

Esa Hiiva

**Virtuaalitodellisuuspelien tilavaatimusten pienentäminen
kotikäytössä uudelleensuunnatun kävelyn avulla**

Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

29. marraskuuta 2018

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Esa Hiiva

Yhteystiedot: esa.i.hiiva@student.jyu.fi

Ohjaajat: Paavo Nieminen ja Jukka Varsaluoma

Työn nimi: Virtuaaliodellisuuspelien tilavaatimusten pienentäminen kotikäytössä uudelleensuunnatun kävelyn avulla

Title in English: Using redirected walking in home environment to decrease space requirements of virtual reality games

Työ: Pro gradu -tutkielma

Opintosuunta: Pelit ja pelillisuus

Sivumäärä: 99 + 6

Tiivistelmä: Huonemittakaavan virtuaaliodellisuuspelit vaativat paljon fyysistä tilaa, jota useimmilla kotikäyttäjillä ei ole. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää pelaajien halukkuutta käyttää manipuloitua kävelyä tilavaatimusten pienentämiseksi, sekä tekniikoiden tehokkuutta ja niiden aiheuttamaa simulaatiopahoinvointia. Tutkimus osoitti tunnistamiskyvyn rajoilla olevien menetelmien pystyvän pienentämään tilantarvetta noin kolmanneksen ilman että liikkumisen manipulointi aiheuttaa merkittävää simulaatiopahoinvointia. Tutkimuksen perusteella voidaan päätellä, että kävelyn manipulointi on mahdollista pelinomaisessa virtuaaliympäristössä, ja että pelaajilla on halukkuutta tilantarpeen pienentämiseen sivuvaikutuksista huolimatta. Tutkimuksessa myös kehitettiin uusi paikannuslaitteen käyttöön perustuva uudelleensuuntausmenetelmä.

Avainsanat: virtuaaliodellisuus, uudelleensuunnattu kävely, videopelit

Abstract: Room-scale virtual reality games require a larger physical space than the spaces most home users have. The goal of this research was to find out how willingly gamers would use manipulated walking techniques to reduce the space requirements, how effective those techniques are, and whether they cause simulation sickness. The research showed that barely recognizable techniques can reduce the space requirements by one third without significant

symptoms of simulation sickness. It can be deduced from the research that manipulated walking is possible in a game-like virtual environment and that gamers are willing to reduce the space requirements regardless of the side effects. A redirected walking method that uses an external tracking device was also developed in the research.

Keywords: virtual reality, redirected walking, video games

Kuvat

Kuva 1. Todellisuus–virtuaalisuus -jatkumo (mukaillen Milgram & Kishino, 1994).....	6
Kuva 2. Uudelleensuuntaustekniikoiden taksonomia (mukaillen E. A. Suma ym., 2012)..	17
Kuva 3. Uudelleensuuntauksessa käytettävät vahvistukset (mukaillen Nilsson ym., 2018)	19
Kuva 4. Soveltuvuustestissä ja käyttäjättestissä käytetyt tilakoot	26
Kuva 5. Poimintaliikkeen aiheuttama VR-lasien liike (A), vyötäröllä sijaitsevan Trackerin liike (B) ja käden liike (C)	35
Kuva 6. Manipulointialgoritmin toiminta	43
Kuva 7. Koehenkilöiden ikäjakauma ja sukupuoli	52
Kuva 8. Käyttäjättestissä käytetty tila.....	53
Kuva 9. Odotustila VR-tilan eteisessä	54
Kuva 10. Testissä käytetyt HTC Vive VR-lasit.....	57
Kuva 11. TPCast-järjestelmän langattoman lähettimen sijoittelu	58
Kuva 12. Kohtisuoran projektion kuva testikentästä	60
Kuva 13. Testipelissä kerättävät eläinfiguurit	61
Kuva 14. Esimerkki testipelin keräysmekanismista	64
Kuva 15. Esimerkki testipelin sisäisestä kyselystä	65
Kuva 16. Testitapahtuman aloitus ja seuraavien testikertojen aloitus	66
Kuva 17. Testikerran ohjekyltti	66
Kuva 18. Kerättävät figuurit testikerran aloituspisteen oikealla puolella.....	67
Kuva 19. Kerättävät figuurit testikerran aloituspisteestä takavasemmalle	67
Kuva 20. Figuurit virtuaalisesti hankalassa sijainnissa.....	68
Kuva 21. Vastaukset kysymykseen liikkumisen manipuloinnin käytöstä.....	74
Kuva 22. Simulaatiopahoinvointikyselyn vastauksien keskiarvot	75
Kuva 23. Simulaatiopahoinvointikyselyn painotetut tulokset osa-alueittain.....	76
Kuva 24. Tilantarpeen tiivistyminen paikannuspistekohtaisesti.....	77
Kuva 25. Pään ja vyötärön tilantarpeen tiivistyminen verrattuna tilan kokonaistiivistymiseen	78
Kuva 26. Vertailujen yksiselitteisyys	79
Kuva 27. Tilan tiivistymisen onnistuminen.....	84

Taulukot

Taulukko 1. SteamVR-alustalla käytettyjen huonemittakaavan VR-tilojen koot (mukaillen Valve, 2017).....	14
Taulukko 2. Oculus Riftillä huonemittakaavan virtuaalitodellisuutta käyttävien käyttäjien tilakoot (mukaillen Oculus, 2018)	15
Taulukko 3. Soveltuvuustestissä ja käyttäjättestissä käytetyt tilakoot.....	27
Taulukko 4. Tärkeimpien muuttujien tietotyypit.....	41
Taulukko 5. Testikertojen parivertailujen suoritus	48

Sisältö

1	JOHDANTO.....	1
2	VIRTUAALITODELLISUUS	4
2.1	Virtuaalitodellisuuden ja VR-lasien historia.....	4
2.2	Virtuaalinen ympäristö ja immersio.....	6
2.3	Virtuaaliympäristön havainnointi	7
2.4	VR-pahoinvointi	8
2.5	Virtuaalitodellisuus pelikäytössä	9
2.6	Liikkumismenetelmät virtuaalitodellisuudessa.....	9
2.6.1	Ilman fyysistä liikkumista toteutetut liikkumismenetelmät	10
2.6.2	Kävelyä simuloivat liikkumismenetelmät	11
2.6.3	Luonnolliseen fyysiseen kävelyyn perustuvat liikkumismenetelmät	11
2.7	Fyysisen tilan tarve	13
2.7.1	Tilantarpeeseen vaikuttava tekijät	13
2.7.2	Pelaajilla käytössä olevan fyysisen tilan koko	13
3	VIRTUAALIYMPÄRISTÖSSÄ LIIKKUMISEN MANIPULOINTI	16
3.1	Uudelleensuuntaustekniikat	16
3.2	Uudelleensuunnatun kävelyn historia	18
3.3	Huomaamattomat uudelleensuunnatun kävelyn menetelmät.....	18
3.3.1	Rotaatiovahvistus	19
3.3.2	Translaatiovahvistus	20
3.3.3	Kaarevuusvahvistus.....	21
3.3.4	Taipumisvahvistus.....	22
3.4	Huomaamattomia uudelleensuunnatun kävelyn algoritmeja.....	22
3.4.1	Reaktiiviset algoritmit	23
3.4.2	Ennakoivat algoritmit	24
4	UUDELLEENSUUNNATUN KÄVELYN MENETELMIEN SOVELTUVUUSTESTI	25
4.1	Tilakokojen testaus	25
4.1.1	Pieni tila.....	27
4.1.2	Keskisuuri tila.....	29
4.1.3	Suuri tila	30
4.2	Kertoimien testaus	31
4.3	Uudet manipulointimenetelmät.....	33
4.3.1	Tracker Assisted Manipulation (TAM) -manipulointimenetelmä.....	33
4.3.2	Tracker Centric Manipulation (TCM) -manipulointimenetelmä.....	34
4.4	TAM- ja TCM-menetelmien toteutus pelimoottorissa	37
4.4.1	Unreal Engine 4 pelimoottori ja sen ohjainluokat.....	38
4.4.2	Manipulointimenetelmien toteutus Unreal Engine 4 pelimoottorilla.....	39
4.4.3	Manipulointialgoritmin toteutus.....	42

5	KÄYTTÄJÄTUTKIMUS	45
5.1	Tutkimusmenetelmä.....	45
5.1.1	Tutkimuskysymykset.....	45
5.1.2	Rajaukset	46
5.1.3	Parivertailu	47
5.1.4	Testattavat menetelmät.....	49
5.1.5	Ennakkokysely	50
5.1.6	Testipelin automaattisesti suorittama tiedonkeruu	50
5.1.7	Kysely käyttäjätestin jälkeen.....	51
5.2	Kohderyhmä ja käyttäjätestin koehenkilöt.....	51
5.3	Käyttäjätestin ajankohta ja tila.....	53
5.4	Tutkimusetiikka	55
5.5	Käytetty laitteisto	55
5.5.1	PC-tietokone	56
5.5.2	Virtuaalitodellisuuslasit.....	56
5.5.3	Seurantajärjestelmä.....	58
5.6	Testipeli.....	59
5.6.1	Käyttäjätutkimuksen testikenttä	60
5.6.2	Kerättävät esineet	61
5.6.3	Tutustuminen virtuaalitodellisuuteen ja käytettäviin mekanismeihin	63
5.6.4	Testikertojen rakenne	65
6	TULOKSET	70
6.1	Aineiston huomiot.....	70
6.1.1	Poikkeustapaus koehenkilöiltä kerätyssä datassa.....	70
6.1.2	Testipelistä automaattisesti kerätty liiketieto	71
6.1.3	Paperiset kyselyt.....	72
6.1.4	Aineiston jatkokäyttö.....	73
6.2	Halukkuus manipuloidun kävelyn käyttöön VR:ssä.....	73
6.3	VR-Pahoinvointi	75
6.4	Tilantarpeen pienentyminen.....	76
6.5	Koehenkilöiden valintojen yksiselitteisyys.....	79
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	80
7.1	Kotikäytössä toimivat liikkumisen manipulointimenetelmät	80
7.2	Koehenkilöiden halukkuus manipuloidun kävelyn käytölle VR-peleissä	81
7.3	Tilansäästö käytettäessä manipuloitua kävelyä	82
7.4	VR-pahoinvointi	85
7.5	Pohdinta	86
8	YHTEENVETO	88
	LÄHTEET	90

LIITTEET	94
A Testipelin ohjelmointiin ja käyttöön käytetyt sovellukset	94
B Testipelissä käytetty lisensoitu pelisisältö	94
C Kutsu käyttäjätettiin.....	95
D Vastuuvapauslomake	96
E Ennakkokysely	97
F Käyttäjätestin jälkeinen kysely	98
G Manipulointialgoritmin Blueprint-lähdekoodi.....	99

1 Johdanto

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on löytää keinoja kotikäyttöön tarkoitettujen virtuaalitodellisuuspelien vaatiman huonetilan pienentämiseksi. Virtuaalitodellisuudesta (engl. *Virtual Reality*) käytetään jatkossa lyhennettä VR. Virtuaalitodellisuuslaitteiden hinta on laskenut kuluttajille sopivaan hintatasoon viime vuosina. VR-laseja myydään kuluttajille erityisesti viihdekäyttöön, VR-pelien ollessa näkyvimmin mediassa esillä. Virtuaalitodellisuuden historiasta ja virtuaalitodellisuuslaitteiden kehityksestä kerrotaan lisää luvussa 2.

