

EEG-pohjaisten BCI-laitteiden käyttö kommunikoinnin apuvälineenä

Henna Mukkala

Tulevaisuuden teknologioiden laitos
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Turun yliopisto

PRO GRADU

Turku 2017

Turun yliopiston laatuvarmistuksen mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

The originality of this thesis has been checked in accordance with the University of Turku quality assurance system using the Turnitin OriginalityCheck service.

TURUN YLIOPISTO
Tulevaisuuden teknologioiden laitos

MUKKALA, HENNA: EEG-pohjaisten BCI-laitteiden käyttö kommunikoinnin
apuvälineenä

Pro Gradu, 53 s., 2 liites.
Tietojenkäsittelytiede
Syyskuu 2017

Aivojen vaurio tai sairaus voi aiheuttaa vaikeuksia kommunikoinnissa niin, ettei kommunikointi perinteisellä tavalla eli puheella enää onnistu. Vaurion tai sairauden seurauksena puhekykynsä menettäneet henkilöt käyttävät puhetta korvaavia kommunikointikeinoja, joita perinteisesti ovat olleet erilaiset manuaaliset kommunikointikansiot ja -kommunikointitaulut. Nämä perinteiset menetelmät kuitenkin vaativat usein käyttäjää kommunikoidaan avustajan avulla. Teknologian kehittyminen mahdollistaa toimintakykynsä menettäneelle henkilölle itsenäisemmän kommunikoinnin.

EEG-pohjaiset ohjausmenetelmät ovat eräs tulevaisuuden kommunikoinnin apuvälineiden kehityssuunnista. Sellaisia laitteita, joita ohjataan aivoista tulevien signaalien avulla, kutsutaan BCI-laitteiksi. Tämän tutkielman tutkimuskysymyksenä oli selvittää, onko nykyisellä teknologialla mahdollista toteuttaa toimivia EEG-pohjaisia BCI-laitteita hyödyntäviä sovelluksia kuluttajilla suunnitelluilla BCI-laiteilla. Tässä tutkielmassa selvitetään EEG-pohjaisten BCI-laitteiden soveltuvuutta kommunikoinnin apuvälineiden ohjaamiseen BCIController-ohjelman avulla. BCIController tulkitsee käyttäjän aivosähkötoiminnasta keskittymistason ja liikuttaa sen perusteella ruudulla näkyvää pistettä. Järjestelmän toimivuutta testattiin koehenkilöiden avulla.

Tehdyssä tutkimuksessa EEG-pannan avulla saatiin lupaavia tuloksia. Se saattaisi soveltua tulevaisuudessa kommunikoinnin apuvälineeksi, kunhan sen käytössä ilmeneviä ongelmia saadaan ensin ratkottua. Ongelmia olivat muun muassa sensorien lukutarkkuuden ongelmat sekä vaadittavan keskittymistason ylläpitämisen haasteellisuus. Kommunikoinnin apuvälineeksi soveltamiseksi vaaditaan niin käyttäjäkokemuksien huomioon ottamista kuin myös moniammatillista yhteistyötä IT-asiantuntijoiden ja toimintakykyä kuntouttavien asiantuntijoiden välillä.

Asiasanat: BCI-laite, EEG-pohjainen sovellus, kommunikoinnin apuväline, Muse

Brain damage or illness can cause difficulties in communication so that communication in the traditional way with speech is no longer possible. Because of an injury or an illness, people who have lost their ability to communicate with speech can use substitute methods that have traditionally been, for example, manual communication folders and communication tables. However, these traditional methods often require the user to communicate with aid of an assistant. Progress in the development of technology makes it possible for a person who has lost his / her ability to communicate by himself/herself to have more independent communication methods.

EEG-based control methods are one of the development directions for future communication tools. Devices controlled by brain signals are called BCI devices. One of the research questions in this thesis was to find out whether the current technology is usable for implementing functional EEG-based BCI devices using consumer-designed BCI devices. The performance of EEG-based BCI devices for controlling communication tools were tested with the BCIController program. The BCIController interprets the user's level of concentration on the brain power and moves the cursor visible on the screen. The functionality of the system was tested with test subjects.

In the study, the EEG device yielded promising results. It might be suitable for future use as a means of communication, if the problems encountered in using it can be resolved first. Problems were, among other things, the problems of sensors' readability and the challenge of maintaining the required concentration level. To be able to use it as a communication tool, it is necessary to consider user experience as well as to multi-professional collaboration between IT experts and rehabilitation experts.

Keywords: BCI-device, EEG-based application, communication aid, Muse

Sisällysluettelo

| | |
|---|----|
| 1 Johdanto..... | 1 |
| 2 Hermosto..... | 5 |
| 2.1 Hermoston rakenne ja toiminta..... | 5 |
| 2.1.1 Hermokudos..... | 6 |
| 2.1.2 Keskushermosto..... | 8 |
| 2.1.3 Ääreishermosto..... | 9 |
| 2.2 Aivojen rakenne ja toiminta..... | 11 |
| 2.2.1 Aivojen verenkierto..... | 11 |
| 2.2.2 Aivojen alueet | 12 |
| 2.3 Aivovauriot ja niiden aiheuttamat kommunikoinnin vaikeudet..... | 15 |
| 2.3.1 Aivoverenkiertohäiriöt ja muut aivovauriot | 15 |
| 2.3.2 Kommunikoinnin häiriöt | 16 |
| 2.4 Aivosähkökäyrän aaltomuodot..... | 17 |
| 3 Kuvantamismenetelmät ja markkinoilla olevat kuluttajille suunnatut EEG-pohjaiset BCI-laitteet | 19 |
| 3.1 Aivojen kuvantamismenetelmät | 19 |
| 3.2 Kuluttajakäyttöön suunnitellut EEG-pohjaiset BCI-laitteet | 22 |
| 3.2.1 MindWave..... | 23 |
| 3.2.2 Emotiv Epoc ja Emotic Insight..... | 24 |
| 3.2.3 OpenBCI | 25 |
| 3.2.4 Aurora Dreamband | 26 |
| 3.2.5 Muse..... | 27 |
| 3.2 Laitteiden vertailu | 28 |
| | 0 |

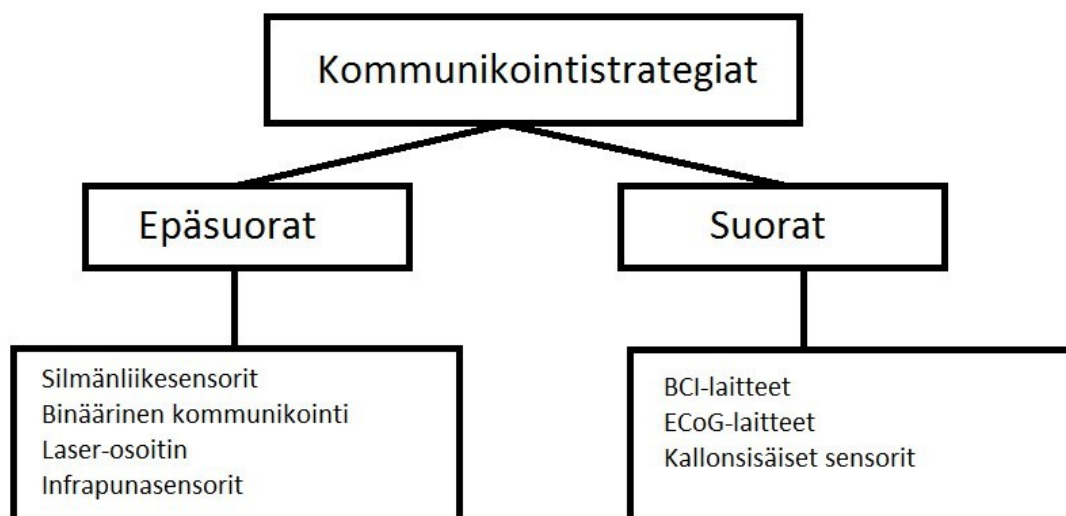
| | |
|---|----|
| 3.3 BCI-laitteiden sovellutukset | 30 |
| 4 EEG-pohjaisen BCI-laitteen käyttäminen tietokoneen ohjaamiseen..... | 32 |
| 4.1 Valitut teknologiat..... | 32 |
| 4.2 Toimintalogiikka | 33 |
| 4.3 Algoritmit | 37 |
| 4.4 Tutkimuksen eteneminen | 39 |
| 5 Tulokset | 42 |
| 6 Pohdinta | 46 |
| Lähdeluettelo | 49 |
| Liitteet | |

1 Johdanto

Aivot ovat monimutkainen kokonaisuus. Aivojen vaurio voi aiheuttaa vaikeuksia kommunikoinnissa niin, ettei kommunikointi perinteisellä tavalla eli puheella enää onnistu. Vaurioiden lisäksi on olemassa sairauksia, jotka aiheuttavat kommunikoinnin heikkenemistä. Tällaisia sairauksia ovat esimerkiksi neuromuskulaarisairaudet, jotka vaikuttavat lihasten toimintaan joko suoraan tai epäsuorasti vaikuttamalla lihaksia ohjaaviin hermoihin. Vaurion tai sairauden seurauksena puhekykynsä menettäneet henkilöt voivat hyötyä puhetta tukevista tai korvaavista kommunikointikeinoista.

Perinteisesti tällaisia keinoja ovat olleet erilaiset manuaaliset kommunikointikansiot ja -kommunikointitaulut. Näiden käyttö on kuitenkin vaatinut käyttäjältä joko itse halutun kuvan tai merkin osoittamista tai avustajan avulla kertomista. Osoittamisessa haasteena on se, että osoittaminen ei välttämättä ole mahdollista esimerkiksi raajoista halvaantuneella henkilöllä. Jos taas osoittaminen tapahtuu silmillä, kommunikointi vaatii keskustelukumppanilta erityistä tarkkaavaisuutta. Avustajan avulla kommunikointiin puolestaan tarvitaan avustajan läsnäoloa, jolloin kommunikointi itsenäisesti on haastavaa. Vaikka perinteisissä puhetta tukevissa ja korvaavissa kommunikointikeinoissa on myös etunsa, teknologian kehittyminen on tuonut uusia mahdollisuuksia myös kommunikointiin. Tietokoneiden avulla pystytään mahdollistamaan käyttäjille monipuolisempi, laajempi sekä itsenäisempi kommunikointi verrattuna perinteisiin menetelmiin.

Viimeisten vuosikymmenien aikana vakavasti halvaantuneille on kehitetty suuri määrä erilaisia epäsuoria ja suoria kommunikointia korvaavia ja avustavia menetelmiä ja apuvälineitä (kuva 1). Yksinkertaisimmillaan ne ovat mahdollistaneet epäsuoran kommunikoinnin esimerkiksi binäärisen kommunikoinnin kautta antaen potilaalle mahdollisuuden vastata ”kyllä” ja ”ei”. Tällainen kommunikointitapa voidaan toteuttaa esimerkiksi siten, että yksi silmienräpäytys on ”kyllä” ja kaksi ”ei”.



Kuva 1: Vakavissa halvaustapauksissa käytettävät kommunikointistrategiat voidaan jakaa epäsuoriin ja suoriin kommunikointistrategioihin.

Koska binäärinen kommunikointi vaatii, että toinen henkilö kysyy kysymyksiä, aakkosiin perustuvat menetelmät kehitettiin. Aakkosiin perustuvat menetelmät hyödyntävät yleensä aakkostaulua ja esimerkiksi silmänliikkeitä seuraavaa laitetta. Tällaisten menetelmien heikkoutena on se, että ne ovat hitaita ja tekevät kommunikoinnista raskasta.

Suorien kommunikointistrategioiden avulla kommunikointi on luonnollisempaa ja tehokkaampaa eikä vaadi toimiakseen avustajaa. Aikaisemmin suorat kommunikointistrategiat ovat tyypillisesti vaatineet invasiivisten sensorien käyttöä, mikä on tehnyt niistä epäkäytännöllisiä ja kalliita. Nykyisten menetelmien ja halventuneiden teknologioiden avulla käskyjä voidaan siirtää myös kehon ulkopuolisten laitteiden avulla. Esimerkiksi suun ja kielen liikkeitä tarkkailemalla tietokone pystyy muodostamaan puhetta. Menetelmä on tarkoitettu esimerkiksi kommunikointiin meluisilla alueilla, jossa puheen avulla kommunikointi olisi muuten mahdotonta. Järjestelmä tulkitsee, mitä käyttäjä haluaa sanoa ja siirtää sen toisen henkilön korvassa sijaitsevaan laitteeseen. Tämä ei kuitenkaan ole tyypillisesti mahdollista erittäin vakavissa halvaustilanteissa, jolloin aivojen sähkötoimintaan perustuvat menetelmät ovat parempia.

Erityisesti aivojen sähkötoimintaan perustuvat BCI-laitteet ovat olleet viime vuosina laajalti tutkimusten kohteena (Leuthardt, Schalk, Roland, Rouse & Moran, 2009). BCI-laitteella (Brain-Computer Interface) tarkoitetaan järjestelmää, joka mahdollistaa tietokoneiden ja muiden ulkoisten laitteiden käytön aivojen aktiivisuuden avulla (Gerven ym., 2009). BCI-laitteita on tutkittu 1970-luvulta saakka (Karydis, Aguiar, Foster & Mershin, 2015). BCI-laitteiden avulla esimerkiksi ihmiset, jotka sairastavat neuromuskulaarisairauksia, pystyvät tietokoneen avulla suorittamaan monenlaisia tehtäviä, kuten ohjaamaan tietokonetta, ja käyttämään kommunikointiapuvälineitä, kuten puhesyntetisaattoria (Leeb, Sagha, Chavarriaga & Millan, 2011). Lisäksi BCI-laitteiden avulla pystytään tutkimaan aivojen toimintaa sekä kartoittamaan sitä. Kyky käyttää tietokonetta on nykyään tärkeää, koska tietokoneiden avulla hallitaan lähes kaikkea normaaliin elämään liittyviä laitteita. Esimerkiksi pyörätuolit, hissit, ovet, valot ja televisiot toimivat nykyään tietokoneiden avulla.

BCI-laitteiden avulla on pyritty mahdollistamaan suora vuorovaikutus ihmisen ja esimerkiksi tietokoneen välillä ilman nykyisin tarvittuja oheislaitteita kuten hiirtä ja näppäimistöä, jotka vaativat fyysistä vuorovaikutusta toimiakseen (Wolpaw, Birbaumer, McFarlanda, Pfurtscheller & Vaughana, 2002). Aivojen sähkötoimintaan perustuvat BCI-laitteet soveltuvat tähän tarkoitukseen erityisen hyvin, koska sähkösignaalit liikkuvat nopeasti, niitä on helppo havaita ja ne kuvastavat aivoissa tapahtuvia kognitiivisia prosesseja. Kommunikointi on tärkeä osa ihmisen jokapäiväistä elämää. BCI-laitteiden avulla esimerkiksi halvaantuneen on mahdollista kommunikoida kirjoittamalla, vaikka kädet olisivatkin halvaantuneet.

Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkastellaan EEG-pohjaisten BCI-laitteiden soveltuvuutta kommunikoinnin apuvälineeksi BCIController-ohjelman avulla. Tutkielman tutkimuskysymyksenä oli selvittää, onko nykyisellä teknologialla mahdollista toteuttaa toimivia EEG-pohjaisia BCI-laitteita hyödyntäviä sovelluksia kuluttajilla suunnitelluilla BCI-laiteilla. BCIController tulkitsee käyttäjän aivosähkötoiminnasta keskittymistason ja liikuttaa sen perusteella ruudulla näkyvää pistettä. Järjestelmän toimivuutta testattiin koehenkilöiden avulla. Koehenkilöiksi valittiin sellaisia henkilöitä, jotka eivät olleet

aikaisemmin käyttäneet BCI-laitteita. Luvussa 2 käsitellään taustatietona hermoston rakennetta ja sen toimintaa sekä aivovaurioita ja niiden aiheuttamia vaikeuksia kommunikoinnissa. Normaalin hermoston toiminnan ja rakenteen ymmärtäminen ovat tärkeitä, jotta häiriöitä voidaan ymmärtää paremmin ja siten kehittää parempia BCI-laitteita. Lopuksi käydään läpi aivosähkökäyrän aaltomuodot, jotka ovat aivoissa tapahtuvan hermotoiminnan mitattavissa oleva ilmenemismuoto ja siten oleellisia EEG-käyrää tulkittaessa. Kolmannessa luvussa esitellään aivojen kuvantamismenetelmiä, joita voidaan hyödyntää BCI-laitteita suunniteltaessa. Lisäksi esitellään ja vertaillaan kuluttajille suunnattuja EEG-pohjaisia BCI-laitteita sekä käydään läpi BCI-laitteiden sovellutuksia. Neljännessä luvussa esitellään tutkielmassa käytetty sovellus sekä tutkimuksen eteneminen. Viidennessä luvussa analysoidaan tutkimuksessa saatuja tuloksia ja viimeisessä luvussa pohditaan tulosten merkitystä sekä tuloksiin vaikuttaneita asioita.

