

Tatu Pesonen

BRAIN-COMPUTER INTERFACE- TEKNOLOGIAN ARKIPÄIVÄISET SOVELLUSKOHTEET

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
syyskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Tatu Pesonen: Brain-Computer Interface-Teknologian Arkipäiväiset Sovelluskohteet
Kandidaattitutkielma
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
syyskuu 2023

Tämän tutkielman tarkoituksena on antaa lukijalle yleiskuva Brain-Computer Interface (BCI) -laitteiden sovelluskohteista arkipäiväisessä käytössä ja selvittää millaisia sovelluskohteita BCI-laitteille on olemassa. Tutkielmassa selvitin BCI-laitteiden sovelluskohteita ja näille sovelluskohteille sopivia teknologioita kirjallisuuskatsauksen keinoin. Aineistoa on haettu aihepiirille sopivilta julkaisutietokannoilta ja aineiston ikähaarukka on 2010-luvulta tähän päivään eli käytetty aineisto on suhteellisen tuoretta.

Brain-Computer Interface tarkoittaa teknologiaa, jolla aivoista kaapattuja signaaleja voidaan tulkita komennoiksi tietokoneelle. Tämä signaalien tulkinta mahdollistaa esimerkiksi tietokoneen ohjaamisen ajatusten voimalla tai ohjelmiston toimimisen ajatusten jatkeena tehostamaan työskentelyä. Tutkielmassa löytämiäni BCI-laitteiden käyttökohteita olivat biometrinen tunnustautuminen, peli- ja viihdekäyttö, neuromarkkinointi ja älykkäät ympäristöt. Näihin käyttötarkoituksiin soveltuvia BCI-teknologioita ovat EEG ja NIRS. Tutkimuksen kohdistuessa arkipäiväisiin käyttökohteisiin, lääketieteelliset ja muut erikoiset käyttökohteet on jätetty vähemmälle huomiolle.

Työ jakautuu kolmeen osaan, joista ensimmäisessä käydään läpi BCI-laitteiden teknologioita ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia. Toisessa osassa käydään läpi löydettyjä käyttökohteita ja niiden mahdollisia vaikutuksia arkipäiväiseen elämään. Viimeinen osa on keskustelu osio, jossa pohdiskellaan teknisiä haasteita, eettisiä kysymyksiä ja mahdollisia tulevaisuuden kehityskohteita BCI-teknologialle. Tutkimuksen tuloksena on löydetty potentiaalisia käyttökohteita BCI-teknologialle, mutta samalla myös todettu, että BCI-teknologia on vielä kehityksen alla, eikä vielä toistaiseksi välttämättä sovellu arkipäiväiseen käyttöön.

Avainsanat: Brain-Computer Interface, BCI, sovellukset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Sisällysluettelo

1. Johdanto	1
2. Tutkimusmenetelmä	1
3. BCI-teknologiat	2
3.1. EEG	2
3.2. NIRS	3
3.3. fMRI	3
3.4. MEG	4
3.5. Invasiiviset teknologiat	4
4. Käyttökohteet	5
4.1. Biometrinen tunnistautuminen	5
4.2. Viihde- ja pelikäyttö	7
4.3. Neuromarkkinointi	8
4.4. Älykkäät ympäristöt	9
5. Keskustelu	9
6. Yhteenveto	12
Lähteet	14

1. JOHDANTO

Brain-Computer Interface (BCI) laitteet ovat laitteita, jotka lukevat aivoissa tapahtuvia muutoksia tai sähköisiä signaaleja, analysoivat niitä ja muuttavat ne tietokoneen ymmärtämiksi komennoiksi. BCI laitteilla on monenlaisia käyttökohteita etenkin lääketieteellisessä käytössä, mutta tämän tutkielman tavoitteena on kuitenkin tutustua ei-lääketieteellisiin käyttökohteisiin. Tällaisia niin kutsuttuja arkipäiväisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi biometrinen tunnustautuminen ja peli/viihdekäyttö. (Sumithra, M. G et al. 2023)

Ensimmäiset jäljet BCI teknologiasta on lähtöisin 1920-luvulta, jolloin onnistuttiin ensimmäisen kerran tallentamaan aivotoimintaa EEG-tekniikan avulla, mutta vasta 1970-luvulla BCI teknologiaa alettiin tutkia neuroproteeseja varten ja 1990-luvulla tällaisia proteeseja saatiin implementoitua ihmisiin. Vodaankin siis sanoa, että BCI teknologiaa on tutkittu lääketieteen alalla jo pitkään, mutta arkipäiväisessä käytössä se on vielä melko uutta ja tuntematonta teknologiaa. (Sumithra, M. G et al. 2023)

Vaikka BCI-laitteet eivät toistaiseksi ole osa arkipäiväistä elämää, ne osoittavat potentiaalia niin hyöty kuin viihdekäytönkin osalta ja haluan luoda ymmärrettävän yleiskuvan siitä, mitä BCI-laitteet ovat ja mitä niillä voi tehdä. Lisäksi pohdin, millaisia teknisiä haasteita BCI-laitteiden käyttöön liittyy, mitä eettisiä ongelmia niihin liittyy ja millaisiin tarkoituksiin niitä voisi käyttää tulevaisuudessa.