Virtuaalitodellisuudessa liikkuminen on kuitenkin haasteellista kotikäyttäjille. Kotikäyttäjät eivät ole tottuneet liikkumaan virtuaalitodellisuudessa, mikä johtuu mahdollisesti tekniikan uutuudesta. Liikkumista eivät myöskään helpota monille käyttäjille vieraat liikkumismenetelmät. Seurauksena voi olla simulaatiopahoinvointia. Luonnollisen – todellisen maailman kokemusta vastaavan – kävelyn käyttäminen liikkumismenetelmänä helpottaisi virtuaalitodellisuuden kokemista, koska menetelmä on kaikille käyttäjille entuudestaan tuttu. Monilla kotikäyttäjillä ei ole käytettävissään riittävän suurta fyysistä tilaa, joka mahdollistaisi luonnollisen kävelyn huonemittakaavan (engl. *room scale*) virtuaalitodellisuudessa. Huonemittakaavan virtuaalitodellisuus tarvitsee fyysistä tilaa nimensä mukaisesti kokonaisen huoneen tai vähintään osan siitä.

Tutkimuksen motiivi tulee tutkijan omista kokemuksista. Osa VR-peleistä vaatii niin suurta fyysistä tilaa, ettei sellaisia pelejä ollut edes mahdollista kokeilla tutkijan olohuoneessa keskikokoista huonemittakaavan virtuaalitodellisuutta käytettäessä. VR-pelien tilavaatimuksien pienentämiselle olisi käytännön tarvetta. Useimmat VR-pelit eivät hyödynnä huonemittakaavan virtuaalitodellisuuden kaikkia mahdollisuuksia. Tähän saattaa olla myös syynä huonemittakaavan virtuaalitodellisuuden vähäinen käyttäjämäärä. Tilavaatimuksissa ja tilankäytössä olisi parannettavaa, mihin tämä tutkielma pyrkii löytämään keinoja kävelyn manipulointimenetelmien kautta. Kävelyn manipuloinnilla tarkoitetaan menetelmiä, joita käyttämällä käyttäjän fyysinen kävely ei vastaa hänen VR-laseista kokemaansa näkymän muutosta. Tieteellistä tutkimusta virtuaalitodellisuudessa liikkumisesta on tehty vuosikymmeniä ja tutkimuksessa on viimeisen vajaan 20 vuoden aikana tullut esille useita tapoja manipuloida liikkumista. Liikkumisen manipuloinnista kerrotaan tarkemmin luvussa 3.

Liikkumisen manipulointi täysin huomaamattomasti vaatii kuitenkin kotikäyttöä suuremman tilan. Tieteellisesti tutkittuja huomaamattomia manipulointimenetelmiä suurille – liikuntasalin kokoisille – tiloille on kehitetty. Vastaavasti on myös kehitetty käyttäjälle näkyviä menetelmiä, joissa käyttäjä voi havaita manipuloinnin. Tämän tutkimuksen tarkoitus on selvittää, voidaanko tieteellisesti tutkittuja menetelmiä hyödyntää kotikäytössä VR-peleissä liikkuttaessa. Tämä tutkimus keskittyy selvittämään käyttäjien halukkuutta manipuloinnin käyttöön, mikäli manipulointi on havaittavissa ja liikkuminen tuntuu käyttäjältä tavallisuudesta poikkeavalta. Tutkimuksessa huomioidaan myös simulaatiopahoinvoinnin mahdollisuus.

Tutkimus sisältää tutkijan toimesta suoritettavan soveltuvuustestin, josta kerrotaan lisää luvussa 4. Soveltuvuustestiä tehtiin kotikäyttöä vastaavassa tilassa ja siinä testattiin erilaisia manipulointimenetelmiä. Soveltuvuustestiä ja käyttäjätutkimusta varten ohjelmoitiin testipeli Unreal Engine 4 -pelimoottorilla. Soveltuvuustestissä huomattiin VR-laseista erillisen paikannuspisteen käytön tarjoamat mahdollisuudet kävelyn manipuloinnin toteuttamiseksi. Toisena paikannuspisteenä käytettiin vyötärölle sijoitettua HTC Vive Tracker -paikanninlaitetta. Tutkimuksen yhteydessä kehitettiin kaksi uutta Trackeriä käyttävää menetelmää, jotka ovat Trackeriä liikesuunnan tunnistamiseen käyttävä *Tracker Assisted Manipulation (TAM)* ja Trackeriä manipulointiin käyttävä *Tracker Centric Manipulation (TCM)*.

Tutkielmaan liittyen tehtiin käyttäjätutkimus, jossa ulkopuoliset koehenkilöt testasivat valittuja manipulointimenetelmiä. Tutkimusmenetelmästä, käytetystä laitteistosta ja testipelistä kerrotaan lisää luvussa 5. Tässä tutkimuksessa haettiin vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitkä kävelyn manipulointimenetelmät toimivat liikkumismenetelmänä VR-peleissä kotikäytössä ja mitkä ovat niiden rajoitteet?
2. Ovatko manipuloitua kävelyä kokeilleet pelaajat halukkaita käyttämään sitä VR-peleissä?
3. Pitävätkö pelaajat luonnollista kävelyä manipuloitua kävelyä parempana liikkumismenetelmänä kokeiltuaan molempia?
4. Kuinka paljon fyysisen tilan kokoa voidaan pienentää VR-peleissä manipuloidun kävelyn avulla?

Tutkimuksen tulokset löytyvät luvusta 6. Johtopäätökset ja pohdinta ovat luvussa 7. Tutkimuksessa pystyttiin löytämään kotikäytössä toimivia kävelyn manipulointimenetelmiä. Tutkimuksessa havaittiin koehenkilöiden mielenkiinto manipuloitua kävelyä kohtaan sekä pystyttiin osoittamaan manipuloidun kävelyn antavan hyötyä tilansäästöissä. Yhteenveto tutkimuksesta on luvussa 8.

2 Virtuaalitodellisuus

Tässä luvussa kerrotaan, mitä virtuaalitodellisuus on ja millaisilla laitteilla virtuaalitodellisuuden pystyy kokemaan. Aluksi kerrotaan virtuaalitodellisuuden määritelmä ja kerrotaan virtuaalitodellisuuden historiasta VR-laitteiden kehityksen kautta. Tämän jälkeen pohditaan, mitä virtuaaliympäristö on ja miten virtuaaliympäristöä havainnoidaan kokemuksena sekä kerrotaan VR-pahoinvoinnista. Seuraavaksi tarkastellaan virtuaalitodellisuuden pelikäytön ja kokemuspohjaisten sovelluksien eroavaisuuksia. Lopuksi kerrotaan eri liikkumismenetelmien kehittymisestä ja virtuaalitodellisuuspelien vaatimasta fyysisen tilan tarpeesta.

2.1 Virtuaalitodellisuuden ja VR-lasien historia

Virtuaalitodellisuus tässä tutkimuksessa määritellään tietokoneen luomana todentuntuisena digitaalisena ympäristönä, joka pystytään havainnoimaan näkö-, kuulo- ja liikeaistien perusteella. Tässä tutkimuksessa virtuaalitodellisuuden taso vastaa sitä tasoa, mikä on mahdollista saatavilla olevilla kuluttajahintaisilla VR-laseilla. Virtuaalitodellisuuden määrittely ilman laiteriippuvuutta kuvaa ihannetilannetta – täydellistä näyttöä – jollaisen virtuaalitodellisuus-pioneeri Ivan Sutherland kuvasi esseessään *The Ultimate Display* vuonna 1965. Sutherlandin mukaan täydellinen näyttö olisi huone, jossa tietokone hallitsisi aineen olemassaoloa. Huone vastaisi todellisuutta VR-käyttäjän näkökulmasta. Huoneessa olevalle tuolille pystyisi istumaan, huoneessa esitetyt käsiraudat rajoittaisivat liikkumista ja huoneessa esitetty luoti olisi tappava. (viitattu lähteessä Steinicke, 2016, s. 19.) Tarvittavaa tekniikkaa kuvatun kaltaisen VR-kokemuksen toteuttamiseksi ei ollut 60-luvulla, eikä se ole mahdollista tällä hetkelläkään, 50 vuotta myöhemmin.

Virtuaalitodellisuus sellaisena kuin se nykyään tunnetaan, on luotu 60-luvulla muutamien henkilöiden toimesta (Steinicke, 2016, s. 25). Kuluttajille tällä hetkellä myytävät VR-lasit tunnetaan englanninkielisessä kirjallisuudessa myös päähän puettavana näyttönä, jonka yleisesti käytetty englanninkielinen lyhenne on HMD (engl. *Head Mounted Display*). Tässä tutkimuksessa käytän nimitystä VR-lasit tarkoittamaan HMD-termiä vastaavaa päähän puettava näyttöä, koska HMD:tä vastaavaa yleistynyttä suomenkielistä lyhyttä termiä ei ole käytössä. Ensimmäiset VR-lasit kehitti Ivan Sutherland yhdessä oppilaansa Bob Sproullin

kanssa 1968 ja nämä VR-lasit tunnetaan myös nimellä *Sword of Damocles*, eli Damocleen miekka (Steinicke, 2016, s. 27).

Kuluttajien tietoisuuteen virtuaalitodellisuus tuli 1990-luvun alussa viihdeteollisuuden kautta, virtuaalitodellisuuden esiintyessä kirjoissa ja elokuvissa (Steinicke, 2016, s. 6). Kuluttajat joutuivat kuitenkin pettymään, eikä VR yleistynyt 90-luvulla. Kuluttajille oli tarjolla useita VR-laseja, kuten esimerkiksi Nintendo Virtual Boy ja Forte VFX-1, mutta niiden tarjoaman virtuaalitodellisuuden taso ei vastannut kuluttajien odotuksia. Steinicken (2016, s. 7) mukaan yksi suurimpia ongelmia oli, etteivät sen aikaiset VR-lasit pystyneet näyttämään kuin muutamia värillisiä monikulmioita matalalla näytön tarkkuudella ja kelpaamattoman suurella viiveellä. Hänen mukaansa VR-pelejä ei ollut tarpeeksi 90-luvulla ja ne olivat laadullisesti huonoja. VR ei ollut valmis kotikäyttöön 90-luvulla, ja suuren yleisön mielenkiinto sitä kohtaan katosi. VR-teollisuus saavutti huippunsa 1996, jonka jälkeen alan hidaskäyttö alkoi (Jerald, 2015). Virtuaalitodellisuuden tieteellinen tutkiminen ei loppunut 90-luvun jälkeen ja suuri osa tämän tutkimuksen lähteistä onkin kirjoitettu aikana, jolloin monet kuluttajat pitivät virtuaalitodellisuutta kuolleena tekniikkana. Virtuaalitodellisuuden kehityksestä 90-luvulla löytyy lisää tietoa muun muassa Ben Delaney'n kirjoittamasta kirjasta *Sex, drugs and tessellation: The truth about virtual reality, as revealed in the pages of CyberEdge Journal* (Delaney, 2014).