2 Hermosto

Tässä luvussa käsitellään hermoston rakennetta ja toimintaa. Painopisteenä ovat kommunikointiin tarvittavat aivoalueet ja niiden toiminta, koska ne ovat BCI-laitteiden ja nykyaikaisten kommunikoinnin apuvälineiden kannalta oleellisia. Tarkemmin käsitellään aivojen rakenteista ja toiminnasta aivojen alueet sekä aivojen verenkierto. Lisäksi käydään läpi erilaisia aivovaurioita, jotka aiheuttavat aivojen toimintahäiriöitä, sekä niistä aiheutuvia häiriöitä. Lopuksi käydään läpi aivosähkökäyrän aaltomuodot.

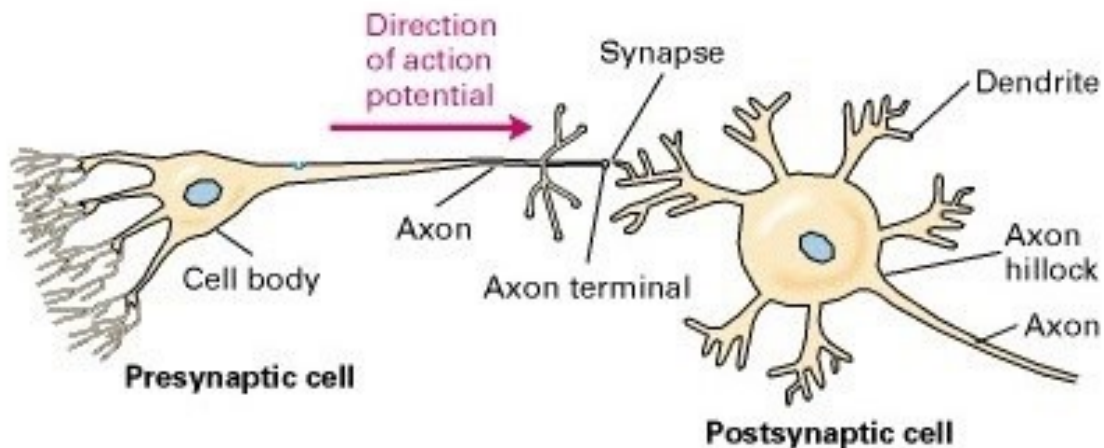
2.1 Hermoston rakenne ja toiminta

Hermosto on ihmisen tärkein elintoimintoja säätelevä ja koordinoiva järjestelmä (Leppäluoto ym., 2013). Sen tehtävänä on ottaa vastaan informaatiota aistinreseptorien avulla ympäristöstä sekä elimistön sisäisestä tilasta. Lisäksi hermosto muokkaa ja kuljettaa vastaanottamaansa tietoa ja ohjaa sen perusteella elimistön toimintaa.

Hermosto voidaan jakaa toiminnaltaan ja rakenteeltaan eri tavalla (Leppäluoto ym., 2013). Toiminnaltaan hermosto voidaan jakaa kahteen osaan: somaattiseen hermostoon, joka hermottaa tahdonalaisia lihaksia, ja autonomiseen hermostoon, joka säätelee tahdosta riippumattomia toimintoja, kuten sydämen sykettä. Autonominen hermosto voidaan jakaa vielä kahteen eri osaan: sympaattiseen ja parasympaattiseen hermostoon. Sympaattinen hermosto aktivoituu stressitilanteessa ja fyysisessä rasituksessa, kun taas parasympaattinen hermosto aktivoituu levossa. Hermosto voidaan jakaa myös rakenteen perusteella kahteen osaan: keskushermostoon eli sentraaliseen hermostoon ja ääreishermostoon eli perifeeriseen hermostoon. Keskushermoston muodostavat aivot ja selkäydin. Ääreishermostoon kuuluvat selkäydinhermot, aivohermot ja autonomisen hermoston perifeeriset osat.

2.1.1 Hermokudos

Hermosto koostuu hermokudoksesta ja hermokudos kahdenlaisista soluista: hermotukisolusta eli gliasolusta ja hermosolusta eli neuroneista (Hiltunen ym., 2010). Gliasoluja eli hermotukisoluja on paljon enemmän kuin hermosoluja. Niiden tehtävänä on muun muassa pitää huolta hermosolujen kemiallisesta tasapainosta, muodostaa veri-aivoeste sekä toimia eristeenä aksonien ympärillä. Hermosolu puolestaan on hermoston toimintayksikkö ja se koostuu dendriiteistä, soomasta, aksonista ja synapseista (kuva 2). Dendriitit eli tuojahaarakkeet vastaanottavat hermoimpulsseja ja kuljettavat ne neuronin soomaan eli solukeskukseen. Soomassa sijaitsee neuronin toimintaa säätelevä tuma. Soomasta lähtee yksi aksoni eli viejähaarakke, jonka tehtävä on kuljettaa hermoimpulssia eteenpäin. Aksoni haarautuu loppuosasta synapseiksi, joista hermoimpulssi siirtyy toiseen hermosoluun kemiallisten välittäjäaineiden avulla. Hermosolut eivät ole kiinni toisissaan, vaan niiden välissä on synapsirako. Kahden hermosolun välistä liitoskohtaa kutsutaan synapsiksi. Jos hermosolu liittyy lihassoluun, kutsutaan niiden yhtymäkohtaa hermo-lihassoluliitokseksi.



Kuva 2: Hermosolun toiminta perustuu sähköimpulsseihin jotka kulkevat hermosolusta hermosoluun tuoja- ja viejähaarakkeiden sekä niiden väliin jäävän synapsin avulla (Lodish & Zipursky, 2001).

Hermoston toiminta perustuu hermosolussa tapahtuviin sähköisiin muutoksiin (Leppäluoto ym., 2013). Sähköiset muutokset etenevät hermoimpulssina hermosolun aksonia pitkin ja siirtyvät solusta toiseen synapseissa kemiallisten välittäjäaineiden avulla. Hermosolun toiminta perustuu solukalvolla oleviin ionipumppuihin ja muihin soluelimiin, jotka pumppaavat toisia ioneja ulos solusta ja toisia ioneja soluun sisään. Nämä ionipumput kasvattavat jännite-eroa solukalvon eri puolilla siten, että potentiaali kasvaa lopulta riittävän suureksi ja aiheuttaa sen purkautumisen hermoimpulssina, joka kulkee soomasta kohti aksonin synapsipäätteitä.

Keskushermostosta lähtevä käsky välittyy neuronista toiseen synapsien kautta (Leppäluoto ym., 2013). Synapsipäätteestä vapautuu synapsirakoon välittäjäaineita. Vastaanottavan neuronin dendriitin reseptorit tunnistavat välittäjäaineet, jotka sitoutuvat reseptoreihin ja aiheuttavat vasteen. Reseptorit välittävät tiedon solun sisään, jonka seurauksena ionikanavien toiminta muuttuu. Kun informaatio on kulkenut hermosolun läpi, se palautuu lepotentiaaliin, kunnes tulee uusi impulssi.

Hermosolujen välittämä tieto kulkee hermosolua pitkin hermoimpulssina ja välittyy synapseissa solusta toiseen välittäjäaineiden avulla (Hiltunen ym., 2010). Sen perusteella, mihin tieto kulkee, hermosyyt eli aksonit voidaan jakaa vieviin eli efferentteihin ja tuoviin eli afferentteihin hermosyihin. Motoriset hermosyyt eli liikehermosyyt vievät tietoa keskushermostosta pois päin ja saavat aikaan esimerkiksi poikkijuovaisen lihaksen supistumisen. Sensoriset hermosyyt eli aistinhermosyyt taas tuovat tietoa ääreishermostosta keskushermostoon päin.

Somaattisen hermoston muodostavat efferentit eli vievät hermosäikeet, jotka kuljettavat käskyjä aivoista tahdonalaisesti toimiviin lihaksiin sekä afferentit eli tuovat hermosäikeet, jotka kuljettavat tietoa lihaksista ja tuntoelimistä aivoihin (Hiltunen ym., 2010). Autonomisen hermoston muodostavat tahdosta riippumattomat efferentit hermot, jotka eivät kuulu somaattiseen hermoston.

2.1.2 Keskushermosto

Keskushermosto saa aisti-informaatiota ääreishermostosta (Leppäluoto ym., 2013). Myös keskushermoston lähettämät käskyt lihaksille ja umpieritysrauhasille välittyvät ääreishermostoa pitkin (Hiltunen ym., 2010). Keskushermoston muodostavat aivot (*encephalon*) ja selkäydin (*medulla spinalis*). Aivot koostuvat isoivoista (*cerebrum*), pikkuaivoista (*cerebellum*) ja aivorungosta (*truncus cerebri*).

Isoaivot muodostuvat vasemmasta ja oikeasta aivopuoliskosta eli hemisfääristä, joita yhdistää toisiinsa poikittaisista hermoradoista muodostunut aivokurkiainen (*corpus callosum*) (Hiltunen ym., 2010). Molempien aivopuoliskojen sisällä on aivokammio eli sivukammio. Aivopuoliskojen pintakerros eli isoivokuori muodostuu harmaasta aineesta, jossa on pääosin neuronien soomaosia. Harmaan aineen alla on valkeaa ainetta, jonka muodostaa myeliinitupelliset aksonit.

Pikkuaivot muodostuvat kahdesta pikkuaivopuoliskosta ja parittomasta pikkuaivomadosta (*vermis*) (Hiltunen ym., 2010). Pikkuaivojen tärkein tehtävä on osallistua lihasliikkeiden säätelyyn ja liikesarjojen muistamiseen. Pikkuaivot liittyvät aivorungon takaosaan pikkuaivovarsien (*pedunculus cerebelli*) välityksellä.

Väliaivot (*diencephalon*) sijaitsevat kolmannen aivokammion ympärillä (Hiltunen ym., 2010). Väliaivojen yläosan muodostaa talamus (*thalamus*), joka toimii tärkeänä aistiratojen väliasemana, ja alaosan hypothalamus (*hypothalamus*), joka osallistuu monien elimistön autonomisten toimintojen säätelyyn. Hypotalamuksen alaosaan on kiinnittynyt aivolisäke eli hypofyyysi, joka ohjaa yhdessä hypotalamuksen kanssa muiden umpieritteisten rauhasen toimintaa. Väliaivot liittyvät isoivot aivorunkoon (Leppäluoto ym., 2013). Aivorunko sisältää motorisia ja sensorisia hermoratoja sekä yhteyksiä aivojen eri osien välillä. Lisäksi se yhdistää aivot selkäyttimeen.

Aivorungon muodostavat keskiaivot (*mesencephalon*), aivosilta (*pons*) ja ydinjatke (*medulla oblongata*). Keskiaivot sijaitsevat kolmannesta aivokammioista alaspäin jatkuvat aivonesteviemäriin ympärillä (Hiltunen ym., 2010). Aivosillan ja ydinjatkeen kohdalla aivonesteviemäri laajenee neljänneksi aivokammioiksi. Ydinjatkeessa on

alueita, jotka säätelevät erilaisia elintärkeitä automaattisia toimintoja, kuten verenpainetta ja hengitystä (Hiltunen ym., 2010). Väliaivoista ydinjatkeeseen ulottuva harmaan ja valkean aineen muodostama aivoverkosto (*formatio reticularis*) säätelee vireystilaa ja unirytmia.

Selkäydin sijaitsee selkärangan kanavassa, jossa on selkäytimen lisäksi muun muassa verisuonia, hermoja, selkäydinkalvoja ja aivo-selkäydinnestettä (Leppäluoto ym., 2013). Selkäytimen tehtävänä on ohjata aivoista saapuvia hermoimpulsseja kohti esimerkiksi lihaksia sekä ohjata elimistöä ja sen ulkopuolelta tulevaa informaatiota aivoihin (Hiltunen ym., 2010). Selkäydin kulkee selkärangassa, jonka jokaisen nikamaparin välistä lähtee hermoja eri puolille kehoa.

Aivo- ja selkäydinkalvot ovat sidekudoskalvoja, jotka ympäröivät keskushermostoa (Soinila, 2006). Niiden tehtävä on suojata hermokudosta liikkeiden ja törmäyksien aiheuttamilta vaurioilta. Kovakalvo (*dura mater*) on kalvoista uloin. Sen ja luukalvon väliin jäävää tilaa kutsutaan epiduraalitalaksi. Kovakalvon alla on lukinkalvo (*arachnoidea mater*). Kovakalvon ja lukinkalvon välistä tilaa kutsutaan subduraalitalaksi. Alimmaisena kalvona on pehmeäkalvo (*pia mater*), joka peittää aivojen ja selkäytimen pintaa mukaillen niiden pinnan rakenteita. Lukinkalvon ja pehmeäkalvon väliin jäävää aivo-selkäydinnesteen täyttämää tilaa kutsutaan lukinkalvononteloksi eli subaraknoidaalitalaksi.

2.1.3 Ääreishermosto

Ääreishermosto koostuu niistä hermoista, jotka lähtevät keskushermostosta ja hermottavat muun muassa kaikkia raajoja (Leppäluoto ym., 2013). Keskushermostosta lähtevät aivohermot, jotka hermottavat pään eri lihaksia ja aisteja, sekä selkäydinhermot, jotka hermottavat kaikkia muita kehon lihaksia ja aisteja. Ääreishermostoon kuuluvia aivohermoja (*nervus cranialis*) on 12 paria (Leppäluoto ym., 2013). Kaikki muut aivohermot, paitsi hajuhermo, kulkevat talamukseen. Ensimmäinen ja toinen aivohermo lähtevät iso- ja kraniaalisen aivoverkoston kautta ja loput aivorungosta.

Ensimmäinen aivohermo (I) on hajusermo (*nervus olfactorius*), joka tuo hajuaistimuksia nenästä ja se päättyy isoaivojen hajukäämiin. Toinen aivohermo (II) on näköhermo (*nervus opticus*) ja se lähtee silmänpohjasta. Kolmas aivohermo (III) on silmän liikehermo (*nervus oculomotorius*), joka on silmän yläluomen kohottajalihaksen ja neljän silmälihaksen somaattinen hermo. Kolmannen aivohermon lisäksi silmää hermottaa neljäs ja kuudes aivohermo. Neljäs aivohermo (IV) on telahermo (*nervus trochlearis*), jonka tehtävä on hermottaa silmää ulos- ja alaspäin kääntävää silmälihasta. Kuudes aivohermo (VI) on loitontajahermo (*nervus abducens*), joka myös osallistuu silmän lihasten hermottamiseen hermottamalla yhtä silmänliikuttajalihasta.

Viides aivohermo (V) on kolmoisherma (*nervus trigeminus*), joka on kasvojen tuntohermo ja puremalihasten liikehermo. Se jakautuu kolmeen haaraan: silmähermoon (*nervus ophthalmicus*), yläleukahermoon (*nervus maxillaris*) ja alaleukahermo (*nervus mandibularis*). Seitsemäs aivohermo (VII) on kasvohermo (*nervus facialis*), joka on kasvolihasten liikehermo. Lisäksi se on kielen etuosan makusermo. Kahdeksas aivohermo (VIII) on kuulo-tasapainohermo (*nervus vestibulocochlearis*), jonka tehtävänä on tuoda kuulo-, liike- ja asentoimpulsseja sisäkorvasta.

Yhdeksäs aivohermo (IX) on kieli-kitahermo (*nervus glossopharyngeus*), joka on nielun liike- ja tuntohermo sekä kielen takaosan makusermo. Kymmenes aivohermo (X) on kiertäjähermo (*nervus vagus*), joka on rinta- ja vatsaontelon elimien parasympaattinen hermo. Vagusermo haarautuu palaavaksi kurkunpäähermoksi (*nervus laryngeus recurrens*), joka hermottaa suurinta osaa kurkunpään lihaksista. Yhdestoista aivohermo (XI) on lisähermo (*nervus accessorius*) ja se hermottaa kahta kaulalihasta: päänkiertäjälihasta ja epäkäslihasta. Kahdestoista aivohermo (XII) on kielen liikehermo (*nervus hypoglossus*) ja se hermottaa kielen lihaksia.

Aivohermojen lisäksi ääreishermostoon kuuluu selkäydinhermot, joita on 31 paria (Leppäluoto ym., 2013). Selkärangan nikamien alta lähtee aina yksi pari selkäydinhermoja, mutta ensimmäinen selkäydinhermopari lähtee heti kallon alta. Selkäydinhermot lähtevät selkäytimestä kahdella juurella, jotka sitten yhtyvät tullessaan

ulos nikamien välistä. Takajuuressa (*radix dorsalis*) on tuntohermosyitä ja etujuuressa (*radix ventralis*) on liikehermosyitä. Eri selkäydinhermojen etuhaaroista muodostuu hermopunoksia, joista lähtevät varsinaiset ääreishermit.