Tämän tutkielman tavoitteena on selvittää, millaista BCI-teknologiaa on olemassa ja millaisia käyttökohteita BCI-teknologialla on arkipäiväisessä käytössä ja pohtia miten tätä teknologiaa voisi hyödyntää lähitulevaisuudessa. Tutkielman luvussa 2 kerrotaan tutkimusmenetelmästä. Luvussa 3 esitellään aiheeseen soveltuvia BCI-teknologioita. Luvussa 4 tutkitaan BCI-laitteiden käyttökohteita. Luvussa 5 käydään läpi pohdiskeluja tutkielman aiheista ja tutkielmasta yleisesti. Luvussa 6 on tutkielman yhteenveto.

2. TUTKIMUSMENETELMÄ

Tässä tutkimuksessa toteutan katsauksen Brain-Computer Interface laitteiden käyttökohteisiin kirjallisuuskatsauksen muodossa. Tutkielman tavoite on selvittää, millaisia arkipäiväisiä käyttökohteita Brain-Computer Interface laitteille on olemassa ja miten ne mahdollisesti vaikuttavat tavallisten ihmisten vuorovaikutukseen tietokoneiden kanssa.

Aineistona hyödynnän aihepiiriin liittyviä muiden alan toimijoiden kirjoittamia kirjoja, artikkeleita ja konferenssijulkaisuja, jotka käsittelevät aihetta vaihtelevista näkökulmista. Teoksia on haettu eri tietokantoja hyödyntäen, joista eniten on käytetty Tampereen yliopiston Andor hakupalvelua ja ACM Digital Library -tietokantaa. Näistä kahdesta edellä mainitusta tietokannasta Andor on yleinen tietokanta, josta löytyy useamman eri aihepiirin teoksia, kun taas ACM Digital Library on suuntaukseltaan enemmän tietotekniikkaan erikoistuva tietokanta. Aineistohakua toteutin hakusanoilla ”Brain-Computer Interface”, biometrics, entertainment ja neuromarketing.

3. BCI-TEKNOLOGIAT

BCI-laitteissa käytetty teknologia voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, invasiivisiin ja ei invasiivisiin teknologioihin. Invasiivisella teknologialla tarkoitetaan teknologiaa, jossa aivosignaaleja kaappaava laite asennetaan aivokuoren alle kirurgisia toimenpiteitä käyttäen ja ei invasiivinen teknologia puolestaan tarkoittaa teknologiaa ei vaadi kirurgisia toimenpiteitä, vaan aivosignaalit kaapataan aivokuoren ulkopuolelta. Koska tämän tutkielman tarkoitus on tutkia BCI-laitteiden käyttökohteita arkipäiväisessä käytössä, tutkielman pääpainona ovat ei invasiivista teknologiaa hyödyntävät BCI-laitteet. Ei invasiivisia teknologioita on neljää erilaista EEG, MEG, fMRI ja NIRS. Näistä neljästä eri teknologiasta MEG ja fMRI soveltuvat vain lääketieteelliseen käyttöön suuren kokonsa ja häiriöalttiutensa puolesta. Puolestaan EEG ja NIRS soveltuvat pienen kokonsa puolesta myös kotikäyttöön. (Sumithra, M. G et al. 2023)

3.1. EEG

EEG (Electroencephalogram) on signaalin kaappausmetodi, jossa aivojen tuottamia sähköisiä signaaleja kaapataan päänahkaan kiinnitetyillä elektrodeilla. EEG:ssä käytettyjä elektrodeja on neljää eri tyyppiä: Perinteiset märät elektrodit, kuivat elektrodit, passiiviset elektrodit ja aktiiviset

elektrodit. Perinteisillä märillä elektrodeilla signaalin laatu on parempi verrattuna kuiviin elektrodeihin, mutta ne vaativat enemmän ylläpitoa, ovat epämukavia käyttää eivätkä sovellu hyvin pitkäaikaiseen käyttöön. Kuivat elektrodit vaativat vähemmän ylläpitoa, mutta elektrodit on vaihdettava ajoittain ja voivat aiheuttaa lisäkustannuksia. (Sumithra, M. G et al. 2023)

EEG:n tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä elektrodien tyyppin lisäksi on esimerkiksi elektrodien määrä. Abdulkader, S. N. et al. kirjoittaman artikkelin mukaan elektrodeja voisi olla jopa 256 kappaletta ja määrän lisäksi on kehitetty kartta, jonka mukaan elektrodit tulisi asettaa paremman signaalin laadun saavuttamiseksi. EEG:llä on monia etuja muihin BCI-tekniikoihin verrattuna, kuten Kannettavuus, suuri tarkkuus ja helppokäyttöisyys, joiden vuoksi sitä pidetään tällä hetkellä parhaimpana vaihtoehtona kaupallisille BCI-laitteille. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

3.2. NIRS

NIRS (Near-Infrared Spectroscopy) on signaalin kaappaus metodi, jolla mitataan otsalohkon aivokuoren toimintaa lyhytaaltoisella infrapunavalolla. Tällä metodilla mitataan aivokuoren happi ja hemoglobiini tasoja valon absorboinnin perusteella, josta voidaan päätellä otsalohkon aktiivisuutta. (Sumithra, M. G et al. 2023)

NIRS-laitteet ovat pienikokoisia ja helppokäyttöisiä, mutta kyseisen teknologian signaalin luokkyky rajoittuu otsalohkon alueelle, joten se on vähemmän tehokas ratkaisu verrattuna EEG pohjaisiin laitteisiin. NIRS-laitteita kuitenkin pidetään helppokäyttöisenä ja edullisena vaihtoehtona lääketieteellisiin tutkimuksiin ja jopa käytännöllisiin sovelluksiin. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