Virtuaalitodellisuus palasi suuren yleisön tietoisuuteen Oculus¹ Rift VR-lasien myötä lähes 20 vuotta myöhemmin. Oculus Rift VR-lasien kuluttajaversio julkaistiin vuonna 2016, jota oli edeltänyt onnistunut Kickstarter-joukkorahoituskampanja vuonna 2012 ja kaksi kehittäjille suunnattua versiota VR-laseista (engl. *Developer Kit*) (Steinicke, 2016, s. 31). Tämän tutkimuksen tekijän ensimmäinen virtuaalitodellisuuskokemus tapahtui Oculus Rift Developer Kit 2 VR-laseilla vuonna 2016. Vuonna 2016 julkaistiin myös tässä tutkimuksessa käytetyt Valven² kehittämät ja HTC:n valmistamat Vive³ VR-lasit.

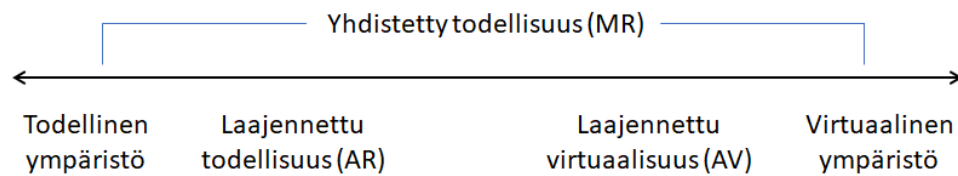
¹ Oculus. Lisätietoa: <https://www.oculus.com>.

² Valve. Lisätietoa: <https://www.valvesoftware.com>.

³ HTC Vive. Lisätietoa: <https://www.vive.com>.

2.2 Virtuaalinen ympäristö ja immersio

Todellinen ympäristö on maailma, jossa me elämme ja täysin virtuaalinen ympäristö on keinotekoisesti luotu ympäristö, jossa ei ole käytetty mitään oikeasta maailmasta. Virtuaalisten ympäristöjen tavoitteena on saada käyttäjä tuntemaan läsnäolonsa virtuaalisessa ympäristössä ja unohtamaan todellisen ympäristönsä (Jerald, 2015).



Kuva 1. Todellisuus–virtuaalisuus -jatkumo (mukaillen Milgram & Kishino, 1994)

Ympäristön ja sen sisällön sijoittumista todellisen ja virtuaalisen välille voidaan selittää Milgramin ja Kishinon (1994) esittämän todellisuus–virtuaalisuus -jatkumon avulla, joka on esitelty yllä olevassa kuvassa (Kuva 1). Jatkumossa yhden ääripään muodostaa todellinen ympäristö ja toisen ääripään virtuaalinen ympäristö. Jatkumossa todellisen ja virtuaalisen ympäristön väliin jäävä alue on yhdistettyä todellisuutta (engl. *Mixed Reality, MR*), jonka voi edelleen jakaa laajennettuun todellisuuteen (engl. *Augmented Reality, AR*) ja laajennettuun virtuaalisuuteen (engl. *Augmented Virtuality, AV*) (Milgram & Kishino, 1994). Tässä tutkimuksessa virtuaalinen ympäristö ei sisällä tarkoituksellisesti todellisen ympäristön elementtejä ja esitetään käyttäen immersivisiä VR-laseja.

Immersiivisillä VR-laseilla tarkoitetaan VR-laseja, jotka peittävät käyttäjän koko näkökentän. Käyttäjä näkee tällöin ainoastaan virtuaalisen ympäristön ja näköhavainnot todellisesta ympäristöstä ovat piilotettuja. Vastaavasti tavallinen tietokoneen näyttö esittää virtuaalista sisältöä, mutta täyttää vain osan käyttäjän näkökentästä, eikä se ole immerstiivinen näyttölaite. Immersio on tärkeä osa virtuaalitodellisuuskokemusta ja käyttäjän subjektiivinen kokemus immersioista tunnetaan läsnäolona (engl. *presence*) (Jerald, 2015). Saatuun VR-kokemukseen vaikuttaa näin ollen laitteisto, mutta vain osittain. Läsnäolon tunne on käyttäjän fyysinen ja psykologinen mielentila, johon vaikuttaa käyttäjä ja laitteiston tuottama immersio (Jerald, 2015).

2.3 Virtuaaliympäristön havainnointi

Ihminen aistii ympäröivän tilan monilla eri aisteilla. VR-simulaatiossa matkitaan aistiärsykeitä, jotta ihminen saadaan tuntemaan aiemmin kuvattu läsnäolon tunne ja kuvittelemaan olevansa virtuaalimaailmassa. Wallerin ja Hodgsonin (2013, s. 4) mukaan tilan tunne koostuu useista eri aistihavainnoista, joiden antama tieto on päällekkäistä ja sisältää paljon tarpeetonta tietoa. Ideaalisessa immersiiivisessä virtuaaliympäristössä hyödynnettäisiin kaikkia aisteja, mutta se olisi hyvin hankalaa ja nykyteknologialla mahdotonta. Tämä ei ole kuitenkaan tarpeellista, koska ihminen pystyy saamaan karkean kuvan ympäristöstään ja liikkeistään jo melkein minkä tahansa yksittäisenkin aistihavaintolähteen perusteella (Waller & Hodgson, 2013, s. 21). Haasteina VR-simulaation toteutuksessa on tällä hetkellä käytössä olevien VR-lasien antama vajavainen aistikokemus ja reaali maailman kanssa päällekkäin menevät aistikokemukset.

Waller ja Hodgson (2013, s. 3) jakavat aistihavainnot ulkoisiin aistihavaintoihin, sisäisiin aistihavaintoihin ja efferentteihin aistihavaintoihin. Ulkoisia aistihavaintoja ovat mm. näkö-, kuulo- ja hajuaisti sekä somaattiset aistit (kuten liikeaisti, asentoaisti, kosketusaisti). Sisäisiä aistihavaintoja ovat mm. tasapaino- ja liikeaistit. Efferenttejä aisteja ovat efferentti kopio, huomion keskittäminen johonkin, kognitiivinen päätöksenteko ja asioiden muuntaminen mielessä. (Waller & Hodgson, 2013, s. 3.)

Ulkoisista aistihavainnoista varsinkin näköaistia on tutkittu paljon, ja usein VR-laitteistoissa päähuomio keskittyykin näyttöihin ja niiden laatuun. Wallerin ja Hodgsonin (2013, s. 6) mukaan jopa lyhyt näköhavainto voi riittää hahmottamaan tilan rakenteen sekä näköaisti on riittävän tarkka nopeuden, etäisyyksien ja suunnan arviointiin. Näköaisti on tehokas, mutta myös ilman sitä on mahdollista paikantaa itsensä ympäristöön nähden (Waller & Hodgson, 2013, s. 6). Näköaisti on kuitenkin yksinään huono suunnan muutoksien tunnistamisessa (Waller & Hodgson, 2013, s. 6). Näköaistin vahvuuksien ja erityisesti heikkouksien tunnistaminen helpottaa virtuaalimaailmassa liikkumisen suunnittelua.

Myös muut ulkoiset aistit antavat tietoa ympäristöstä, joten niitä voidaan virtuaaliympäristöissä hyödyntää näköaistin lisäksi. Waller ja Hodgson (2013, s. 6) pitävät muina tärkeinä ulkoisina aisteina kuuloa ja somaattisista aisteista ihon painereseptoreja. Muut ulkoiset aistit

ovat heidän mukaansa merkityksettömämpiä. Tilaäänet ovatkin yleinen osa monia VR-kokemuksia, ja useimmat VR-lasien liikeohjaimet pystyvät antamaan palautetta värinän avulla. Tasapainoainin avulla ihminen voi aistia pään lineaarista kiihtyvyyttä ja kulmakiihtyvyyttä, pään sijainnin ja suunnan, sekä painovoiman suunnan (Waller & Hodgson, 2013, s. 7).

Ihmisen havainto omasta liikkumisestaan näköainin avulla perustuu kiinteisiin maamerkeihin ja optiseen virtaan (engl. *optic flow*), joka tarkoittaa liikkeen tunnistamista, esimerkiksi suunnan ja nopeuden muutoksista aiheutuvien verkkokalvolle piirtyvien kuvioden avulla (Bruder, Steinicke & Wieland, 2011). Monissa tutkimuksissa (esimerkiksi Interrante, Ries & Anderson, 2007; Steinicke, Bruder, Jerald, Frenz & Lappe, 2010) on havaittu käyttäjien aliarvioivan käveltyjen matkojen pituuksia. Steinicken ym. (2010) tutkimuksessa käyttäjät arvioivat liikkumansa matkan pituuden 7 % liian suureksi, käveltyään 4.69 metriä tavoitteen ollessa 5 metriä. Illuusio omasta liikkumisesta virtuaaliympäristössä on siis erilainen verrattuna fyysiseen liikkumiseen. Ihmiset kävelevät virtuaalitodellisuudessa erilaisella nopeudella, kuin millä he normaalisti kävelevät. Erilaisesta nopeudesta seuraa se, että käyttäjät arvioivat matkojen pituuksia väärin virtuaaliympäristössä. Bruderin ym. (2011) esittämällä menetelmällä oli mahdollista kompensoida virhettä optisen virran illuusioilla, vaikuttaen käyttäjän liikkeen tunteeseen.

2.4 VR-pahoinvointi

VR-pahoinvoinnista käytetään useita eri termejä, kuten liikepahoinvointi (engl. *motion sickness*), kyberpahoinvointi (engl. *cybersickness*) ja simulaattoripahoinvointi (engl. *simulator sickness*). Termejä käytetään usein tarkoittamaan samaa asiaa, vaikka tarkkaan ottaen niiden määritelmät poikkeavat toisistaan. Liikepahoinvointi liittyy oikeaan tai näennäiseen liikkeeseen, kyberpahoinvointi liittyy tietokoneen luoman keinotekoisien maailman visuaaliseen havainnointiin – riippumatta liikutaanko siinä – ja simulaattoripahoinvointi johtuu simulaation puutteellisuudesta verrattuna oikeaan simuloituun tapahtumaan (Jerald, 2015). Yleisellä VR-pahoinvointi tarkoitetaan kaikkia kolmea edellä mainittua pahoinvoinnin muotoa.

Englanninkielinen termi *motion sickness* käännetään suomeksi usein myös matkapahoinvoinniksi, mutta käytän siitä nimitystä liikepahoinvointi, jotta se erottuu

matkapahoinvoinnista (engl. *travel sickness*). Jerald (2015) toteaa matkapahoinvoinnin olevan liikepahoinvoinnin muoto, joka aiheutuu oikeasta fyysisestä liikkeestä. Liikepahoinvointi pitää sisällään myös havaitun liikkeen (Jerald, 2015). Jeraldin mukaan (2015) visuaalisesti käynnistetyyn liikepahoinvoinnin voi pysäyttää sulkemalla silmät, mutta se ei auta fyysisesti käynnistettyyn liikepahoinvointiin, eli matkapahoinvointiin. Tässä tutkimuksessa muutetaan tarkoituksellisesti käyttäjän näkemä liike VR-laseissa vastaamaan suurempaa liikettä kuin käyttäjän fyysisesti kokema. VR-pahoinvointi on tämän johdosta tärkeä ottaa huomioon tutkimuksessa.