Kaulahermoja on kahdeksan paria (C1-C8), rintahermoja kaksitoista paria (T1-T12), lannehermoja viisi paria (L1-L5), ristihermoja viisi paria (S1-S5) ja häntähermoja yksi pari (CO). Neljä ylintä kaulahermon etuhaaraa muodostavat kaulapunoksen, josta lähtee muun muassa palleahermo. Neljän alimman kaulahermon ja ylimmän rintahermon etuhaarat muodostavat hartiapunoksen, josta lähtevät hermot hermottavat yläraajoja. Yläraajan ihon ja lihasten hermotuksesta vastaavat kainalohermo, värttinähermo, keskihermo, kyynärhermo ja lihas-ihohermo. Lanne-ristipunoksen muodostavat lanne- ja ristihermojen etuhaarat. Se hermottaa alaraajoja ja siitä haarautuvat hermot ovat lonkkahermo ja reisihermo. Lonkkahermo haarautuu vielä säärihermoksi ja yhteiseksi pohjehermoksi.

2.2 Aivojen rakenne ja toiminta

Aivojen tehtävä on ottaa vastaan, varastoida, käsitellä ja tuottaa informaatiota (Leppäluoto ym., 2013). Ne kelluvat aivo-selkäydinnesteessä, joka suojaa aivoja tärähdyksiltä ja toimii kemiallisena puskurina ja siten aivojen sisätilan olosuhteiden vakioijana (Soinila, 2006). Aivot ovat yhteydessä ulkomaailmaan aistinsolujen sekä lihaksia ohjaavien solujen kautta.

2.2.1 Aivojen verenkierto

Aivot saavat verensä kahden sisemmän kaulavaltimon eli päänvaltimon sisemmän (*arteria carotis interna*) ja kahden nikamavaltimon (*arteria vertebralis*) kautta (Soinila, 2006). Nikamavaltimot yhtyvät aivojen pohjaosissa keskellä aivorungon alla parittomaksi kallonpohjavaltimoksi (*arteria basilaris*). Nikamavaltimoista ja kallonpohjavaltimoista lähtevät pienemmät haarat tuovat verta aivorungon ja pikkuaivojen alueelle. Sisemmät päänvaltimot yhdistyvät Willisin valtimokehäksi (*circulus arteriosus cerebri, circulus Willisi*), joka kiertää näköhermoristin ympäri ja johon kallonpohjavaltimo yhtyy.

Valtimokehästä haarautuu parilliset etummainen, keskimmäinen ja takimmainen aivovaltimo (*arteria cerebri anterior, media ja posterior*), jotka tuovat verta omille aivoalueilleen (Soinila, 2006). Jos aivojen jollekin alueelle tuova valtimo tukkeutuu, valtimokehä ohjaa verenkiertoa tukkeutuneen valtimon suonitusalueelle. Aivoista palaava laskimoveri kerääntyy kovakalvon lehtien välissä sijaitseviin veriviemäriin. Laskimoiden veri palaa yläonttolaskimon kautta sydämeen.

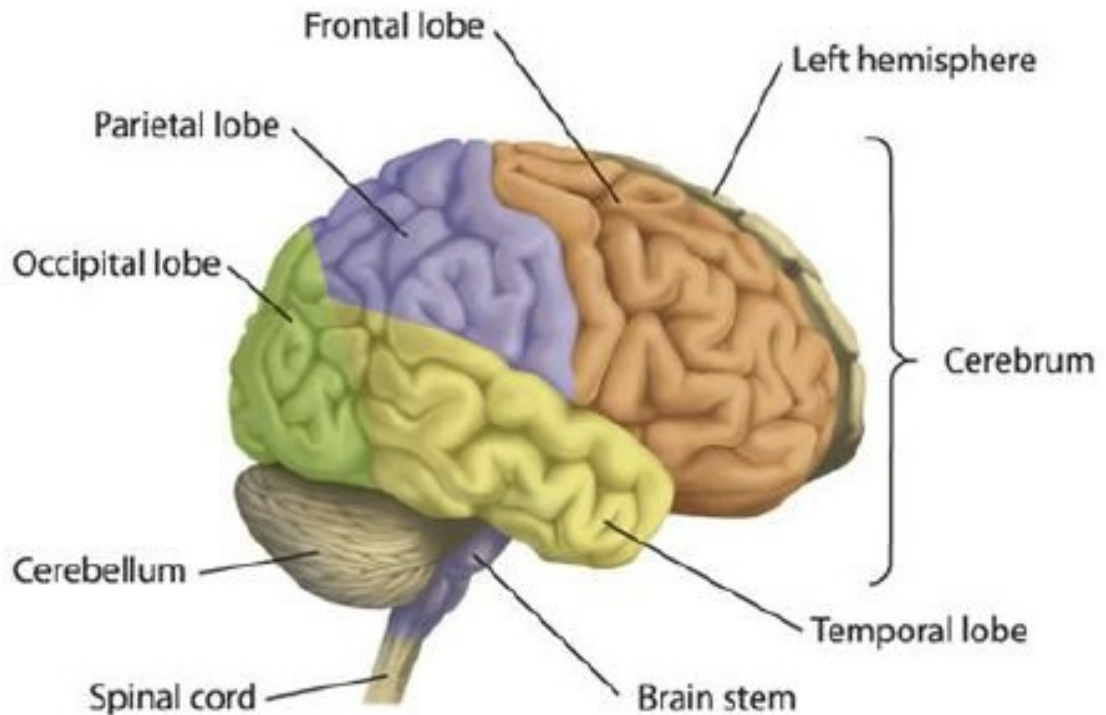
2.2.2 Aivojen alueet

Aivot voidaan jakaa rakenteensa ja toimintansa perusteella kahteen aivopuoliskoon eli hemisfääriin, jotka molemmat jaetaan neljään aivolohkoon. Toiminnan perusteella jako kuitenkin on hyvin karkeajakoinen. Vaikka aivojen eri osilla on havaittavissa erilaisia toiminta-alueita, ne eivät ole kuitenkaan tarkkarajaisia. Aivot toimivat kokonaisuutena eikä voida yksiselitteisesti erotella vain tiettyä toimintoa yhteen tiettyyn alueeseen, sillä aktivaatiota tapahtuu yleensä useassa osassa aivoja. Selkeyden vuoksi käytetään kuitenkin tätä karkeajakoista tapaa.

Aivojen hemisfäärit eli aivopuoliskot toimivat kokonaisuutena, mutta aivopuoliskojen välillä on havaittavissa myös työnjakoa. Vasemmassa aivopuoliskossa sijaitsee muun muassa puheen tuottamiseen liittyvät alueet sekä analyyttiset toiminnot (Leppäluoto ym., 2013). Oikea aivopuolisko taas vastaa esimerkiksi aikaan, paikkaan ja tilasuhteiden hallintaan liittyvien asioiden ja esineiden tunnistamisesta sekä erilaisten äänien tunnistamisesta, kuten linnunlaulun tai hyräilyksen sävelen (Leppäluoto ym., 2013). Vasen aivopuolisko säätelee kehon oikean puolen toimintoja ja oikea aivopuolisko vastaavasti kehon vasemman puolen toimintoja. Aivopuoliskoja yhdistää aivokurkiainen (*corpus callosum*).

Isoaivot jaetaan sen pinnan rakenteiden perusteella neljään parilliseen aivolohkoon (kuva 3): otsalohkoon (*lobus frontalis*), päälaenlohkoon (*lobus parietalis*), ohimolohkoon (*lobus temporalis*) ja takaraivolohkoon (*lobus occipitalis*) (Leppäluoto ym., 2013). Otsalohko eli frontaalilohko muodostuu keskusuurteen (*sulcus centralis*) etupuolella olevasta aivojen osasta. Ohimolohkon eli temporaalilohkon rajaa aivojen sivu-uurre (*sulcus lateralis*). Ohimolohkon mediaalireunaan muodostuu aivokuoren poimu, jonka

sisään jää hippokampus. Takaraivolohko eli okkipitaalilohko on aivojen taaimmaisin osa, jonka rajaa päälaki-takaraivouurre (*sulcus parieto-occipitalis*). Päälakilohko eli parietaalilohko sijaitsee päälalla.



Kuva 3: Aivojen molemmat hemisfäärit voidaan jakaa neljään eri alueeseen, joita ovat temporaalilohko, frontaalilohko, parietaalilohko sekä okkipitaalilohko (Materka & Poryzala, 2013).

Isoaivojen pintaa peittää harmaasta aineesta muodostuva aivokuori eli korteksi (*cortex cerebri*) ja se muodostaa aivojen laajimman kokonaisuuden (Leppäluoto ym., 2013). Sen alapuolella on valkean aineen muodostama subkortikaalinen kerros. Aivokuoren eri alueet ja alueiden osat ovat kytkeytyneet toisiinsa valkean aineen aksonikimppujen eli assosiaatiosyiden välityksellä. Aisteista tulevat eli afferentit viestit välittyvät talamuksen kautta, hajuaistia lukuun ottamatta, motoriset eli efferentit viestit välittyvät aivokuorelta aivorunkoon.

Aivokuoren eri alueet vastaavat erilaisista toiminnoista. Yleensä motoriset alueet sijaitsevat aivokuoren etuosissa ja sensoriset alueet taaempänä aivokuorella (Leppäluoto ym., 2013). Lisäksi aivokuorella on laajoja alueita, joita ei voi luokitella motorisiksi eikä sensorisiksi alueiksi. Niitä kutsutaan assosiativisiksi eli yhdisteleviksi alueiksi. Assosiaatioalueet yhdistelevät tietystä aistista tulevaa tietoa muista aisteista tuleviin tietoihin sekä vertaavat tullutta tietoa muistoihin ja kokemuksiin. Aivokuorella olevaa aluetta, johon aisti-informaatio ensisijaisesti tulee, kutsutaan primaarisiksi aivokuoreksi. Primaarinen alue lähettää signaalit muokattuina läheisille aivokuorialueille eli sekundaarisille alueille.

Otsalohkon alueella sijaitsevat prefrontaalinen alue, premotorinen alue sekä motorinen alue (Leppäluoto ym., 2013). Prefrontaalinen alue liittyy ajatteluun ja visuaalispatiaaliseen (avaruudellinen hahmottaminen) tietoisuuteen sekä persoonallisuuden yleispiirteisiin. Premotorinen alue vastaa aikomuksesta tuottaa liikkeitä ja se ohjaa sekä koordinoi toimintoja. Motorinen alue puolestaan ohjaa lihasten koordinoituja liikkeitä. Lisäksi otsalohkon aivokuorella sijaitsee Brocan alue, joka ohjaa puheen motorista tuottamista.

Ohimolohkossa sijaitsevat primaarinen kuuloalue, auditorinen assosiaatioalue sekä Wernicken alue (Leppäluoto ym., 2013). Primaarisen kuuloalueen tehtävä on käsitellä kuulohieron kautta tulevaa informaatiota. Auditorinen assosiaatioalue yhdistelee kuuloalueen saamia tietoja muistoihin, tunnetiloihin sekä muista aisteista tuleviin tietoihin. Wernicken alue on merkityksellinen puheen ymmärtämisessä.

Päälakilohkossa sijaitsevat somatosensorinen alue sekä sensorinen assosiaatioalue (Leppäluoto ym., 2013). Somatosensorinen alue analysoi ihon, suun ja kielen alueilta tulevia kosketushermosignaaleja, joita ovat muun muassa tunto-, paine-, kipu- ja lämpötila-aistimukset. Sensorinen assosiaatioalue käsittelee yleistä aisti-informaatiota.

Takaraivolohkossa sijaitsevat visuaalinen assosiaatioalue sekä primaarinen näköalue (Leppäluoto ym., 2013). Visuaalinen assosiaatioalue yhdistelee näköalueelta tulevaa tietoa muistiin, tunnetiloihin sekä muihin aisteihin. Primaarinen näköalue puolestaan käsittelee näköhermon kautta tulevaa informaatiota.

2.3 Aivovauriot ja niiden aiheuttamat kommunikoinnin vaikeudet

Normaali aivotoiminta voi häiriintyä jonkin vamman, häiriön tai muun trauman seurauksena. Jotta voidaan ymmärtää aivovaurioiden vaikutuksia, on tärkeää tietää, miten hermosto ja aivot normaalisti toimivat. Tämä on tärkeää, koska se, miten laaja vaurio ja missä kohtaa aivoja tai hermostoa vaurio sijaitsee vaikuttaa siihen, minkälaisia toimintavaikeuksia vaurio aiheuttaa. Esimerkiksi selkäytimen vaurio, aivojen verenkiertohäiriö kallonpohjanvaltimossa tai jonkin aivohermon vaurio vaikuttavat kaikki eri tavalla toimintakykyyn. Osalle ihmisistä vaurion aiheuttama haitta voi olla vähäistä, mutta osalle voi jostain vauriosta aiheutua suurtakin haittaa, esimerkiksi jokapäiväiseen kommunikointiin. Kun ihminen menettää kykynsä kommunikoida puheella, vaihtoehtoisia kommunikointikeinoja on monenlaisia. Lisäksi teknologian kehittyminen on tuonut lisää mahdollisuuksia kommunikointikeinojen kehittämiseen perinteisten vaihtoehtoisten kommunikointikeinojen rinnalle.

2.3.1 Aivoverenkiertohäiriöt ja muut aivovauriot

Aivoverenkiertohäiriö aiheuttaa tilapäisiä toimintahäiriöitä tai pysyviä vaurioita siinä aivojen osassa, jossa aivoverenkiertohäiriö tapahtuu (Kaste ym., 2006). Aivoverenkiertohäiriöitä ovat aivoinfarkti, aivoverenvuoto sekä ohimenevä aivoverenkiertohäiriö. Aivoinfarktissa eli aivoverisuonitukoksessa valtimo tukkeutuu äkillisesti, minkä seurauksena valtimon alueen aivokudos jää ilman verenkiertoa ja happea (Kaste ym., 2006). Aivoverenvuodossa puolestaan aivovaltimo repeää, minkä seurauksena veri vuotaa joko aivoaineeseen (intrakerebraalivuoto) tai lukinkalvon alaiseen tilaan (subaraknoidaalivuoto). Ohimenevän aivoverenkierronhäiriön oireet muistuttavat aivoinfarktia, mutta ne menevät nopeasti ohi toisin kuin aivoinfarktissa tai aivoverenvuodossa. Aivoverenkiertohäiriöstä aiheutuvat vauriot riippuvat vaurioalueen laajuudesta ja sen sijainnista.

Aivoverenkiertohäiriöiden lisäksi aivojen toimintahäiriöitä voivat aiheuttaa esimerkiksi erilaiset aivovammat, aivokasvaimet, aivohalvaus tai aivotulehdus (Kaste ym., 2006). Ne voivat aiheuttaa pysyviä häiriöitä aivojen toiminnassa tai vain hetkellisiä

toimintahäiriöitä. Esimerkiksi aivokasvaimen poistaminen saattaa joissain tapauksissa palauttaa aivojen toiminnan normaaliksi.

Hermoratojen risteämisen vuoksi, oikeanpuoleisessa halvauksessa vaurio on vasemmassa aivopuoliskossa (Kaste ym., 2006). Vasemmanpuolen aivovaurion jälkeen voi olla vaikeaa ymmärtää, mitä yhteyttä näytetyssä kuvassa olevilla esineillä on tai mitä jokin lause tarkoittaa, vaikka kaikki sanat olisivat tuttuja. Vaikeuksia voi olla myös esineiden nimien muistamisessa sekä laskutehtävissä ja loogista päättelyä vaativissa tehtävissä. Oikeaa aivopuoliskoä tarvitaan myös esineiden muodon ja aseman tajuamisessa sekä yleensä ympäristön hallinnassa. Oikean aivopuoliskon vaurio voi vaikeuttaa piirtämistä ja muovaamista mallin mukaan sekä tien löytämistä paikasta toiseen.

2.3.2 Kommunikoinnin häiriöt

Aivojen vaurio saattaa aiheuttaa pysyvän häiriön, joka voi vaikeuttaa puheella kommunikointia. Tällaisia kommunikointia vaikeuttavia häiriöitä ovat muun muassa amyotrofinen lateraaliskleroosi ja Locked-in -oireyhtymä.