3.3. FMRI

fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging) on aivojen kuvantamismetodi, jolla voidaan havaita aivotoimintaa veren virtauksen muutoksiin perustuen. fMRI:n toiminta perustuu veren happipitoisuuksista riippuvaan kontrastiin eli laite havaitsee happipitoisuuden muutoksia. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

fMRI-laitteet on kookkaita ja niitä käytetään yleensä sairaaloissa aivojen kuvantamiseen. Sen etuja ovat kyky havaita aivotoimintaa myös aivojen sisemmistä osista, jonne muilla sähköisyyteen tai magneettisuuteen perustuvilla metodeilla ei kyetä mittaamaan. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

3.4. MEG

MEG (Magnetoencephalography) on signaalin kaappausmetodi, joka perustuu aivoissa esiintyvien sähköisten virtauksien tuottamien magneettikenttien havaitsemiseen. MEG-laitteet ovat erittäin häiriöalttiita ja niitä voidaan käyttää vain magneettisesti suojatuissa huoneissa. Lisäksi MEG-laitteet käyttävät suprajohtavia komponentteja, jonka vuoksi laitteisto tarvitsee nestemäistä heliumia saavuttaakseen toiminnallisen lämpötilan. MEG-laitteiden häiriöalttiuden ja haastavan ylläpidon vuoksi niitä käytetään lähinnä lääketieteellisessä tutkimuskäytössä. (Sumithra, M. G et al. 2023)

3.5. INVASIIVISET TEKNOLOGIAT

Invasiivisten BCI-teknologioiden ideana on saavuttaa parempi signaali aivoista tietokoneelle verrattuna ei-invasiivisiin metodeihin verrattuna asentamalla signaalin kaappauslaite aivokuoren alle. Invasiivisiä BCI-tekniikoita on kolmea erilaista: Intra-Cortical recording, ECoG (Electrocorticography) ja sEEG (Stereotactic electroencephalography). (Sumithra, M. G et al. 2023)

Intra-Cortical recording perustuu sähköisen potentiaalin mittaamiseen suoraan aivokuoren pinnalta. Sähköinen potentiaali voidaan mitata hermosolusta metallisella johtimella, koneistetuilla mikroelektrodeilla (micromachined microelectrodes) tai polymeerisilla mikroelektrodeilla. Tällä tavoin saadaan suurin mahdollinen resoluutio aivosignaalien kaappaamiseen, mutta pidempiaikaisessa käytössä on osoittautunut ongelmalliseksi. Esimerkiksi metallijohtimiin perustuvat implantit ovat herkkiä murtumaan ja ne alkavat syöpymään jopa kuukausia asentamisen jälkeen. Koneistetuilla mikroelektrodeilla on pyritty parantamaan kestävyyttä ja helpottamaan asennusprosessia, mutta myös ne ovat herkkiä murtumaan ja hajoavat ajan myötä. Polymeeriset elektrodit ovat puolestaan taipuisia eivätkä murru niin helposti, mutta niiden valmistaminen on kallista ja

asentaminen vaikeaa niiden monimutkaisen rakenteen vuoksi. (Sumithra, M. G et al. 2023) (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

ECoG on invasiivisista signaalinkaappaus metodeista vähemmän invasiivinen, mutta samaan aikaan sillä on invasiivisen teknologian hyötyjä, kuten parempi avaruudellinen resoluutio (spatial resolution), parempi signaalin vahvuus ja vähemmän häiriöalttiutta. Sen signaalin kaappaus perustuu aivokuoren päälle asetettavaan elektrodi verkkoon ja se tallentaa koskemansa alueen aivosolujen aktiivisuutta. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

sEEG perustuu samanlaiseen tekniikkaan kuin EEG, mutta siinä elektrodit työskentelevät pareittain mahdollistaen aivojen kolmiulotteisen mallintamisen ja on tunnetuista tekniikoista ainoa, jolla tällainen kolmiulotteinen signaalin kaappaus syvältä aivoista on mahdollista. Sumithra et al. kirjoittaman kirjan mukaan sEEG:n saama huomio BCI-laitteiden sovelluksissa on ollut vähäistä ja puolestaan Gholipour, T et al. kirjoittamassa artikkelissa todetaan, että sEEG:stä on viimeaikaisen teknologisen kehityksen kuten tietokoneavusteisen suunnittelun ja robottiaavusteisen sijoittelun vuoksi tullut paljon toteutuskelpoisempi tekniikka esimerkiksi epilepsian hoidon apuvälineenä.

Vaikka invasiivisillä teknologioilla saavutetaan suurempi tarkkuus signaalinkaappauksessa, niillä harvemmin on sovelluksia lääketieteellisen käytön ulkopuolella ja siksi ovat tämän tutkielman osalta hieman aiheen ulkopuolella, mutta tilanteessa, jossa henkilöllä olisi invasiivisin keinoin asennettu BCI-laite jo valmiina, sen kytkeminen myös arkipäiväisiin sovelluksiin olisi ainakin periaatteessa mahdollista olettaen, että kyseinen ratkaisu kykenee kaappaamaan signaaleja sovelluksen vaatimilta aivokuorialueilta.

