

Ele- ja ohjainkäyttökokemus virtuaalitodellisuudessa

Jyri Mäkinen

Tampereen yliopisto

Viestintätieteiden tiedekunta

Human-Technology Interaction

Pro gradu -tutkielma

Ohjaaja: Roope Raisamo

Heinäkuu 2018

Tampereen yliopisto

Viestintätieteiden tiedekunta

Human-Technology interaction

Jyri Mäkinen: Ele- ja ohjainkäyttökokemus virtuaalitodellisuudessa

Pro gradu -tutkielma, 46 sivua

Heinäkuu 2018

Virtuaalitodellisuuden (VR) viimeaikainen yleistyminen on nostanut esille kysymyksiä myös uudenlaisista vuorovaikutustavoista. Käsielekäyttöliittymät tarjoavat potentiaalisesti intuitiivisen ja monipuolisen vuorovaikutustavan virtuaaliympäristöihin. Käsieleiden käytettävyyttä on kuitenkin tutkittu vasta vähän virtuaaliympäristössä. Tutkielmassa tarkastelen, miten elepohjainen käyttöliittymä ja ohjainkäyttöliittymä vaikuttavat käyttökokemukseen virtuaalitodellisuudessa. Käytettävyydestien pohjalta selvisi että perinteinen VR-ohjain on eleitä tarkempi ja nopeampi kappaleidenlajittelutehtävässä. Eleet tarjoavat kuitenkin luonnollisemman tavan käsitellä todellisen maailman esineitä. Käyttäjät arvioivat ohjaimet käytettävämmiksi kuin eleet. Testissä käytetyn Leap Motion Controller:n eleiden tunnistuksen epätarkkuus aiheutti testihenkilöille ongelmia erityisesti nopeutta ja tarkkuutta vaativassa tehtävässä. Eleiden tunnistuksen ongelmien ratkaiseminen on oleellista eleiden käytettävyyden kehittämisessä.

Avainsanat ja -sanonnat: virtuaalitodellisuus, eleet, käyttökokemus, käytettävyys, HTC Vive, Leap Motion Controller.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Kirjallisuuskatsaus	6
	2.1 Yleiskuva	6
	2.2 Virtuaalitodellisuus	6
	2.3 VR syötelaitteiden koko kirjo	11
	2.3.1 Virtuaalitodellisuuteen tarkoitettut ohjaimet	12
	2.3.2 Käsielekäyttöliittymät	12
	2.3.3 Muut syötelaitteet	13
	2.4 Virtuaalitodellisuussovellusten käyttökohteita	13
	2.5 Käytettävyys ja virtuaalitodellisuus	16
	2.6 Käytettävyyden arviointi	20
3	Testattavan järjestelmän toteutus	22
	3.1 Design	22
	3.2 Laitteisto	23
	3.3 Ohjelmisto	24
4	Käytettävyydestien toteutus	25
	4.1 Arviointimenetelmät	25
	4.2 Pilottitesti	25
	4.3 Päätesti	26
	4.3.1 Osallistujat	26
	4.3.2 Testin läpivienti	27
5	Tulokset	29
	5.1 Mittaustulokset	29
	5.2 Kyselylomakkeiden tulokset	33
	5.2.1 Testikysely	33
	5.2.2 System Usability Scale (SUS)	33
	5.3 Haastattelujen tulokset	34
	Pohdinta	37
	Johtopäätökset	41
	Lähteet	

1. Johdanto

“Virtuaalitodellisuus (VR) luotiin tyydyttämään ihmisen uteliaisuus tutkimusretkistä todellisuuden toiselle puolen.” (Bates-Brkljac 2012). Yhä useammilla on nykyään mahdollisuus ylittää todellisuuden rajat virtuaalitodellisuuden mahdollistavien laitteiden yleistyessä. Akateemisessa maailmassa virtuaalitodellisuuden ilmiöitä ja mahdollisuuksia on tutkittu jo pitkään, mutta teknologian rajoitteet ovat estäneet laitteiden yleistymisen. Nyt ensimmäistä kertaa on tarjolla laadukkaita laitteita lähes jokaisen ulottuvilla. Virtuaalilaseja on tarjolla niin pc-, konsoli- kuin mobiilipohjaisina. Halvimmillaan virtuaalitodellisuuden pääsee kokemaan Google Cardboard:n avulla vain muutamilla euroilla. VR-viihteen ympärille on alkanut kasvaa myös palveluita ja VR-pelejä pääsee kokemaan niille tarkoitettussa pelitiloissa.

Teknologian kehitys on mahdollistanut laadukkaiden ja saavutettavien laitteiden valmistuksen. Aiemmin virtuaalilasien käyttö aiheutti useilla pahoinvointia, mutta kehittynyt kuvantuotto- ja linssitekniikka on vähentänyt pahoinvoinnin yleisyyttä. Lisäksi laseja voi käyttää yhdellä istumalla pidempään. Lähitulevaisuuteen arvioidaan virtuaalitodellisuuslaitteiden ja -sovellusten suurta kasvua. Arviolta virtuaalitodellisuusmarkkinat tulevat kasvamaan jopa kymmenkertaisiksi seuraavassa neljässä vuodessa (IDC 2018).

Virtuaalitodellisuuden ohjainten ja muiden syötelaiteiden kirjo on laaja. Tällä hetkellä yleisimmät syötelaitteet lienevät eri valmistajien VR-ohjaimet kuten HTC Vive Controller tai Oculus Touch. Myös käyttäjän käsien tuominen osaksi virtuaalimaailmaa on mahdollista. Käsien liikkeen seuraamiseen tarkoitettu Leap Motion Controller on siirtynyt työpöydältä virtuaalilaseihin ja mahdollistanut vaivattoman eleiden seurannan. Käsien seuraamisen teknologia ei vaadi erityisen kalliita tai tilaavieviä komponentteja, joten tulevaisuudessa tämä teknologia saattaa olla osa virtuaalilaseja.

Suunnittelijalle VR-ympäristö eroaa huomattavasti muista käyttöympäristöistä. Virtuaaliympäristössä navigointi ja esineiden käsittely on toteutettava rikkomatta kokemusta virtuaalisesta maailmasta. Jotta voi suunnitella onnistuneen VR-ympäristön on ymmärrettävä, miten ihminen kokee virtuaalimaailman ja mitkä asiat vaikuttavat virtuaalimaailmaan uppoutumiseen. VR-tutkimusta on paljon tarjolla, mutta se on hyvin

erikoistunutta. Esimerkiksi käsieleisiin liittyvää tutkimusta on melko vähän. Lisäksi yleisten standardien luomisen haasteena on laaja sovelluskenttä.

Tässä tutkielmassa perehdyn ele ja ohjainkäyttöliittymiin virtuaalitodellisuudessa. Seuraavassa luvussa perehdyn alan kirjallisuuteen ja tutkimukseen. Selvitän mitä virtuaalitodellisuus tarkoittaa käyttäjän näkökulmasta ja miten se tuotetaan teknologian avulla. Perehdyn virtuaalitodellisuuden syötelaitteisiin, keskittyen ohjaimiin ja käsielekäyttöliittymiin. Esittelen myös VR-sovellusten käyttökohteita ja tutkin mitä käytettävyyden suunnitteluun ja arviointiin liittyviä ominaisuuksia on VR sovelluksilla. Kolmannessa luvussa esittelen testattavan ympäristön toteutuksen. Neljännessä luvussa esittelen miten käytettävyydestit toteutettiin. Viidennessä luvussa esittelen käytettävyydestien tulokset ja lopuksi pohdin mitä tuloksista voidaan päätellä.

2. Kirjallisuuskatsaus

2.1. Yleiskuva

Virtuaalitodellisuuden sovellusten käyttötarkoitukset ulottuvat aina viihteestä koulutukseen ja käytännössä kaikkeen mihin tietokonettakin voidaan käyttää. Nykyisten kehittyneiden laitteiden myötä yhä useamman tahon on mahdollista tuottaa VR-sovelluksia erilaisiin hyvinkin erikoistuneisiin käyttökohteisiin. Virtuaalitodellisuuden yleisimmät syötelaitteet perustuvat peliohjaimiin. Lupaavana syötekanavana ovat käsieleet. Käsieleiden avulla käyttäjä voi vahvemmin uppoutua virtuaalimaailmaan ja saada VR-ympäristön hyödyt paremmin irti. Uutena teknologiana eleiden käytettävyyttä virtuaalitodellisuudessa on tutkittu varsin vähän.

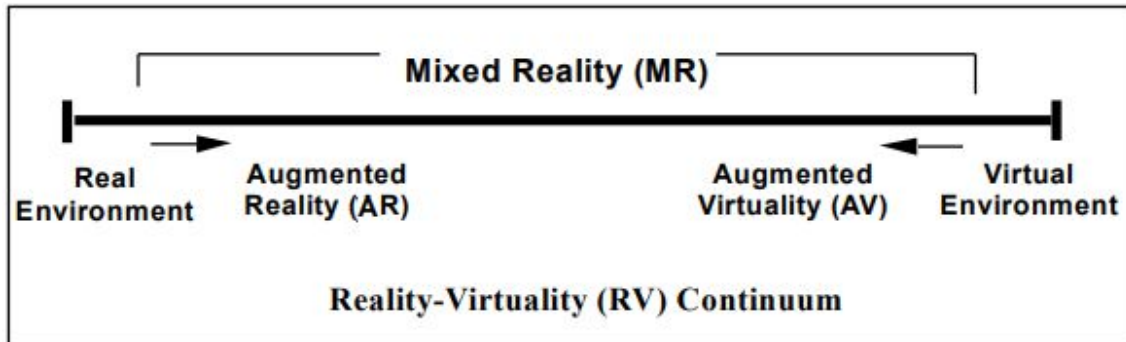
Tässä kappaleessa käsittelen millaisia teknologiaratkaisuja virtuaalitodellisuuden tuottamiseen on olemassa, miten käsieleet sijoittuvat VR-syötelaiteiden koko kuvaan, millaisia olemassaolevia sovelluksia löytyy virtuaalitodellisuuden ja käsieleiden yhdistämisestä ja mitä asioita tulee ottaa huomioon, kun puhutaan virtuaaliympäristöjen käytettävyydestä.

2.2. Virtuaalitodellisuus

Tässä kohdassa selvitän mitä tarkoittaa virtuaalitodellisuus, miten se eroaa yhdistetystä todellisuudesta, millaisia lajitteluja VR-sovelluksilla on, mitä teknologiaa vaaditaan VR:n tuottamiseen ja millaisia ilmiöitä VR:ään liittyy.

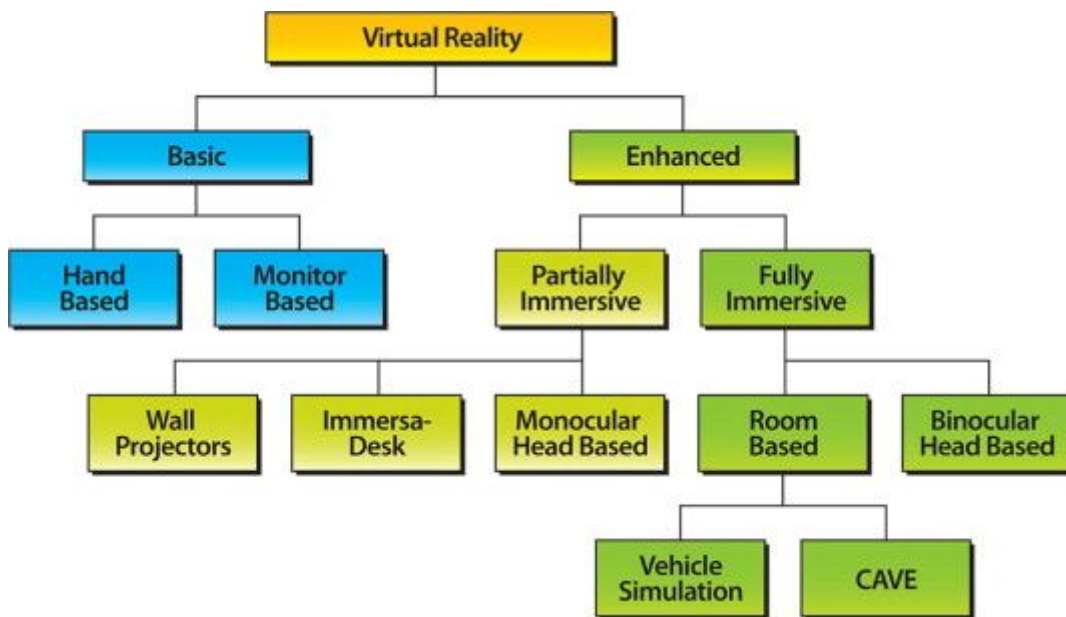
Virtuaalitodellisuus tarkoittaa käyttöliittymää, joka mahdollistaa henkilön vuorovaikutuksen virtuaalisten kohteiden kanssa kolmiulotteisessa maailmassa. (Chandler ja Munday 2016). VR liittyy oleellisesti jaettuun todellisuuteen. Milgram et al. (1995) esittelemässä todellisuus-virtuaalisuus-jatkumossa VR sijoittuu oikeaan laitaan (Kuva 1). Todellisuuden ja VR:n välillä puhutaan jaetusta todellisuudesta, johon kuuluu jatkettu todellisuus ja jatkettu virtuaalisuus. Jatketussa todellisuudessa todelliseen maailmaan lisätään virtuaalisia elementtejä. Esimerkiksi auton tuulilasiin heijastettava näyttö on jatkettua todellisuutta. Jatketussa virtuaalisuudessa taas virtuaalimaailmaan

lisätään todellisen elämän elementtejä. Esimerkiksi käyttäjän kädet voidaan kuvallistaa mukaan virtuaaliympäristöön.



Kuva 1: Todellisuus-virtuaalisuus-jatkumo (Milgram et al. 1995)

Virtuaalitodellisuusteknologiat voidaan jaotella usealla tavalla. Yksi tapa on Muhannan (2015) esittelemä melko laaja lajittelu (Kuva 2).



Kuva 2: Muhannan VR-taksonomia (Muhanna 2015).