2.5 Virtuaalitodellisuus pelikäytössä

Virtuaalitodellisuuden kotikäyttö on tällä hetkellä pääosin viihteellistä, jakautuen virtuaalitodellisuuspeleihin ja -kokemuksiin. Virtuaalitodellisuuskokemukset ovat pääosin hidastempoisia ja visuaalisia, eikä useimmissa kokemuksissa käyttäjä pääse vaikuttamaan kokemuksen kulkuun. VR-pelejä on monen eri tasoisia visuaalisesti sekä pelimekaniikoiltaan. VR-peleissä käyttäjällä on tavoite, jonka saavuttamiseksi käyttäjän tulee käyttää pelin mekaniikkoja. VR-peleissä tempo on virtuaalitodellisuuskokemuksia suurempi ja käyttäjä on aktiivisemmassa roolissa. Tässä tutkimuksessa keskitytään VR-peleihin, joten käyttäjän aktiivinen osallistuminen on olennainen osa tutkimusta.

VR-pelit on kuvattu yleisimmin pelaajan silmin, eli ensimmäisen persoonan näkökulmasta. Ensimmäisen persoonan näkökulma valittiin myös tähän käyttäjätestiin. VR-pelejä on tehty myös käyttäen muita kameramekanismeja onnistuneesti, kuten esimerkiksi kolmannen persoonan kuvakulmasta kuvattu *Hellblade: Senua's Sacrifice* pelin VR-versio⁴.

2.6 Liikkumismenetelmät virtuaalitodellisuudessa

Monia tieteellisesti tutkittuja liikkumismenetelmiä on tuotu kuluttajille suunnattuihin peleihin ja sovelluksiin. Tässä luvussa kerrotaan erilaisista liikkumismenetelmistä, jotka jaan

⁴ *Hellblade: Senua's sacrifice* VR edition. Lisätietoa:
https://store.steampowered.com/app/747350/Hellblade_Senuas_Sacrifice_VR_Edition/.

kolmeen ryhmään. Ryhmät ovat ilman fyysistä liikkumista toteutetut liikkumismenetelmät, kävelyä simuloivat menetelmät sekä luonnolliseen fyysiseen kävelyyn perustuvat menetelmät.

2.6.1 Ilman fyysistä liikkumista toteutetut liikkumismenetelmät

Liikkumismenetelmä VR-silmikon kautta pelattavissa pelissä voidaan toteuttaa samaan tapaan kuin se toteutetaan monissa kuvaruudulta pelattavissa videopeleissä, käyttämällä näppäimistöä ja hiirtä yhdessä, joystick-ohjainta tai pad-ohjainta liikkumiseen. Käytän tästä menetelmästä peliohjaimen rakenteesta riippumatta nimeä joystick-ohjaus, samoin kuin lähdemateriaalissa (mm. Jerald, 2015; Steinicke, 2016) on tehty. Liikkuminen tapahtuu ohjaamalla pelihahmoa, ilman että käyttäjä itse liikkuu paikaltaan. Peliohjaimen käyttö voi aiheuttaa epäluonnollisia liikeratoja niiden binäärisen luonteen takia, käyttäjän liikkuessa pitkiä suorita matkoja ja kääntyen vain harvoin (Multon & Olivier, 2013, s. 73). Perinteisesti pelihahmoa ohjataan käyttämällä peliohjainta käsin, mutta kuluttajille on myynnissä myös jaloilla ohjattavia peliohjaimia VR-pelikäyttöön, kuten esimerkiksi 3dRudder⁵. Ennen VR-pelien yleistymistä on ollut jaloilla ohjattavia peliohjaimia, kuten esimerkiksi Nintendo Wiin Balance Board. Jaloilla käytettävä ohjain vapauttaa käyttäjän kädet esimerkiksi liikeohjaimien käyttöön, mistä on hyötyä VR-peleissä. Joystick-ohjauksen haittapuolia ovat kuitenkin virtuaalimaailmassa liikkumisen eroavaisuus sen vaatimaan fyysisen liikkeeseen – peliohjaimen napin painallukseen – sekä näköaistin korostuminen aistihavainnoissa fyysisen liikkeen puuttuessa (Frissen, Campos, Sreenivasa & Ernst, 2013, s. 114).

Liikkumiseen virtuaaliympäristössä ilman fyysistä liikkumista voidaan käyttää teleport-toimintoa, eli suorittaa siirtymä virtuaalitodellisuudessa peliohjaimen painikkeen painalluksella. Teleport-toiminnon voi toteuttaa monin eri tavoin ja tällä hetkellä VR-peleissä yleisessä tavassa käyttäjä näkee tapahtuvan siirtymän paikan etukäteen ja siihen johtavan reitin. Reitti näytetään käyttäjälle useimmiten ballistisena lentoratana käyttäjän nykyisestä sijainnista kohdesijaintiin. Reitin hyväksytyään käyttäjä hyppää uuteen sijaintiin välittömästi tai lyhyen VR-lasien näytön pimennyksen kautta.

⁵ 3dRudder. Lisätietoa: <https://www.3drudder.com>.

2.6.2 Kävelyä simuloivat liikkumismenetelmät

Kävelyn simulointia on toteutettu tieteellisissä tutkimuksissa eri tavoin. Erityisesti paikallaan kävelyä on tutkittu paljon. Useimmissa vanhemmissa tutkimuksissa paikallaan kävelyn algoritmit käyttävät ainoastaan pään sijaintia kävelyn tunnistamiseen, koska muita paikannettavia pisteitä ei ollut käytettävissä. Liikeohjaimien yleistymisen mahdollisti algoritmien kehittämisen myös liikkumiseen käsien liikkeiden perusteella. PC-tietokoneeseen kytkettävissä VR-laseissa tulee mukana käsillä käytettävät liikeohjaimet, jonka lisäksi kuluttajille myydään muun muassa WalkOVR⁶:n tapaisia jalkoihin liitettäviä liiketunnistimia ja erikoisvalmisteisia ohjaintuoleja kuten VRGO⁷. On myös olemassa VR-tuoleja, esimerkiksi Yaw VR⁸, jotka aikaansaavat liikkeen tunteen virtuaalimaailmassa fyysisen liikkeen avulla ilman että niitä käytettäisiin pelihahmon ohjaamiseen.

2.6.3 Luonnolliseen fyysiseen kävelyyn perustuvat liikkumismenetelmät

Luonnollisen kävelyn on todettu antavan käyttäjälle joystick-ohjausta tai paikallaan kävelyä paremman läsnäolon tunteen (Usoh ym., 1999). VR-peleissä liikkuminen ja toiminnallisuus on tärkeää. Luonnollisen kävelyn on myös havaittu olevan joystick-ohjausta tehokkaampi virtuaalimaailmassa suunnistuksessa (Ruddle & Lessels, 2009) ja törmäysten välttelyssä (E. Suma ym., 2010). Luonnollisen kävelyn käyttämiseksi virtuaaliympäristöissä on kehitetty useita eri lähestymistapoja, jotka Iwata (2013, s. 199) jakaa neljään ryhmään. Nämä neljä ryhmää ovat: liukuvat kengät, juoksumatto, liukuvat jalkatyynyt ja robottilaatat.

Liukuvien kenkien menetelmässä tavoitteena on saada luonnollinen kävelyrytmi, mutta pitää käyttäjä paikallaan fyysisessä ympäristössä. Iwata (2013, s. 201-204) kertoo kolmesta tutkimuksesta, joissa jokaisessa liukuvien kenkien menetelmää käyttävä järjestelmä oli rakennettu eri tavalla. Menetelmää käyttävä käyttäjä tuntee kävelevänsä fyysisesti eteenpäin, mutta liukuvien kenkien johdosta hän pysyy fyysisesti samassa paikassa. Jalkojen liike

⁶ WalkOVR. Lisätietoa: <https://www.walkovr.com>.

⁷ VRGO. Lisätietoa: <http://www.vrgochair.com>.

⁸ Yaw VR. Lisätietoa: <http://www.yawvr.com>.

tunnistetaan sensoreilla ja käyttäjää liikutetaan virtuaalisessa ympäristössä tunnistetun liikkeen perusteella.

Ensimmäisessä liukuvien kenkien tekniikassa – *Virtual Perambulator* vuodelta 1988 – käyttäjällä on jalassaan kaikkiin suuntaan liikkuvat rullaluistimet ja hän on tuettu ylävartalostaan kiinteästi laitteistoon. Toisessa tekniikassa – vuodelta 2006 – käyttäjällä on jalassa moottoroidut rullaluistimet, jotka liikuttavat käyttäjään taaksepäin jokaisen askeleen jälkeen. Kolmannessa tekniikassa – *String Walker* vuodelta 2006 – kumpikin käyttäjän kengistä on tuettu neljällä vaijerilla moottoreihin, joiden avulla tukijalkaa liu’utetaan lattiaa myöten taaksepäin kävelyn aikana liikkeen eliminoimiseksi. (Iwata, 2013, s. 201-204) Kaupallisessa myynissä tai kaupalliseen myyntiin tulossa on useita liukuvien kenkien tekniikkaa käyttäviä laitteita, kuten Virtuix Omni⁹, KatVR Kat Walk¹⁰ ja Cyberith Virtualizer¹¹.

Juoksumattoa on käytetty virtuaaliympäristöissä liikkumisessa jo pitkään. Iwata (2013, s. 205-210) mainitsee juoksumaton käytöstä liikkumisvälineenä jo vuonna 1986 julkaistussa tutkimuksessa, ja kaikkiin suuntiin liikkuvasta juoksumatosta on julkaistu tutkimus vuonna 1997. Kaikkiin suuntiin liikkuva juoksumatto koostuu kahteen suuntaan liikkuvista elementeistä. Järjestelmä koostuu juoksumatosta, joka koostuu useista pienistä poikittain asetetuista juoksumatoista. Juoksumattoja liikutetaan käyttäjän liikkeiden perusteella, jotta voidaan nollata käyttäjän siirtymä fyysisessä ympäristössä. Tällaista juoksumattoa kutsutaan torus-juoksumatoksi (engl. *torus treadmill*) sen rakenteen johdosta (Iwata, 2013, s 206). Torus-juoksumatto Infinadeck¹² on tulossa kaupalliseen myyntiin.

Luonnolliseen fyysiseen kävelyyn perustuvia menetelmiä on käytetty tieteellisessä tutkimuksessa ja niitä on myös tarjolla kuluttajille. Laitteet ovat kuitenkin suurikokoisia ja kalliita, mikä tekee niistä sopivampia VR-pelihalleihin kuin kotikäyttöön. Kotikäyttöön VR-pelaajille tarkoitetun laitteen tulisi olla vähän fyysistä tilaa vievä, edullinen ostaa ja edullinen käyttää.

⁹ Virtuix. Lisätietoa: <http://www.virtuix.com>.

¹⁰ KatVR. Lisätietoa: <http://katvr.com>.

¹¹ Cyberith. Lisätietoa: <https://www.cyberith.com>.

¹² Infinadeck. Lisätietoa: <http://www.infinadeck.com>.

2.7 Fyysisen tilan tarve

Luonnollisessa kävelyssä suurin rajoite on tarvittava tila, koska käyttäjä liikkuu samassa suhteessa oikeassa maailmassa verrattuna virtuaalimaailmaan. Virtuaalimaailman maksimikoko on siinä tapauksessa oikean maailman paikannusjärjestelmän koko. Tätä ongelmaa on yritetty korjata erilaisilla menetelmillä, joissa käyttäjä voi liikkua virtuaalimaailmassa fyysistä paikannustilaa suuremmalla alueella.