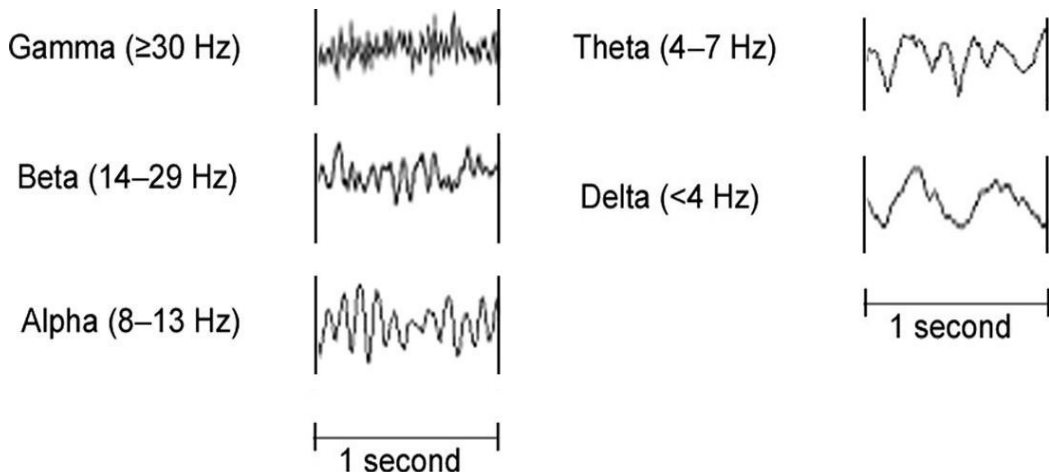
Amyotrofinen lateraaliskleroosi eli ALS on motoneuronisairaus, joka aiheuttaa rappeutumista niissä liikehermosoluissa, jotka ohjaavat tahdonalaisten lihaksien toimintaa (Zarei ym., 2015). ALS on asteittain etenevä sairaus ja se aiheuttaa vaikeuksia muun muassa puhumisessa, nielemisessä, liikkumisessa sekä hengittämisessä.

Locked-in -oireyhtymällä tarkoitetaan tilaa, jossa ajattelu toimii normaalisti, mutta lihakset ovat halvaantuneet niin kasvoista kuin muualta raajoista eikä puhuminen tai nieleminen onnistu (Chaudhary, Xia, Silvoni, Cohen & Birbaumer, 2017). Silmän liikkeet ovat kuitenkin tavallisesti säilyneet. Locked-in aiheutuu yleensä aivoverenkierronhäiriöstä aivojen takaosissa. Muita syitä ovat laajat aivorunkovauriot, pikkuaivoalueen vauriot, kasvaimet sekä virusperäiset sairaudet. Locked-in -oireyhtymään sairastuneet potilaat eivät pysty ilmaisemaan itseään, joten kommunikointi heidän kanssaan on erittäin vaikeaa. Koska silmän liikkeet ovat yleensä säilyneet, kommunikointi perustuu yleensä silmien liikkeeseen ja niillä tehtyihin

valintoihin. Nykyään käytetään myös erilaisia tietokoneavusteisia kommunikointimenetelmiä.

2.4 Aivosähkökäyrän aaltomuodot

Hermosolujen sähköreaktiot muodostavat pohjan EEG-aalloille (Başar, Başar-Eroglu, Karakaş & Schürmann, 2001). Aivosähkökäyrästä on havaittavissa sille tyypillisiä ominaispiirteitä, joita ovat esimerkiksi aaltomuoto, aaltojen taajuus sekä niiden amplitudi. Näiden ominaisuuksien avulla on mahdollista havaita ja paikallistaa poikkeava toiminta. EEG:n taajuusalue on noin 1–50 Hz ja sen eri aaltomuotoja on havaittavissa erilaisissa tilanteissa. EEG:n aaltomuotoja ovat alfa, beta, theta, delta, gamma ja myy (kuva 4).



Kuva 4: EEG-aaltojen aaltomuodot voidaan tunnistaa EEG:n osataajuuksien aaltomuotojen perusteella (Cervenka, Nagle & Boatman-Reich, 2011). Gamma-aaltojen taajuus on suurin ja delta-aaltojen pienin.

Alfa-aallot ovat taajuudeltaan 8–13 Hz ja niitä voidaan havaita valveilla olevalta henkilöltä, kun hän on silmät kiinni ja rentoutunut (Başar ym., 2001). Alfa-aaltoja voidaan mitata päälaki- ja takaraivolohkoilta. Samalla taajuudella (8–13 Hz) alfa-aaltojen kanssa ovat myös myy-aallot (Başar ym., 2001). Niitä voidaan mitata tunto- ja liikeaivokuorelta ja ne liittyvät liiketoimintojen sekä hermojen lepotilaan. Tunto- ja liikeaivokuorelta voidaan mitata myös gamma-aaltoja (Başar ym., 2001). Niiden taajuus

on yli 30 Hz ja niitä esiintyy, kun aivot yhdistelevät eri aistikanavista tulevaa informaatiota. Gamma-aaltoja esiintyy myös ongelmanratkaisutilanteissa sekä silloin, kun aivot tunnistavat tuttuja ääniä tai esineitä, minkä vuoksi gamma-aallot soveltuvat erityisesti EEG-pohjaisten BCI-laitteiden toteuttamiseen (Maddox ym., 2015).

Beta-aaltojen taajuus on 13–30 Hz ja niitä voidaan havaita aivojen molemmissa puoliskoissa, mutta ne ovat voimakkaimmillaan otsalohkon alueella (Başar ym., 2001). Pieni amplitudisia beta-aaltoja esiintyy, kun henkilö on valveilla ja aktiivinen, kuten keskittyessään johonkin tai ollessaan valppaana. Gamma-aaltojen lisäksi myös beta-aaltoja voidaan käyttää esimerkiksi kehitettäessä nykyaikaisempia kommunikoinnin apuvälineitä.

Theta-aaltojen taajuus on 4–8 Hz ja niitä esiintyy yleensä pienillä lapsilla (Başar ym., 2001). Aikuisilta niitä voidaan havaita, kun henkilö on unelias. Delta-aaltojen taajuus on alle 4 Hz ja niiden amplitudi on suurin (Başar ym., 2001). Niitä esiintyy aikuisilla vain unen aikana, mutta vauvoilla niitä esiintyy myös valvetilassa. Delta-aaltoja voidaan mitata otsalohkosta.

3 Kuvantamismenetelmät ja markkinoilla olevat kuluttajille suunnatut EEG-pohjaiset BCI-laitteet

Tässä luvussa käydään läpi, millaisia aivojen kuvantamismenetelmiä on tällä hetkellä käytössä ja mihin tarkoituksiin niitä käytetään. Lisäksi esitellään markkinoilla olevia BCI-laitteita, jotka perustuvat tyypillisesti johonkin aivojen kuvantamismenetelmään. Laitteista erityisessä tarkastelussa on EEG-käyrän seuraamiseen perustuva Muse Headband, jolle toteutettiin tätä tutkielmaa varten keskittymistasoa aivosähkökäyrästä seuraavan sovelluksen prototyyppi. Kehitetyn prototyypin tarkoituksena on demonstroida BCI-laitteiden käyttömahdollisuuksia esimerkiksi kuntoutuksen ja kommunikoinnin apuvälineinä.

3.1 Aivojen kuvantamismenetelmät

Aivojen kuvantamismenetelmillä voidaan kuvata aivoista esimerkiksi rakenteellisia tai toiminnallisia ominaisuuksia. BCI-laitteiden suunnittelussa tärkeitä ovat erityisesti aivojen toiminnallisten ominaisuuksien kuvantamismenetelmät, sillä niiden avulla aivojen toiminnan muutokset pystytään yhdistämään esimerkiksi fyysisiin suoritteisiin. Yleisimpiä tällä hetkellä käytössä olevia aivojen kuvantamismenetelmiä ovat muun muassa toiminnallisia ominaisuuksia mittaavat EEG, fMRI, PET, TMS ja MEG sekä rakenteellisia ominaisuuksia mittaava MRI (Bera, 2015; Rinne, Salmi, Degerman & Alho, 2006; Vitikainen & Kähkönen, 2006).

EEG:llä (electroencephalography) eli aivosähkökäyrällä mitataan aivojen sähköistä toimintaa (Bera, 2015). EEG:ssä päähän kiinnitetään elektrodit, joiden avulla mitataan aivotoiminnan aiheuttamia sähköisiä potentiaaleja. EEG:tä voidaan käyttää kliinisessä tutkimuksessa muun muassa epilepsian diagnosoimiseen. EEG:ssä mitataan aivojen sähköisen toiminnan eri aaltomuotoja, joiden muutosten perusteella voidaan seurata aivotoiminnan muutoksia. Poikkeavan muutoksen avulla pystytään esimerkiksi diagnosoimaan mahdollisen aivotoiminnan häiriön laajuutta ja luonnetta. EEG:tä voidaan käyttää esimerkiksi aivoinfarktin, päähän kohdistuneen iskun tai aivokasvaimien aiheuttamien vaurioiden paikallistamiseen. Uudempien ja tarkempien

aivojen kuvantamismenetelmien yleistymisen myötä EEG:n käyttö on kuitenkin vähentynyt.

Toiminnallisessa magneettikuvauksessa eli fMRI:ssä (functional magnetic resonance imaging) mitataan aivojen eri osissa tapahtuvia veren happipitoisuuden muutoksia (Rinne ym., 2006). fMRI:llä pystytään paikantamaan jopa alle millimetrin tarkkuudella ne aivoalueet, joilla veren happipitoisuus muuttuu, kun tutkittava tekee jotain tehtävää, esimerkiksi lukee sanoja tai katselee kasvokuvia. Veren virtaus aktiiviselle aivoalueelle muuttuu muutaman sekunnin kuluttua ärsykkeen havaitsemisesta ja aivoalueen sähköisestä aktivoitumisesta. Toiminnallisen magneettikuvauksen fysikaalinen toiminta perustuu hemoglobiinin erilaisiin magneettisiin ominaisuuksiin, silloin kun se kantaa mukanaan happea verrattuna siihen, kun se ei kannaa happea. fMRI:n heikkoudeksi luetaan sen ajallinen tarkkuus, koska aivoalueen aktivoitumisen jälkeen kestää noin viisi sekuntia ennen kuin havaittu signaali on voimakkaimmillaan.

PET eli positroniemissiotomografia on kuvantamismenetelmä, jossa käytetään puoliintumisajaltaan lyhyitä radioisotooppeja (Bera, 2015). Radioaktiivinen aine laitetaan laskimon tai keuhkojen kautta ennen kuin vartalo kuvataan erikoiskameralla. Aine hakeutuu erityisesti aivoihin, maksaan ja kasvaimiin. Radioaktiivinen merkkiaine toimii siten, että siinä olevat positronit törmäävät kehossa oleviin elektroneihin, minkä seurauksena tapahtuu annihilaatio. Tästä aiheutuvaa gammasäteilyä pystytään havaitsemaan gammakuvauslaitteella kehon ulkopuolelta. Radioaktiivinen aine jakaantuu elimistössä, minkä avulla muodostetaan tietokoneella kolmiulotteinen kuva. PET ei käytännössä sovellu BCI-laitteiden kehittämiseen, koska se vaatii toimiakseen radioaktiivisten isotooppien käyttämistä, mikä on pitkäaikaisessa käytössä haitallista.

PET-kuvantamista voidaan käyttää myös yhdessä tietokonekerroskuvauksen kanssa, jolloin voidaan saada tarkempi anatominen kuva sairastuneesta elimestä (Bera, 2015). PET-kuvauksella voidaan havaita mahdollinen sairaus jo varhaisessa vaiheessa. Sitä käytetään erityisesti syöpätutkimuksissa. Lisäksi PET-kuvausta voidaan käyttää mittaamaan aktiivisuutta aivojen toiminnassa. Aivojen toiminta perustuu siihen, että

verenkierto ja glukoosin käyttö kasvavat aivojen aktiivisissa osissa, mikä taas näkyy kuvassa.

TMS:ssä eli transkraniaalisessa magneettistimulaatiossa aktivoidaan kallon ulkopuolelta aivojen hermosoluja magneettikentän avulla (Vitikainen & Kähkönen, 2006). Tutkittavana olevan henkilön päälle laitetaan kuparikela, johon johdetaan sähkövirtaa sykäyksittäin. Tällä tavoin syntyvä magneettikenttä vaikuttaa ihon, kallon ja aivonesteen läpi aivokuoren hermosoluihin. Magneettistimulaatiolla tuotettujen hermoimpulssien etenemistä aivojen eri alueille voidaan seurata ja tällä tavoin kartoittaa eri aivoalueiden tehtäviä ja mahdollisesta eri vaurioiden laajuutta.

MEG:llä (magnetoencefalografia) eli aivomagneettikäyrällä mitataan aivojen sähköisen toiminnan tuottamia magneettikenttiä (Bera, 2015). Sen avulla mitataan aivojen magneettikenttiä, joita hermosoluviestintään liittyvät sähkövirrat aiheuttavat. MEG:llä aivojen toimintaa voidaan seurata millisekunnin tarkkuudella. Sen lisäksi, että MEG:n avulla pystytään saaman tietoa, milloin hermosoluviestintää tapahtuu, pystytään myös paikantamaan, millä aivoalueella vilkasta hermosoluviestintä tapahtuu. Tämä edellyttää, että tutkittava henkilö tekee annettua tehtävää samalla, kun toimintaa mitataan. MEG on aikatarkkuudeltaan yhtä hyvä kuin EEG, mutta MEG:llä aktivoituneiden aivoalueiden paikantaminen on tarkempaa. MEG:n vahvuus verrattuna fMRI:hin on se, että MEG:llä on mahdollisuus tutkia aktivoituneen aivoalueen aikakäyttäytymistä.

MRI:tä (magnetic resonance imaging) eli magneettikuvausta käytetään rakenteiden kuvaamiseen (Bera, 2015). Se soveltuu luuytimen, keskushermoston sekä rasva- ja vesipitoisten kudosten tutkimiseen, koska ne sisältävät vetyä. MRI:llä mitataan siis vetytimien magneettikentässä emittoimaa radiotaajuista signaalia. Kuvauksissa käytetyn voimakkaan magneettikentän suuruutta paikan funktiona ohjataan tietokoneella niin, että kuvauskohteen eri osiin vaikuttaa erisuuruinen magneettikenttä. Lisäksi resonanssia synnytetään ja havaitaan radiolähtetimen ja -vastaanottimen avulla. MRI:ssä käytetään kontrastiaineita, joiden avulla muutetaan kudosten näkyvyyttä.

Kuvauksessa käytetään myös kuvattavan kehonosan lähelle asetettavia keloja, joiden tarkoituksena on vahvistaa magneettikuvaslaitteen tuottamia signaaleja.

Tähän mennessä ei-invasiivisia BCI-laitteita on pyritty toteuttamaan erityisesti käyttämällä MEG:tä, EEG:tä ja fMRI:tä (Bera, 2015). Niissä on kaikissa omat etunsa ja heikkoutensa. MEG:n hyvä puoli on, että sen avulla on mahdollista saavuttaa parempi resoluutio kuin EEG:n avulla. Sen huono puoli kuitenkin on, että MEG-laitteet ovat ainakin tällä hetkellä liian kalliita ja isokokoisia eivätkä ne sovellu reaaliaikaiseen aivotoiminnan seuraamiseen. EEG:llä ei ole MEG:n huonoja puolia, koska se perustuu aivosähkötoiminnan suoraan seuraamiseen edullisten sensorien avulla. Sen haittapuolena on kuitenkin se, että niiden avulla saavutettava resoluutio on melko heikko ja altis esimerkiksi lihasten toiminnasta aiheutuville virhesignaaleille. fMRI:n hyvänä puolena on hyvä resoluutio ja se, että se ei aiheuta säteilyä. Huonona puolena puolestaan on se, että se on kallis ja sen viive on fysiologisista syistä 3–6 sekuntia. Tällä hetkellä BCI-laitteissa yleisimmin käytetty kuvantamismenetelmä on EEG.

3.2 Kuluttajakäyttöön suunnitellut EEG-pohjaiset BCI-laitteet

Markkinoilla olevien EEG-pohjaisten BCI-laitteiden ja niitä hyödyntävien ohjelmien määrä on kasvanut kiihtyvää tahtia viimeisten vuosien aikana (Ekandem, Davis, Alvarez, James & Gilbert, 2012). Tällä hetkellä suurin osa BCI-laitteista on EEG-pohjaisia (Hwang, Kim, Choi & Im, 2013). Eräinä syinä tähän ovat muun muassa mobiililaitteiden kehittyminen ja halpeneminen sekä käyttäjien kiinnostus seurata oman kehonsa toimintaa esimerkiksi osana urheiluosuoritusta. Erilaisten BCI-laitteiden, kuten esimerkiksi EEG-pantojen, valmistaminen on myös tullut halvemmaksi teknologian halventuessa sekä erilaisten avoimien projektien kasvattaessa suosiotaan.

Kuluttajahintaisia BCI-laitteita on ollut olemassa noin kymmenen vuotta. Ensimmäisten laitteiden ongelmana oli kuitenkin se, että ne pystyivät seuraamaan vain yhtä mielentilaa eivätkä esimerkiksi yksittäisiä EEG-aaltoja. Ensimmäiset kuluttajille suunnatut kaupalliset BCI-laitteet pohjautuivat NeuroSky-yhtiön kehittämään BCI-siruun. Viimeisten parin vuoden aikana laitteet ovat kehittyneet monipuolisemmiksi ja

tarjoavat laajasti erilaisia signaaleja. Suurempi signaalimäärä on seurausta suuremmasta elektrodimäärästä. Laitteiden julkaisuaikoja ja hintoja esitellään tarkemmin luvussa 3.3.