Tässä taksonomiassa myös perinteiset näytöt luetaan virtuaalilaitteiksi, koska niillä voidaan näyttää virtuaaliympäristöjä. Omassa tutkimuksessani keskityn kuitenkin lajittelun “täysin immersiiivisiin” teknologioihin. Immersiiivinen virtuaalitodellisuus voidaan tuottaa virtuaalitodellisuuslaseilla (head mounted display), CAVE-ympäristössä (Cave Automatic Virtual Environment) tai ajoneuvosimulaattoreilla, kuten koko huoneen lentosimulaattorilla. (Muhanna 2015.) Luonnollisesti CAVE-ympäristöt ja koko huoneen simulaattorit ovat yleisesti kalliita vaihtoehtoja tuottaa virtuaalitodellisuus. Projektoreilla tuotettu CAVE voi olla halvempi vaihtoehto mikäli

virtuaaliympäristössä on tarkoitus tehdä yhteistyötä (Sharples et al. 2008). Näin jokaiselle käyttäjälle ei tarvita omia VR-laseja (Sharples et al. 2008).

Ensimmäiset tietokoneeseen kytketyt virtuaalilasit esiteltiin vuonna 1968 (Sutherland). Nämä kokeelliset lasit hyödynsivät kuvaputkitekniologiaa ja lasit olivat erittäin painavat ja hankalakäyttöiset. Nykypäivän kevyen näyttötekniologian ansiosta myös virtuaalilasit ovat kevyempiä ja käytettävämpiä. Virtuaalilaseilla voidaan heijastaa kuva yhdelle (monokulaarinen) tai kahdelle (binokulaarinen) silmälle. (Han 2016.) Lasit voivat olla joko suljetut, jolloin ulkopuolinen valo ei pääse lasien sisälle, tai avoimet, jolloin näyttö peittää vain osan näkökentästä (Patterson, Winterbottom ja Pierce 2006). Monokulaarisuus ja avoimet lasit liitetään useammin lisätyn todellisuuden sovelluksiin, kuin virtuaalisen todellisuuden. Tästä eteenpäin viitaten virtuaalilaseihin tarkoitan binokulaarisia ja suljettuja laseja.

Virtuaalilasit toimivat lasien sisällä olevan kahden näytön tai yhden jaetun näytön avulla. Näytön/näyttöjen kuvat heijastetaan linssin läpi katsojan silmiin. Kuvat ovat etäällä toisistaan silmien etäisyyden verran ja näin saadaan aikaan 3D näkymä. Näytön ja silmän välissä oleva laajakuvalinssi mahdollistaa laajan näkökentän ilman että käyttäjän tarvitsee liikuttaa ja rasittaa silmiään lähellä olevan näytön seuraamiseen. (Lin et al. 2017; Patterson, Winterbottom ja Pierce 2006.)

Virtuaalilasit voidaan jakaa kolmeen tyyppiin sen mukaan millä laitteella lasit on tarkoitettu käytettäväksi. PC-alustaisissa tietokoneella tuotettu kuva näytetään lasien näytöllä. Konsolialustaisissa periaate on sama mutta kuva tuotetaan konsolilla. Mobiilialustaisissa mobiililaitte asetetaan lasien sisään ja laitteen näyttö toimii lasien näyttönä. (Han 2016.) Uudet itsenäiset VR-lasit kuten Oculus Go poikkeavat edellä mainituista. Esimerkiksi Oculus Go:n kuva tuotetaan lasien omalla prosessorilla ja kiinteällä näytöllä (Techradar 2018). Oculus Go on siis kuin mobiilialustaiset VR-lasit, mutta kiinteällä mobiililaitteistolla.

Virtuaalilasien näytön oleellisia ominaisuuksia ovat näkökentän laajuus (field of view, FOV), riittävä kuvan resoluutio sekä syvyysuuntainen tarkkuusalue (depth of focus). Laajan näkökentän ja korkean resoluution yhtäaikainen tuottaminen vaatii tietokoneelta paljon laskentatehoa, mikä asettaa rajoituksia VR-sovelluksille. (Patterson, Winterbottom ja Pierce 2006; Han 2016.)

Kuvantuoton lisäksi lasien oleellinen ominaisuus on pään liikkeitä seuraava järjestelmä. Virtuaalilaseissa otetaan yleisimmin huomioon kuusi vapausastetta (Degree of Freedom, DOF): liikkuminen x, y ja z akselilla sekä pyöriminen vaaka-, pysty- ja sivusuunnassa. Pään liikkeen mukaan voidaan lasien näytön kuvaa muuttaa samassa suhteessa. (Patterson, Winterbottom ja Pierce 2006.) Tämän hetken kehittyneimpien kaupallisten virtuaalilasien, kuten Oculus Rift:n ja HTC Vive:n, liikkeentunnistus on toteutettu infrapunavaloilla ja huoneeseen sijoitettavilla lähetin-vastaanottimilla (ViveBlog 2017, VRFocus 2015). Samalla tekniikalla voidaan tuoda virtuaalimaailmaan myös lasien kanssa käytettäviä liikeohjaimia.

Virtuaalitodellisuus voidaan tuottaa myös CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) -ympäristön avulla. CAVE-ympäristössä käyttäjä tarkastelee virtuaaliympäristöä tilassa, jonka jokaiselle seinälle on heijastettu kuva. Käyttäjällä on päässä 3D-lasien tapainen laite. Lasien läpi katsottuna saadaan kummallekin silmälle heijastettua eri kuva. Näin käyttäjälle välittyy 3D vaikutelma. Lisäksi laseissa on sensorit, jotka tunnistavat pään asennon ja sijainnin ja näin seinien kuvan perspektiivi pysyy käyttäjän näkökulmasta oikeana. CAVE-ympäristöä voi käyttää samanaikaisesti useita henkilöitä, mikä on yksi CAVE-ympäristön olennainen hyöty. (Cruz-Neira et al. 1992.) CAVE käyttökokemusta on verrattu mobiilivirtuaalilaseilla tuotettuun kokemukseen. Tutkimuksen mukaan CAVE ympäristö tarjoaa paremman kokemuksen läsnäolon, immersion ja tunteiden osalta. Lisäksi CAVE mahdollistaa paremmat kyvyt tehtävien suorituksessa. (Tcha-Tokey et al. 2017.) Erot voivat kuitenkin olla pienemmät käytettäessä kehittyneempiä virtuaalilaseja.

Virtuaalilasien käyttöön liittyy monilla pahoinvointia (virtual reality sickness, cyber sickness). Tässä osassa perehdyn VR-pahoinvoinnin oireisiin, yleisyyteen, syihin ja mittaamiseen.

Oireita ovat pahoinvointi, silmien oireet kuten rasittuneisuus ja disorientaatio. VR-pahoinvoinnin oireet ovat samoja kuin simulaatiopahoinvoinnissa (simulation sickness), mutta kummassakin tapauksessa on omanlaisensa profiili. VR-pahoinvoinnissa korostuu disorientaatio-oireet ja simulaatiopahoinvoinnissa silmän liikehermon oireet. (Cobb et al. 1999; Sharples et al. 2008.)

VR-pahoinvoinnin oireiden esiintyvyys riippuu paljon olosuhteista. (Regan ja Price 1994)) selvittivät tutkimuksessaan, että jopa 61% käyttäjistä kärsii jonkinlaisista oireista. Munafo, Diedrick ja Stoffregen (2016) tekemässä kokeessa oireita sai vain 22% käyttäjistä. He tekivät myös toisen samanlaisen kokeen missä vain virtuaalilasien pelisisältö oli eri ja oireita sai 56%. Heidän testistä selvisi myös että oireet näyttävät olevan yleisempiä naisilla.

Rebenitsch ja Owen (2016) nostaa esiin neljä teoriaa pahoinvoinnin syyksi: aistihavaintojen ristiriita, epävakaa ryhti, “fysiikan lakien kokemisen harha” ja myrkytys. Yleisin pahoinvoinnin syyksi mainittu teoria on aistihavaintojen ristiriita. Myrkytysteoriaan en perehdy tässä tutkimuksessa syvemmin. Se on hyvin erityislaatuinen tapaus, joka perustuu kehon virhetulkintaan tilanteesta, joka muistuttaa henkilön aiemmasta myrkytystilasta. (Rebenitsch ja Owen 2016.)

Teoria aistihavaintojen ristiriidasta perustuu vestibulaarisen eli liikettä ja painovoimaa aistivan järjestelmän ja näköaistin havaintojen ristiriitoihin. Ristiriita johtuu siitä että virtuaalilaseilla tuotettu kuva ei vastaa täysin käyttäjän vestibulaarisia havaintoja liikkeestä ja painovoimasta. Teoria saa tukea monessa tutkimuksessa. (Rebenitsch ja Owen 2016; Patterson, Winterbottom ja Pierce 2006; Kronqvist, Jokinen, ja Rousi 2016.) Pahoinvointioireita on osoittanut vähentävän aivojen ohimo- ja päälakilohkojen liitoskohdan stimulointi tasavirralla, mikä edelleen tukee aistihavaintojen ristiriitaa oleelliseksi pahoinvoinnin syyksi (Takeuchi et al. 2018).

Epävakaa ryhti voi aiheuttaa VR-pahoinvointia. Epävakaan ryhdin teorian mukaan vahvaryhtinen keho pystyy aistimaan tehokkaamin kehon ja ympäristön vuorovaikutusta ja on immuuni liikkeestä johtuvaan pahoinvointiin (Ricci ja Stoffregen 1991). Muutokset ryhdissä voi myös aiheuttaa vääristymiä VR-lasien maailman ja ulkopuolisen maailman välillä. Esim. etukenossa kallistuneena VR-lasien näytön pystyakseli voi olla vinossa vaikka käyttäjän vestibulaariaistimet viestivät käyttäjän olevan suorassa maahan nähden. (Rebenitsch ja Owen 2016; Munafo, Diedrick ja Stoffregen 2016.) Vaikuttaa siis että epävakaa ryhti voi olla yksi aistihavaintojen ristiriidan aiheuttaja.

Fysiikan lakien kokemisen harha muistuttaa paljon epävakaan ryhdin teoriaa, mutta se ei ota kantaa mistä harha johtuu. Fysiikan lakien kokemisen harha aiheuttaa

pahoinvointia kun käyttäjä kokee painovoiman määrittämän suunnan “alaspäin” olevan eri riippuen aistimista (Rebenitsch ja Owen 2016).

Edellä mainittujen teorioiden lisäksi pahoinvointia voi aiheuttaa virtuaalilasien näkökentän laajuus tai linssin tyyppi (Sharples et al. 2008). Myös virtuaalilasien koettu epämiellyttävyys ja vaikeakäyttöisyys lisää pahoinvoinnin tunnetta. (Sharples et al. 2008; Israel, Zerres ja Tscheulin 2017).

VR-pahoinvointia mitataan simulaatiopahoinvointikyselylomakkeella (simulator sickness questionnaire SSQ). Lomake on johdettu matkapahoinvointia mittaavasta kyselylomakkeesta. Kyselyssä on lista oireista, joista käyttäjä valitsee hänen kohdalla tapahtuneet. Oireet jaetaan kolmeen pääkokonaisuuteen: (1.) silmän liikehermoon liittyvät oireet (rasitus, tarkennuksen hankaluus, sumentunut näkö, päänsärky), (2.) disorientaatio-oireet (huimaus, tasapaino-ongelmat) ja (3.) pahoinvointi ruoansulatuselimistössä (kuvotus, vatsan tiedostaminen, lisääntynyt syljeneritys, lisääntynyt röyhtäily). Jokaisen oireen esiintyvyys arvioidaan neljäkohtaisella skaalalla (ei lainkaan, vähän, kohtalaisesti, vakavasti). (Kennedy et al. 1993.)

2.3. VR syötelaiteiden koko kirjo

Virtuaalitodellisuuden syötelaiteiden kehitys ja kirjo on laajempi kuin näyttölaitteissa. Syötelaitteet voidaan jakaa ohjaimiin, navigointilaitteisiin, vartalonseurantalaitteisiin ja käsieleidenseurantalaitteisiin. (Anthes et al. 2016.)

Ohjaimet ovat syötelaitteita joita käyttäjä pitää kädessään. Syötteet annetaan yleisimmin napin painalluksilla ja ohjaimen sijainnin seurannalla. Navigointilaitteiden tarkoitus on helpottaa käyttäjän navigointia virtuaaliympäristössä. Vartalonseurantalaitteilla voidaan lukea käyttäjän koko vartalon eleitä syötteiksi. Käsienseurantalaitteilla luetaan käsieleet syötteiksi. (Anthes et al. 2016.) Seuraavissa kappaleissa perehdyn edellä mainittuihin syötelaitteisiin keskittyen ohjaimiin ja käsieleidenseurantalaitteisiin.

2.3.1. Virtuaalitodellisuuden tarkoitettavat ohjaimet

Tällä hetkellä tarjolla olevat VR-ohjaimet perustuvat usein muotoilultaan peliohjaimiin, mutta sisältävät myös kuuden vapausasteen liikkeenseurannan. Tulevaisuudessa on kuitenkin odotettavissa erilaisia näkökulmia ohjainten suunnitteluun. (Anthes et al. 2016.)

Ohjainvalinnalla voidaan vaikuttaa virtuaalitodellisuuden käyttökokemukseen. Käyttäjän näkökulmasta luonnolliset ja intuitiiviset ohjaimet ovat portti immersiiivisten virtuaalimaailmojen luomiseen. Luonnolliseen ja intuitiiviseen muotoiluun keskittyvä ohjain ei välttämättä ole sitä käyttäjän näkökulmasta. Käyttäjän aiemmat ohjaintottumukset vaikuttavat siis kokemuksen arviointiin. (Seibert & Shafer 2018.) Esimerkiksi vanhemmilla käyttäjillä voi ilmetä enemmän ongelmia ohjainten käytössä. Mikäli sovelluksen oletettu käyttäjäkunta on monimuotoinen on syytä panostaa yksinkertaisuuteen ja intuitiivisuuteen. (Schnack, Wright ja Holdershaw 2018.)

2.3.2. Käsielekäyttöliittymät

Käsieleiden ja virtuaalitodellisuuden yhdistämisestä on muutaman vuoden sisään julkaistu paljon uusia tutkimuksia, joita tulen käsittelemään tämän ja seuraavan luvun aikana. Käsieleiden käyttö tietokoneiden syötteenä ei kuitenkaan ole uusi innovaatio. Ensimmäinen tutkimus on tehty vuonna 1980 (Bolt). Put-that-there tutkimuksessa osoitus-eleitä käytettiin yhdessä puhekomentojen kanssa siirtämään kohteita näytöllä paikasta toiseen.