4. KÄYTTÖKOHTEET

4.1. BIOMETRINEN TUNNUSTAUTUMINEN

Yksi BCI-laitteiden käyttökohteista on kognitiivinen biometrinen tunnistautuminen. Kognitiivinen biometrinen tunnistautuminen perustuu käyttäjän aivosignaalien tunnistamiseen ja sen sanotaan olevan mahdollisesti yksi turvallisimmista tunnistautumiskeinoista, sillä aivosignaaleja ei voi varastaa ja kognitiivista biometriikkaa on hyvin vaikea jäljitellä. (Sumithra, M. G et al. 2023)

Artikkelissa Multifactor Authentication System Using Simplified EEG Brain-Computer Interface on tutkittu yksinkertaisen EEG-laitteen käyttöä biometrisen tunnistautumisen välineenä. Tutkimuksessa on todettu, että yhden elektrodin EEG-laitteella on mahdollista saavuttaa jopa noin 78 prosentin toimintavarmuus käyttäen tutkimuksessa käytettyä tunnistautumisjärjestelmää, joten tällaisessa aivosignaalien biometrisessä tunnistautumisessa on huomattava määrä potentiaalia tietoturvallisten järjestelmien tunnistautumiskeinona. (Bialas, K., Kedziora, M., Chalupnik, R., & Song, H. H. 2022)

Myös konferenssijulkaisussa Multi-factor EEG-based user authentication käydään läpi EEG-pohjaisen biometrisen tunnistautumisen vahvuuksia ja mahdollisia toimintamalleja. Julkaisussa tunnistautumiskeinon vahvuuksiksi mainitaan neljä asiaa:

1. EEG-pohjainen tunnistautuminen perustuu käyttäjän mielessä suoritettavaan tehtävään, joten sitä ei voida tarkkailla.
2. EEG-signaaleja on erittäin vaikea matkia, sillä samanlaisista mielessä suoritettavista tehtävistä saatavat signaalit ovat käyttäjäkohtaisia.
3. Signaalien varastaminen on lähes mahdotonta, sillä aivotoiminta muuttuu herkästi stressin ja mielentilan muuttuessa, joten käyttäjää ei voida pakottaa tuottamaan samanlaisia signaaleja stressin alaisena.
4. EEG-signaalien tuottaminen vaatii elävän ihmisen.

Julkaisussa ei kuitenkaan mainita mahdollisia heikkouksia kyseiselle tunnistautumiskeinolle. Koska tunnistautuminen perustuu mielessä tapahtuvan tehtävän tekemiseen, itseäni jäi mietityttämään mahdolliset tilanteet, joissa tunnistautuminen epäonnistuu, koska ihmismieli toimii eri tavalla normaalin nähden, esimerkiksi masennuksen seurauksena. Konferenssijulkaisussa kuitenkin mainitaan, että lääkityksen, kahvin tai muiden aineiden nauttimisen ja erilaisten terveydentilojen vaikutuksia ei ole tutkittu kyseistä tutkimusta tehtäessä, mutta julkaisussa laitetaan vireille idea tunnistautumismetodin vahvistamisesta käyttäen EEG:llä kaapattua informaatiota esimerkiksi käyttäjän iästä ja sukupuolesta. (Pham, Tien et al. 2014)

4.2. VIIHDE- JA PELIKÄYTTÖ

BCI-laitteilla on myös potentiaalia viihde- ja pelikäytössä, esimerkiksi peleissä, joissa jotain pelin osaa voi hallita ajatusten voimalla. Sumithra, M. G et al. kirjassa yhtenä tällaisena pelinä mainitaan peli nimeltä Brain ball, jonka ideana on hallita palloa ajatusten voimalla mahdollisimman rentoutuneessa mielentilassa eli pelin voittaakseen pelaajan on hallittava stressitasoja ja rentouttava, mutta pelaajan täytyy myös keskittyä peliin. (Sumithra, M. G et al. 2023)

Toinen samankaltainen peli on Bonnet, L. et al. julkaisemassa artikkelissa esitetty Brain arena, joka on suunniteltu kahden pelaajan pelattavaksi ja jossa pelaajat ohjaavat jalkapallon tyylistä peliä ajattelemalla käsien liikkeitä. Pelissä on kolme erilaista pelitilaa: yksinpeli, yhteistyöpeli ja kaksintaistelu. Brain arena pelin tutkimuksessa on myös todettu, että BCI-laitteet soveltuvat myös useamman käyttäjän reaaliaikaisiin sovelluksiin. (Bonnet, L. N. et al. 2015)

BCI-laitteille kehitettyjä pelejä voidaan myös käyttää apuna opettamaan käyttäjälle BCI-laitteen käyttöä. Esimerkiksi MindGame niminen peli perustuu p300 Speller paradigmaan, jota käytetään locked in syndroomasta kärsivien potilaiden kanssa kommunikoimiseen. Pelin perustuminen samaan tekniikkaan tarkoittaa myös sitä, että peliä pelaamalla on myös helpompi oppia käyttämään myös p300 speller laitetta. Itse MindGame ei kuitenkaan ole sanoihin perustuva peli, vaan siinä ohjataan pelihahmoa shakkilautamaisella pelikentällä. Pelikentällä on myös satunnaisesti sijoitettuja puita ja pelaajan tavoite on käydä jokaisen puun luona ohjaamalla hahmoa BCI-laitetta käyttäen. (Finke, A. et al. 2009)