Perinteisesti EEG-pannoilla on pyritty seuraamaan unenlaatua. Ajatusta on viime aikoina jatkettu kehittämällä erilaisia EEG:tä hyödyntäviä meditointisovelluksia. EEG-pannat soveltuvat tähän tarkoitukseen hyvin, koska esimerkiksi keskittymisen mittaaminen seuraamalla alfa- ja beta-aaltojen suhdetta on yksinkertaisuudestaan huolimatta riittävän tarkkaa. Koska laskentateho on nykyään riittävää ja prosessorien koko on pienentynyt, myös erilaisia aivosähkökäyrää tarkemmin tulkitsevia sovelluksia on tullut markkinoille. Esimerkiksi erilaisten hermoverkkojen avulla voidaan yrittää tulkita ajatuksia EEG-käyrästä. Menetelmä vaatii kuitenkin verkkojen kouluttamista jokaiselle käyttäjälle erikseen, sillä jokaisella ihmisellä on omanlaisensa aivosähkökäyrä.

3.2.1 MindWave

NeuroSky (NeuroSky, 2017) on vuonna 2004 perustettu yhdysvaltalainen yritys. Yrityksen tarkoituksena on luoda kuluttajille sopivia EEG:tä käyttäviä laitteita. Heidän suunnittelemaansa teknologioita on käytetty muun muassa leluissa, opetuksessa, autoteollisuudessa sekä terveydenhuollossa. NeuroSkyn kehittämien laitteiden etuna on, että niissä käytetään halpoja kuivasensoreita, jotka eivät vaadi sähköä johtavan geelin käyttöä. Laitteissa on lisäksi sisäänrakennettuna häiriönpoistojärjestelmä ja sulautettu sirutason signaalinkäsittely-yksikkö. Heidän kehittämänsä EEG-panta on nimeltään MindWave.

MindWave (kuva 5) edustaa EEG-pantojen halvinta joukkoa. Siinä on yksi elektrodi, joka pystyy lukemaan kahta mielentilaa, jotka päätellään neljästä aivoaallostaa. Lisäksi laite pystyy tunnistamaan silmänräpäytykset. MindWaveen on saatavilla ilmaiseksi kehitystyökalut yrityksen omilta sivuilta Androidiin, iOS:ään sekä PC:lle ja Macille. Ilmaisten kehitystyökalujen lisäksi NeuroSky myy tutkimukseen tarkoitettua kehitystyökalua, joka mahdollistaa muun muassa raakadatan lukemisen laitteesta. Tutkimustarkoituksessa MindWavea on käytetty muun muassa Navalyn ja Gavasinin tutkimuksessa (2014). Tutkimuksessa MindWaven avulla pyrittiin selvittämään muutoksia lasten keskittymiskyvyssä heidän tehdessä matemaattisia harjoituksia.

Tutkimuksessa todettiin, että keskittymiskykyä voitiin parantaa merkittävästi EEG-
pinnan avulla.



Kuva 5: NeuroSky MindWave julkaistiin alun perin vuonna 2011 ja se on edelleen myynnissä. Laitteen etuna on edullinen hinta, mutta heikkoutena signaalien pieni määrä.

3.2.2 Emotiv Epoc ja Emotic Insight

Emotiv Systems (Emotiv, 2017) on australialainen yritys, joka kehittää teknologioita, joiden avulla tietokoneen kanssa vuorovaikutuksessa oleminen muistuttaisi mahdollisimman paljon toisen ihmisen kanssa vuorovaikutuksessa olemista. Tähän tarkoitukseen on kehitetty Emotiv Epoc niminen EEG-panta, joka tarkoituksena on lukea EEG:n avulla ajatuksia, joiden avulla tietokonetta voitaisiin ohjata. Emotiv Epoc on alun perin julkaistu vuonna 2009 ja sen uudistettu versio on edelleen myynnissä. Laite on huomattavasti monipuolisempi kuin esimerkiksi NeuroSkyn MindWave, mutta se on myös huomattavasti kalliimpi. Yritys kehittää tällä hetkellä halvempaa ja kevyempää ratkaisua muun muassa oman keskittymistason seuraamiseen ja kehittämiseen. Uuden laitteen nimi on Emotiv Insight.

Emotiv Epocissa (kuva 6) on 14 elektrodiä, jotka mahdollistavat kolmen mielentilan, 13 tietoisien ajatuksen, ilmeiden sekä päänliikkeiden seuraamisen gyroskooppien avulla. Emotic Epocin on saatavilla suuri määrä ilmaisia ja maksullisia sovelluksia. Lisäksi

saatavilla on sekä ilmaisia että maksullisia kehitystyökaluja Windowsille, Macille, Linuxille, Androidille sekä iOS:lle. Emotic Epocin hyvänä puolena on valmiiden ohjelmien sekä kehitystyökalujen suuri määrä, mutta heikkoutena korkea hinta ja pinnan suuri koko. Tutkimuksia Emotiv Epocista ovat tehneet muun muassa Badcock ym. (2013). He selvittivät tutkimuksessaan Emotic Epocin tarkkuutta. Tutkimuksessa voitiin todeta, että Emotic Epoc on riittävän tarkka, jotta sillä voidaan korvata isommat ja kalliimmat EEG-mittausjärjestelmät ainakin tutkimuksissa, joissa täysin täsmälliset tulokset eivät ole tarpeellisia.

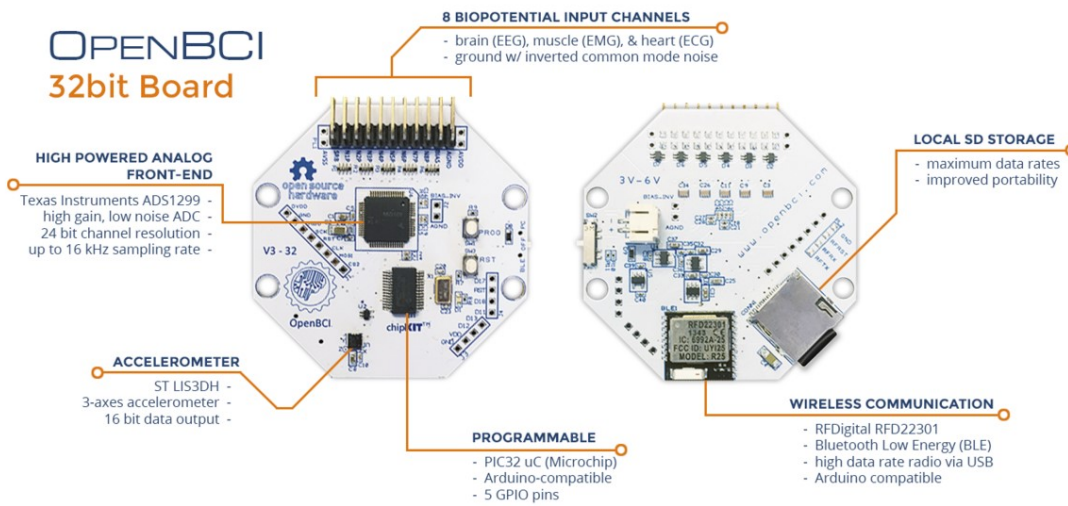


Kuva 6: Emotiv Epoc on monipuolinen EEG-panta, jonka avulla pystytään seuraamaan yksittäisten aivoaaltojen lisäksi muun muassa ohjelmoitavissa olevia ajatuksia.

3.2.3 OpenBCI

OpenBCI (OpenBCI, 2017) on yhteisö, joka koostuu tutkijoista ja insinööreistä. Heidän tarkoituksenaan on kehittää avoimia ja vapaasti saatavilla olevia laitteita aivosähkökäyrän lukemiseen. Tällä hetkellä myynnissä oleva versio julkaistiin vuonna 2016. Laitteita on mukana kehittämässä suuri määrä vapaaehtoisia ja yhteistyöyrityksiä. OpenBCI:n sivuilta on saatavissa ilmaiseksi kehitystyökaluja, pinnan tulostukseen tarvittavia 3D-tulostustiedostoja sekä kehitystyökaluja eri kielille. Sen lisäksi, että periaatteessa kuka tahansa voisi rakentaa laitteen itse, yritys myös myy niitä valmiiksi rakennettuina.

OpenBCI:n 32-bittinen piiri tukee kahdeksaa elektrodiä, joiden avulla pystytään lukemaan muun muassa EEG:tä sekä lihasten aktivoitumista (kuva 7). Lisäksi laitteessa on sensorit päänniikkeiden seuraamisen. Piiri on tarkoitettu olemaan mahdollisimman mukauttavissa, mikä tekee siitä erilaisen kuin kaikki muut markkinoilla olevat laitteet. Monipuolisuus ja mukauttavuus ovatkin sen parhaita puolia, mutta heikkoutena on, että se ei ole niin valmis tuote kuin muut tässä luvussa esitellyt laitteet, joten sen käyttöönotto vaatii enemmän työtä. OpenBCI:n avulla toteutettujen laitteiden tarkkuutta on mitattu muun muassa Freyn (2016) tekemässä tutkimuksessa, jossa todettiin, että OpenBCI pystyy tarjoamaan riittävää tarkkuutta kilpaillakseen lääketieteellisen tason laitteiden kanssa.



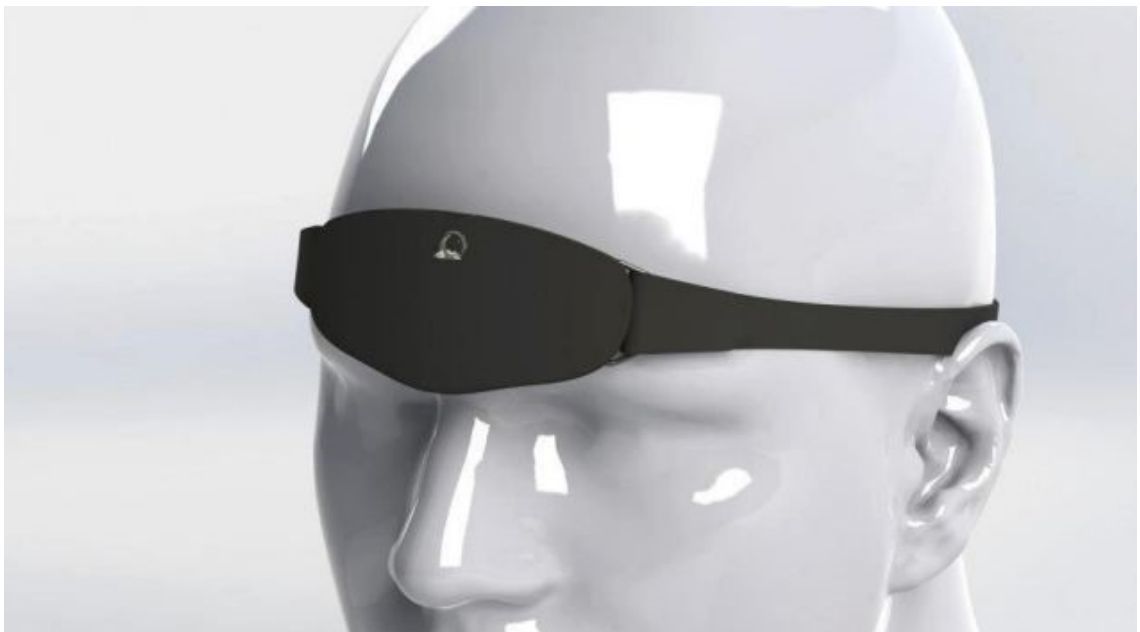
Kuva 7: OpenBCI:n 32-bittinen piiri on yrityksen uusin tarjolla oleva BCI-piiri. Se tukee kahdeksaa elektrodiä ja on täysin mukauttavissa projektin tarpeisiin.

3.2.4 Aurora Dreamband

Aurora Dreamband on vuonna 2017 julkaistava unenseurantaan tarkoitettu EEG-panta (Aurora, 2017). Siinä on yksi elektrodi ja sen avulla pystytään seuraamaan EEG:tä, minkä lisäksi panta pystyy seuraamaan silmien liikkumista, lihasten jännittymistä sekä sykettä. Koska laite on tarkoitettu unien ja nukkumisen seuraamiseen, laitteessa on vain otsalohkon aivoaaltojen seuraamisen mahdollistava sensori. Muihin edellä esitettyihin

laitteisiin verrattuna Aurora Dreambandissä on panostettu enemmän laitteen mukavuuteen kuin siinä oleviin ominaisuuksiin, koska laitetta on tarkoitus pitää koko yö.

Aurora Dreambandin (kuva 8) yhtenä tarkoituksena on auttaa käyttäjää pääsemään niin sanottuun valveunitilaan seuraamalla aivoaaltoja ja säätämällä esimerkiksi pannassa olevia valoja ja soittamalla kaiuttimista aivoaaltoja muuntavia ääniä. Kun laite julkaistaan, sen mukana on tarkoitus julkaista myös ilmainen kehitystyökalu, jotta omien sovellusten toteuttaminen olisi mahdollisimman helppoa.



Kuva 8: Aurora Dreamband on unien ja nukkumisen seurantaan erikoistunut EEG-panta. Sen avulla pystytään muun muassa seuraamaan unen syvyyttä ja säätämään herätystä sen mukaisesti.

3.2.5 Muse

Muse (Muse, 2017) on kanadalaisen InterAxonin kehittämä mielentilojen lukemiseen tarkoitettu EEG-panta (kuva 9). Sen pääasiallisena tarkoituksena on auttaa käyttäjää keskittymään ja parantamaan meditoimistaitojaan. Musen ideana on, että laite itsessään hoitaisi mahdollisimman suuren osan signaalien käsittelystä. InterAxonille on ollut alusta asti tärkeää, että käyttäjät pääsevät toteuttamaan itse omia sovelluksiaan ja siksi tarjolla onkin ilmaisia kehitystyökaluja yleisimmille käyttöjärjestelmille.



Kuva 9: Muse Headbandissä on useita sensoreita, joilla pystyy seuraamaan EEG-signaaleja ympäri päätä. Laite analysoi raakadatan itse mahdollisimman pitkälle, jotta sitä olisi nopea käsitellä kannettavassa laitteessa.

Musessa on neljä elektrodiä, jotka on sijoitettu ympäri päätä (Li, Xu & Zhu, 2015). Laitteen suorittaman Fourier muunnoksen ansiosta, EEG:stä on valmiiksi eroteltu alfa-, beeta-, gamma- ja delta-aallot. Raakadatan lisäksi laite mahdollistaa muun muassa keskittymistason seuraamisen. Keskittymistaso muodostetaan vertailemalla alfa- ja beeta-aaltojen tasoja keskenään. Keskittymistaso on tärkeässä osassa Musen alkuperäistä tarkoitusta varten eli toimia keskittymisen apuvälineenä. Laitteen hyvänä puolena verrattuna muihin edellä esiteltyihin laitteisiin on sen kevyt rakenne. Huonona puolena puolestaan on se, että koska dataa on käsitelty valmiiksi jo hyvin pitkälle, pantaa ei voida käyttää tehokkaasti kaikkiin tutkimustarkoituksiin.

3.2 Laitteiden vertailu

BCI-laitteissa ei ole perustoiminnaltaan suuria eroja, mutta nähtävissä on, että se, koska ne on julkaistu, vaikuttaa niissä oleviin ominaisuuksiin. Ensimmäisissä BCI-laitteissa on yleensä mahdollista seurata vain yhtä mielentilaa eikä raakadataa saa laitteista ollenkaan ulos. Nykyaikaisemmat laitteet mahdollistavat suuren määrän erilaisia

signaaleja ja laitteiden käyttämisen omiin käyttötarkoituksiin saatavilla olevan raakadatan avulla.

Taulukosta 1 voidaan nähdä, että tällä hetkellä myynnissä olevat laitteet eroavat toisistaan muun muassa hinnan perusteella. Tutkimustarkoituksiin kaikki laitteet ovat kuitenkin melko edullisia. Laitetta valittaessa onkin tärkeämpää ensin miettiä, mikä on laitteen käyttötarkoitus. Esimerkiksi unien ja nukkumisen seurantaan soveltuu parhaiten Aurora Headband, mutta tarkan tutkimuksen tekemiseen puolestaan paras valinta olisi Emotiv Epoc. Muut BCI-laitteet eli MindWave, OpenBCI sekä Muse ovat sopivia esimerkiksi mielentilojen seuraamiseen. Kaikissa tässä luvussa esitellyissä BCI-laitteissa oli saatavilla ilmainen kehitystyökalu. Lisäksi osaan laitteista on saatavilla sekä ilmaisia että maksullisia valmiita sovelluksia, jotka on tarkoitettu sekä tutkimustarkoituksiin että kuluttajien käytettäväksi.

| Nimi | Julkaistu | Hinta (dollaria) | Elektrodien määrä | Mitä lukee |
|-----------------|-----------|------------------|-------------------|--|
| MindWave | 2011 | 99,99–129,99 | 1 | 2 mielentilaa, silmänräpäytys |
| Emotiv Epoc | 2009 | 399–499 | 14 | 3 mielentilaa, 13 tietoista ajatusta, ilmeet, päänliikkeet |
| OpenBCI | 2014 | 499,99 | 8 | EEG, EMG, EKG sekä päänliikkeet |
| Aurora Headband | 2017 | 299 | 1 | EEG, EOG, EMG, ECG, päänliikkeet |
| Muse | 2014 | 299 | 4 | 2 mielentilaa, EEG, silmänräpäytykset, päänliikkeet |

Taulukko 1: Taulukossa on vertailtu markkinoilla olevia BCI-laitteita. Taulukosta voidaan nähdä, että viimeisen parin vuoden aikana erilaisten BCI-laitteiden määrä on lähtenyt kasvamaan. Lisäksi voidaan huomata, että hinnat vaihtelevat jonkin verran.