Käsieleet voidaan toteuttaa erilaisin tekniikoin. Put-that-there tutkimuksessa osoitusele tunnistettiin magneettisten käämien avulla. Lähetys ja vastaanottolaitteen välillä tehdyt osoituseleet vaikuttivat magneettisuuteen, joten osoitus voitiin tunnistaa (Bolt 1980). Magneettisen eleiden tunnistuksen jälkeen yleistyi erilaisten datahanskojen käyttö (Badi ja Hussein 2014). Datahanskoja tutkitaan edelleen eleiden tunnistamiseen (Lv et al. 2017). Lisäksi eleitä voidaan tunnistaa ranteessa pidettävällä elektromyografisella (EMG) eli lihassähköä lukevalla laitteella (Anthes et al. 2016). Lisäksi nykyään on saatavilla useita kameralaitteita, kuten Kinect ja Leap Motion millä

on mahdollista tunnistaa eleitä. Kuvapohjainen eleiden tunnistus voidaan toteuttaa monella eri tekniikalla, esimerkiksi Leap Motionissa on kolme infrapunalediä ja kaksi sensoria. Laite tulkitsee sensorien kuvasta käden asennon ja siten sekä passiiviset ja aktiiviset eleet. (Mantecón et al. 2016.)

Leap motionin eleentunnistusteknologia oli vuonna 2014 vielä varsin epäkäytettävä. Työpöytäkäytössä hiiri ja näppäimistöyhdistelmä koettiin käytettävämmäksi kuin Leap Motion. Laitteen hyötynä oli intuitiivisuus ja luonnollisuus. (Škrlj et al., 2014.) Uudet versiot ovat vieneet järjestelmää eteenpäin ja tämän päivän tutkimuksissa Leap:lla toteutettu elekäyttöliittymä on osoittautunut toimivaksi (Zhang et al. 2017). Leap motionin eleiden tunnistuksen varmuutta on pyritty parantamaan viimeaikaisissa tutkimuksissa. Leapin rinnalle on esimerkiksi tuotu ranteessa pidettävä EMG-laite, jolla voidaan tunnistaa lihastoimintaa ja näin varmemmin tunnistaa milloin sormet ovat koukistettu tai ojennettu (Jiang, Xiao ja Menon 2018).

2.3.3. Muut syötelaitteet

Navigointiin tarkoitetuilla syötelaitteet on tarkoitettu edistämään käyttäjän liikkumista virtuaaliympäristössä. Navigointilaitteita on esimerkiksi juoksumattoon perustuvat laitteet tai erilaiset paikallaan käytettävät teknologiat. Juoksumattoja on olemassa monisuuntaisia ja yksisuuntaisia. Niiden avulla käyttäjä voi liikkua virtuaalimaailmassa kävelemällä juoksumatolla. Paikallaan käytettäviä laitteita ovat esimerkiksi erilaiset tuolit tai kenkiin kiinnitettävät askelmittarin tapaiset laitteet. (Anthes et al. 2016.)

Kokovartalon eleiden tunnistus voidaan toteuttaa käsieleiden tunnistuksen tapaan vartalon tunnistavan kameran avulla tai kehoon kiinnitettävien liikkeen tunnistimien avulla. Kokovartalon eleiden tunnistuksessa voidaan lukea esimerkiksi käsivarsilla tehtyjä aktiivisia eleitä tai kehon asentoa. (Anthes et al. 2016)

2.4. Virtuaalitodellisuussovellusten käyttökohteita

Virtuaalitodellisuuden käyttökohteita on käytännössä rajaton määrä. Tässä luvussa perehdyn Craig, Sherman ja Will (2009) esittelemiini yleisiin käyttökohteisiin. Heidän

mukaan virtuaalitodellisuuden sovellukset voidaan jakaa viiteen ryhmään sovellusalueen mukaan: virtuaalinen prototyyppi, arkkitehtuuri, visualisointi, taidon harjoittelu ja viihde. Yksittäinen sovellus voi siis edustaa useaa edellä mainituista kategorioista. Muina maininnan arvoisina käyttökohteina ovat lääketieteen sovellukset, opetukselliset sovellukset ja taidesovellukset. (Craig, Sherman ja Will 2009.) Perehdyn seuraavissa kappaleissa virtuaalitodellisuuden käyttökohteisiin viimeisimpien tutkimusten avulla. Lisäksi perehdyn käsielevuorovaikutusta sisältäviin VR-sovelluksiin.

Prototyypinnissa virtuaalitodellisuuden avulla voidaan käyttäjille esitellä palvelun käyttöympäristö virtuaalisesti. Virtuaalinen käyttöympäristö mahdollistaa tehokkaan palvelun testaamisen kun todellisessa käyttöympäristössä prototyyppi on haastavaa. Virtuaaliprototyypinnin avulla voidaan kommunikoida palvelun konsepti immersiiivisellä tavalla ja saada palvelusta rakentavaa palautetta (Boletsis 2018).

Arkkitehtuurin saralla VR-sovelluksella on saavutettu hyötyä spatiaalisessa eli tilan ymmärtämisessä. Tutkimuksessa arkkitehtuurin opiskelijoille esitettiin virtuaalinen toimistotila. Sovelluksen todettiin auttavan erityisesti tilan, mittasuhteiden ja valaistuksen hahmottamisessa. (Sapto Pamungkas et al. 2018.)

Virtuaalitodellisuus soveltuu erittäin hyvin kolmiulotteisen datan visualisointiin. Esimerkiksi aivojen hermosoluverkon tutkimiseen kehitetty VR-sovellus osoittautui tarkemmaksi ja nopeammaksi työkaluksi neuroverkkojen jäljittämiseen kuin alan standardi sovellukset, joissa ei hyödynnetty virtuaalitodellisuutta. VR-sovelluksen vuorovaikutus koettiin myös helpommaksi ja vähemmän uuvuttavaksi. (Usher et al. 2018.)

VR-sovelluksella toteutettu kirurgiakoulutus on todettu edistävän anatomian ja psykomotoristen taitojen oppimista. Pään ja kaulan alueen kirurgiopiskelijoille tarkoitettulla koulutussimulaattorilla on todettu olevan potentiaalinen rooli jatko-opiskelijoiden koulutuksessa. Laseilla tuotetun 3D-kuvan ja haptisen

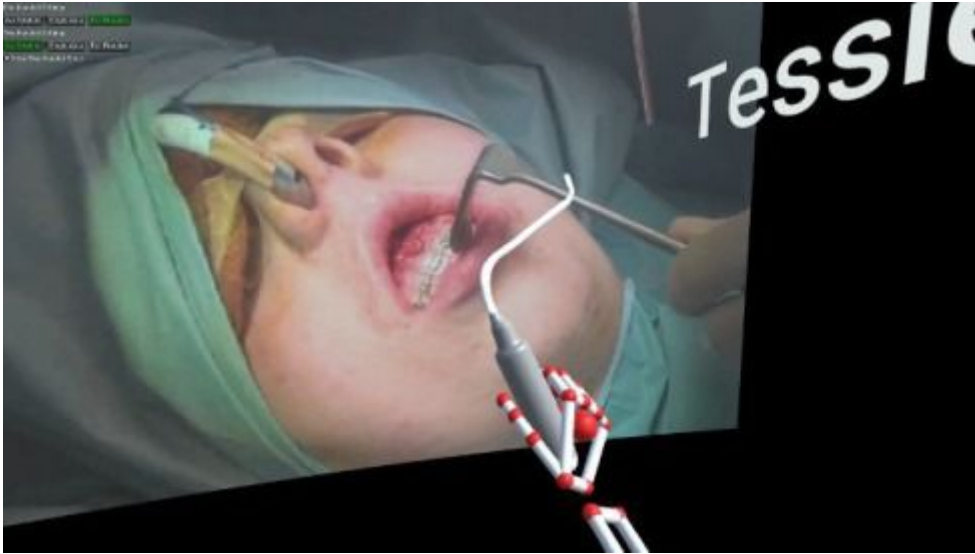
vastavoimaohjaimen avulla opiskelijat voivat harjoitella esimerkiksi ohimoluuhun tehtäviä porauksia. (Arora et al. 2015.)

Viihteessä virtuaalitodellisuuden yleisin käyttökohde lienee pelit. VR-sovelluksilla voidaan kuitenkin tarjota elämyksiä esimerkiksi vuorovaikutteisen fiktion muodossa esimerkiksi 360-elokuvana. Luovat sovellukset mahdollistavat esimerkiksi piirtämisen virtuaaliympäristössä. VR-sovelluksia voidaan hyödyntää myös viihteen tuottamisessa esimerkiksi 3D-äänilähteiden sijoittamisessa virtuaaliympäristöön. (Craig, Sherman ja Will 2009.)

Opetuksessa virtuaalitodellisuutta on hyödynnetty erityisesti luonnontieteiden opetuksessa ja sillä on paljon potentiaalia. Tällä hetkellä haasteet liittyvät suunnittelun suositusten laatimiseen ja opettajien opastukseen virtuaalitodellisuuden hyödyntämisessä. (Curcio, Dipace ja Norlund 2016.) Myös lääketieteellisten VR-sovellusten tutkimusta tehdään paljon ja potentiaali on suuri. Kirurgiassa VR-sovelluksia voidaan käyttää esimerkiksi koulutuksen tukena tai leikkauksen etäseuraamisessa. (Khor et al. 2016.)

Käsieleiden käyttöä virtuaaliympäristössä ovat tutkineet mm. (Zhang et al. 2017). Heidän tutkimus osoittaa kahdella kädellä tehtävien eleiden sopivan VR-ympäristössä navigointiin. Ohjaimiin verrattuna käsieleet eivät olleet yhtä herkät, joten ne soveltuvat tehtäviin missä ei vaadita nopeaa reagoitua. Käsieleillä toteutettu navigointi koettiin intuitiiviseksi, ei-uuvuttavaksi ja helposti opittavaksi. (Tecchia et al. 2014) ovat tutkineet käyttäjän käsien lisäämistä virtuaaliympäristöön kameran avulla. Tutkimuksessaan Tecchia et al. (2014) keskittyivät fyysisen läsnäolon tunteen tutkimiseen. Heidän tutkimus validoi valokuvallisen representaatio käsistä vaihtoehtona tietokonegrafiikalla tuotetuille. Käytännön esimerkkinä käsieleitä hyödyntävä VR-sovellus voisi olla esimerkiksi kuivaharjoittelusovellus kirurgeille. (Pulijala et al. 2018)) esittelivät tutkimuksessaan sovelluksen, jossa 360-videoiden avulla visualisoidaan leikkaustilanne (Kuva 3). Leikkauksen aikana opiskelijat voivat eleiden avulla käsitellä leikkaukseen liittyviä välineitä. Sovelluksella voidaan harjoitella

leikkauksen toimintamallia, mutta käytännön suorituksen harjoittelu on mahdotonta ilman ohjaimen voimavastetta.

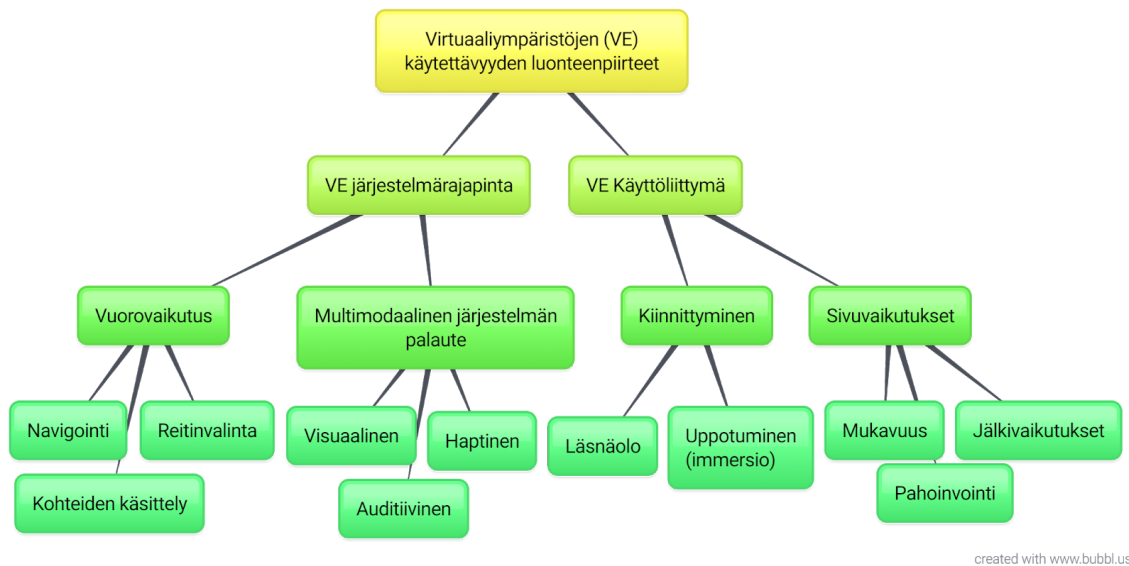


Kuva 3: Kirurgian koulutukseen tarkoitettu VR-sovellus (Pulijala et al. 2018).

2.5. Käytettävyys ja virtuaalitodellisuus

Käytettävyys tarkoittaa näkökulmaa käyttöliittymän suunnitteluun, jossa pyritään tuottamaan intuitiivinen ja helppokäyttöinen käyttöliittymä (Chandler ja Munday 2016). Käytettävyys on moniosainen kokonaisuus. Perinteisesti käytettävyyteen liitetään seuraavat osatekijät: opittavuus, tehokkuus, muistettavuus, virheettömyys ja tyytyväisyys (Nielsen 1994). Tässä kappaleessa selvitan mitä luonteenomaisia piirteitä liittyy käytettävyyteen puhuttaessa virtuaalitodellisuudesta ja elekäyttöliittymistä. Lisäksi kartoitan millaisia käytettävyyden arviointiin liittyviä menetelmiä on tarjolla.

Virtuaalitodellisuuden käytettävyys voidaan jakaa Stanney et al. (2003) mukaan ns. järjestelmälähtöisiin ja käyttäjälähtöisiin käyttöliittymän piirteisiin (Kuva 4). Järjestelmän käyttöliittymän piirteillä tarkoitetaan järjestelmän tarjoamia vuorovaikutusominaisuuksia. Käyttäjälähtöiset piirteet taas perustuvat käyttäjän kokemuksiin järjestelmästä.