Myös VR (Virtual Reality) -ympäristöä voi hyödyntää BCI-laitteiden opetusympäristönä. Škola ja Liarokapis tutkivat motor imagery tekniikan käyttämistä VR ympäristössä. Motor imagery on Školan ja Liarokapisin mukaan yksi yleisimmin käytetyistä BCI-laitteiden ohjaustavoista. Sen ideana on se, että käyttäjä ajattelee kehon motorisia toimintoja ilman, että käyttäjä itse liikuttaa kehoa. Školan ja Liarokapisin suorittamassa tutkimuksessa koehenkilöitä koulutettiin käyttämään motor imageryyn perustuvaa BCI-järjestelmää VR ympäristössä, jossa koehenkilölle simuloitiin virtuaaliset kädet, joita koehenkilön piti oppia liikuttamaan. Tutkimuksessa verrattiin VR-ympäristössä tapahtuvaa oppimisprosessia perinteisempään Graz paradigmaan, jossa järjestelmä antaa ohjeet käyttäjälle symbolisesti. Školan ja Liarokapisin mukaan VR ympäristössä tapahtuva oppiminen on tehokkaampaa, sillä aivot omaksuvat simuloitujen kätien helpommin kuin symboliset ohjeet. (Škola, F., & Liarokapis, F. 2018)

Edellä mainitut pelit on kehitetty tutkimustarkoituksiin ja niitä on suunniteltu pelattavaksi käyttäen BCI-laitetta ainoana ohjaimena. Tutkimusta tehdessäni en kuitenkaan löytänyt sovellusta, jossa BCI-laitetta käytetään ohjaimena jonkin toisenlaisen ohjaimen lisäksi. Tämä on omasta mielestäni tutkimisen arvoinen asia, sillä EEG-signaalit ovat suhteellisen herkkiä erilaisille häiriöille, kuten esimerkiksi Parbez, R. M. S. et al. konferenssijulkaisussa on tutkittu silmienräpäyksien lukemista EEG-laitteella, blink fruity nimistä peliä hyödyntäen. Blink fruity pelissä pelaaja liikuttaa koria silmänräpäytyksillä ja yrittää kerätä pelikentällä olevia hedelmiä. (Parbez, R. M. S. et al. 2020)

Vaikka tutkimusympäristöistä löytyykin useita erilaisia pelejä, on oikean maailman vaatimukset hieman erilaiset. Kriittisiä näkökulmia esitetään esimerkiksi Cattan, G:n artikkelissa *The Use of Brain–Computer Interfaces in Games Is Not Ready for the General Public*. Cattanin mukaan BCI-laitteiden käyttämisessä pelikäytössä on kolme keskeistä ongelmaa: matalat tiedonsiirto nopeudet, materiaalien kustannukset ja pelisuunnittelun puute. Artikkelissa nostetaan pelisuunnittelun ja graafisten elementtien puute nostetaan yhdeksi keskeiseksi ongelmaksi, sillä niiden oleellisuus on Cattanin mukaan aliarvioitu tutkimustarkoituksiin kehitettyjen BCI-pelien kehityksessä. Esimerkiksi stimulaatio pohjaisessa BCI-pelissä pelin sulavuudella on artikkelin mukaan suuri vaikutus, sillä stimulaation on tapahduttava noin kahden millisekunnin tarkkuudella, jotta se tuntuisi pelaajalle sulavalta, siinä missä 50 Hz virkistystaajuudella päivittyvä kuva päivittyy 20 millisekunnin välein. Cattan antaa myös kritiikkiä siitä, että matalan virkistystaajuudesta johtuva värinä (jitter) on jätetty liian vähäiselle huomiolle BCI:hin perustuvassa viihteessä. (Cattan, G. 2021)

4.3. NEUROMARKKINOINTI

Neuromarkkinointi termillä tarkoitetaan markkinointi keinoa, jolla selvitetään mainosten ja tuotteiden kiinnostavuutta mittaamalla aivojen aktiivisuutta mainosten esittämishetkellä ja tällä tavoin päätellä, miten paljon kuluttaja on kiinnostunut tuotteesta tai miten hyvin kuluttaja muistaa mainoksen sisällön. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

Neuromarkkinoinnin keskeisenä ideana on seurata kuluttajan tunnetiloja ja päätöksen tekoon liittyviä signaaleja mainosten katselun aikana. Tyypillisesti tällaiseen seurantaan käytetään fMRI- tai EEG-laitteita. Stanton et al. mukaan neuromarkkinoinnissa käytetään tyypillisesti fMRI-laitteistoa, sillä fMRI:llä voidaan havaita etenkin päätöksen tekoon vaikuttavia signaaleja

tehokkaammin. Myös EEG on Stantoniet al. mukaan neuromarkkinoinnin sovelluksiin soveltuva tekniikka. EEG:n etuihin kuuluu laitteiston edullisuus, mutta se ei ole yhtä tarkka paikantamaan signaaleja verrattuna fMRI:hin. (Stanton, S. J. et al. 2017)

Neuromarkkinointi on kohdannut myös kritiikkiä sen eettisyydestä tutkimuskohteena. Eettisiä kysymyksiä on nostanut kysymykset esimerkiksi kuluttajien yksityisyydestä ja valintojen ennustettavuudesta. Stanton et al. mukaan pelkoa neuromarkkinointia kohtaan on herättänyt esimerkiksi se, että neuromarkkinointia hyödyntävät yritykset saavat liikaa tietoa kuluttajasta, jolloin kuluttajan valinnat muuttuvat liian ennustettaviksi ja kuluttajaa olisi helppo manipuloida ostamaan jotain tiettyä tuotetta. Stanton et al. mukaan neuromarkkinoinnin ala ei vielä toistaiseksi ole niin kehittynyttä, että tämän tasoinen kuluttajan ennustettavuus olisi mahdollista ja arvioi, että neuromarkkinointi ei tule saavuttamaan sellaista tasoa ikinä. (Stanton, S. J. et al. 2017)