2.7.1 Tilantarpeeseen vaikuttava tekijät

Tarvittava fyysinen tila virtuaalitodellisuuspelien pelaamiseen riippuu monista tekijöistä, joita ovat muun muassa VR-lasit, käytetty VR-pelien jakelualue sekä pelin antamat tilavaatimukset. Tässä tutkimuksessa keskitytään HTC Vive VR-laseihin, Valven Steam¹³ jakelualueeseen ja SteamVR¹⁴ VR-hallintaso-velukseen. Käytetystä laitteistosta löytyy tarkempi kuvaus luvusta 5.5. Pienin SteamVR:n tukema tilan koko on 1,5 x 2,0 metriä ja suurin 4,0 x 4,0 metriä, HTC Vive tukee virallisesti lävistäjältään maksimissaan 5,0 metrin kokoista aluetta, jollainen on sivujen mitoiltaan muun muassa 3,0 x 4,0 metrin kokoinen alue. Käyttäjä voi myös valita käyttöönsä seisomatilan, mikäli fyysistä tilaa ei ole tarpeeksi huonemittakaavan virtuaalitodellisuuteen. VR:n käyttö seisomatilassa vaatii yhden metrin halkaisijalta olevan ympyrän muotoisen tilan verran vapaata lattiapinta-alaa.

2.7.2 Pelaajilla käytössä olevan fyysisen tilan koko

Luotettavaa julkista tietoa pelaajien käyttämästä fyysisestä tilasta ei ole saatavilla. VR-alus-
tojen tarjoajat eivät jaa heidän keräämäänsä tietoa julkisesti. Valve kerää tietoa Steam jakelupalvelun käyttäjien tietokoneista vapaaehtoisena automaattisena kuukausittaisena laitteisto- ja ohjelmistokyselyn avulla (*Steam Hardware & Software Survey*¹⁵) ja julkaisee koosteen tiedoista julkisesti Steam palvelussa, mutta julkaistussa koosteessa ei ole VR-laitteista muuta tietoa kuin merkki ja malli.

¹³ Steam. Lisätietoa: <https://store.steampowered.com>.

¹⁴ SteamVR. Lisätietoa: <https://steamcommunity.com/steamvr>.

¹⁵ Steam hardware and software survey. Lisätietoa: <https://store.steampowered.com/hwsurvey>.

Valven kehittäjä nimimerkillä *PersonGuy* on julkaissut SteamVR-kehittäjille suunnatulla foorumilla kolme otetta Valven keräämästä tiedosta koskien VR-peleissä käytettyä fyysistä tilaa (Valve, 2017). Valven kehittäjää voitaneen pitää luotettavana lähteenä, mutta ilmoitetut arvot eivät ole tarkkoja, eikä otoksen kokoa ole ilmoitettu. Julkaistu tieto sisältää prosentuaaliset määrät SteamVR-käyttäjien istunnoista fyysisen tilan mittojen mukaan jaettuna. Jokaisen eri kokoisen tilan käyttäjien arvo pitää sisällään myös kaikkien sitä pienempien tilojen käyttäjien määrän. Tilan koko on pyöristetty alaspäin lähimpään puoleen metriin kummankin sivun osalta erikseen. On tärkeää huomata, että ilmoitetut tiedot koskevat istuntoja käyttäjien sijaan, joten aktiivikäyttäjiltä on samassa otoksessa enemmän istuntotietoja kuin sattunaisilta käyttäjiltä. Istuntokohtainen tilan koon tutkiminen on kuitenkin mielekkäämpää kuin käyttäjäkohtainen, koska sama käyttäjä saattaa käyttää useampaa eri kokoa eri istunnoilla pitemmällä aikavälillä. Esimerkiksi tämän tutkimuksen sovellustestissä oli käytössä kolme eri kokoista fyysistä tilaa.

Taulukko 1. SteamVR-alustalla käytettyjen huonemittakaavan VR-tilojen koot (mukaillen Valve, 2017)

	1,5 m	2,0 m	2,5 m	3,0 m	3,5 m	4,0 m
2,0 m	69 %	52 %				
2,5 m	45 %	39 %	20 %			
3,0 m	21 %	19 %	12 %	5 %		
3,5 m	8 %	8 %	6 %	3 %	1 %	
4,0 m	3 %	3 %	2 %	1 %	0,7 %	0,3 %

Yllä olevassa taulukossa (Taulukko 1) on esitetty viimeisin julkaistu ote Valven keräämästä tiedosta. Viimeisin, 11.11.2017 päivätty ote sisältää tiedon SteamVR istunnoista edellisen 30 päivän ajalta samalla tarkkuudella kuin lähteessä (Valve, 2017). Taulukko sisältää koosteen julkistetuista tiedoista, joista voidaan päätellä seisomatilaa käytetyn kaikissa istunnoissa, joissa ei ole ollut käytössä vähintäänkin SteamVR:n asettamaa minimikokoa 1,5 x

2,0 m. Seisomatilan käyttäjiä on ollut siis 31 % kaikista istunnoista, 69 % käyttäessä huonemittakaavan virtuaalitodellisuutta. Taulukko sisältää tiedot kaikkien SteamVR-alustan VR-lasien käytöstä, eikä rajoitu ainoastaan tutkimuksessa käytettävään HTC Viveen.

Oculus Rift VR-laseja käytetään huonemittakaavan virtuaalitodellisuuspeleihin ja -kokeuksiin HTC Viveä vähemmän, minkä osoittaa Oculuksen kehittäjille julkaisema laitteistoraportti *Oculus Hardware Report* (Oculus, 2018). Raportissa kerrotaan Oculus Rift VR-lasien käyttäjien laitteistokokoonpanoista julkaisua edeltäneen 28 päivän ajalta. 3.11.2018 päiväystä laitteistoraportista käy ilmi ainoastaan joka viidennen (20 %) Riftin käyttäjistä käyttävän huonemittakaavan virtuaalitodellisuutta (Oculus, 2018). Tämä tieto selviää, kun tarkastellaan käytettyjen sensorien määrää. Huonemittakaavan virtuaalitodellisuuden käyttö Riftillä vaatii kolme tai neljä sensoria, mutta vain 1,3 prosentilla käyttäjistä on neljä sensoria ja 18,7 prosentilla on kolme sensoria (Oculus, 2018).

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) on eri tilakokojen käyttöaste suhteessa huonemittakaavan virtuaalitodellisuuden käyttäjien kokonaismäärään, joka oli edellä esitetty 20 % kaikista Oculus Rift käyttäjistä. Taulukon arvot on esitetty samalla tarkkuudella, jolla ne on julkaistu laitteistoraportissa. Taulukkoa tarkastellessa on hyvä ottaa huomioon, ettei sen arvoja voi vertailla edellisen taulukon (Taulukko 1) lukuarvoihin.

Taulukko 2. Oculus Riftillä huonemittakaavan virtuaalitodellisuutta käyttävien käyttäjien tilakoot (mukaiillen Oculus, 2018)

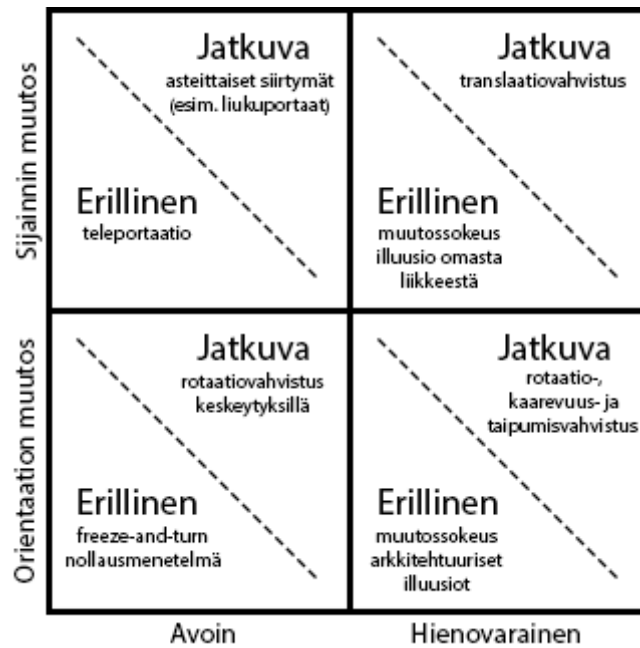
	0,5–1,0 m	1,0–1,5 m	1,5–2,0 m	2,0–2,5 m	2,5–3,0 m
0,5–1,0 m	1 %	2 %	1 %	0 %	0 %
1,0–1,5 m	1 %	14 %	13 %	4 %	0 %
1,5–2,0 m	0 %	6 %	13 %	20 %	2 %
2,0–2,5 m	0 %	2 %	3 %	9 %	2 %
2,5–3,0 m	0 %	0 %	1 %	2 %	1 %

3 Virtuaaliympäristössä liikkumisen manipulointi

Tässä luvussa kerrotaan menetelmistä, joilla virtuaalimaailmassa liikkumista voidaan manipuloida. Ensimmäisessä alaluvussa kerrotaan uudelleensuuntaustekniikoista yleisesti ja toisessa alaluvussa esitellään yksi uudelleensuuntauksen osa-alue, uudelleensuunnattu kävely. Kolmannessa alaluvussa tutkitaan tarkemmin huomaamattomia uudelleensuunnatun kävelyn menetelmiä ja neljännessä alaluvussa kerrotaan uudelleensuunnattuun kävelyyn kehitetyistä algoritmeista.

3.1 Uudelleensuuntaustekniikat

Uudelleensuuntaustekniikoiden tavoite on mahdollistaa käyttäjän liikkuminen fyysistä tilaa suuremmassa virtuaalisessa tilassa. Luonnollista kävelyä käyttävien immersiiivisissä virtuaaliympäristöissä käytettävien uudelleensuuntaustekniikoiden kategorisoimiseen on olemassa taksonomia (E. A. Suma, Bruder, Steinicke, Krum & Bolas, 2012), jonka avulla tekniikat voidaan jakaa kahdeksaan eri kategoriaan. Taksonomia jakaa menetelmät perustuen niiden geometriseen joustavuuteen ja siihen, kuinka todennäköisesti käyttäjä huomaa manipuloinnin. Taksonomian kahdeksan kategoriaa muodostuvat, kun uudelleensuuntaustekniikat jaetaan manipulointikohteen perusteella sijainnin muutokseen perustuviin ja orientaation muutokseen perustuviin, jotka edelleen jaetaan toimintatavan näkyvyyden perusteella käyttäjän suhteen avoimesti toimiviin tekniikoihin ja hienovaraisiin tekniikoihin, joita käyttäjän ei ole tarkoitus huomata. Saatu nelikenttä jaetaan vielä toimintavan perusteella jatkuviin menetelmiin ja erillisiin, kertaluontaisesti suoritettaviin menetelmiin.