Kuva 4: VR käytettävyyden piirteet (Stanney et al. 2003)

Järjestelmälähtöiset piirteet voidaan jakaa käyttäjän vuorovaikutukseen ja järjestelmän palautteenantoon. Järjestelmän vuorovaikutuksessa oleellista on navigointi, reitinvalinta ja kohteiden käsittely. Käyttäjän vuorovaikutusosaan liittyy luonnostaan myös käyttäjän syötteet. Järjestelmän palautteenanto käsittää seuraavat multimodaaliset palautekanavat: visuaalinen, haptinen ja auditorinen kanava. (Stanney et al. 2003)

Reitinvalinnalla tarkoitetaan käyttäjän kykyä säilyttää ymmärrys omasta sijainnista ja suunnasta virtuaalisessa ympäristössä. Reitinvalinnan helppous perustuu pääasiassa virtuaalisen ympäristön onnistuneeseen suunnitteluun. (Stanney et al. 2003.) Esimerkiksi virtuaaliympäristöön sijoitetut maamerkit tekevät reitinvalinnasta tehokkaampaa ja virheettömämpää (Sharma et al. 2017).

Navigoinnilla tarkoitetaan käytännössä liikkumista virtuaaliympäristössä. Navigointitekniikoiden tulisi olla helppoja ja kognitiivisesti rasittamattomia. Navigointi voidaan toteuttaa monin eri tavoin, kuten erilaisten ohjainten avulla. (Stanney et al. 2003; Ware ja Slipp 1991.) Tuoreemmissa tutkimuksissa navigointiin on testattu erilaisia eleratkaisuja. Navigointi on toteutettu esimerkiksi vartalon asennon avulla (Roupé, Bosch-Sijtsema ja Johansson 2014) tai katseella ja osoittamisella (Tzanavari et al. 2016). Navigoinnin vaivattomuuteen voi vaikuttaa myös perspektiivillä. Virtuaalitodellisuudessa tyypillinen ensimmäisen persoonan näkökulma sopii hyvin

navigointiin, kolmannen persoonan näkymässä taas lähiympäristö korostuu (Lee et al. 2016).

Kohteiden käsittely sisältää virtuaaliympäristön kohteen valinnan ja kohteeseen tehtävät muutokset esimerkiksi sijainnin tai suunnan osalta. Kohteiden käsittelyn tehokkuudella ja vaikuttavuudella on suuri merkitys virtuaaliympäristön käytettävyyteen (Stanney et al. 2003). (Argelaguet ja Andujar 2013) jakavat laajassa tutkimuksessaan kohteiden valinnan tekniikat kahteen metaforaan: virtuaaliseen käteen ja -osoittimeen. Virtuaalisen käden metafora on intuitiivisempi. Osoitinmetafora taas mahdollistaa kaukana olevien kohteiden valitsemisen. Virtuaalisen käden metaforan ongelmana ovat ihmisen motoriset rajoitteet. Käden pituus määrittää kuinka kaukana olevia kohteita voidaan manipuloida luonnollisesti. Käyttäjän kontrolloimaa aluetta voidaan laajentaa muuttamalla käden liikkeen kattamaan pidemmän matkan virtuaaliympäristössä (ns. Go-Go-tekniikka). Motorisen ja visuaalisen ympäristön erottaminen kuitenkin heikentää käyttäjän suoritusta. Argelaguet ja Andujar (2013) esittelevät mekanismin, jolla kontrollialuetta voi siirtää väliaikaisesti valitsemalla uusi tartuntapiste. Näin käyttäjän sijainti virtuaalimaailmassa muuttuu ja aiemmin tavoittamattomat kohteet voidaan saavuttaa ilman fyysisen ja virtuaalimaailman etäisyyksien ristiriitaa. Käytettävyyden kannalta kohteiden valinnassa on oleellista ottaa huomioon Fittsin laki, jonka mukaan kohteen valinnan nopeuteen vaikuttaa kohdistimen etäisyys kohteesta ja kohteen leveys; mitä pidempi etäisyys ja ohuempi kohde, sen kauemmin kohteen valitsemiseen kuluu aikaa (Fitts 1954). Fittsin lain on todettu pätevän myös virtuaaliympäristössä kolmiulotteisten kohteiden valintaan (Wingrave ja Bowman 2005)

Visuaalinen palaute on usein kaikista vangitsevin ja keskeisin palautekanava VR sovelluksissa (Stanney et al. 2003). Ihminen on erityisen herkkä visuaalisen kanavan virheille ja näytön muuttujilla on iso rooli koko järjestelmän käytettävyyttä arvioitaessa (Kalawsky 1999). Näytön teknisten ominaisuuksien lisäksi myös näytölle renderöityjen ympäristöjen ja kohteiden ominaisuudet tulee ottaa huomioon. Gabbard ja Hix (1997) nostavat esille vaakalautatilanteen, jossa korkealla laadulla renderöidyt kohteet voivat aiheuttaa nykimistä tai virheitä kuvassa. Vuonna 1997 kirjoitetun tutkimuksen asetelma

on edelleen voimassa, nykyisten virtuaalilasien vaatiessa tehokkaan PC:n renderointiin. (LIBlog 2016).

Äänipalaute ei vastaa vaikuttavuudeltaan visuaalista, mutta äänellä voidaan syventää tai joissain tapauksissa korvata visuaaliset viestit (Kalawsky 1993). Äänipalautetta on kahden tyyppistä. Informaatio voidaan muuttaa äänimuotoon esimerkiksi äänimerkein tai puhesyntetisaattorin avulla. Toinen tyyppi on 3d-ääni, jonka avulla käyttäjälle voidaan viestiä tämän sijaintia virtuaaliympäristössä. (Gabbard ja Hix 1997.)

Viimeinen järjestelmän palautteenantotyyppi on haptinen palaute. Haptisella palautteella voidaan tarkoittaa sekä voimapalautetta ja taktiilista eli tuntoaistiin perustuvaa palautetta. Tuntopalaute voidaan toteuttaa hyödyntäen ohjainta tai puettavaa teknologiaa. (Stanney et al. 2003.) Virtuaalitodellisuudessa käytettyjä ohjaimia ovat esimerkiksi kiinteät ohjaimet (kuten autosimulaation ratti), kädessä pidettävät ohjaimet (kuten HTC Vive ohjain) tai datahanskat (Schultheis et al. 2007; Lee et al. 2017).

Käyttäjän kokemuksiin perustuvat ominaisuudet voidaan jakaa virtuaaliympäristöön kiinnittymiseen ja sivuvaikutuksiin. Käsittelen ensin käyttäjän kiinnittymistä virtuaaliympäristöön jonka jälkeen puhun lyhyesti sivuvaikutuksista.

Käyttäjän kiinnittymisellä virtuaaliympäristöön tarkoitetaan läsnäoloa (presence) ja uppoutumista (immersion). Nämä kaksi termiä liittyvät vahvasti toisiinsa. Läsnäoloon vaikuttaa käyttäjän kokemus virtuaalimaailman todellisuudesta ja immersio saavutetaan käyttäjälle tuotetuilla ärsykkeillä. (Stanney et al. 2003.) Todellisen tuntuisen virtuaalimaailman tulisi olla sopivan yksinkertainen, mutta myös riittävän realistinen (Kaur 1997). Todentuntuisuutta lisää jos maailman kohteiden kanssa pystyy olemaan vuorovaikutuksessa (Kalawsky 1993). Läsnäolon tunteen vahvuuteen vaikuttaa myös modaaliteettien valinta. (Fröhlich ja Wachsmuth 2013) esittävät tutkimuksessaan että suurempi määrä modaaliteetteja ei automaattisesti lisää läsnäolon tunnetta. He argumentoivat että tiettyjen modaaliteettien yhdistelmällä käyttäjä kokee virtuaalimaailman epäuskottavana (ns. Outo laakso -ilmiö (Mori, MacDorman ja Kageki 2012)).

Sivuvaikutukset voidaan jakaa mukavuuteen, pahoinvointiin ja jälkivaikutuksiin. Mukavuuteen vaikuttaa VR-lasien ja ohjainten käyttömukavuus. (Stanney et al. 2003.) Hyvä käyttömukavuus on tärkeää sillä kipu tai vain epämukavuus voi yliajaa muita

tuntemuksia (Mavor ja Durlach 1994). VR-pahoinvointia käsittelemällä jo ensimmäisessä kappaleessa. Pahoinvoinnin lisäksi VR voi aiheuttaa jälkivaikutuksia. Jälkivaikutuksiksi lasketaan kaikki oireet mitkä ilmenevät välittömästi lasien käytön jälkeen ja voivat jatkua jopa kuukauden. (Stanney et al. 2003.) Jälkivaikutuksen oireet muistuttavat matkapahoinvoinnin oireita (tasapainon heikentyminen, rasittunut näköaisti ja silmä-käsi koordinaation muutokset) (Stanney et al. 1998).

2.6. Käytettävyyden arviointi

Käytettävyyttä voidaan arvioida monin eri tavoin, mutta tässä osiossa perehdyn käytettävyydestä. Ensin puhun käytettävyydestä yleisesti, jonka jälkeen muutama sana käytettävyydestä virtuaaliympäristöissä ja lopuksi millaisia mitta-asteikkoja käytetään onnistuneen käytettävyyden mittaamiseen. Käytettävyydestä tarkoitetaan palvelun tai järjestelmän arviointia siten että käyttäjät osallistuvat prosessiin käyttämällä palvelua tai järjestelmää. Käytettävyydestä muodostetaan hypoteesi, eli mitä tuloksia odotetaan, valitaan satunnainen käyttäjien otanta ja suoritetaan testin tiukassa valvonnassa, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. (Rubin ja Chisnell 2011.)

Virtuaaliympäristöjä arvioitaessa käytettävyydestä on todettu olevan hyvä tapa löytää ongelmia jotka liittyvät erityisesti vuorovaikutuksen "tilaan". Tämän tyylisiä ongelmia ei voisi huomata ilman läsnäoloa. Mikäli haluaa löytää mahdollisimman laajasti ongelmia virtuaaliympäristöstä on syytä käyttää käytettävyydestä tukena käytettävyyssiantuntijan analyysiä. (Bach ja Scapin 2010.)

Mitta-asteikkoja käytettävyyden arviointiin löytyy useita, mutta keskityn tässä osiossa käsittelemään System Usability Scale (SUS) asteikkoa, sillä se on ollut jo yli 20 vuotta laajassa käytössä ja se on validoitu lähivuosina (Peres et al. 2013). SUS asteikkoa hyödynnetään esimerkiksi käytettävyydestä yhteydessä. Se perustuu kymmeneen kysymykseen, joilla kartoitetaan järjestelmän käytettävyyttä. Jokaiseen kysymykseen vastataan asteikolla yhdestä viiteen. Pisteet lasketaan yhteen erityisellä kaavalla ja saadaan lukuarvo, joka kuvastaa järjestelmän käytettävyyttä. 100 pistettä on maksimi, 85 erinomainen ja alle 70 ei hyväksyttävä käytettävyys. (Grier et al. 2013.) Nopeasti saatavien luotettavien tulosten ansiosta SUS-asteikkoa suositellaan käytettäväksi

edelleen. Lisäksi asteikosta on laadittu versioita, joissa kysymyksiä on karsittu ja näin saatu asteikon käyttäminen vielä tehokkaammaksi (Lewis 2018.)

3. Testattavan järjestelmän toteutus

Tässä luvussa esitellään testijärjestelmän toteutus ja käytetty laitteisto ja ohjelmisto.

3.1. Design

Testiympäristön lopullinen muoto sisältää kolme vaihetta. Laitteistoon totutteluosan ja testiosan kaksi erilaista testiä. Aluksi testiosaan kuului vain ns. palikoiden järjestelytesti. Pilottitestin ja asiantuntijapalautteen johdosta testiin lisättiin myös testiosa, joka vastaisi paremmin todellisen elämän toimintaa. Tähän tarpeeseen kehitettiin ns. kukkienkastelutesti. Kukkienkastelutestissä testihenkilö kastelee pöydälle ilmestyvät kukkaruukut käyttäen kastelukannua. Tämän testin tarkoitus on tarjota testihenkilölle kokemus käsieleiden ja ohjaimen käytöstä todellisen elämän tehtävässä. Kastelukannun käyttö työkaluna on myös monimutkaisempaa kuin pelkästään palikoiden siirtely. Kukkien kastelutestistä ei kerätä nopeuteen tai tarkkuuteen liittyvää dataa.



Kuva 5: Lähtöasetelma kukkienkastelutehtävään

Kuutioidenlajittelutestissä testihenkilön tulee lajitella vihreät kuutiot pöydän vasemmalta puolelta oikealle puolelle maalialueelle. Maalialueen muotoa iteroitiin

useaan kertaan. Aluksi maali oli laatikko, jonne palikat siirrettiin. Malli kuitenkin vaihdettiin maalitauluksi, jotta saadaan tietoa tarkkuudesta palikoiden siirtelyssä.



Kuva 6: Lähtöasetelma lajittelutehtävään

3.2. Laitteisto

Testissä käytettiin Tobii Pro VR-laseja. Nämä virtuaalilasit sisältävät katseentunnistusominaisuudet joita ei testissä käytetty. Lasit ovat käytännössä HTC Vive lasit, joissa on katseentunnistusominaisuus. Käsieleiden seuranta toteutettiin virtuaalilaseihin kiinnitetyllä Leap Motion liiketunnistimella. Ohjaimina käytettiin HTC Vive Controller-ohjaimia (Kuva x). Testin tietokoneena toimi Windows 10 PC seuraavilla komponenteilla: Intel(R) Core(TM) i7-4770K CPU @ 3.50Ghz, 16 GB RAM ja NVIDIA GeForce GTX 1080 8GB.



Kuva 7: Testilaitteet: Tobii Pro-lasit joissa Leap Motion Controller sekä HTC Vive Controller ohjaimet

3.3. Ohjelmisto

Unity versiolla 2017.3.1. toteutettu testiympäristö jakautuu kahteen toteutukseen, jotka ovat muuten samanlaisia, mutta toisessa ohjaimena toimii käsieleet ja toisessa Oculus Rift Touch ohjaimet. Käsielepuolen fysiikkamoottorina toimii Leap Motionin virallinen Leap Motion Interaction Engine (1.1.1). Ohjainpuolella fysiikkamoottorina toimi avoimen lähdekoodin NewtonVR (ladattu 1.4.2018). Käytössä olleet ajurit olivat Leap Motion Orion 3.2.1-ajurit ja HTC Vive ajurit (ladattu 2018).