3.3 BCI-laitteiden sovellutukset

Kommunikointitaulut ovat tärkeä osa puhetta tukevia ja korvaavia kommunikointimenetelmiä, mutta nykyään ne ovat lähes poikkeuksetta toteutettu kokoamalla useita kommunikointitauluja fyysisiin kansioihin tai tauluihin. EEG-pohjaisia BCI-laitteita on aikaisemmin käytetty monenlaisiin käyttötarkoituksiin (Fouad, Amin, El-Bendary & Hassanien, 2015; Hwang ym., 2013). Yksi suosituimmista käyttötarkoituksista on ollut kirjoittamiseen tarkoitetut sovellukset, joita on toteutettu muun muassa erilaisten oppivien hermoverkkojen avulla (Li, Guan, Li & Chin, 2008).

Toinen suosittu käyttötarkoitus on ollut yrittää emuloida tietokoneen hiirtä BCI-laitteen avulla (McFarland, Krusienski, Sarnacki & Wolpaw, 2008). Nykyään EEG-pohjaisten BCI-laitteiden avulla on pyritty ratkaisemaan myös monimutkaisempia ongelmia kuten pelisovellusten toteuttaminen sekä robottikäden ohjaaminen (mm. Iidal ym., 2017 ja Roy, Mahadevappa & Kumar, 2016). BCI-laitteita on myös yhdistetty virtuaaliseen todellisuuteen (Amores, Benavides & Maes, 2016).

4 EEG-pohjaisen BCI-laitteen käyttäminen tietokoneen ohjaamiseen

Tämän tutkielman tutkimuskysymyksenä oli selvittää, onko nykyisellä teknologialla mahdollista toteuttaa toimivia EEG-pohjaisia BCI-laitteita hyödyntäviä sovelluksia kuluttajilla suunnitelluilla BCI-laiteilla. Lähempään tarkasteluun valittiin Muse, koska se on edullinen ja tarjoaa monipuolisesti erilaisia signaaleja. Tutkimuskysymyksen vastauksen selvittämiseksi toteutettiin BCIController-niminen esimerkkisovellus.

4.1 Valitut teknologiat

BCIController on Windows 10 -laitteiden ohjaamiseen tarkoitettu alusta, jonka avulla pystytään toteuttamaan erilaisia sovelluksia esimerkiksi kommunikoinnin apuvälineeksi. Tässä tutkielmassa sen avulla kehitettiin yksinkertainen testialusta, jonka tarkoituksena oli selvittää, kuinka helppoa BCI-laitteen avulla on ohjata ruudulla näkyvää pistettä. Sovellus toteutettiin C++:lla käyttäen apuna Windows 10 SDK:ta sekä Musen omaa SDK:ta. SDK:lla eli Software Development Kitillä tarkoitetaan ohjelmistokehitykseen tarkoitettua pakettia, joka sisältää kehitykseen tarvittavia työkaluja. SDK:iden avulla ohjelmistokehityksen aloittaminen jollekin laitteelle on helpompaa ja nopeampaa verrattuna siihen, että kaikki pitäisi itse tehdä alusta alkaen.

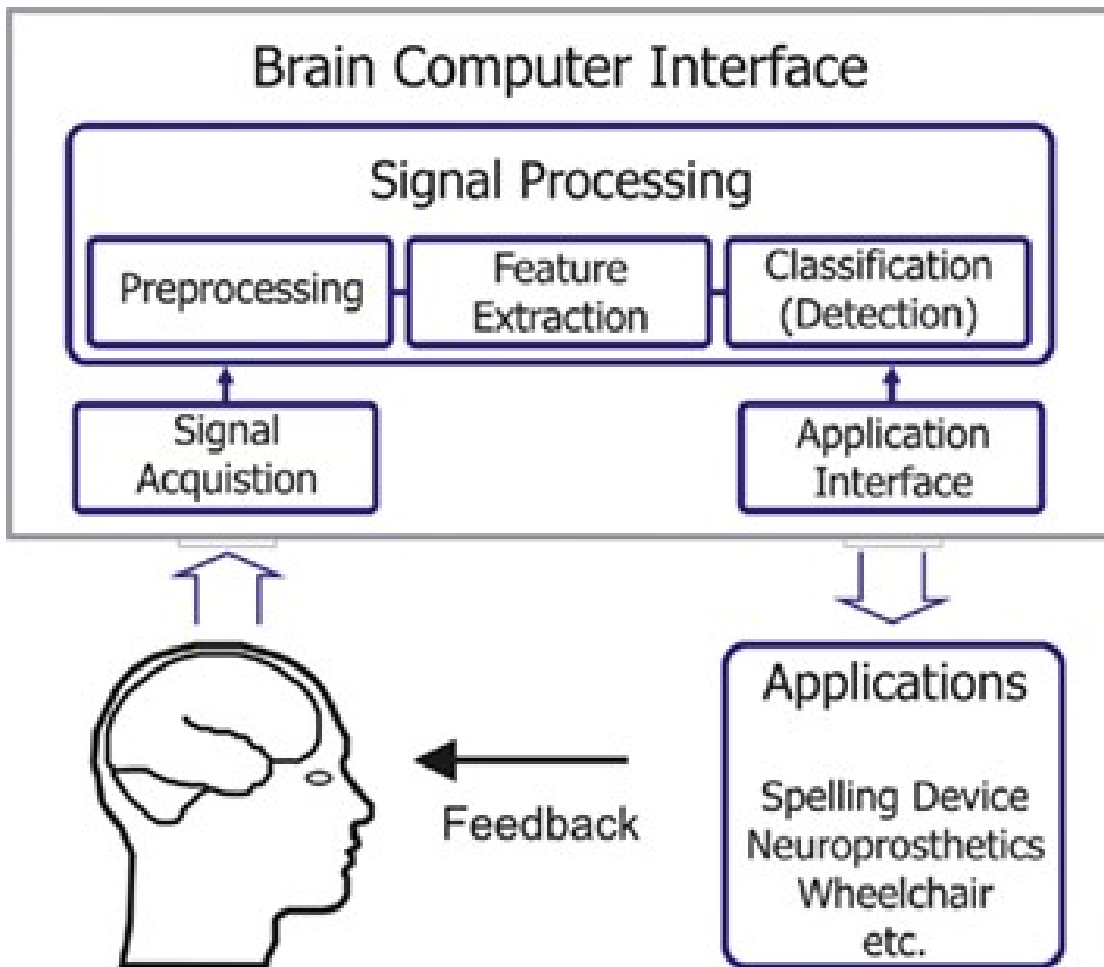
Kaikki vaadittavat SDK:t ovat ilmaiseksi saatavilla ja sovellusten kehittäminen on mahdollista muun muassa Windowsilla ja Linuxilla. Huonona puolena Musen SDK:ssa oli aikaisemmin se, että sillä pystyi kehittämään ohjelmia vain Androidille ja iOS:lle. Tilanne korjaantui vuoden 2017 keväällä, kun tuki Windows-, Linux- ja OSX-laitteille valmistui. Koska Muse suorittaa suurimman osan laskennasta laitteistopohjaisesti, ei esimerkiksi mobiililaitteiden alhaisempi laskuteho ole ongelma. Tietokonepohjaisen sovelluksen hyvänä puolena on kuitenkin se, että tieteellisemmän tutkimuksen tekeminen on helpompaa, koska esimerkiksi tarkkojen arvojen kirjaaminen ja visualisointi on helpompaa.

SDK:iden ilmaisuus ja monialustatuki lisäävät kehittäjien mahdollisuuksia toteuttaa erilaisiin tarpeisiin sopivia edullisia sovelluksia. Kehityssyklin nopeus ja edullisuus mahdollistavat myös sellaisten ohjelmien tekemisen, jotka muuten jäisivät tekemättä esimerkiksi pienen kohdeyleisön vuoksi. On yleistä, että kommunikointitaulua tarvitsevien henkilöiden tarpeet poikkeavat suuresti toisistaan ja siksi ohjelmien pitääkin olla edullisesti ja helposti mukautettavissa jokaisen yksilöllisiin tarpeisiin sopiviksi. Kehittämisen helpottamiseksi Musen SDK:n mukana tulee valmis esimerkkisovellus, jonka avulla on helppoa lähteä kehittämään omia sovelluksia.

Muse ja tietokone yhdistettiin toisiinsa Bluetooth-yhteyden avulla. Langattomuuden hyötynä on se, että se tarjoaa paremman liikkuvuuden, koska johdon pituus ja sotkeutuminen eivät ole ongelmia. Langattomuuden heikkoutena puolestaan on se, että se vaatii erillisen akun langattomasti toimivaan laitteeseen. Erityisesti pitkäaikaisessa käytössä akun kesto voi muodostua ongelmaksi, mikä puolestaan haittaa esimerkiksi BCI-laitteen käyttämistä kommunikoinnin apuvälineenä.

4.2 Toimintalogiikka

EEG-pohjaisten BCI-laitteiden perinteinen toimintalogiikka on kuvattu kuvassa 10. Prosessi alkaa, kun pään ihon kanssa kosketuksissa olevat pannan sensorit havaitsevat sähkösignaalin (signal acquisition). Tämän jälkeen BCI-laite esikäsittelee saamansa datan, kuten poistaa siitä muun muassa virhesignaaleja ja melua (preprocessing). Kun signaali on esikäsitelty, siitä voidaan erotella yksittäisiä artefakteja eli esimerkiksi eri aaltomuodot, liike ja silmänräpäytykset (feature extraction ja classification). Lopuksi BCI-laite lähettää tiedot tietokoneelle rajapinnan avulla (application interface). Tämän jälkeen tietokone pystyy tulkitsemaan saamansa datan ja toteuttamaan eri käskyjä sen mukaisesti.



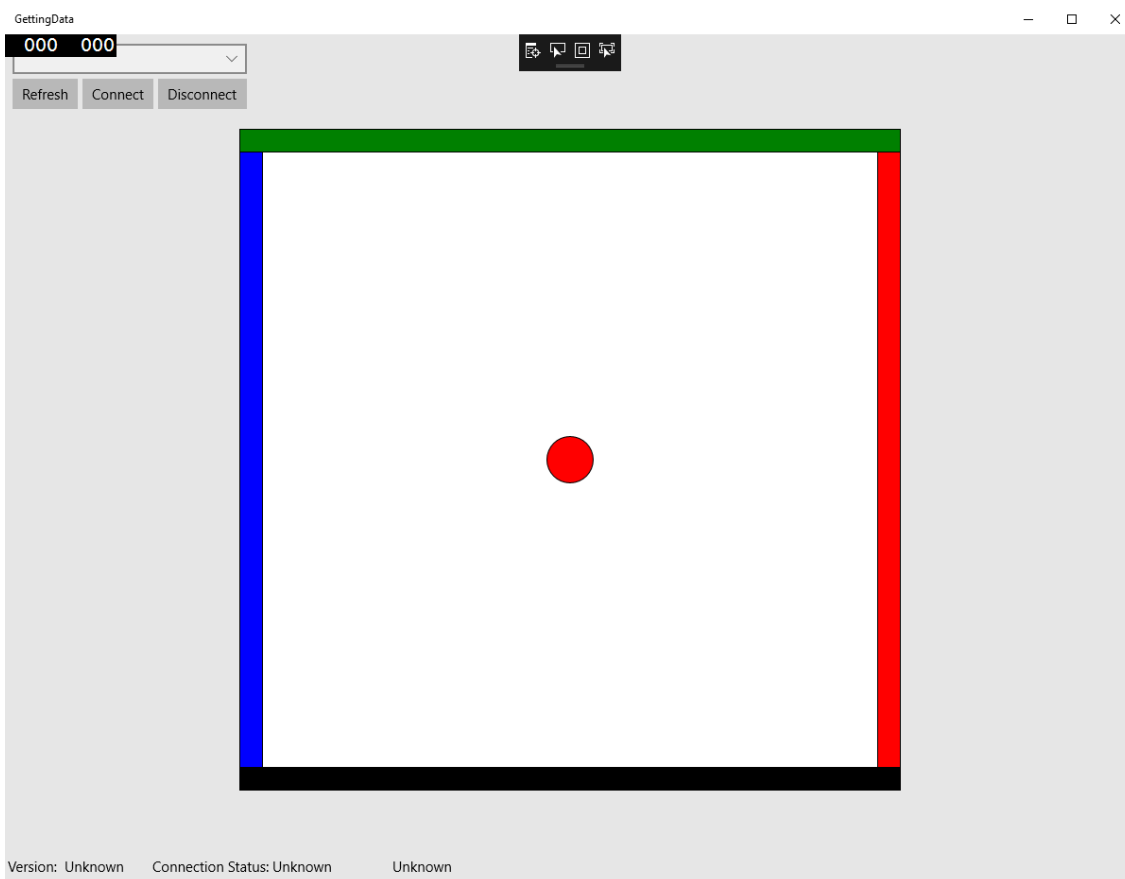
Kuva 10: EEG-pohjaisten BCI-laitteiden toimintalogiikka (Wolpaw, 2010). Prosessi alkaa siitä, kun sensorit saavat signaalin ja päättyy siihen, kun haluttu toiminto on suoritettu kohdelaitteessa.

BCI-laitteiden toiminnan kannalta erityisen tärkeää on piirteiden (feature) lukeminen. Piirteillä tarkoitetaan sellaisia mitattavissa olevia aivotoiminnan ominaisuuksia, joita pystytään käyttämään BCI-laitteiden ohjaamiseen (Schalk, McFarland, Hinterberger, Birbaumer & Wolpaw, 2004). Tyypillisesti käytettyjä piirteitä ovat muun muassa hitaat kortikaaliset potentiaalit, P300 herätteiset potentiaalit, aivokuoren herätepotentiaalit sekä sensomotoriset rytmit, joita pystytään mittaamaan päänahasta (Pfurtscheller, Flotzinger & Kalcher, 1993). Tässä tutkielmassa käytetty Muse käyttää piirteinä sensomotorisia rytmejä.

BCIControllerin ohjausmekaniikan ideana on, että käyttäjä ohjaa sovelluksen toimintaa EEG:n ja kasvojen lihasten avulla. Käytännössä sovellus saa Muselta käyttäjän gamma-aaltojen tason, mutta myös tiedon tämän silmänräpäytyksistä sekä leuan lihasten jännittymisestä. Muse kutsuu näitä aaltojen lisäksi saatavia tapahtumia artefakteiksi. Sovellus laskee keskittymistason pannalta saadun gamma-aalto-datan perusteella. Keskittymistason laskemiseksi saatu data normalisoidaan ensin välille [0,1]. Tämän jälkeen viimeisen kymmenen mittauksen tuloksista otetaan keskiarvo. Keskiarvon ja normalisoinnin avulla yksittäiset poikkeamat ja pannan virheet saadaan minimoitua.

Keskittymistason asteikolla 0,0-1,0 siten, että 1,0 on "täysin keskittynyt" ja 0,0 on "ei lainkaan keskittynyt". Toteutetussa testisovelluksessa käyttäjä pystyy liikuttamaan pistettä, jos hänen keskittymistasonsa on välillä 0,7-1,0 (korkea keskittymistaso). Jos keskittymistaso laskee korkean keskittymistason alapuolelle, piste pysähtyy. Räpäyttämällä silmiään kaksi kertaa kahden sekunnin sisällä, käyttäjä voi valita, mihin suuntaan hän haluaa liikkua. Valittavia suuntia sovelluksessa on neljä: oikealle, vasemmalle, ylös ja alas.

Toteutettu sovellus (kuva 11) koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen on niin kutsuttu kontrolliossa. Sen avulla käyttäjä voi yhdistää tabletin Museen Bluetooth-yhteyden avulla sekä seuraamaan muun muassa keskittymistasoaan. Toinen osa on varsinainen testiohjelma, jonka toimintaa käyttäjä pyrkii ohjaamaan säätämällä keskittymistasoaan.