Kuva 2. Uudelleensuuntaustekniikoiden taksonomia
(mukaiillen E. A. Suma ym., 2012)

Suman ym. (2012) taksonomia esitellään yllä olevassa kuvassa (Kuva 2), jossa on annettu muutamia esimerkkejä menetelmistä. Kuva sisältää myös taksonomian jälkeen julkaistun taipumisvahvistuksen (Langbehn, Lubos, Bruder & Steinicke, 2017). Taksonomia kattaa tekniikat sekä käyttäjän liikkeen manipuloimiseen että virtuaalisen tilan arkkitehtuurin manipuloimiseen, mutta vain osa taksonomian tekniikoista käyttää luonnollista kävelyä pääasiallisena liikkumismenetelmänä. Tässä tutkimuksessa keskitytään ainoastaan käyttäjän liikkeen manipulointiin, ja virtuaalisen tilan arkkitehtuurin manipulointi on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle. Liikkeen manipuloinnista keskitytään uudelleensuunnattuun kävelyyhyn, jossa luonnollinen kävely on pääasiallinen liikkumismenetelmä. Huomaamattomat uudelleensuunnatun kävelyn menetelmät ovat Suman ym. (2012) taksonomiassa toimintatavaltaan hienovaraisia ja jatkuvia, manipulointikohteen ollessa sijainti tai orientaatio, riippuen menetelmästä. Tässä tutkimuksessa kehitetyt ja luvussa 4.3 esiteltävät kahta paikannuspistettä käyttävät menetelmät manipuloivat käyttäjän sijaintia ja ovat toimintatavaltaan jatkuvia ja toimintatavan näkyvyydeltään avoimia. Uudelleensuunnattuun kävelyyhyn tutustutaan tarkemmin seuraavassa alaluvussa.

3.2 Uudelleensuunnatun kävelyn historia

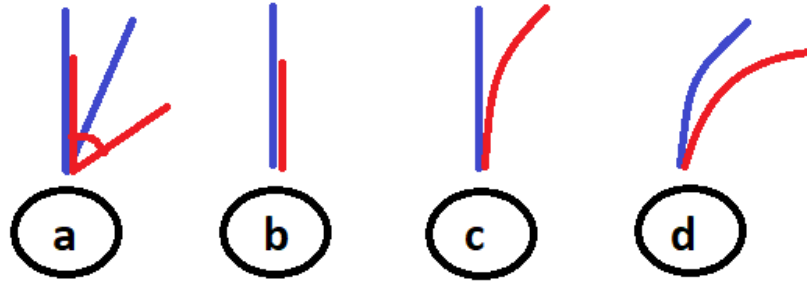
Luvussa 2.6 parhaaksi liikkumismenetelmäksi todetun luonnollisen kävelyn käyttöä rajoittaa fyysisen tilan koko, jonka rajoituksen poistamiseksi Razzaque, Kohn ja Whitton (2001) esittelivät menetelmän **Uudelleensuunnattu kävely** (engl. *Redirected Walking*) konferenssijulkaisuna vuonna 2001. Menetelmästä julkaistiin myöhemmin myös väitöskirjatutkimus (Razzaque, 2005). Alkuperäistä menetelmää on tutkittu ja laajennettu useiden tutkijoiden toimesta myöhemmin (Steinicke, Bruder, Ropinski & Hinrichs, 2008; Steinicke ym., 2009; Zhang & Kuhl, 2013b). Tutkimus on keskittynyt menetelmän validointiin, rajojen ja mahdollisuuksien löytämiseen sekä uusien manipulointitekniikoiden kehittämiseen laboratorioolosuhteissa (Azmandian, Grechkin, Bolas & Suma, 2016b).

Uudelleensuunnattu kävely -termin käyttö näyttää vakiintuneen merkitsemään yhden yksittäisen menetelmän sijaan virtuaalimaailmassa liikkumisen manipulointia, jossa käyttäjän liike fyysisessä maailmassa ei vastaa liikettä virtuaalisessa maailmassa. Tämän johdosta tässä tutkimuksessa käytetään uudelleensuunnattu kävely -termiä kattamaan useita samankaltaisia menetelmiä. Esimerkiksi Nilsson ym. (2018) sisällyttävät uudelleensuunnattu kävely -termin alle kaikki uudelleensuuntaustekniikat, joiden tavoite on ylläpitää illuusiota luonnollisesta kävelystä, sisällyttäen siihen sekä kävelyn että arkkitehtuurin manipuloinnin. Heidän mielestään ideaalisen uudelleensuunnatun kävelyn tekniikan tulee täyttää neljä vaatimusta: sen tulee olla huomaamaton, turvallinen, yleistettävä ja olla sivuvaikutukseton. Sivuvaikutuksina he ilmoittavat simulaatiopahoinvoinnin ja ensisijaisten sekä toissijaisten tehtävien suorittamiseen vaikuttamisen.

3.3 Huomaamattomat uudelleensuunnatun kävelyn menetelmät

Tässä alaluvussa esitellään neljä eri manipulointimenetelmää, joilla käyttäjän liikkumista voidaan manipuloida huomaamattomasti virtuaalisessa ympäristössä. Menetelmistä puhutaan yleisesti vahvistuksina (engl. *gain*) ja annetun kertoimen suuruus ilmoittaa vahvistuksen määrän. Graafinen esitys vahvistuksista on alla olevassa kuvassa (Kuva 3), jossa esitettynä ovat: (a) rotaatiovahvistus, (b) translaatiovahvistus, (c) kaarevuusvahvistus ja (d)

taipumisvahvistus. Kuvassa sininen viiva kuvaa virtuaalista liikettä ja punainen viiva kuvaa fyysistä liikettä. Tarkempi kuvaus vahvistuksien toiminnasta kerrotaan alaluvuissa.



Kuva 3. Uudelleensuuntauksessa käytettävät vahvistukset
(mukaillen Nilsson ym., 2018)

Menetelmien yhteydessä kerrotaan myös niiden havaitsemiskynnyksistä, jotka tarkoittavat pienintä ihmisen aisteilla havaittavissa olevaa manipuloinnin tasoa. On kuitenkin huomioitava, että suuri osa havaitsemiskynnystä koskevasta tutkimuksesta on tehty virtuaalitodellisuuslaitteilla, jotka eivät ominaisuuksiltaan vastaa tällä hetkellä kuluttajille myytäviä laitteita. Vahvistuksien havaitsemisessa on suuria eroja eri tutkijaryhmien kesken ja Nilsson ym. (Nilsson ym., 2018) ehdottavatkin luotettavan arviointimenetelmän kehittämistä havaitsemiskynnyksen tutkimiseen, jotta voidaan tarkistaa pätevätkö aiemmat havaintokynnystä koskevat tutkimukset nykyisille virtuaalitodellisuuslaitteille.

3.3.1 Rotaatiovahvistus

Razzaquen ym. (2001) alkuperäisessä uudelleensuunnatussa kävelyssä ainoana manipulointimenetelmänä oli rotaatiovahvistus (engl. *rotation gain*). Rotaatiovahvistusta käytettäessä käyttäjän pään luonnollisia liikkeitä vahvistetaan tai vaimennetaan. Yleisimmin vahvistusta tehdään rotaation kolmesta komponentista ainoastaan pään pysty akselin suuntaista komponenttia käyttäen (engl. *yaw*) (Nilsson ym., 2018). Menetelmä vaatii käyttäjältä pään kierto liikettä, eikä manipulointia voida tehdä, mikäli käyttäjä kävelee suoraan eteenpäin, katsoen vain suoraan eteensä. Manipulointi tapahtuu käyttäjän ollessa paikallaan tai liikkeessä, käyttäjän sijainti pysyy virtuaaliympäristössä samana kuin fyysisessä ympäristössä.

Razzaque (2005) käytti varhaisissa tutkimuksissaan rotaatiovahvistusta käyttäjän seisoessa paikallaan, kääntäessä päätänsä sekä käyttäjän kävellessä. Razzaquen (2005, s. 78-79) havaintojen mukaan päätä kääntäessä havaitsemiskynnys on paljon suurempi kuin seisoessa paikallaan ja kävellessä havaitsemiskynnys on hieman suurempi kuin paikallaan seisoessa. Hänen havaintonsa mukaan rotaatiovahvistuksen havaitsemiskynnys on 1 aste sekunnissa pahimmassa mahdollisessa tapauksessa, käyttäjän yrittäessä havaita manipulointia (Razzaque, 2005, s. 133). Jerald, Peck, Steinicke ja Whitton (2008) havaitsivat manipuloinnin suunnalla olevan merkitystä, pään rotaatiota voitiin vahvistaa 11.2 % tai heikentää 5.2 %. Steinicken ym. (2010) tutkimuksessa käyttäjää voitiin kääntää fyysisessä ympäristössä 49 % enemmän tai 20 % vähemmän kuin virtuaalisessa ympäristössä. Zhang ja Kuhl (2013a) tutkivat ihmisen aistien herkkyyttä rotaatiovahvistuksen dynaamiselle muutokselle, mutta he eivät havainneet eroa tunnistuksessa tilanteessa, jossa rotaatiovahvistuksen tunnistusta verrattiin tasaisella ja portaittaisella muutoksella toteutettuina.

Edellä esitellyt tutkimustulokset viittaavat rotaation manipuloinnin asymmetrisyyteen eli siihen, että ihminen tunnistaa luonnollisen rotaation vahvistuksen heikommin kuin sen vaimentamisen. Tutkimusten perusteella rotaatiovahvistusta voidaan käyttää paikallaan ollessa, kävellessä ja päätä tai koko vartaloa käännettäessä, eikä sillä ole merkitystä, tapahtuuko muutos portaittain vai tasaisesti.

3.3.2 Translaatiovahvistus

Translaatiovahvistus (engl. *translation gain*) vahvistaa käyttäjän liikkuman matkan suuruutta, muuttamatta käyttäjän orientaatiota. Menetelmässä käyttäjä liikkuu virtuaalimaailmassa eri nopeudella verrattuna hänen fyysiseen liikkeeseensä, manipuloinnin tapahtuessa ainoastaan liikuttaessa. Käyttäjän sijainti fyysisessä maailmassa ei vastaa manipuloinnin jälkeen käyttäjän sijaintia virtuaalisessa maailmassa, mutta käyttäjän orientaatio maailmaan nähden pysyy samana. Translaatiovahvistusta on käytetty muun muassa Seven League Boots -algoritmissa (Interrante ym., 2007) dynaamisella kertoimella 1–7 ja kiinteällä kertoimella 10. Williams, Narasimham, McNamara, Carr, Rieser ja Bodenheimer (2006) käyttivät puolestaan kiinteitä kertoimia 2 ja 10. Translaatiovahvistusta on tutkittu sekä pienillä

huomaamattomilla tai lähes huomaamattomilla kertoimilla, että varsin suurilla käyttäjän selvästi havaittavissa olevilla kertoimilla.

Steinicken ym. (2010) mukaan käveltyä matkaa voidaan pienentää 14% tai kasvattaa 26% käyttäjän sitä huomaamatta. Zhang, Li ja Kuhl (2014) ovat tutkineet translaatiovahvistuksen dynaamista muuttamista ja havainneet etteivät käyttäjät havaitse vahvistuksen muutoksia luotettavasti, mutta kertoimen suuruudella testin alussa on suuri merkitys siihen, kuinka käyttäjät havaitsevat kertoimen muutokset. Manipulointikertoimella 2,0 aloittaneet koehenkilöt luulivat manipulointikertoimen pienentyessä muutoksen pysyvän samana. Vastaavasti manipulointikertoimella 0,7 aloittaneet koehenkilöt luulivat manipulointikertoimen kasvessa muutoksen pysyvän samana. Manipulointikertoimen muutosta oli siis hankalampi havaita, mikäli se muuttui kohti normaalia kävelynopeutta. Translaatiovahvistusta voi käyttää myös simuloimaan epätasaista maastoa. Translaatiovahvistuksella on onnistuttu saamaan simuloitu tunne ylämäkeen kävelemisestä, mutta alamäkeen kävelyn simulointiin sama menetelmä ei toiminut (Matsumoto, Narumi, Tanikawa & Hirose, 2017).