4. Käytettävyydestien toteutus

4.1. Arviointimenetelmät

Modaliteetteja arvioitiin määrällisesti mittaamalla käyttäjien suoritusta lajittelutehtävässä ja kyselylomakkeilla sekä laadullisesti haastatteluilla.

Käyttäjien suorituksesta mitattiin jokaisen palikan maalialueelle siirtämiseen kulunut aika ja tarkkuus, kuinka keskelle maalialuetta palikka laskettiin. Lisäksi jokainen pöydältä pudonnut maalipalikka laskettiin.

Kyselylomakkeina käytettiin testejä varten koottua testikyselyä sekä System Usability Scale -kyselyä. Ensimmäisenä testihenkilöt vastasivat testikyselyyn. Tällä kyselyllä kartoitettiin testihenkilön mielipidettä modeliteetin ominaisuuksista viisikohtaisella asteikolla. Kysely sisälsi seitsemän väittämää ja jokaisen väittämän kohdalla asteikon ääripäät vastasivat adjektiiveja, joiden pohjalta testihenkilö arvioi väittämää. Esimerkiksi "Ohjainten käyttö oli luonnollista/epäluonnollista." Seitsemän ominaisuutta, joita käyttäjä arvioi olivat luonnollisuus, reagoinnin toimivuus, reagoinnin nopeus, esineiden käsittelyn tarkkuus, esineiden käsittelyn nopeus, fyysinen raskaus ja käytön miellyttävyys.

Toisena kyselylomakkeena käytössä oli System Usability Scale.

Haastattelussa testihenkilöt saivat vapaasti kertoa mielipiteensä ja antaa palautetta järjestelmästä. Käyttäjältä kysyttiin mielipiteitä modaliteeteista ja niiden hyvistä ja huonoista puolista. Lisäksi käyttäjältä kysyttiin kokiko tämä lasien käytöstä johtuvaa pahoinvointia.

4.2. Pilottitesti

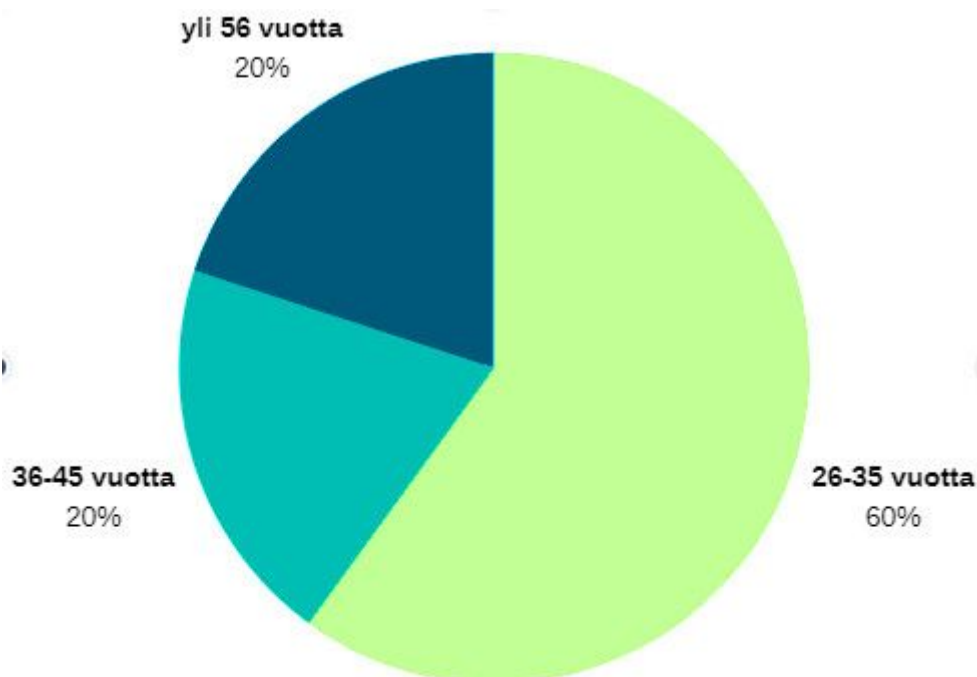
Pilottitestissä testattiin ainoastaan palikoiden lajittelua. Jotta saataisiin kattavammat tulokset käytettävyydestä, testiin lisättiin myös kastelukannutehtävä. Pilottitestissä testikyselyihin vastattiin vasta kun molemmat vaiheet oli testattu. Tämä aiheutti kuitenkin sekavuutta, kun testihenkilö joutui ajattelemaan testin eri vaiheita. Testikyselyiden osalta päädyttiin siis ratkaisuun, jossa testihenkilöt täyttävät

kyselylomakkeet välittömästi suoritettuna vaiheen jälkeen. Näin testihenkilöiden on helpompi arvioida juuri käytettyä modaliteettia.

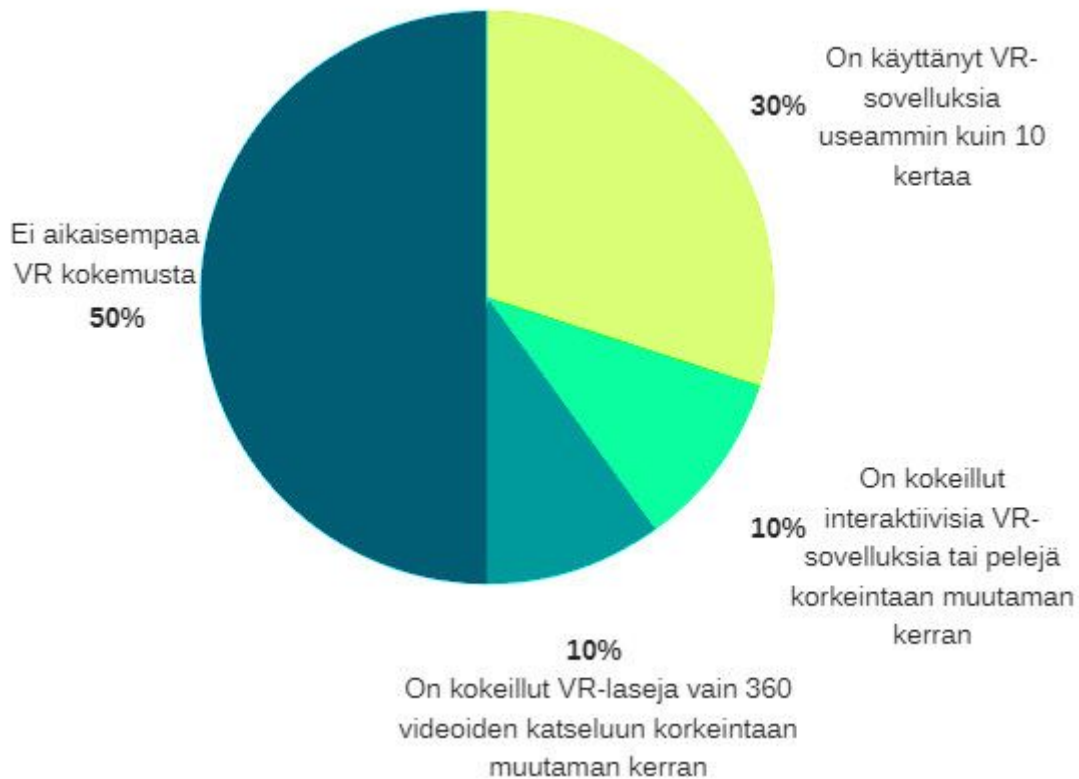
4.3. Päätesti

4.3.1. Osallistujat

Päätestiin osallistui kymmenen testihenkilöä joista puolet oli naisia ja puolet miehiä. Testihenkilöiden ikäjakauma oli seuraava: kuusi oli 26-35 vuotiaita, kaksi oli 36-45 vuotiaita ja kaksi yli 56 vuotiaita (Kuva 8). Aiemmin virtuaalitodellisuussovelluksia ei ollut lainkaan käyttänyt viisi osallistujista. Kaksi oli kokeillut VR-sovelluksia tai 360-videoiden katselua ja kolme oli käyttänyt VR-sovelluksia aiemmin yli kymmenen kertaa (Kuva 9).



Kuva 8: Testihenkilöiden ikäjakauma



Kuva 9: Testihenkilöiden aiempi kokemus virtuaalitodellisuudesta

4.3.2. Testin läpivienti

Testihenkilöt kutsuttiin yksittäin Tampereen yliopiston VR-laboratorioon. Testit toteutettiin aikavälillä 27.4. - 17.5.2018.

Ensin jokaiselle testihenkilölle esiteltiin testi yleisesti, kerrottiin testin tarkoitus ja kerrottiin miten testi etenee. Seuraavaksi testihenkilöt saivat täyttää esitietolomakkeen, jonka jälkeen aloitettiin varsinainen testi. Testihenkilöt aloittivat satunnaisesti tekemällä ensin joko käsielehtävät tai ohjaintehtävät. Ensimmäisen modaliteetin jälkeen käyttäjät täyttivät kyseiseen modaliteettiin liittyvät kysely, jonka jälkeen tehtiin toisen modaliteetin tehtävät ja kyselylomakkeet. Lopuksi jokaista testihenkilöä haastateltiin. Testihenkilöiden toimintaa VR-ympäristössä seurattiin videotykillä (Kuva 10).



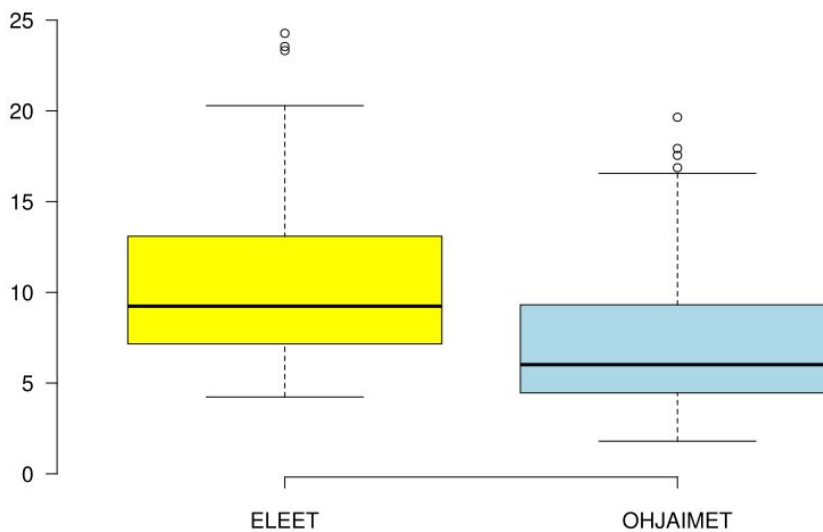
Kuva 10: Havainnollistus testitilanteesta

5. Tulokset

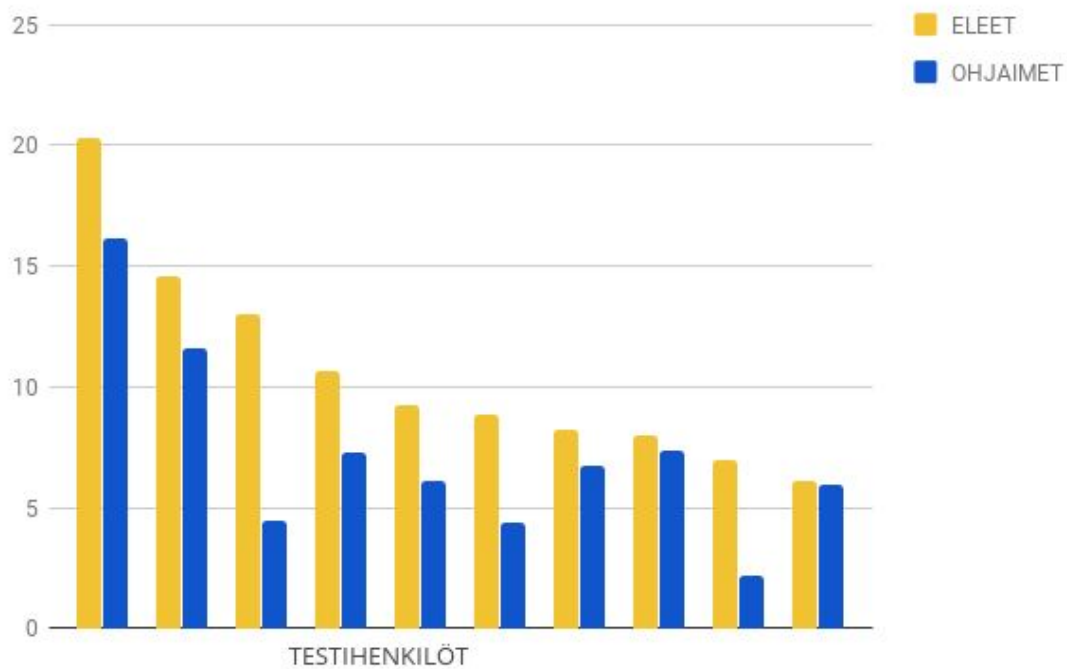
Tässä kappaleessa esittelen testin tulokset.

5.1. Mittaustulokset

Lajittelutehtävässä mitattiin yhden sarjan (kolmen palikan) suorittamiseen käytetty aika. Eleillä tehdyt suoritteet osoittautuivat hitaammiksi (*keskiarvo* = 10,60; *keskihajonta* = 4,63; *n* = 70), kuin ohjaimilla (*keskiarvo* = 7,23; *keskihajonta* = 4,19; *n* = 70). Suoritusnopeuden ero osoittautui kahden riippumattoman otoksen t-testillä merkitseväksi ($t(4,52) = 136,7$; $p = 0.00001$; 2-suuntainen). Keskimääräinen suoritus aika oli ohjaimilla n. 32% nopeampi. Kuvasta voidaan nähdä, että eleiden suoritusajoissa oli enemmän vaihtelua (Kuva 11). Kuvassa ohjainten suoritusnopeuden yläneljännes vastaa eleiden mediaania. Ohjaimet olivat jokaisen testihenkilön kohdalla nopeampi modaliteetti lajittelutehtävässä. Ts. jokaisen testihenkilön keskimääräinen suoritus aika oli nopeampi ohjaimilla, kuin eleillä (Kuva 12).