4.4. ÄLYKKÄÄT YMPÄRISTÖT

BCI-laitteita voidaan hyödyntää myös älykkäissä ympäristöissä, esimerkiksi järjestelmä, joka tulkitsee käyttäjän mielentilaa ja säätelee asunnon lämpötilaa ja valaistusta sen mukaan. Toisin sanoen BCI-laitteita voidaan käyttää hallitsemaan Internet of Things (IoT) -laitteilla luotua älykästä ympäristöä. (Abdulkader, S. N. et al. 2015)

Lin, C.-T. et al. kirjottamassa artikkelissa on tutkittu EEG pohjaista automaattisen älykotijärjestelmän suorituskykyä ja verrattu sen ominaisuuksia muilla tekniikoilla toteutettuihin älykoti järjestelmiin. Tutkimuksessa käytetyn brain computer interface-based smart living environmental auto-adjustment control system (BSLEACS) -laitteen etuna on se, että se kykenee havaitsemaan käyttäjänsä kognitiivisen tilan ja säätämään ympäristöä sen mukaan. BSLEACS-laitteen muita etuja ovat artikkelin mukaan myös se, että älykotiin ei tarvitse asentaa erillisiä sensoreita havaitakseen käyttäjän liikkumista älykodin sisällä, mutta hyötyäkseen älykodin ominaisuuksia käyttäjän on pidettävä hiuspannan muotoista laitetta päässään. (Lin, C.-T. et al. 2014)

5. KESKUSTELU

BCI-laitteille on keksitty ainakin teoriassa monenlaisia käyttökohteita, mutta käytännössä asiat voivat olla toisin. Esimerkiksi Cattanin kirjoittamassa artikkelissa esitetään kriittisiä näkökulmia BCI-teknologian valmiuteen pelikäytössä. Vaikka artikkeli keskittyy pelikäytön ongelmiin, osa asioista vaikuttaa pätevästi yleisesti muidenkin käyttökohteiden kohdalla. (Cattan, G. 2021)

Yhtenä ongelmana mainitaan matala tiedonsiirto nopeus, jonka havainnollistamiseksi EEG:hen perustuvaa P300 kirjoitusjärjestelmää on verrattu pikakirjoituksen maailman ennätukseen. Vaikka P300 kirjoitusjärjestelmän vertaaminen maailmanennätyksen 360 sanaan minuutissa on ehkä hieman yliampuvaa, siitä huolimatta P300 järjestelmän yksi merkki parin sekunnin välein on huomattavan hidas tapa tuottaa tekstiä. (Cattan, G. 2021)

Koska BCI-laitteet yhdistävät aivot tietokoneisiin ja sitä kautta mahdollisesti internettiin, myös eettiset kysymykset nousevat pinnalle. Nykypäivän ohjelmistoista on vaikea nähdä päällepäin millaista koodia ohjelmisto ajaa taustalla, joten on hyvä myös pohtia mitä kaikkea BCI-laitteilla voi saada aikaan käyttäjän huomaamatta. Esimerkiksi aikaisemmin mainittu neuromarkkinointi voi saada yksityisyydestään kiinnostuneen käyttäjän huolestumaan ja herääkin kysymys siitä, mitä kaikkea BCI-laitteella voidaan päätellä käyttäjästä ja kuinka laajasti mahdollista tiedon keräämistä on mahdollista tehdä BCI-laitteeseen perustuvan tuotteen taustaprosessina. Tällainen taustaprosessi toimiva tiedonkerääminen olisi ainakin teoriassa mahdollista BCI-laitteeseen perustuvan älykkään ympäristön toteuttavan järjestelmän taustaprosessina, koska tällaisen järjestelmän ohjauslaite on jatkuvasti käyttäjän päässä ja ohjaimen BCI-laite voisi jatkuvasti seurata käyttäjän aivosignaaleja.

Eettisiä kysymyksiä on herättänyt myös BCI-teknologian kehitystyö etenkin invasiivisen teknologian eli pään sisäpuolelle kirurgisin menetelmin asennettavan teknologian osalta. Esimerkkinä eettisiä kysymyksiä pinnalle nostattaneesta BCI-laitteiden kehityksestä nousee pinnalle Elon Muskin omistama Neuralink niminen yritys, joka kehittää kaupallista invasiiviseen teknologiaan perustuvaa BCI-tuotetta ja joka sai hiljattain luvan suorittaa ihmiskokeita. Kritiikkiä yritys on saanut esimerkiksi Benzingerin sanomalehtiartikkelin mukaan eläinkokeiden aiheuttama kärsimys kokeissa käytettyjä apinoita kohtaan. Sanomalehtiartikkelin mukaan Elon Musk kieltää apinoiden kuolleen Neuralinkin kokeiden seurauksena, mutta sanomalehtiartikkelin mukaan apinat on jouduttu lopettamaan epäonnistuneiden kokeiden tuloksena. Etsiessäni lisää lähteitä kyseiselle

tapaukselle huomasi, että yliopiston Andor tietokannasta ei löytynyt muita lähteitä, jotka käsittelivät tätä kyseistä tapausta tai vastaavanlaisia tapauksia. (Benzinga.com 2023)