Aiempien tutkimustuloksien perusteella voidaan päätellä translaatiovahvistuksen toimivan samalla tavoin asymmetrisesti kuin rotaatiovahvistuskin, eli ihmisen on hankalampi havaita vahvistusta kuin vaimennusta. Tutkimusten perusteella translaatiovahvistusta käytettäessä tulee kuitenkin huomioida vahvistuksen suuruus käytön alussa.

3.3.3 Kaarevuusvahvistus

Kaarevuusvahvistusta (engl. *curvature gain*) käytettäessä käyttäjä kävelee virtuaalimaailmassa suoraan, mutta näkymää kierretään hitaasti ja pehmeästi käyttäjän sitä huomaamatta niin, että käyttäjän kohde siirtyy ja käyttäjä korjaa kävelyään fyysisessä maailmassa sitä itse tiedostomattaan, tehden kävellystä reitistä kaarevan. Manipuloinnin jälkeen käyttäjän sijainti ja suunta virtuaalimaailmassa eivät vastaa hänen sijaintiaan fyysisessä maailmassa. Manipulointi vaatii käyttäjän liikettä, eikä sitä voida tehdä käyttäjän ollessa paikallaan.

Kaarevuusvahvistuksen havaitsemiskynnykselle on tutkimuksissa saatu toisistaan poikkeavia arvoja. Steinicke ym. (2010) saivat kaarron säteen minimipituudeksi 22 metriä.

Grechkin, Thomas, Azmandian, Bolas ja Suma (2016) puolestaan saivat kaarron säteen mittaustulokseksi 11,61 metriä, selittäen eron mittausmenetelmien ja laitteistojen eroilla.

Tutkimustuloksista ei ristiriitaisten tuloksien johdosta saa selvää vastausta kaarevuusvahvistuksen tilavaatimuksille, mutta tulosten mittakaava kertoo kuitenkin kaarevuusvahvistuksen vaativan enemmän tilaa kuin tämän tutkimuksen kohdetila kotikäytössä mahdollistaa.

3.3.4 Taipumisvahvistus

Kaarevuusvahvistuksesta on kehitetty taipumisvahvistus (engl. *bending gain*), jossa käyttäjän reitti on kaareva sekä fyysisessä että virtuaalisessa ympäristössä. Langbehnin ym. (2017) esittelemä menetelmä mahdollistaa suuremmat vahvistuksen kertoimet kuin kaarevuusvahvistus, koska käyttäjän on hankalampi tunnistaa manipulointia kaarevan polun kaarevuutta muutettaessa verrattuna kaarevuusvahvistuksen huonoimman mahdollisen tilanteen tapaukseen, jossa suora reitti muutetaan kaarevaksi.

Taipumisvahvistuksen havaitsemiskynnystä on tutkittu menetelmän kehittäjien Langbehnin ym. (2017) toimesta, jotka havaitsivat taipumisvahvistuksen mahdollistavan fyysisen polun kaarevuuden muuttamisen 4,35 kertaa suuremmaksi virtuaalisessa ympäristössä, joka puolestaan mahdollistaa noin 25 x 25 metrin kokoisen virtuaalisen tilan 4 x 4 metrin kokoisessa fyysisessä tilassa.

Neljästä esittelystä vahvistuksesta taipumisvahvistus on viimeisimpänä kehitetty. Se on tämän tutkimuksen kannalta kiinnostava, koska Langbehnin ym. (2017) käyttivät tutkimuksessaan tätä tutkimusta vastaavia laitteita ja tilavaatimuksia.

3.4 Huomaamattomia uudelleensuunnatun kävelyn algoritmeja

Uudelleensuunnatun kävelyn algoritmit voidaan jakaa niiden toiminnan perusteella reaktiivisiin ja ennustaviin algoritmeihin (Azmandianin ym., 2016b) riippuen siitä, perustuuko algoritmi käyttäjän liikkeisiin reagoimiseen vai niiden ennustamiseen. Razzaquen ym. (2001) alkuperäinen uudelleensuunnatun kävelyn algoritmi on tämän jaon mukaisesti ennustava, perustuen etukäteen asetettuihin reittipisteisiin. Razzaque (2005) esitteli tutkimuksessaan

kolme uutta reaktiivista algoritmia, joita on käytetty ja jatkokehitetty muiden tutkijoiden myöhemmissä tutkimuksissa.

Tässä luvussa tarkastellaan tämän tutkimuksen kannalta oleellisimpia algoritmeja, jotka ovat Suman ym. (2012) taksonomian mukaisesti hienovaraisia ja jatkuvia, mahdollistaen niiden käytön käyttäjän huomaamatta niitä.

3.4.1 Reaktiiviset algoritmit

Razzaque (2005) esitti uudelleensuunnatun kävelyn algoritmeiksi käyttäjän ohjauksen kohti fyysisen tilan keskustaa (**Steer-to-Center**) ja käyttäjän ohjauksen ympyränmuotoiselle kiertoradalle kiertäen fyysisen tilan keskustaa (**Steer-onto-Orbit**) (muiden tutkijoiden toimesta yleensä viitattu nimellä Steer-to-Orbit) sekä käyttäjän ohjauksen muuttuvien fyysisessä tilassa olevien kohteiden suuntaan (**Steer-to-Changing-Targets**). Nämä ehdotetut algoritmit ovat toimineet pohjana uudelleensuunnatun kävelyn jatkokehityksessä muiden toimesta.

Hodgson ja Bachmann (2013) vertailivat neljän eri algoritmin toimivuutta tutkimuksessaan, jossa testattavina olivat Razzaquen (2005) ehdottamista algoritmistä Steer-to-Center ja Steer-to-Orbit -algoritmien parannellut versiot sekä **Steer-to-Multiple-Targets** ja **Steer-to-Multiple+Center** -algoritmit, joista Steer-to-Multiple-Targets -algoritmi oli samankaltainen kolmannen Razzaquen (2005) ehdottaman algoritmin Steer-to-Changing-Targets -algoritmin kanssa. Heidän Steer-to-Orbit -algoritmissa kiertoradan säteen pituus oli viisi metriä. Steer-to-Multiple-Targets -algoritmi käytti kolmea kohdepistettä, jotka oli sijoitettu 120° välein fyysisen tilan keskispisteen ympärille, viiden metrin päähän siitä. Steer-to-Multiple+Center -algoritmi puolestaan yhdisti Steer-to-Center -algoritmin Steer-to-Changing-Targets -algoritmiin neljäntenä kohdepisteenä. He havaitsivat Steer-to-Center -algoritmin olevan muita testattuja algoritmeja parempi yleisesti, mutta Steer-to-Orbit -algoritmin toimivan hyvin tilanteissa, joissa käyttäjän piti kävellä pitkiä suorita matkoja ja tehdä suorakulmaisia käännöksiä.

3.4.2 Ennakoivat algoritmit

Razzaquen ym. (2001) alkuperäistä uudelleensuunnatun kävelyn algoritmia käytettäessä liikuttiin reittipisteiden välillä ja manipuloitiin näkymää kolmella eri tavalla yhtä aikaa: näkymää kierrettiin tasaisesti koko ajan pienellä rotaatiolla, käyttäjän kävellessä käytettiin käyttäjän kävelynopeuden perusteella laskettua rotaatiota, ja käyttäjän kääntyessä käänöksissä käytettiin myös rotaatiovahvistusta. Algoritmi oli ennakoiva, koska käyttäjän reittipisteet ja liikkuminen niiden välillä oli etukäteen tiedossa.

Käyttäjän liikkumisen ennakointia käyttäviä algoritmeja on kehitetty uudelleensuunnatulle kävelyllä useita. Rajatuille tiloille, joissa käyttäjä voi liikkua vain etukäteen tiedossa olevia reittejä käyttäen on kehitetty algoritmit **FORCE** (Zmuda, Wonser, Bachmann & Hodgson, 2013) ja **MPCRed** (Nescher, Huang & Kunz, 2014) sekä Azmandianin, Yahatan, Bolasin ja Suman (2014) etukäteen asetettuja reittipisteitä käyttävä algoritmi. Kaikissa näissä kolmessa algoritmissa virtuaalimaailman suunnittelijan tarvitsi asettaa reittipisteet tai luoda sopivat reitit kartalle. On olemassa myös automaattisia menetelmiä käyttäjän reitin ennustamiseen. Yksi kehitetyistä menetelmistä tukeutuu useista pelimoottoreista valmiiksi löytyvään navigointiverkko-toimintoon (Azmandian, Grechkin, Bolas & Suma, 2016a). Langbehn ym. (2017) taipumisvahvistusta käyttävä uudelleensuunnatun kävelyn menetelmä on myös ennakoiva menetelmä, koska käyttäjä kävelee ennalta määrättyjen kaarevien polkujen ja niiden risteyksien muodostamassa virtuaalimaailmassa.

4 Uudelleensuunnatun kävelyn menetelmien soveltuvuustesti

Manipulointialgoritmeja testattiin eri kokoisissa fyysisissä tiloissa, jotta saataisiin selville mitkä algoritmeista toimivat kotikäytössä. Soveltuvuustestin tarkoituksena oli testata ainoastaan algoritmien toimivuutta ja havaittavuutta tutkijan toimesta. Soveltuvuustestausta suoritettiin osa-aikaisesti noin kahden kuukauden ajan. Tutkijan lisäksi algoritmeja kokeilivat myös muutamat muut henkilöt vapaaehtoisesti. Soveltuvuustestin perusteella valittiin algoritmit käyttäjättestissä käytettyyn testipeliin.

Soveltuvuustestin avulla varmistettiin käyttäjän näkymän olevan helposti manipuloitavissa pelimoottorissa ja valittujen algoritmien olevan kohtuullisella vaivalla ohjelmoitavissa. Soveltuvuustestin tavoitteena oli valita tutkimuksen kannalta sopivimmat menetelmät käyttäjättestiin ja tehdä valinta käytettävien algoritmien kertoimien suuruuksista. Manipulointimenetelmien toteutus tehtiin tavalla, joka mahdollisti niiden parametrien helpon säädettävyyden ja algoritmien helpon siirtämisen testipeliin.

4.1 Tilakokojen testaus

Soveltuvuustesti suoritettiin kolmessa eri kokoisessa tilassa, jotka on esitelty seuraavalla sivulla olevassa kuvassa (Kuva 4). Kuvan taustalla näkyy kuvaruutukaappaus käyttäjätestin virtuaalisesta testikentästä. Kuvassa värillisenä näkyvän reuna-alueen leveys kuvaa käytettyjen turva-alueiden leveyttä ja värillisten reuna-alueiden sisään jäävä alue on sovelluksen hyödynnettävissä oleva fyysinen tila. Soveltuvuustestin pieni (punainen) ja keskisuuri (sininen) tila sijaitsivat tutkijan olohuoneessa, jonka johdosta suurin osa soveltuvuustestistä suoritettiin näissä kahdessa tilakoossa. Suuri (vihreä) tila sijaitsi Jyväskylän yliopiston Mattilanniemen kampuksella. Pientä tilaa käytettiin ainoastaan soveltuvuustestin alkuvaiheissa. Keskisuurta tilaa käytettiin soveltuvuustestissä ja käyttäjätestin kehityksessä. Suurta tilaa käytettiin käyttäjätestissä ja sen kehityksessä. Käyttäjätesti suoritettiin suuressa tilassa ja sitä pystyttiin osin myös kehittämään keskisuuressa tilassa, hyödyntäen ainoastaan käyttäjätestin testikentän toista puolta.