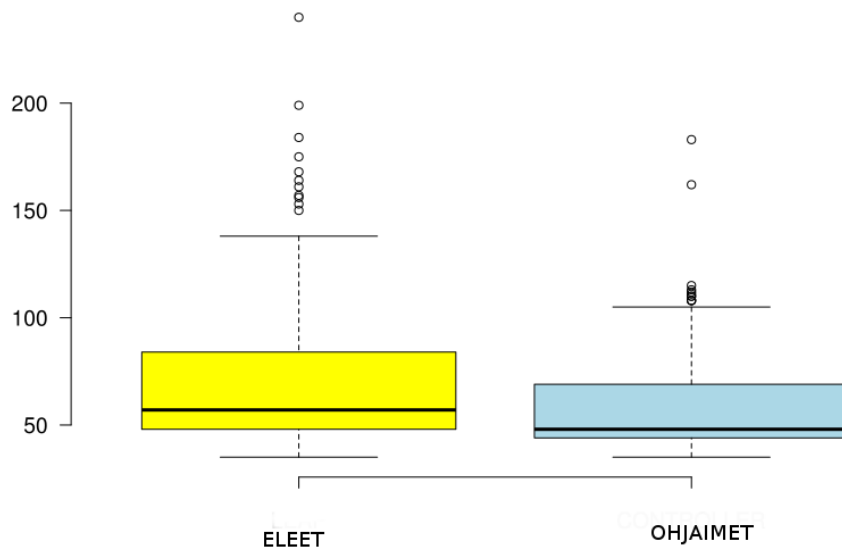


Kuva 11: Suoritusajojen jakaantuminen

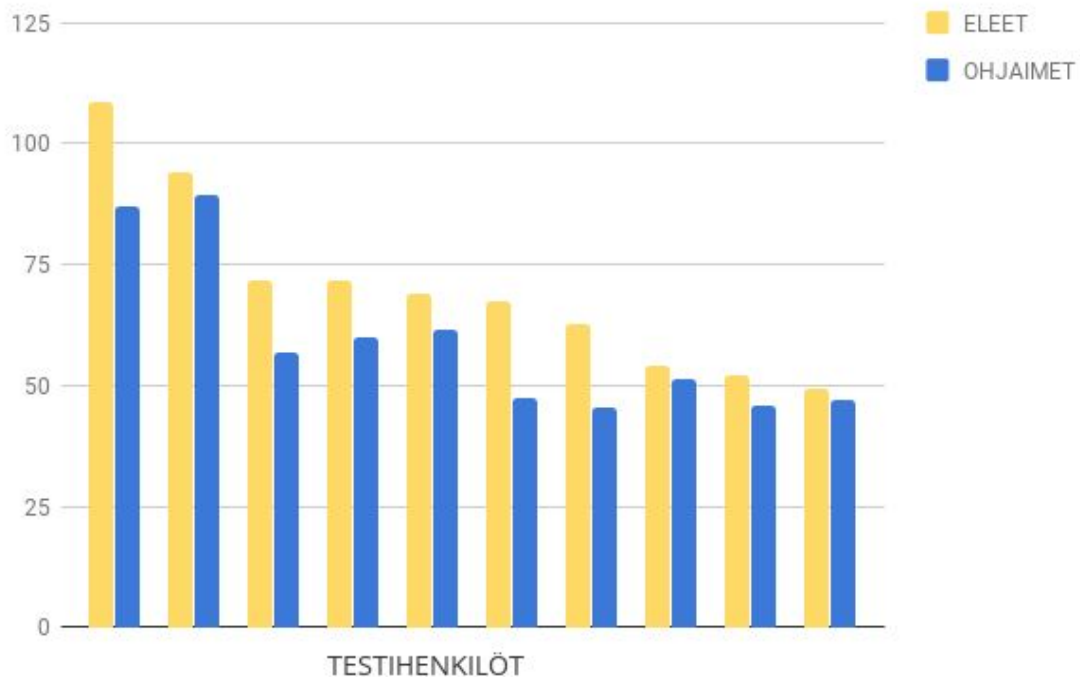


Kuva 12: Testihenkilöiden kolmen sarjan suoritusaikojen keskiarvot sekunteina

Lajittelutehtävässä mitattiin myös tarkkuutta, eli kuinka lähelle maalialueen keskustaa testihenkilöt saivat palikat osumaan. Eleillä osuttiin heikommin maaliin (*keskiarvo* = 70,03; *keskihajonta* = 33,07; *n* = 234), kuin ohjaimilla (*keskiarvo* = 59,12; *keskihajonta* = 22,97; *n* = 240). Tarkkuuden ero osoittautui kahden riippumattoman otoksen t-testillä merkitseväksi ($t(4,163) = 414,3$; $p = 0.00001$; 2-suuntainen). Eleiden osumaetäisyydessä hajonta oli suurempaa (Kuva 13). Myöskin osumatarkkuudessa jokaisen käyttäjän kohdalla ohjaimet olivat paremmat (Kuva 14).



Kuva 13: Osumatarkkuuden jakautuminen



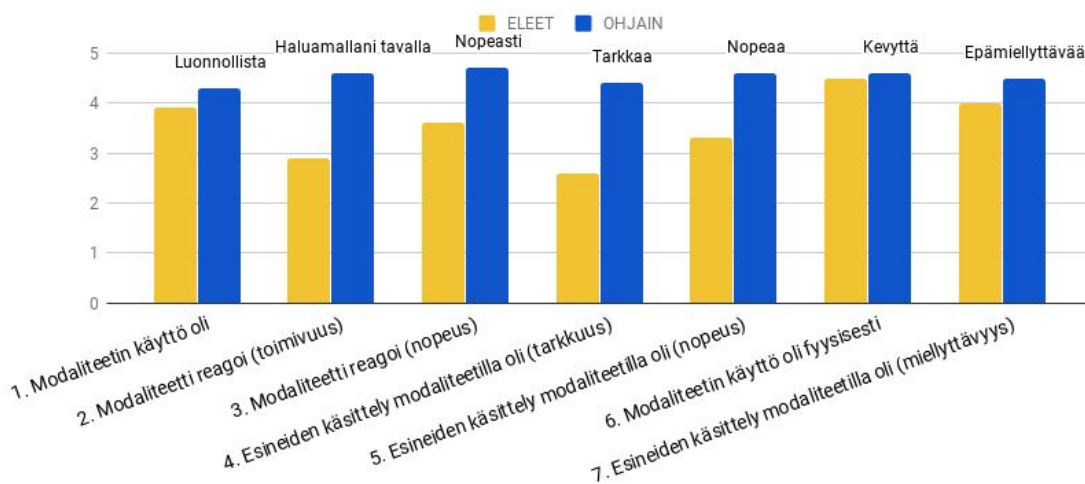
Kuva 14: Testihenkilöiden keskimääräinen osumaetäisyys maalin keskustasta Unity yksikköinä

Tutkittaessa palikoiden siirtämiseen käytetyn ajan ja osumatarkkuuden riippuvuutta, ei tilastollisesti merkittävää korrelaatiota havaittu kummankaan modaliteetin tapauksessa. Eleillä korrelaation todennäköisyys oli hieman suurempi ($r=-0,198$; $n=70$; *1-suuntaisen testin p-arvo*=0,1) kuin ohjaimella ($r=-0,133$; $n=70$; *1-suuntaisen testin p-arvo*=0,272). Korrelaation puuttumiseen voi vaikuttaa testin toteutus. Erityisesti käsieleiden tapauksessa fysiikkamoottorin ohjelmointivirheiden takia palikat putosivat tai lensivät testihenkilöiden käsistä ulottumattomiin, jolloin palikka katosi testiympäristöstä. Tämä saattoi vaikuttaa suoritusaikaa vähentävästi, muuttamatta kuitenkaan etäisyyden keskiarvoa. Mahdolliseen korrelaatioon viittaavat tulokset saattoivat johtua myös fysiikkamoottorin ongelmista, mitkä johtivat testihenkilöiden varovaiseen palikoiden siirtelyyn. Ohjaimilla tätä ongelmaa ei ollut ja ohjaimilla korrelaatio oli epätodennäköinen. Ohjainten tapauksessa siis tarkkuus ja nopeus olivat selkeästi erillisiä käyttäjäkohtaisia ominaisuuksia. Eleillä aiheen jatkotutkimus voisi olla merkityksellistä paremmin korrelaation tutkimiseen soveltuvilla testeillä.

5.2. Kyselylomakkeiden tulokset

5.2.1. Testikysely

Testikyselyllä pyrittiin kartoittamaan modaliteettien eri ominaisuuksia. Jokaisen ominaisuuden keskiarvon suhteen ohjain arvioitiin paremmaksi kuin eleet (Kuva 15). Pienimmillään ero oli modaliteetin fyysisyyden arvioinnissa, jolloin modaliteeteissa ei ollut oleellista eroa. Suurimmat erot koettiin tarkkuuden ja toimivuuden kohdalla. Tämä johtui oletettavasti eleiden fysiikkamoottorin ohjelmointivirheistä.

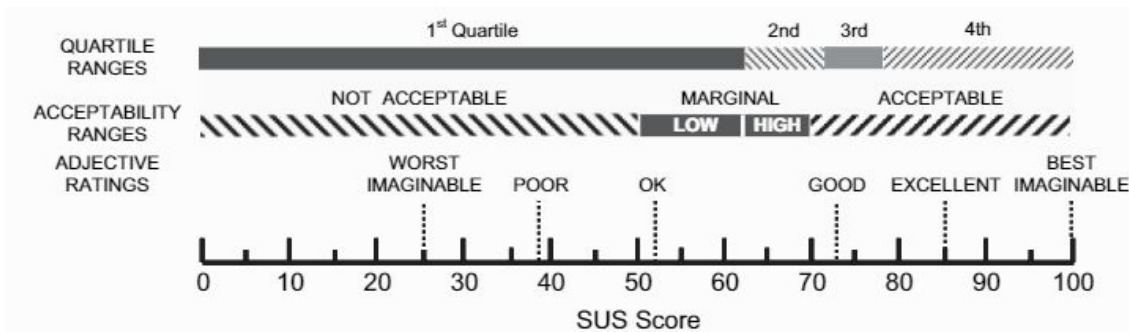


Kuva 15: Testikyselyn tulokset

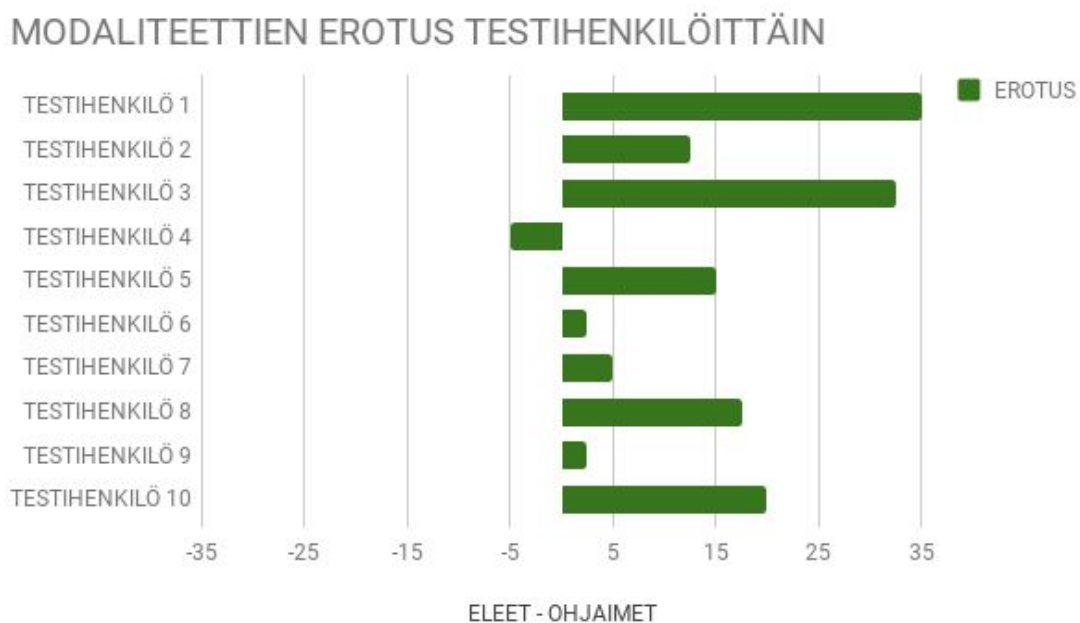
5.2.2. System Usability Scale (SUS)

Yleistä käytettävyyttä mittaavassa System Usability Scale-asteikossa eleet saivat ohjaimia heikommat pisteet. System Usability Scale-asteikon tueksi laadituilla adjektiiveilla ja hyväksyttävyyks-asteikolla (Kuva 16) molemmat modaliteetit sijoittuivat hyväksyttävälle alueelle (Bangor, Kortum ja Miller 2008). Eleet saivat SUS pisteitä 70.25, joten niillä käytettävyys arvioitiin olevan “ok” tai lähes “hyvä”. Ohjaimilla käytettävyys sai pisteitä 84, joten niillä käytettävyys arvioitiin olevan “hyvä” tai lähes

“erinomainen”. Yhdeksän kymmenestä testihenkilöstä arvioi ohjaimella tehdyn testin käytettävämmäksi kuin eleiden (Kuva 17). Suurimmillaan ero ohjainten hyväksi oli 35 pistettä. Eleitä suosinut käyttäjä arvioi eleet 5 pistettä käytettävämmäksi kuin ohjaimet.



Kuva 16: SUS adjektiivin ja hyväksyttävyyden asteikko (Bangor, Kortum ja Miller 2008).



Kuva 17: Testihenkilöiden SUS tulosten modaliteettien välinen erotus

5.3. Haastattelujen tulokset

Tässä osassa perehdyn haastattelujen tuloksiin. Käytettävyydestin lopuksi tehdyistä haastatteluista saatiin laadullista tietoa käyttäjien kokemuksista. Haastattelu toteutettiin puolistrukturoituna ja kysymyksissä pyrittiin selvittämään käyttäjien mielipiteitä

modaliteettien hyvistä ja huonoista puolista. Useiden testihenkilöiden kohdalla nousi esiin samoja mielipiteitä. Testihenkilöt nostivat erityisesti esille eleiden kohdalla tapahtuneen palikoiden tartuntaongelman, ohjaimen toimintavarmuuden ja tarkkuuden, eleiden “tuntuman” puuttumisen, eleiden sopivuuden paremmin kastelukannutehtävään sekä eleisiin liittyneen hämmästyksen. Seuraavissa kappaleissa perehdyn näihin ilmiöihin.