Neuralink on myös hiljattain saanut luvan Yhdysvaltojen FDA (Food and Drug Administration) järjestöltä suorittaa ihmiskokeita, minkä vuoksi eettisten kysymyksien vaikutus kasvaa. Jawad, A. J. nimisen tutkijan kirjoittamassa artikkelissa käydään läpi Neuralinkin kehitystyöhön liittyviä eettisiä kysymyksiä. Eettisinä kysymyksiä ovat Jawadin mukaan esimerkiksi terveys ja turvallisuus kysymykset sekä tietoturvaluottamus. Jawadin mukaan BCI-laitteita koskevat nykyiset terveys ja turvallisuus vaatimukset ovat puutteellisia ja niitä tulisi säätää ja luoda käyttäjien turvallisuuden takaamiseksi. Myös tietoturva nostetaan oleelliseksi huolenaiheeksi, sillä Jawadin mukaan Neuralinkin BCI-laite käyttää USB, Wi-Fi ja Bluetooth yhteyksiä, joihin hakkerit voisivat kohdistaa hyökkäyksiä, joten on tärkeää, että laitteen tietoturvasta pidetään riittävästi huolta. (Jawad, A. J. 2020)

Tutkimusta tehdessäni huomasi, että kaikki yleisesti tunnetut BCI-tekniikat ovat tarkoitettu tietojen lukemiseen aivoista, mutta tietojen syöttämisestä aivoihin tarkoitettua teknologiaa ei juuri vaikuta olevan. Aiheesta löytyy kuitenkin tutkimuksia tACS (Transcranial alternating current stimulation) teknologiaan liittyen, joka on ei-invasiivinen metodi, jolla voidaan vaikuttaa alueellisesti aivotoimintaan luomalla sähkökenttiä aivokuorelle. Evans, I. D. et al. kirjoittaman artikkelin mukaan aivokuoren stimuloimista sähköisin keinoin ja niistä syntyviä koehenkilön havaittavissa olevia valonväläyksiä eli phospheneja on tutkittu jo pitkään ensimmäisten havaintojen ollessa jopa 1755-luvulta lähtien, mutta toistaiseksi tutkimustyö phosphenien tuottamisesta tACS-tekniikalla ei ole vielä läheskään valmista. Evans, I. D. et al. suorittamassa tutkimuksessa tutkittiin erilaisten taajuuksien eroja phosphenien tuottamisessa. Tutkimuksessa koehenkilöt näkivät lähinnä valopisteitä, jotka taajuuden mukaan saattoivat kerääntyä jollekin tietylle näkökentän alueelle, mutta mitään selkeitä kuvioita ei kuitenkaan ollut havaittavissa. (Evans, I. D. et al. 2019)

Phosphenien tuottamiseen ja tACS-tekniikkaan liittyvät tutkimustyöt ovat mielestäni tärkeitä tutkimuskohteita BCI-teknologian kannalta, sillä onnistuneena teknologia mahdollistaisi ainakin kuvien syöttämisen suoraan aivoihin mahdollisesti parantaen BCI-laitteiden ja ihmisten välistä vuorovaikutusta tehden siitä saumattomampaa, esimerkiksi tACS-teknologialla voisi olla potentiaalia toimia informatiivisten järjestelmien HUD (Head Up Display) näyttönä tai jopa seuraavan sukupolven VR (Virtual Reality) järjestelmien visuaalisena komponenttina. Tällä hetkellä kuitenkin vaikuttaa siltä, että edellä mainitut visiot ovat vielä kaukana tulevaisuudessa, sillä kyseisestä teknologiasta ei

vielä ole tarpeeksi tietämystä, jotta sitä voisi hyödyntää käytännössä. Ei-invasiivisena teknologiana tACS tarjoaisi kuitenkin hyvän lähtökohdan myös arkipäiväisten BCI-laitteiden komponenttina, sillä se ei vaadi kirurgisia tai muita kehoa muuttavia toimenpiteitä toimiakseen, vaan käyttäjä voisi myös halutessaan itse poistaa laitteen käytöstä.

6. YHTEENVETO

Tämän tutkielman tavoitteena oli selvittää BCI-laitteiden mahdollisia arkipäiväisiä käyttökohteita. Tutkielmassa esiteltiin neljä ei-invasiivistä ja lyhyesti kolme invasiivistä BCI-teknologiaa sekä neljä erilaista käyttökohdetta kirjallisuustutkimuksen keinoin. Aluksi esiteltiin erilaisia BCI-teknologioita, joista arkipäiväisiin sovelluksiin soveltuvia olivat EEG ja NIRS, joista EEG vaikuttaa olevan huomattavasti suositumpi teknologia kattavamman signaalinkaappauskykynsä vuoksi. Seuraavaksi esiteltiin näiden teknologioiden mahdollisia käyttökohteita, joita olivat biometrinen tunnistautuminen, viihde- ja pelikäyttö, neuromarkkinointi ja älykkäät ympäristöt. Koska tutkielman tarkoitus oli selvittää BCI-laitteiden arkipäiväisiä käyttökohteita, lääketieteelliset sovellukset ja muut erikoistapaukset on jätetty vähemmälle huomiolle tässä tutkielmassa.