Kuva 11: Tutkielmaa varten toteutettiin BCIController-sovellus, jonka tarkoituksena on testata BCI-laitteiden soveltuvuutta esimerkiksi kommunikoinnin apuvälineenä.

Järjestelmä lukee EEG:tä ja tulkitsee, onko käyttäjä keskittynyt vai ei. Lisäksi järjestelmän ohjaamiseen käytetään silmänräpäytyksiä.

BCI-laitteita käyttävien sovellusten ongelmana on perinteisesti ollut niiden käyttöönoton hankaluus. Mitä monimutkaisempi ohjausjärjestelmä on, sitä enemmän sen käyttämiseen tarvitaan erilaisia signaaleja. Käytännössä tämä on tarkoittanut, että jokaisen käyttäjän täytyy kouluttaa järjestelmä erikseen, jotta juuri heidän aivosähkökäyräänsä pystyttäisiin tulkitsemaan. Lisäksi kouluttamisen jälkeen käyttäjän täytyy opetella hallitsemaan ajatuksiaan, jotta käskyt menisivät perille.

Tätä tutkielmaa varten toteutettu sovellus käyttää yksinkertaisempaa menetelmää. Keskittymistason laskeminen toimii samalla periaatteella kaikille ihmisille, joten kouluttamista ei tarvita. Keskittymistason hallitseminen on lisäksi helpompaa kuin yksittäisten ajatusten hallitseminen, koska tietyn ohjauskäskyn ajattelemisen ja

ohjelman käyttäminen samaan aikaan voi olla haasteellista. Tämä voi mahdollisesti aiheuttaa vaikeuksia, jos käyttäjällä on jokin aivovaurio.

4.3 Algoritmit

BCIController-ohjelman toiminta voidaan jakaa kolmeen tärkeimpään algoritmiin, joita ovat artefakti-paketin vastaanottaminen, keskiarvon laskeminen ja käyttöliittymän päivittäminen. Ensimmäinen kolmesta tärkeästä algoritmista eli artefakti-paketin vastaanottaminen (algoritmi 1) tarkistaa aluksi, onko vastaanotettu artefakti-paketti tyypiltään silmänräpäytys. Jos ehto on totta, algoritmi ottaa talteen nykyisen kellonajan ja vertaa sitä aikaan, jolloin edellinen räpäytys havaittiin. Jos tuloksena saatu aika on suurempi kuin 500 millisekuntia, mutta pienempi kuin 2000 millisekuntia, algoritmi muuttaa ohjelmassa liikutettavan kursorin suuntaa ja merkitsee nykyisen ajan viimeisen räpäytyksen ajaksi. Tallennettua aikaa voidaan myöhemmin käyttää ylimääräisten räpäytysten pois suodattamiseen.

Algoritmi 1 Artefakti-pakettiin reagoiminen

Syöte Musen artefakti-paketti

Tulos Ei palauta mitään

```
1: void receive_muse_artifact_packet(const MuseArtifactPacket & packet) {
2:     if (packet.blink) {
3:         __int64 now = getCurrentTime();
4:         __int64 difference = now - lastBlink;
5:         __int64 difference2 = now - lastDirectionChange;
6:
7:         if (difference > 500 && difference < 2000 && difference2 > 2000) {
8:             direction = direction > 3 ? 0 : direction + 1;
9:             lastDirectionChange = now;
10:        }
11:
12:        lastBlink = getCurrentTime();
13:    }
14: }
```

Toinen tärkeistä algoritmeista on keskiarvon laskeminen (algoritmi 2). Keskiarvon laskeminen saa syötteenä puskuritaulukon, joka sisältää kuusi EEG-pannalta saatua gamma-arvoa. Silmukan avulla, saadut arvot summataan ja lopuksi saatu tulos jaetaan

gamma-arvojen määrällä. Keskiarvo käännetään vielä ympäri, jotta saadaan ihmiselle helpommin tulkittavissa oleva arvo. Panta laskee alun perin arvot siten, että mitä lähempänä nollaa arvo on, sitä parempi keskittyminen henkilöllä on. BCIController kääntää arvon siten, että arvo 1 on suurin keskittyminen, koska silloin arvon tulkitseminen on intuitiivisempaa.

Algoritmi 2 Keskiarvon laskeminen

Syöte puskuri, joka sisältää 6 gamma-arvoa

Tulos laskettu keskiarvo

```
1: double calculateAverage(double buffer[6]) {
2:     double sum = 0.0;
3:     for (int i = 0; i < 6; i++) {
4:         sum += buffer[i];
5:     }
6:
7:     double avg = 1.0 - (sum / 6.0);
8:     return avg;
9: }
```

Kolmas tärkeistä algoritmeista on käyttöliittymän päivittäminen (algoritmi 3). Aluksi algoritmi ottaa talteen nykyisen kellonajan. Kyseistä aikaa käytetään käyttöliittymän päivityksen aloittamisen säätämiseen. Järjestelmä antaa käyttäjälle ja EEG-pannalle kymmenen sekuntia aikaa säätää asetukset kuntoon ja signaalin tasaantua ennen kuin käyttöliittymän päivittäminen aloitetaan. Toinen säätämiseen käytetty menetelmä on datan muuttuneisuuden tarkistaminen. Jos data ei ole muuttunut, käyttöliittymää ei ole tarvetta päivittää. Jos käyttöliittymän päivittämiselle on tarvetta, algoritmi laskee ensin keskiarvon. Sen jälkeen algoritmi vaihtaa kursorin väriä vastaamaan suuntaa johon liikutaan, jos liikkumisen suunta on vaihtunut. Lopulta tarkistetaan, onko keskiarvo riittävän suuri liikkumiselle. Jos on, kursoria liikutetaan valittuun suuntaan.

Algoritmi 3 Käyttöliittymän päivittäminen

Syöte ei syötettä

Tulos ei tulosta

```
1: void update_ui() {
2:     __int64 now = getCurrentTime();
3:
4:     if (model_.is_dirty()) {
5:         if (now - started > 10000) {
6:             double buffer[6] = { 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 };
7:             model_.get_buffer(buffer);
8:
9:             double avg = calculateAverage(buffer);
10:
11:             changeColorIfNecessary();
12:
13:             if (avg >= 0.85) {
14:                 move();
15:             }
16:         }
17:     }
18: }
```

4.4 Tutkimuksen eteneminen

Harjoitustehtävänä koehenkilöt aloittivat pantaan tutustumisen Musen valmiin meditointisovelluksen avulla. Sovelluksessa tehtävänä on pitää mieli mahdollisimman tyyneenä. Mielen tyyneys on visualisoitu sovelluksessa meren aaltoisuutena ja lintujen lauluna. Mitä rauhallisempi mieli käyttäjällä on, sitä tyyneempi meri on ja sitä enemmän linnut laulavat. Harjoitustehtävän suorittamiseen yhdellä koehenkilöllä meni aikaa kaksi minuuttia.

Kun käyttäjät olivat suorittaneet sovelluksen harjoitustehtävän kerran, he suorittivat varsinaisen tutkimustehtävän BCIController-ohjelmassa kolme kertaa (kuva 12). Yhden suorituskerran aikana koehenkilön tehtävänä oli saada kursori liikkumaan kerran ruudussa näkyvän neliön jokaiseen reunaan. Kuten testin alussa suoritettu harjoitustehtävä, myös varsinainen tutkimustehtävä mittasi keskittymiskykyä.



Kuva 12: Koehenkilö suorittamassa tehtävää.

Tutkimuksessa käytetyn kentän koko oli 600x600 pikseliä, jolloin testissä liikuttava kokonaismatka on 1200 pikseliä. Panta antaa 60 kertaa sekunnissa dataa ja liikkumista varten tarvittavan keskiarvon laskemiseen tarvitaan kuusi arvoa, jolloin piste liikkuu maksimissaan 10 kertaa sekunnissa. Kerrallaan piste liikkuu kaksi pikseliä, joten maksimissaan piste liikkuu 20 pikseliä sekunnissa. Suunnan vaihtamiseen kuluu kaksi sekuntia ja niitä tarvitsee tehdä testin aikana kolme eli suunnan vaihtamiseen kuluu optimaalisesti kuusi sekuntia. Tällöin optimaalisissa olosuhteissa testin pystyy suorittamaan yhden minuutin ja kuuden sekunnin aikana.

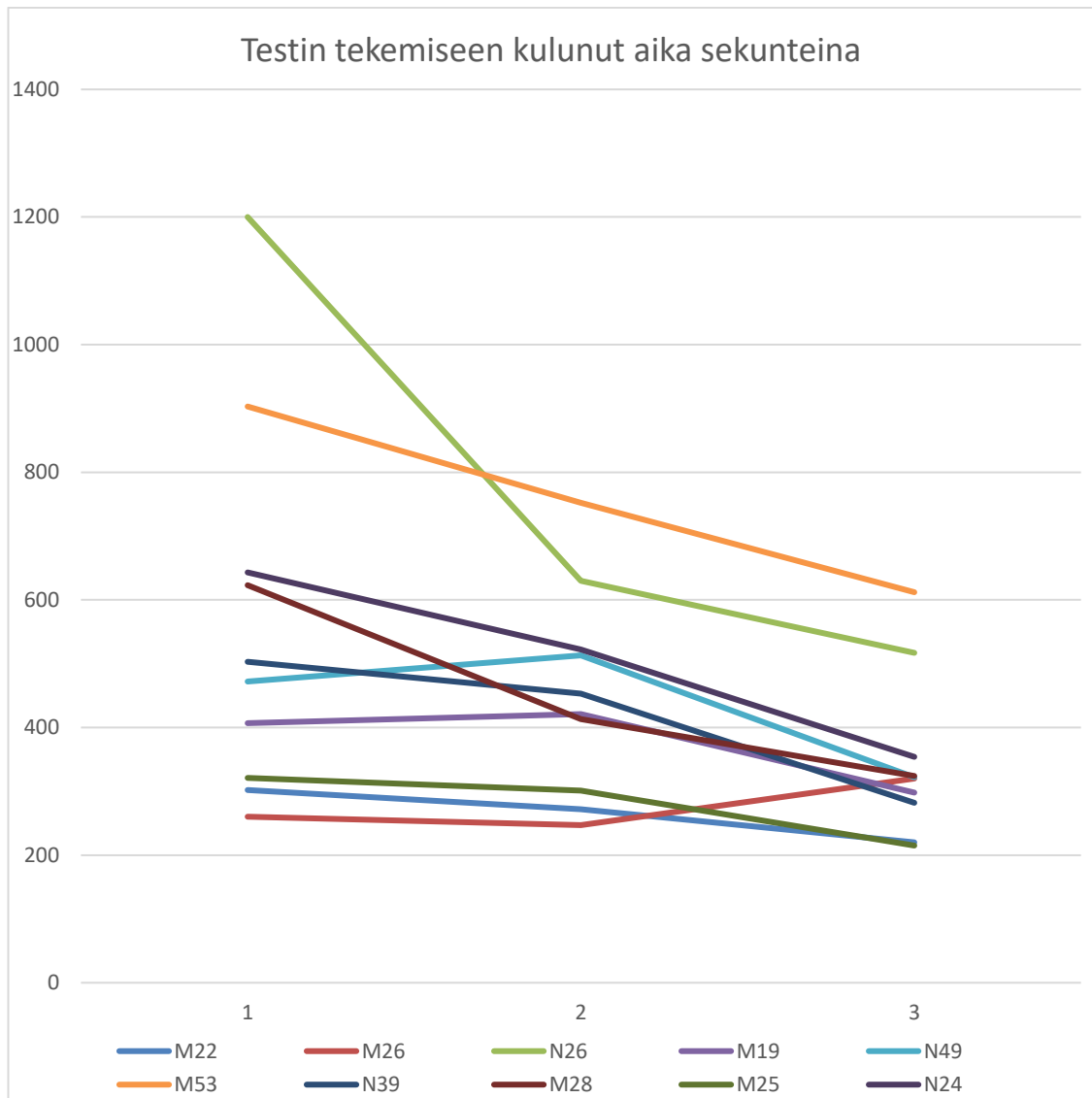
Koehenkilöt suorittivat kolme kertaa ohjelmalla tehtävän, jossa jokaiseen seinään piti osua kerran. Jokaisen harjoituskerran jälkeen pidettiin 10 minuutin tauko. Yhden suorituskerran maksimijaksi määriteltiin 20 minuuttiin. Suurin osa koehenkilöistä suoriutui jokaisesta kolmesta tehtävästä 10 minuutissa. Havaittavissa oli, että jokaisella suorituskerralla suurimmalla osalla koehenkilöistä tehtävästä suoriutuminen nopeutui. Tämä tulos osoittaa, että ohjelman käytössä harjoittelulla on merkittävä rooli, jotta ohjelmaa pystyisi käyttämään esimerkiksi kommunikointitarkoitukseen mahdollisimman tehokkaasti.

5 Tulokset

Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkasteltiin EEG-pohjaisten BCI-laitteiden soveltuvuutta kommunikoinnin apuvälineiden ohjaamiseen BCIController-ohjelman avulla. Tutkimukseen toteutettiin BCIController-niminen ohjelma, jossa tarkoituksena oli liikuttaa näytöllä olevaa pistettä keskittymisen avulla. Ohjelman toimivuutta testattiin kymmenen koehenkilön avulla.

Koehenkilöt olivat iältään 19–53-vuotiaita eikä heillä ollut todettu neurologisia sairauksia. Koehenkilöiden ikien mediaani oli 26 vuotta. Koehenkilöt eivät olleet aikaisemmin käyttäneet vastaavanlaista ohjelmaa. Kymmenestä koehenkilöistä 6 oli miehiä ja 4 oli naisia. Koehenkilöille tehtiin ennen tehtävän alkamista alkukysely, jossa selvitettiin koehenkilöiden taustatietoja, heidän aikaisempia kokemuksia BCI-laitteista sekä asenteita ja mielipiteitä BCI-laitteisiin. Tehtävän suorituksen jälkeen koehenkilöille tehtiin loppukysely, jossa selvitettiin koehenkilöiden mielipiteitä pinnan mukavuudesta, hyödyllisyydestä sekä käytettävyydestä.

Kuvasta 13 voidaan nähdä, että lähes kaikilla koehenkilöillä tulokset paranivat harjoituskertojen myötä. Yhdellä koehenkilöistä viimeisen kerran tulos oli heikompi kuin aikaisempien kertojen tulokset. Syyksi tähän koehenkilö arvioi itse, että hänen keskittymiskykynsä heikkeni tehtävästä aiheutuvan väsyneisyyden vuoksi. Yksi koehenkilöistä ei saanut tehtävää ensimmäisellä kierroksella suoritettua annetun aikarajan sisällä, jolloin hänen ensimmäinen suorituskerta merkittiin 20 minuutin pituiseksi.



Kuva 13: Käyristä voidaan nähdä, että lähes kaikkien koehenkilöiden tulokset paranivat harjoituskertojen edetessä. Pidempiaikaisen harjoittelun jälkeen tehtävän suorittamiseen kuluva aika voisi olla sillä tasolla, että pantaa voisi käyttää kommunikoinnin apuvälineenä.

Koehenkilöiden suorituskestoista muodostettiin taulukko, jossa suorituskesto on ilmaistu sekunteina (taulukko 2). Saaduista ajoista muodostettiin kaksi keskiarvoa, joista toisessa keskiarvo muodostettiin ensimmäisen suorituskeston ajoista ja toisessa viimeisen suorituskeston ajoista. Tästä voitiin tarkastella, oliko ajoissa tapahtunut muutosta ja jos oli, oliko ajoissa tapahtunut muutos positiivista vai negatiivista. Kaikkien koehenkilöiden alkuajojen keskiarvoksi saatiin 563,4 sekuntia eli 9 minuuttia 23 sekuntia ja loppuajojen keskiarvoksi saatiin 346,4 sekuntia eli 5 minuuttia 46 sekuntia. Näin ollen parannusta alkuajojen ja loppuajojen välille tuli 38,5 % eli noin 4 minuuttia.

Miesten suorituskesto oli 400,6 sekuntia eli 6 minuuttia 41 sekuntia ja naisten suorituskesto oli 534,3 sekuntia eli 8 minuuttia 55 sekuntia. Eroa miesten ja naisten suorituskesto välillä oli noin 2 minuuttia. Tämä ero mahdollisesti selittynee sillä, että naisten oli vaikeampi saada tarpeeksi kosketuspintaa pannan ja ihon väliin, sillä pitkät hiukset vaikuttivat sensoreiden toimivuuteen. Koehenkilöiden iällä ei vaikuttanut olevan vaikutusta tulokseen.

| | M22 | M26 | N26 | M19 | N49 | M53 | N39 | M28 | M25 | N24 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. kerta | 302 | 260 | 1200 | 407 | 472 | 903 | 503 | 623 | 321 | 643 |
| 2. kerta | 272 | 247 | 630 | 421 | 513 | 752 | 453 | 413 | 301 | 522 |
| 3. kerta | 220 | 320 | 517 | 298 | 322 | 612 | 282 | 324 | 215 | 354 |
| Keskiarvo | 264,8 | 275,7 | 782,3 | 375,3 | 435,7 | 755,7 | 412,7 | 453,3 | 279,0 | 506,3 |

Taulukko 2: Taulukon vaakasarakkeina ovat harjoituskertojen kesto sekunteina ja pystysarakkeina koehenkilöiden iät ja sukupuoli siten, että M tarkoittaa miestä ja N naista.