Eleiden puutteellisen tartuntamekaniikan koki haastattelujen mukaan ongelmaksi seitsemän kymmenestä testihenkilöstä. Viisi testihenkilöä koki ongelmaksi erityisesti palikoiden sinkoamisen irti otteesta kesken toiminnan ja kaksi testihenkilöä koki että ongelma oli erityisesti palikoihin tarttuminen. Kaksi henkilöä koki ongelmana myös eleissä havaittavan “nykimisen” tai “värinän”.

Vastaavasti ohjainten toimintavarmuus nousi jossain muodossa esille jokaisessa haastattelussa. Ohjainta pidettiin toimintavarman lisäksi hallittavana ja tarkkana.

Kastelukannutehtävässä eleiden käyttöä piti parempana puolet testihenkilöistä. Yksi testihenkilöistä kommentoi: “Luonnollisinta oli liikuttaa kastelukannua eleillä ja palikoita ohjaimella” toisen testihenkilön mielestä eleillä sai luonnollisen otteen kastelukannun kahvasta. Eleet vaikuttavat siis olevan hyvä modaliteetti sellaisten esineiden käsittelyyn missä on luonnollinen tarttumakohta, kuten kastelukannu.

Eleiden laitteettomuutta piti negatiivisena puolet testihenkilöistä. Testihenkilöt kokivat ongelmana käsien uppoamisen esineisiin. Yksi testihenkilö mainitsi jännittäneensä sormiaan tarttuessaan palikkaan. Yksi testihenkilö näki laitteettomuuden positiivisena asiana. Kaksi testihenkilöä kommentoi ohjaimen fyysisen vastuksen hyötyä. Neljä henkilöä myös kokivat ohjaimen ergonomian ongelmallisena. Yksi henkilö mainitsi ohjaimen “joustamattomuuden” aiheuttavan ongelmia erityisesti kun halusi käänellä kappaleita. Ohjainta kommentoitiin myös liian isoksi ja “karkeaksi”.

Opittavuutta kommentoi viisi testihenkilöä. Kaikki kokivat että eleet eivät vaadi opettelua, mutta ohjaimet vähintään jonkin verran. Kolme henkilöä kommentoi että erityisesti ohjainten tartuntakohdan löytäminen vaati opettelua.

Eleiden hämmästyttävyyttä korosti neljä testihenkilöä. Näistä neljästä yksi ei pitänyt hämmästyttävyyttä puhtaasti positiivisena asiana vaan enemmänkin hämmentävänä. Yksi heistä koki eleet “maagisina” ja vaikka hän piti ohjaimia käytettävyydeltään parempina, hän käyttäisi silti mieluummin eleitä, vastaavasti ohjaimen “välineellisyys” rajoitti virtuaalimaailman kokemista. Kaksi henkilöä koki ajoittain aistiritiriitoja eleissä. He kokivat, että eleet virtuaaliympäristössä eivät reagoineet samoin kuin aivot ohjasivat.

6. Pohdinta

Tässä tutkielmassa perehdyttiin virtuaalitodellisuuden palaute- ja syötelaitteisiin, niiden käytettävyyteen sekä selvitettiin käsieleiden ja ohjainten käytettävyyttä, sekä niiden käyttöön liittyviä ominaisuuksia virtuaalitodellisuudessa.

Virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden markkinoiden arvioidaan kasvavan kymmenkertaisiksi seuraavassa neljässä vuodessa (2018-2022) (IDC, 2018). Myös tutkimusta alalla tehdään paljon. Teknologian kehitys ja VR-laitteiden edullistuminen tuo virtuaalitodellisuuden koteihin ja yhä useamman ulottuville. Tällä hetkellä VR-laitteissa ja -sovelluksissa monia kiehtoo viihdearvo. Viihteen lisäksi virtuaalitodellisuudella on mahdollisuus mullistaa opetus ja koulutus. VR-ympäristössä pystytään visualisoimaan kolmiulotteisia asioita vaikuttavasti ja tilan hahmottaminen. Esimerkiksi monimutkaisten luonnontieteellisten ilmiöiden esittäminen virtuaalitodellisuudessa mahdollistaa niiden ymmärtämisen tehokkaammin kuin perinteisillä opetusmenetelmillä. Lääketieteessä ja erityisesti kirurgiassa VR-sovelluksilla voidaan mahdollistaa erilaisten leikkausten harjoittelu turvallisesti. VR-sovelluksilla voidaan kehittää opiskelijan psykomotorisia taitoja ja anatomian ymmärrystä.

Virtuaalitodellisuus luo käytettävyyden suunnittelulle uudenlaisia haasteita. VR-sovellusten laajan kirjon takia on vaikea laatia yleispäteviä ohjeistuksia tai heuristiikkoja sovellusten suunnitteluun. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon niin laitteisiin liittyvät ominaisuudet kuin virtuaalitodellisuuden kokemiseen liittyvät ilmiöt. VR-lasit voivat aiheuttaa joissakin käyttäjissä pahoinvointia pitkän käytön aikana, mikä rajoittaa yhden käyttösessio pituutta. Hyvä kuvanlaatu ja linssit vähentävät pahoinvoinnin yleisyyttä, kuin myös koetun liikkeen luonnollisuus. Tämän takia liikkuminen virtuaaliympäristössä luo haasteen käytettävyyden suunnittelulle.

VR-ympäristöön sopivia syötelaitteita on olemassa laaja kirjo. Fyysisten ohjainten rinnalla elekäyttöliittymät tarjoavat virtuaaliympäristöön potentiaalisen vaihtoehdon.

Ohjaimet ovat välillinen työkalu, mutta eleet mahdollistaa suoran vuorovaikutuksen virtuaalimaailman kanssa. Omien käsien heijastuman näkeminen virtuaalisessa ympäristössä on vaikuttava kokemus. Eleiden tuottamiseen luotu teknologia sisältää vielä puutteita, mutta sekä laitteiden että ohjelmistojen kehittyminen tulee mahdollistamaan erittäin varman ja responsiivisen eleiden tunnistamisen. Tällä hetkellä eleiden tuottamiseen tarvitaan erillinen laite virtuaalilasien lisäksi, mutta tulevaisuudessa eleteknologia voi hyvinkin sisältyä saatavilla oleviin virtuaalilaseihin.

Eleiden mahdollinen yleistyminen VR-laitteissa tarjoaa käytettävyyssuunnittelijoille mielenkiintoisia haasteita. Tällä hetkellä VR-eleissä ei ole olemassa selkeitä standardeja, siksi uusia sovelluksia kehitettäessä on syytä panostaa vuorovaikutuksen suunnitteluun ja arvioida käyttöliittymä huolella. Eleiden etu on niiden luonnollisuus ja virtuaalimaailman käyttöliittymässä onkin järkevää hyödyntää malleja todellisesta elämästä. Vivut, painikkeet ym. todellisen elämän elementit omaavat selkeän affordanssin ja niitä on luonnollista käsitellä eleillä. Käsien asennoilla ja ilmaan piirrettävillä kuvioilla voidaan toteuttaa erilaisia toimintoja. Leap Motion tarjoaa kehittäjälle erilaisia valmiita tapoja käyttöliittymän toteutukseen sekä käsien asentoon perustuvien eleiden tunnistukseen. Käyttöliittymän arviointia varten on syytä kehittää oma sarja heuristiikkoja ja mahdollisesti arviointi-asteikkoja juuri eleiden arviointia varten.

Tutkimusosassa selvitettiin eleiden ja ohjainten käytettävyyttä virtuaaliympäristössä. Kymmenen testihenkilöä tutustui eleiden ja ohjainten käyttöön virtuaaliympäristössä. Testihenkilöt käyttivät kumpaakin modaaliteettia todellisen elämän tehtävässä sekä kappaleiden lajittelutehtävässä. Tutkimus selvitti modaaliteettien käytettävyyttä sekä niiden soveltuvuutta kahteen erilaiseen tehtävään. Virtuaalilaseina toimi HTC Vive pohjainen Tobii Pro VR, ohjaimina oli HTC Vive Controller ja eleet toteutettiin Leap Motion Controller-laitteella.

Testissä selvisi että nykyisellään Leap-eleteknologian ongelmat heikentävät sen käytettävyyttä huomattavasti. Ongelmat liittyvät ilmeisimmin Leapin tarjoamaan eletunnistusohjelmistoon tai fysiikkamoottoriin. Käytännössä se näkyi kappaleiden

irtoamisena otteesta ja käsien virtuaalipresentaation värinä. Elekameran kantama oli tarkoitukseen riittävä suoraan eteenpäin. Sivuttaissuunnassa kantama voi aiheuttaa ongelmia, mikäli käyttäjä kääntää päätään pitäen kädet suoraan eteenpäin. Ongelma tulee ottaa huomioon mikäli ohjelmassa tapahtuu paljon pään kääntämistä. Ratkaisu ongelmaan voisi olla laajempi sivuttaissuuntainen kantama tai kantaman ulkopuolella olevien käsien tilan säilyttäminen.

Vaikka eleet arvioitiin käytettävyydeltään heikommiksi kuin ohjaimet, on niillä silti paljon potentiaalisia käyttötarkoituksia. Eleiden laitteettomuus tekee käytöstä vaivatonta. Virtuaalitodellisuuden ja todellisen maailman välillä siirtyminen on vaivatonta elekäyttöliittymää käytettäessä. Tämä mahdollistaa esimerkiksi opetussovellukset joissa virtuaaliympäristössä opetellaan ensin jokin asia ja välittömästi suoritetaan toimenpide todellisessa ympäristössä, kuten vaikka auton moottorin huoltosovellus. Laitteettomuus mahdollistaa myös käyttöliittymän käytön likaisilla käsillä, kuten autonhuoltoesimerkissä. Laitteeton käyttöliittymä on myös hygieniinen mikä on hyödyllistä esimerkiksi lääkäreille suunnattuihin sovelluksiin.

Haastatteluissa neljä kymmenestä testihenkilöstä kertoi olevansa erittäin innostuneita elekäyttöliittymästä. Eleiden eduksi voidaan lukea niiden vaikuttavuus. Suora vuorovaikutus sitoo käyttäjän virtuaalimaailmaan. Yksi käyttäjästä kertoi olevansa keskittyneempi eleitä käytettäessä ja neljä käyttäjää nosti esille ohjainten ergonomian ongelmana. Ohjainten laitteellisuus vaikuttaa vuorovaikutuksen luonteeseen. Ohjaimet toimivat kuin työkaluna jolla vuorovaikutetaan virtuaalimaailman kanssa. Tässä tutkimuksessa ei testattu immersivisuutta, mutta haastattelutulokset vaikuttavat että eleet lisäävät immersion kokemusta verrattuna ohjaimiin. Varmoja johtopäätöksiä asiasta ei voida kuitenkaan vetää ja siksi eleiden vaikutusta immersion vahvuuteen olisi syytä selvittää erillisessä tutkimuksessa.

Eleiden rinnalla arvioitujen ohjainten käytettävyys oli selkeästi parempi kuin eleissä. Tämä kävi ilmi niin kahdesta erillisestä kyselystä kuin testihenkilöiden haastatteluista. Erityisesti testihenkilöt arvostivat ohjainten tarkkuutta, nopeutta ja oikeaa reagointia käyttäjän syötteisiin. Testin aikana mitattiin nopeutta ja tarkkuutta. Nämä mittaukset

tukevat käyttäjien mielipiteitä. Ohjaimella saadut tulokset olivat paremmat sekä nopeudessa että tarkkuudessa.

Ohjainten selkeää käytettävyyseroa saattaa korostaa käytettävyydestin tehtäväjärjestys. Ohjaimet siis arvioitiin sopivammaksi lajittelutehtävään. Työkalutehtävässä osa käyttäjistä piti eleitä toimivampana. Arviointia edeltävä tehtävä oli aina ohjaimille suotuisa lajittelutehtävä ja sen takia vastauslomakkeisiin saattettiin peilata vahvemmin lajittelutehtävän kokemuksia. Erilaisella tehtäväjärjestelyllä käytettävyysero olisi voinut olla hieman pienempi.

7. Johtopäätökset

Tutkimuksessa selvitettiin eleiden ja ohjainten käytettävyyteen liittyviä ominaisuuksia virtuaaliympäristössä. Kymmenen testihenkilöä kutsuttiin laboratorioon osallistumaan käytettävyydestiin. Testi koostui kahdesta tehtävästä. Toisessa tehtävässä testihenkilöt käyttivät kastelukannua kukkien kasteluun ja toisessa he lajittelivat oikean värisiä palikoita maalialueelle. Lajittelutehtävässä mitattiin nopeutta ja tarkkuutta ja lisäksi testihenkilöt vastasivat kunkin modaliteetin kohdalla kahteen kyselyyn ja lopuksi heitä haastateltiin.

Ohjainten käytettävyys arvioitiin paremmaksi kuin eleiden. Erityisesti tarkkuus ja toimintavarmuus oli testihenkilöiden mielestä parempi ohjaimilla. Eleissä ongelmaksi osoittautui teknologiset ongelmat, joiden takia kappaleet irtosivat testihenkilöiden otteesta. Lähes tulokset tukevat ohjainten käytettävyyden paremmuutta. Haastatteluisia puolet testihenkilöistä piti kastelukannun käsittelyä helpompana eleillä. Luonnollisen tarttumakohdan omaavien esineiden (kuten kastelukannu) käsittely saattaa siis olla eleiden vahvuus.

Vaikka ohjainten käytettävyys arvioitiin paremmaksi, osa testihenkilöistä mieltyi silti eleiden käyttöön ja näki niissä mahdollisuuksia. Eleiden käyttö ei vaatinut lainkaan opettelua ja omien käsien representaation näkeminen virtuaalimaailmassa aiheutti riemastusta. Käsieleet sopivat näiden tulosten perusteella paremmin viihdyttäviin sovelluksiin kuin erityistä tarkkuutta ja nopeutta vaativiin.