Jatkotutkimuksena tälle tutkielmalle voisi olla mielenkiintoista tutkia peli- ja viihdekäytön tai biometrisen tunnistautumisen osa-alueita tarkemmin. Peli- ja viihdekäyttö on itseäni kiinnostava osa-alue, sillä olen kiinnostunut videopeleistä ja BCI-laitteilla on potentiaalia olla immersiiivisempien virtuaalikokemusten komponenttina. Biometrisen tunnistautumisen sovelluksia puolestaan pidän hyödyllisenä tietoturvan näkökulmasta. BCI-teknologian käyttäminen biometrisenä tunnistautumisvälineenä tarjoaa potentiaalisen vaihtoehdon turvajärjestelmille, joita olisi erittäin vaikea murtaa.

BCI-teknologiaa ei toistaiseksi ole kovin laajassa käytössä, mutta ihmisten ja tietokoneiden välinen vuorovaikutus lisääntyy jatkuvasti teknologian kehittyessä. Ihmisten ja tietokoneiden välillä on useita erilaisia vuorovaikutustapoja kuten yleisimpinä näppäimistö ja hiiri tai kosketusnäyttö. BCI-teknologia kuitenkin osoittaa potentiaalia olla seuraavan sukupolven ihmisen ja tietokoneen välinen vuorovaikutustapa esimerkiksi BCI-laitteita voisi käyttää biometrisenä tunnistautumisvälineenä, älykodin kaukosäätimenä tai jopa peliohjaimena lähitulevaisuuden käyttökohteina, mutta toisaalta huomion arvoinen asia ei invasiivisistä BCI-laitteista, joihin tässä tutkielmassa keskityttiin,

on se, että näillä laitteilla pystyy toistaiseksi ainoastaan lukemaan tietoa aivoista, mutta ei syöttämään tietoa aivoihin, joten tietokoneiden ja ihmisten välinen saumaton vuorovaikutus on vielä kaukana tulevaisuudessa.

LÄHTEET

1. Abdulkader, S. N., Atia, A., & Mostafa, M.-S. M. (2015). *Brain computer interfacing: Applications and challenges*. Egyptian Informatics Journal, 16(2), 213–230.
<https://doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.002>
2. Benzinga.com (2023). *Elon Musk Questioned By Ethics Group Over Painful Deaths Of Monkeys Linked To Neuralink*. <https://www.benzinga.com> (Haettu 16.11.2023)
3. Bialas, K., Kedziora, M., Chalupnik, R., & Song, H. H. (2022). *Multifactor Authentication System Using Simplified EEG Brain-Computer Interface*. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 52(5), 1–10. <https://doi.org/10.1109/THMS.2022.3196142>
4. Bonnet, L., Lotte, F., & Lecuyer, A. (2013). *Two Brains, One Game: Design and Evaluation of a Multiuser BCI Video Game Based on Motor Imagery*. IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games., 5(2), 185–198.
<https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2012.2237173>
5. Cattan, G. (2021). *The Use of Brain-Computer Interfaces in Games Is Not Ready for the General Public*. Frontiers in Computer Science (Lausanne), 3.
<https://doi.org/10.3389/fcomp.2021.628773>
6. Evans, I. D., Palmisano, S., Loughran, S. P., Legros, A., & Croft, R. J. (2019). *Frequency-dependent and montage-based differences in phosphene perception thresholds via transcranial alternating current stimulation*. Bioelectromagnetics, 40(6), 365–374.
<https://doi.org/10.1002/bem.22209>
7. Finke, A., Lenhardt, A., & Ritter, H. (2009). *The MindGame: A P300-based brain-computer interface game*. Neural Networks, 22(9), 1329–1333.
<https://doi.org/10.1016/j.neunet.2009.07.003>
8. Gholipour, T., Koubeissi, M. Z., & Shields, D. C. (2020). *Stereotactic electroencephalography*. Clinical Neurology and Neurosurgery, 189, 105640–105640.
<https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2019.105640>
9. Jawad, A. J. (2020). *Engineering Ethics of Neuralink Brain Computer Interfaces Devices*. Annals of Bioethics & Clinical Applications, 4(1). <https://doi.org/10.23880/abca-16000160>
10. Lin, C.-T., Lin, B.-S., Lin, F.-C., & Chang, C.-J. (2014). *Brain Computer Interface-Based Smart Living Environmental Auto-Adjustment Control System in UPnP Home Networking*. IEEE Systems Journal, 8(2), 363–370. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2012.2192756>
11. Parbez, R. M. S., & Mamun, K. A. (2020). *BlinkFruity: A Real-Time EEG Based Neurofeedback Game for Brain-Computer Interface*. 2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology (ICAICT), 404–409.
<https://doi.org/10.1109/ICAICT51780.2020.9333469>

12. Pham, T., Ma, W., Tran, D., Nguyen, P., & Phung, D. (2014). *Multi-factor EEG-based user authentication*. 2014 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 4029–4034. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2014.6889569>
13. Škola, F., & Liarokapis, F. (2018). Embodied VR environment facilitates motor imagery brain–computer interface training. *Computers & Graphics*, 75, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.05.024>
14. Stanton, S. J., Sinnott-Armstrong, W., & Huettel, S. A. (2017). Neuromarketing: Ethical Implications of its Use and Potential Misuse. *Journal of Business Ethics*, 144(4), 799–811. <https://doi.org/10.1007/s10551-016-3059-0>
15. Sumithra, M. G., Dhanaraj, R. K., Milanova, M., Balusamy, B., & Venkatesan, C. (2023). *Brain-Computer Interface: Using Deep Learning Applications (1st ed.)*. John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781119857655>