Alkukyselystä kävi ilmi, että kukaan koehenkilöistä ei ollut aiemmin käyttänyt BCI-laitteita, mutta kaksi heistä oli kuullut aikaisemmin niistä. Suurin osa koehenkilöistä

suhtautui pantaan myönteisesti. Koulutustaustaltaan koehenkilöt jakautuivat lukion tai ammattikoulun käyneisiin sekä alemman tai ylemmän korkeakoulututkinnon suorittaneisiin.

Loppukyselystä kävi ilmi, että suurin osa koehenkilöistä piti pantaan hyödyllisenä, mutta suurin osa koki pannan käyttämisen haasteelliseksi. Vaikeuksia tuottivat muun muassa silmälasit sekä hiusten paljous. Pannan mukavuudesta oli eriäviä mielipiteitä. Osan mielestä panta oli mukava käyttää, mutta osan mielestä koettiin epämukavaksi, sillä se koettiin liian tiukaksi. Epämukavaksi pannan kokivat erityisesti ne, joilla ohjelman hallintaa haittasivat hiukset tai silmälasit. Tällöin pantaakin piti säätää tiukemmalle, jotta pannan anturit saivat tarpeeksi kosketuspintaa ihoon. Tämä saattoi vaikuttaa koehenkilöiden kokemukseen pannan mukavuudesta.

6 Pohdinta

EEG-pohjaisten BCI-laitteiden käyttäminen kommunikoinnin apuvälineenä tuo lisää vaihtoehtoja perinteisten vaihtoehtoisten kommunikointikeinojen rinnalle. Teknologian kehittyminen on mahdollistanut myös silmänliikesensorien käyttämisen kommunikointiin, mutta sen käyttämisessä ovat myös omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Kommunikoinnin apuvälinettä valittaessa on myös otettava huomioon jokaisen tarvitsijan omat yksilölliset tarpeet sekä se, mitä apuvälineen käyttäjä itse haluaa.

Tässä tutkimuksessa käytetyn Muse-pannan yksi suurimmista hyödyistä on se, että se ei vaadi kallon sisäisiä sensoreita. Lisäksi Muse-pannan avulla on mahdollista käyttää laitteita ilman fyysistä kosketusta. Tällaisen EEG-pannan käyttäminen soveltuu erityisesti sellaisille henkilöille, jotka ovat halvaantuneet eivätkä pysty kommunikoimaan perinteisten apuvälineiden, kuten kommunikointitaulusta tai kommunikointikansiosta osoittamisen, avulla. Kommunikoinnin lisäksi toinen käyttösovellus tämän tyyppisille käyttöliittymille, jotka mahdollistavat käsien vapautumisen, voisi olla esimerkiksi rakennusalalla, jossa henkilö voisi tehdä käsillään muita töitä samalla kun hän käyttää laitetta pinnan avulla. Pinnan toiminta kuitenkin vaatii vielä paljon kehittämistä, jotta sitä pystyttäisiin hyödyntämään tehokkaasti ja tarkasti.

Vaikka EEG-pannassa on paljon etuja, siinä on myös omat heikkoutensa. Muse-pannan toimintaa häiritsivät testitilanteessa pitkät hiukset, silmälasit sekä lihasten aktiivisuus. Vastaavanlaisia ongelmia on kaikissa ei-invasiivisissa EEG-pannoissa, koska aivosähkökäyrää on vaikea lukea ihon, lihasten ja kallon läpi (Zhu, Bieger, Molina & Aarts, 2010). Tämä vaikeuttaa pinnan käyttöä kommunikointiin, sillä panta on saatava asetettua niin, että mikään ei häiritse sensoreita. Esimerkiksi, jos henkilöllä on silmälasit, panta ei välttämättä saa asetettua kunnolla ilman silmälasien pois ottamista. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että kaksi pinnan sensoreista sijaitsee korvien takana samassa kohtaa silmälasien sankojen kanssa. Pitkien hiuksien ja silmälasien lisäksi yksi hankaloittava tekijä on lihasten aktiivisuus. Pinnan käyttäminen vaatii käyttäjää

olemaan paikallaan, jotta keskittymistaso säilyisi oikeanlaisena. Tämä on rajoittava tekijä, koska joihinkin neurologisiin sairauksiin liittyy oireena pakkoliikkeitä. Pannan sensorit häiriintyvät lihasten aktiivisuudesta, jolloin pannan käyttö tällaiselle henkilölle olisi käytännössä mahdotonta.

Muse-pannan käyttäminen vaatii paljon keskittymistä. Jos keskittyminen häiriintyy hetkellisestikin, esimerkiksi lihaksen liikkeen, ympäristöstä tulevan äänen tai muun häiriötekijän takia, pisteen kontrollointi vaikeutuu. Keskittyminen onnistuu parhaiten silloin, kun ulkopuolisia häiriötekijöitä ei ole, mutta todellisuudessa tällaisia ei pystytä välttämään. Tekoälyllä voisi suodattaa virheellisiä signaaleja, mutta se vaatisi paljon prosessointitehoa.

Yhtenä huonona puolena testitilanteessa oli myös kursorin liian hidas nopeus. Pisteen siirtyminen keskeltä reunaan kestää useita sekunteja, jolloin myös kommunikointi sen avulla kestäisi todella kauan. Pisteen nopeuden lisääminen vähentäisi tätä ongelmaa, mutta nopeus saattaisi vaikeuttaa pisteen kontrollointia. Jo nyt pisteen kontrollointi vaatii paljon harjoittelua ja silti vain pelkkä seinään osuminen kestää useita minutteja.

Kommunikoinnin apuvälineen vaatimusten lisäksi on otettava huomioon, että laite ei välttämättä aina toimi. Vaikka teknologiaa hyödynnetään nykyään kommunikoinnissa, ei ole takeita sen toimivuudesta kaikkialla ja koko ajan. Toisaalta tietokoneen kanssa kommunikointi auttaa ihmistä itsenäisempään kommunikointiin sekä mahdollistaa laajemman kommunikoinnin kuin esimerkiksi pelkät manuaaliset kommunikointikansiot. Moniammatillista yhteistyötä IT-asiantuntijoiden ja puheterapeuttien välillä tarvitaan, jotta saataisiin kehitettyä sellaisia välineitä, jotka vastaisivat mahdollisimman hyvin kommunikoinnin apuvälineitä käyttävien henkilöiden tarpeisiin.

Tutkimusta voisi jatkaa kehittämällä ohjelmaa enemmän käytännöllisemmäksi, esimerkiksi siten, että pyritään poistamaan enemmän häiriötekijöiden vaikutusta. Tähän tarkoitukseen voisi kouluttaa tekoälyn. Koska tarkoituksena olisi saada pannasta kommunikoinnin apuväline, ohjelmaa voisi myös testata enemmän kommunikoinnin apuvälinettä muistuttavalla testiohjelmalla, esimerkiksi laittamalla aakkoston taustalle.

Tällöin koehenkilöiden tehtävä olisi kirjoittaa EEG-pannan avulla esimerkiksi oma nimensä tai jokin lause. Tässä tutkielmassa tutkittiin EEG-pannan toimivuutta henkilöillä, joilla ei ollut neurologista sairautta. Jotta saataisiin enemmän tutkimustietoa siitä, miten ohjelmaa pitäisi kehittää, olisi koehenkilöiksi hyvä valita sellaisia, jotka EEG-pantaa myös tarvitsisivat.

Lähdeluettelo

Amores, J., Benavides, X. & Maes, P. (2016). PsychicVR: Increasing mindfulness by using Virtual Reality and Brain Computer Interfaces. *Human Factors in Computing Systems (2-2)*. ACM.

Auroran kotisivut, <https://sleepwithaurora.com/aurora>. Vierailtu: 24.2.2017.

Badcock, N. A., Mousikou, P., Mahajan, Y., de Lissa, P., Thie, J. & McArthur, G. (2013). Validation of the Emotiv EPOC® EEG gaming system for measuring research quality auditory ERPs. *PeerJ*, 1(38).

Başar, E., Başar-Eroglu, C., Karakaş, S. & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, 39(2), 241–248.

Bera, T. (2015). Noninvasive electromagnetic methods for brain monitoring: a technical review. Teoksessa A. Hassanien & A. Azar (toim.) *Brain-Computer Interfaces: Current trends and applications*, (51–95). Berliini: Springer International Publishing.

Cervenka, M. C., Nagle, S. & Boatman-Reich, D. (2011). Cortical high-gamma responses in auditory processing. *American Journal of Audiology*, 20(2), 171–180.

Chaudhary, U., Xia, B., Silvoni, S., Cohen, L. G. & Birbaumer, N. (2017). Brain–Computer Interface–Based Communication in the Completely Locked-In State. *PLoS Biology*, 15(1).

Ekandem, J. I., Davis, T. A., Alvarez, I., James, M. T. & Gilbert, J. E. (2012). Evaluating the ergonomics of BCI devices for research and experimentation. *Ergonomics*, 55(5), 592–598.

Emotivin kotisivut, <https://emotiv.com/>. Vierailtu: 24.2.2017.

Fouad, M., Amin, K., El-Bendary, N. & Hassanien, A. (2015). Brain computer interface: a review. Teoksessa A. Hassanien & A. Azar (toim.) *Brain-Computer Interfaces: Current trends and applications*, (3–30). Berliini: Springer International Publishing.

Frey, J. (2016). Comparison of a consumer grade EEG amplifier with medical grade equipment in BCI applications. *International BCI meeting*, (1–2).

Gerven, M. v., Farquhar, J., Schaefer, R., Vlek, R., Geuze, J., Nijholt, A., ... & Desain, P. (2009). The brain–computer interface cycle. *Journal of Neural Engineering*, 6.

Hiltunen, E., Holmberg, P., Jyväsjärvi, E., Kaikkonen, M., Lindblom-Ylänne, S., Nienstedt, W. & Wähälä, K. (2010). Galenos – Johdanto lääketieteen opintoihin. Hermosto. 201–236. Helsinki: WSOY.

Hwang, H. J., Kim, S., Choi, S. & Im, C. H. (2013). EEG-based brain-computer interfaces: a thorough literature survey. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 29(12), 814–826.

Iidal, Y., Tsutsumi, D., Saeki, S., Ootsuka, Y., Hashimoto, T. & Horie, R. (2017). The effect of immersive head mounted display on a brain computer interface game. *Advances in Affective and Pleasurable Design* (211–219). Berliini: Springer International Publishing.

Karydis, T., Aguiar, F., Foster, S. L. & Mershin, A. (2015). Self-calibrating protocols enhance wearable EEG diagnostics and consumer applications. *International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, 96. ACM.

Kaste, M., Hernesniemi, J., Kotila, M., Lepäntalo, M., Lindsberg, P., Palomäki, H., Roine, R. & Sivenius, J. (2006). Aivoverenkiertohäiriöt. Teoksessa S. Soinila, M. Kaste & H. Somer (toim.), *Neurologia* (271–331). Helsinki: Duodecim.

Leeb, R., Sagha, H., Chavarriaga, R. & Millan, J. D. (2011). A hybrid brain–computer interface based on the fusion of electroencephalographic and electromyographic activities. *Journal of Neural Engineering*, 8.

Leppäluoto, J., Kettunen, R., Rintamäki, H., Vakkuri, O., Vierimaa, H. & Lätti, S. (2013). *Anatomia ja fysiologia – Rakenteesta toimintaan. Hermoston rakenne ja autonominen hermosto*. (381–411). Helsinki: Sanoma Pro.

- Leuthardt, E. C., Schalk, G., Roland, J., Rouse, A. & Moran, D. W. (2009). Evolution of brain–computer interfaces: Going beyond classic motor physiology. *Neurosurg Focus*, 27.
- Li, Y., Guan, C., Li, H. & Chin, Z. (2008). A self-training semi-supervised SVM algorithm and its application in an EEG-based brain computer interface speller system. *Pattern Recognition Letters*, 29(9), 1285–1294.
- Li, Z., Xu, J. & Zhu, T. (2015). Recognition of Brain Waves of Left and Right Hand Movement Imagery with Portable Electroencephalographs. ArXiv, 1–13.
- Lodish, H. & Zipursky, S. L. (2001). Molecular cell biology. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 29, 126–133.
- Maddox, M. M., Lopez, A., Mandava, S. H., Boonjindasup, A., Viriyasiripong, S., Silberstein, J. L. & Lee, B. R. (2015). Electroencephalographic Monitoring of Brain Wave Activity During Laparoscopic Surgical Simulation to Measure Surgeon Concentration and Stress: Can the Student Become the Master? *Journal of Endourology*, 29(12), 1329–1333.
- Materka, A. & Poryzala, P. (2013). High-speed noninvasive brain-computer interfaces. Human System Interaction (HSI), 2013 The 6th International Conference on (7–12).
- McFarland, D. J., Krusienski, D. J., Sarnacki, W. A. & Wolpaw, J. R. (2008). Emulation of computer mouse control with a noninvasive brain–computer interface. *Journal of Neural Engineering*, 5(2), 101.
- Musen kotisivut, <http://www.choosemuse.com/>. Vierailtu: 24.2.2017.
- Navalyal, G. U. & Gavas, R. D. (2014). A dynamic attention assessment and enhancement tool using computer graphics. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 4(1), 1.
- NeuroSkyn kotisivut, <http://neurosky.com/>. Vierailtu: 24.2.2017.
- OpenBCI:n kotisivut, <http://openbci.com/>. Vierailtu: 24.2.2017.

Pfurtscheller, G., Flotzinger, D. & Kalcher, J. (1993). Brain-computer interface—a new communication device for handicapped persons. *Journal of Microcomputer Applications*, 16(3), 293–299.

Rinne, T., Salmi, J., Degerman, A. & Alho, K. (2006). Toiminnallinen magneettiresonanssikuvaus. Teoksessa H. Hämäläinen, M. Laine, O. Aaltonen & A. Revonsuo (toim.), *Mieli ja aivot: Kognitiivisen neurotieteen oppikirja*, (125–129) Turun yliopisto: Kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus.

Roy, R., Mahadevappa, M. & Kumar, C. S. (2016). Trajectory Path Planning of EEG Controlled Robotic Arm Using GA. *Procedia Computer Science*, 84, 147–151.

Soinila, S. (2006). Kliininen neuroanatomia. Teoksessa S. Soinila, M. Kaste & H. Somer (toim.), *Neurologia*. 12–50. Helsinki: Duodecim.

Schalk, G., McFarland, D. J., Hinterberger, T., Birbaumer, N. & Wolpaw, J. R. (2004). BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 51(6), 1034–1043.

Vitikainen, A-M. & Kähkönen, S. (2006). Transkraniaalinen magneettiresonanssistimulaatio. Teoksessa H. Hämäläinen, M. Laine, O. Aaltonen & A. Revonsuo (toim.), *Mieli ja aivot: Kognitiivisen neurotieteen oppikirja*, (130–136) Turun yliopisto: Kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus.

Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G. & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767–791.

Wolpaw, J. R. (2010). Brain-computer interface research comes of age: traditional assumptions meet emerging realities. *Journal of Motor Behavior*, 42(6), 351–353.

Zarei, S., Carr, K., Reiley, L., Diaz, K., Guerra, O., Altamirano, P. F., ... & Chinea, A. (2015). A comprehensive review of amyotrophic lateral sclerosis. *Surgical neurology international*, 6.

Zhu, D., Bieger, J., Garcia Molina, G. & Aarts, R. M. (2010). A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2010.

Litteet

1 Ennakkolomake

Sukupuolesi

- Mies
- Nainen

Ikäsi

Koulutustaustasi

- Peruskoulu
- Ammattikoulu/Lukio
- Alempi korkeakoulututkinto
- Ylempi korkeakoulututkinto

Onko sinulla aikaisempia kokemuksia BCI-laitteista?

- Kyllä
- Ei

Millaisia kokemuksia/mielikuvia sinulla on BCI-laitteista?

2 Loppulomake

Miten helppoa järjestelmän käyttö mielestäsi oli? (1=todella vaikeaa, 10=todella helppoa)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|

Miten mukava panta oli pitää? (1=todella epämukava, 10=todella mukava)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|

Voitko kuvitella, että pannasta olisi hyötyä apuvälineenä?

| |
|--|
| |
|--|

Mihin pantaa voisi mielestäsi käyttää?

| |
|--|
| |
|--|

Miten arvioisit pannan totelleen käskyjäsi? (1=todella huonosti, 10=todella hyvin)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|