Lähteet

- Anthes, Christoph, Ruben Jesus Garcia-Hernandez, Markus Wiedemann ja Dieter Kranzlmüller. 2016. "State of the Art of Virtual Reality Technology." In *2016 IEEE Aerospace Conference*.
- Argelaguet, Ferran ja Carlos Andujar. 2013. "A Survey of 3D Object Selection Techniques for Virtual Environments." *Computers & Graphics* 37 (3): 121–36.
- Arora, A., A. Hall, J. Kotecha, C. Burgess, S. Khemani, A. Darzi, A. Singh ja N. Tolley. 2015. "Virtual Reality Simulation Training in Temporal Bone Surgery." *Clinical Otolaryngology: Official Journal of ENT-UK ; Official Journal of Netherlands Society for Oto-Rhino-Laryngology & Cervico-Facial Surgery* 40 (2): 153–59.
- Bach, Cedric ja Dominique L. Scapin. 2010. "Comparing Inspections and User Testing for the Evaluation of Virtual Environments." *International Journal of Human-Computer Interaction* 26 (8): 786–824.
- Badi, Haitham Sabah ja Sabah Hussein. 2014. "Hand Posture and Gesture Recognition Technology." *Neural Computing & Applications* 25 (3-4): 871–78.
- Bangor, Aaron, Philip T. Kortum ja James T. Miller. 2008. "An Empirical Evaluation of the System Usability Scale." *International Journal of Human-Computer Interaction* 24 (6): 574–94.
- Bates-Brkljac, Nada. 2012. *Virtual Reality*. Nova Science Pub Incorporated.
- Boletsis, Costas. 2018. "Virtual Reality for Prototyping Service Journeys." *Multimodal Technologies and Interaction* 2 (2): 14.
- Bolt, Richard A. 1980. "Put-That-There." *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 14 (3): 262–70.
- Chandler, Daniel ja Rod Munday. 2016. *A Dictionary of Media and Communication*.
- Cobb, Sue V. G., Sarah Nichols, Amanda Ramsey ja John R. Wilson. 1999. "Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE)." *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 8 (2): 169–86.
- Craig, Alan B., William R. Sherman ja Jeffrey D. Will. 2009. *Developing Virtual Reality Applications: Foundations of Effective Design*. Morgan Kaufmann.
- Cruz-Neira, Carolina, Daniel J. Sandin, Thomas A. DeFanti, Robert V. Kenyon ja John C. Hart. 1992. "The CAVE: Audio Visual Experience Automatic Virtual Environment." *Communications of the ACM* 35 (6): 64–72.
- Curcio, Igor D. D., Anna Dipace, ja Anita Norlund. 2016. "Virtual Realities and Education." *Research on Education and Media* 8 (2).
<https://doi.org/10.1515/rem-2016-0019>.
- Fitts, P. M. 1954. "The Information Capacity of the Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement." *Journal of Experimental Psychology* 47 (6): 381–91.
- Fröhlich, Julia ja Ipke Wachsmuth. 2013. "The Visual, the Auditory and the Haptic – A User Study on Combining Modalities in Virtual Worlds." In *Lecture Notes in Computer Science*, 159–68.
- Gabbard, J.L. ja Hix, D. 1997. A taxonomy of usability characteristics in virtual environments. Department of Computer Science, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg.
- Grier, Rebecca A., Aaron Bangor, Philip Kortum ja Camille S. Peres. 2013. "The System Usability Scale." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics*

- Society ... Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society. Meeting 57* (1): 187–91.
- Han, Jung-Yeob. 2016. “Study on the Head Mounted Display (HMD)-Based VR Contents and Producing Method.” *Indian Journal of Science and Technology* 9 (25).
- IDC. 2018. Forecast augmented (AR) and virtual reality (VR) market size worldwide from 2016 to 2022 (in billion U.S. dollars). In *Statista - The Statistics Portal*. URL: <https://www.statista.com/statistics/591181/global-augmented-virtual-reality-market-size/>. Viitattu 14. Heinäkuuta 2018.
- Israel, Kai, Christopher Zerres, ja Dieter K. Tscheulin. 2017. “Reducing Cybersickness: The Role of Wearing Comfort and Ease of Use.” In *Frontiers in Optics 2017*.
- Jiang, Xianta, Zhen Gang Xiao, ja Carlo Menon. 2018. “Virtual Grasps Recognition Using Fusion of Leap Motion and Force Myography.” *Virtual Reality*.
- Kalawsky, Roy S. 1993. “The Science of Virtual Reality and Virtual Environments: A Technical, Scientific and Engineering Reference on Virtual Environments”. Addison Wesley Publishing Company.
- Kalawsky, Roy S.. 1999. “VRUSE—a Computerised Diagnostic Tool: For Usability Evaluation of Virtual/synthetic Environment Systems.” *Applied Ergonomics* 30 (1): 11–25.
- Kaur, Kulwinder. 1997. “Designing Virtual Environments for Usability.” In *Human-Computer Interaction INTERACT '97*, 636–39.
- Kennedy, Robert S., Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, ja Michael G. Lilienthal. 1993. “Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness.” *The International Journal of Aviation Psychology* 3 (3): 203–20.
- Khor, Wee Sim, Benjamin Baker, Kavita Amin, Adrian Chan, Ketan Patel, ja Jason Wong. 2016. “Augmented and Virtual Reality in Surgery—the Digital Surgical Environment: Applications, Limitations and Legal Pitfalls.” *Annals of Translational Medicine* 4 (23): 454–454.
- Kronqvist, Aila, Jussi Jokinen, ja Rebekah Rousi. 2016. “Evaluating the Authenticity of Virtual Environments: Comparison of Three Devices.” *Advances in Human-Computer Interaction 2016*: 1–14.
- Lee, Jooyeon, Manri Cheon, Seong-Eun Moon, ja Jong-Seok Lee. 2016. “Peripersonal Space in Virtual Reality.” In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology - UIST '16 Adjunct*.
- Lee, Seokwon, Kihong Park, Junyeop Lee, ja Kibum Kim. 2017. “User Study of VR Basic Controller and Data Glove as Hand Gesture Inputs in VR Games.” In *2017 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality (ISUVR)*.
- Lewis, James R. 2018. “The System Usability Scale: Past, Present, and Future.” *International Journal of Human–Computer Interaction* 34 (7): 577–90.
- LIBlog. 2016. HTC Vive and Oculus Rift Hardware Requirements Explained. URL: <http://blog.logicalincrements.com/2016/08/htc-vive-oculus-rift-hardware-requirements-explained/> Viitattu 12.1.2018
- Lin, Junguo, Dwen Cheng, Cheng Yao, ja Yongtian Wang. 2017. “Retinal Projection Head-Mounted Display.” *Frontiers of Optoelectronics* 10 (1): 1–8.
- Lv, Na, Xiaohui Yang, Yan Jiang, ja Tao Xu. 2017. “Sparse Decomposition for Data Glove Gesture Recognition.” In *2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*.

- Mantecón, Tomás, Carlos R. del-Blanco, Fernando Jaureguizar, ja Narciso García. 2016. "Hand Gesture Recognition Using Infrared Imagery Provided by Leap Motion Controller." In *Lecture Notes in Computer Science*, 47–57.
- Mavor, Anne S., ja Nathaniel I. Durlach. 1994. *Virtual Reality:: Scientific and Technological Challenges*. National Academies Press.
- Milgram, Paul, Haruo Takemura, Akira Utsumi, ja Fumio Kishino. 1995. "Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum." In *Telemanipulator and Telepresence Technologies*.
- Mori, Masahiro, Karl MacDorman ja Norri Kageki. 2012. "The Uncanny Valley [From the Field]." *IEEE Robotics & Automation Magazine / IEEE Robotics & Automation Society* 19 (2): 98–100.
- Muhanna, Muhanna A. 2015. "Virtual Reality and the CAVE: Taxonomy, Interaction Challenges and Research Directions." *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 27 (3): 344–61.
- Munafo, Justin, Meg Diedrick, ja Thomas A. Stoffregen. 2016. "The Virtual Reality Head-Mounted Display Oculus Rift Induces Motion Sickness and Is Sexist in Its Effects." *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale* 235 (3): 889–901.
- Nielsen, Jakob. 1994. *Usability Engineering*. Morgan Kaufmann.
- Patterson, Robert, Marc D. Winterbottom, ja Byron J. Pierce. 2006. "Perceptual Issues in the Use of Head-Mounted Visual Displays." *Human Factors*, Issue 3, 48 (3): 555–73.
- Peres, S. Camille, S. Camille Peres, Tri Pham, ja Ronald Phillips. 2013. "Validation of the System Usability Scale (SUS)." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society ... Annual Meeting Human Factors and Ergonomics Society. Meeting* 57 (1): 192–96.
- Pulijala, Y., M. Ma, M. Pears, D. Peebles ja A. Ayoub. 2018. "An Innovative Virtual Reality Training Tool for Orthognathic Surgery." *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, Helmikuu.
- Rebenitsch, Lisa, ja Charles Owen. 2016. "Review on Cybersickness in Applications and Visual Displays." *Virtual Reality* 20 (2): 101–25.
- Regan, E. C., ja K. R. Price. 1994. "The Frequency of Occurrence and Severity of Side-Effects of Immersion Virtual Reality." *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 65 (6): 527–30.
- Riccio, Gary E., ja Thomas A. Stoffregen. 1991. "An Ecological Theory of Motion Sickness and Postural Instability." *Ecological Psychology: A Publication of the International Society for Ecological Psychology* 3 (3): 195–240.
- Roupé, Mattias, Petra Bosch-Sijtsema, ja Mikael Johansson. 2014. "Interactive Navigation Interface for Virtual Reality Using the Human Body." *Computers, Environment and Urban Systems* 43: 42–50.
- Rubin, Jeffrey, ja Dana Chisnell. 2011. *Handbook of Usability Testing: How to Plan, Design, and Conduct Effective Tests*. John Wiley & Sons.
- Sapto Pamungkas, Luhur, Luhur Sapto Pamungkas, Cinthyaningtyas Meytasari ja Hendro Trieddiantoro. 2018. "Virtual Reality As A Spatial Experience For Architecture Design: A Study of Effectiveness for Architecture Students." *SHS Web of Conferences* 41.
- Schnack, Alexander, Malcolm J. Wright, ja Judith L. Holdershaw. 2018. "Immersive Virtual Reality Technology in a Three-Dimensional Virtual Simulated Store:

- Investigating Telepresence and Usability.” *Food Research International*.
- Schultheis, Maria T., Jose Rebimbas, Ronald Mourant, ja Scott R. Millis. 2007. “Examining the Usability of a Virtual Reality Driving Simulator.” *Assistive Technology: The Official Journal of RESNA* 19 (1): 1–8.
- Seibert, J. & Shafer, D.M. 2018. Control mapping in virtual reality: effects on spatial presence and controller naturalness. *Virtual Reality*, Maaliskuu 2018, Volume 22, Issue 1, pp 79–88.
- Sharma, Greeshma, Yash Kaushal, Sushil Chandra, Vijander Singh, Alok P. Mittal ja Varun Dutt. 2017. “Influence of Landmarks on Wayfinding and Brain Connectivity in Immersive Virtual Reality Environment.” *Frontiers in Psychology* 8 (Heinäkuu): 1220.
- Sharples, Sarah, Sue Cobb, Amanda Moody ja John R. Wilson. 2008. “Virtual Reality Induced Symptoms and Effects (VRISE): Comparison of Head Mounted Display (HMD), Desktop and Projection Display Systems.” *Displays* 29 (2): 58–69.
- Škrlić et al. 2014. “Usability evaluation of input devices for navigation and interaction in 3D visualisation.” *International SERIES on Information Systems and Management in Creative eMedia (2015)*, 19–23.
- Stanney, Kay M., Mansooreh Mollaghasemi, Leah Reeves, Robert Breaux ja David A. Graeber. 2003. “Usability Engineering of Virtual Environments (VEs): Identifying Multiple Criteria That Drive Effective VE System Design.” *International Journal of Human-Computer Studies* 58 (4): 447–81.
- Stanney, K., G. Salvendy, J. Deisinger, P. DiZio, S. Ellis, J. Ellison, G. Fogleman, et al. 1998. “Aftereffects and Sense of Presence in Virtual Environments: Formulation of a Research and Development Agenda.” *International Journal of Human-Computer Interaction* 10 (2): 135–87.
- Sutherland I., 1968. A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I (AFIPS '68 (Fall, part I))*. ACM, New York, NY, USA, 757-764.
- Takeuchi, Naoyuki, Takayuki Mori, Yoshimi Suzukamo ja Shin-Ichi Izumi. 2018. “Modulation of Excitability in the Temporoparietal Junction Relieves Virtual Reality Sickness.” *Cyberpsychology, Behavior and Social Networking* 21 (6): 381–87.
- Tcha-Tokey, Katy, Emilie Loup-Escande, Olivier Christmann ja Simon Richir. 2017. “Effects on User Experience in an Edutainment Virtual Environment.” In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2017 - ECCE 2017*.
- Tecchia, Franco, Giovanni Avveduto, Raffaello Brondi, Marcello Carrozzino, Massimo Bergamasco ja Leila Alem. 2014. “I’m in VR!” In *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology - VRST '14*.
- Techradar. 2018. Oculus Go review. URL: <https://www.techradar.com/reviews/oculus-go>. Viitattu 30 July 2018.
- Tzanavari, Aimilia, Chris Christou, Kyriakos Herakleous ja Charalambos Poullis. 2016. “Studying Children’s Navigation in Virtual Reality.” In *Lecture Notes in Computer Science*, 187–97.
- Usher, Will, Pavol Klacansky, Frederick Federer, Peer-Timo Bremer, Aaron Knoll, Jeff Yarch, Alessandra Angelucci ja Valerio Pascucci. 2018. “A Virtual Reality Visualization Tool for Neuron Tracing.” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24 (1): 994–1003.

- VIVE Blog. 2017. Roomscale 101 – An Introduction to Roomscale VR. URL: <https://blog.vive.com/us/2017/10/25/roomscale-101/>. Viitattu: 13.12.2017.
- VRFocus. 2015. Palmer Luckey Explains Oculus Rift's Constellation Tracking And Fabric. URL: <https://www.vrfocus.com/2015/06/palmer-luckey-explains-oculus-rifts-constellation-tracking-and-fabric/>. Viitattu 13.12.2017.
- Ware, Colin ja Leonard Slipp. 1991. "Using Velocity Control to Navigate 3D Graphical Environments: A Comparison of Three Interfaces." *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* 35 (5): 300–304.
- Wingrave, CA. ja Bowman DA. 2005. "Baseline factors for raycasting selection." *In: Proceedings of virtual reality international 2005*.
- Zhang, Fan, Shaowei Chu, Ruifang Pan, Naye Ji ja Lian Xi. 2017. "Double Hand-Gesture Interaction for Walk-through in VR Environment." *In 2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*.