Kuva 4. Soveltuvuustestissä ja käyttäjättestissä käytetyt tilakoot

Pieni tila oli noin 2,4 x 2,4 metrin kokoinen fyysinen alue ilman reunoilla olevia turva-alueita. Tämä alue vastaa luvun 2.7.2 mukaan tilan kokoa, joka on ollut käytössä 52 prosentissa SteamVR-istunnoista. Pieni tila oli helppo ottaa käyttöön ilman suuria valmisteluja, mutta tilan koko havaittiin liian pieneksi. Tilaa laajennettiin siirtämällä huonekaluja kauemmas, mikä teki tilankäytön hankalammaksi. Käytettävän tilan koko laajeni kooltaan 2,2 x 3,8 metriin ja samalla otettiin käyttöön 10 cm turva-alue fyysisen alueen jokaisella neljällä sivulla. Turvavälin 10 cm koko todettiin riittämättömäksi ja käyttäjätettiin suunniteltiin yhden metrin levyistä turva-alueita. Suurennetun tilan koko oli lähempänä tavoitetta, tilan ollessa lähes

puolet käyttäjätettiin suunnitellusta 4 x 4 metrin koosta. Laajennettu tila vastasi tilan kokoa, joka on ollut käytössä vain kolmessa prosentissa SteamVR-istuntoja.

Myös keskisuuri tila havaittiin liian pieneksi. Erityisjärjestelyin oli mahdollistaa suorittaa soveltuvuustestausta Jyväskylän yliopiston tiloissa, jonne oli mahdollista saada 4 x 4 metrin kokoinen tila. Tästä tilasta käytän nimitystä suuri tila. Vastaavan kokoinen tila on ollut käytössä ainoastaan 0,3:ssa prosentissa SteamVR-istuntoja. Käyttäjättestissä käytettiin metrin levyistä turva-alueita, joka yli kaksinkertaisti tilavaatimuksen pinta-alalla mitattuna. Kotikäytössä turva-alueen koko olisi huomattavasti pienempi. Tutkimuksessa käytetyt tilojen koot ja niissä käytetyt turvavälit löytyvät alla olevasta taulukosta (Taulukko 3).

Taulukko 3. Soveltuvuustestissä ja käyttäjättestissä käytetyt tilakoot

	Tilan koko ilman turva-alueita	Turva-alueen leveys	Tilan koko turva-alueen kanssa	Yleisyys SteamVR-istunnoissa
Pieni tila	2,4 x 2,4 m 5,76 m ²	0 cm	2,4 x 2,4 m 5,76 m ²	52 %
Keskisuuri tila	2,2 x 3,8 m 8,36 m ²	10 cm	2,4 x 4,0 m 9,6 m ²	3 %
Suuri tila	4 x 4 m 16 m ²	1 m	6 x 6 m 36 m ²	0,3 %

4.1.1 Pieni tila

Ensimmäisenä testattiin yksinkertaisia siirron kertoimia ja toteutettiin hieman yksinkertaistettuna Interranten ym. (2007) esittelemä manipulointimenetelmä Seven League Boots. Koikeilussa versiossa käytettiin manipulointisuuntana ainoastaan VR-lasien katseen suuntaa. Toisessa heidän esittelemässään variaatiossa – jota ei saatu toimimaan riittävän hyvin – liikesuunta laskettiin käyttäjän edellisten sijaintien perusteella useamman sekunnin ajalta. Liikesuunnan laskeminen edellisistä sijainneista osoittautui liian hitaaksi menetelmäksi pienessä tilassa, jonka läpi pystyi kävelemään muutamassa sekunnissa.

Kierron algoritmia testattiin ensin erikseen ja sen jälkeen toteuttaen Razzaque ym. (2001) esittelemä uudelleensuunnatun kävelyn algoritmi. Testisovellukseen rakennettiin heidän tutkimustaan vastaava testiympäristö, joka oli mittasuhteiltaan pienempi. Algoritmin toteuttamista hankaloitti, ettei Razzaque ym. (2001) antaneet tarkkoja parametrien suuruuksia algoritmille, eikä niitä oltu annettu myöhemmin myöskään Razzaquen (2005) toimesta. Razzaque ym. (2001) käyttivät 8 metrin etäisyyttä kääntymispisteiden välillä ja fyysisen tilan koko oli heidän tutkimuksensa varhaisessa vaiheessa 3 x 12 metriä, mutta kasvatettiin käyttäjätestiin 4 x 12 metriin. Razzaquen ym. (2001) mukaan tilan leveyden kasvattaminen neljään metriin vaikutti kokeen onnistumiseen ja yksikään koehenkilö ei läpäissyt koetta kolme metriä leveällä alueella, niin että kertoimet olivat huomaamattomia. Testisovelluksessa käytettävä tila oli paljon heidän käyttämänsä tilaa pienempi ja kääntymispisteiden väli oli vain noin 3,1 metriä. Uudelleensuunnatun kävelyn algoritmi toimi näinkin pienessä tilassa, tosin suurella virheprosentilla ja selvästi havaittavasti. Razzaquen (2005) esittämää Steer-to-Center algoritmia kokeiltiin pikaisesti pienessä tilassa, kuitenkin saamatta sitä toimimaan yhtä keskipisteen ohitusta pidemmälle. Algoritmin myöhemmät kokeilut jätettiin suuremmalle tilalle.

Kaarevuusvahvistusta kokeiltiin pikaisesti. Manipulointikerrointa kasvatettiin riittävän suureksi, jotta sen avulla oli mahdollista kävellä ympyrää 2,4 x 2,4 metrin kokoisessa fyysisessä tilassa, liikkeen ollessa suora virtuaalisessa maailmassa. Hyvin suuresta kertoimesta johtuen kävelynopeuden piti olla hyvin pieni kaatumisen välttämiseksi, ja suuren kertoimen käyttö aiheutti välittömiä ja useita tunteja kestäviä simulaatiopahoinvoinnin oireita tutkijalle. Kaarevuusvahvistuksen käyttö yksinään vaatisi tutkitusti kymmenen kertaa suuremman fyysisen tilan.

Pieni tila mahdollisti vain hyvin yksinkertaiset manipuloinnit, ja manipulointialgoritmien toiminta oli hyvin vajavaista tilan koosta johtuen. Testattu tila todettiin liian pieneksi, ja tilaa laajennettiin hieman. Tärkein havainto oli, ettei pieni tila mahdollistanut liikesuunnan laskeamista aiempien sijaintien perusteella.

4.1.2 Keskisuuri tila

Kaarron manipuloinnin testausta jatkettiin keskisuuressa tilassa toteuttamalla Langbehnin ym. (2017) kaarevan polun manipulointimenetelmä. Langbehnin ym. (2017) esittämässä reitin mallissa reittikuvio muodostaa reittien keskelle kolmion, jonka sivujen pituus on 2,0 metriä. Sen kokoisena he saivat reittikuvion mahtumaan Viven mahdollistamaan 4 x 4 metrin kokoiseen fyysiseen tilaan. Menetelmää testattiin yhdellä reitin kaarella pienennettynä ja kolmion sivujen pituuden ollessa lyhennettynä 1,7 metriin. Näillä muutoksilla reittikuvio oli mahdollista saada mahtumaan käytössä olleeseen 2,2 x 3,8 metrin kokoiseen keskisuureen tilaan. Yhden reitin osan poistolla hävisi mahdollisuus loputtomaan kävelyyn ilman risteyksiä. Testatussa versiossa oli mahdollista kävellä yhtäjaksoisesti viisi reitin osaa peräkkäin, eli viisi kuudesosaa ympyrän mallisesta virtuaalisesta reitistä. Menetelmä toteutettiin tässä vaiheessa yksinkertaistettuna, ilman risteyksiä, ainoastaan myötäpäiväisellä kierrolla ja kiinteillä kertoimilla.

Keskisuuressa tilassa oli mahdollista kävellä riittävän pitkä suora reitti yhteen suuntaan, mikä mahdollisti Interrante ym. (2007) kehittämän Seven League Boots -menetelmän toiminnan paremman tarkastelun. Testauksessa huomattiin välittömästi samat ongelmat, jotka he havaitsivat Seven League Boots -menetelmää kehittäessään. Ongelmat olivat käyttäjän silmien tason korkeuden muuttuminen maanpintaan nähden ja suurien kertoimien aiheuttamat suuret pään sivuttaisliikkeet. Korjauksena ongelmiin kokeiltiin Interrante ym. (2007) esittämää ratkaisua, joka oli translaatiovahvistuksen tekeminen ainoastaan käyttäjän liikkumissuunnan suuntaisesti, samansuuntaisesti maanpinnan tasoon nähden. Korjaus antoi välittömästi paremman käyttökokemuksen.

Käyttäjätestiä varten oli hankittu kolme kappaletta HTC Vive Tracker¹⁶ -paikantimia (laitteiston tarkempi kuvaus luvussa 5.5.3). Alkuperäinen tarkoitus oli käyttää paikantimia käyttäjän liikkeiden tallentamiseen ja käyttäjän jalkojen sekä vartalon visualisointiin käyttäjälle itselleen. Trackeriä päätettiin käyttää myös liikesuunnan selvittämiseen. Soveltuvuustestin yhteydessä kehitettiin Trackeriä käyttävä manipulointimenetelmä *Tracker Assisted Manipulation (TAM)* -menetelmä. TAM-menetelmässä manipulointi tapahtuu VR-lasien sijainnin

¹⁶ Vive Tracker. Lisätietoa: <https://www.vive.com/eu/vive-tracker>.

perusteella, kuten testatussa yksinkertaistetussa Seven League Boots -menetelmässä, mutta käyttäjän liikesuunta saadaan reaaliaikaisesti ja luotettavasti vyötärölle sijoitetusta Trackeristä. TAM-menetelmä mahdollisti manipuloitun kävelyn pienessä tilassa samalla ympärilleen katsellen. TAM-menetelmän tarkka kuvaus löytyy luvusta 4.3.1.

Myöhemmässä vaiheessa soveltuvuustestiä havaittiin esineiden poimimisen lattialta olevan hankalaa käytettäessä VR-lasien sijaintiin perustuvaa kiinteäkertoimista manipulointia. Tähän ongelmaan kehitettiin uusi versio TAM-menetelmästä, jota kehitettiin muuttaen manipuloinnin kohteeksi Trackerin sijainti VR-lasien sijainnin sijaan. VR-lasien sijainti laskettiin manipuloinnin jälkeen suhteessa Trackerin sijaintiin, pitäen niiden välinen etäisyys manipuloinnattomana. Tälle menetelmä annettiin nimi *Tracker Centric Manipulation (TCM)*, jonka tarkempi kuvaus on luvussa 4.3.2. Soveltuvuustestissä havaittiin TCM-menetelmän olevan miellyttävämpi käyttää kuin TAM-menetelmä tai Seven League Boots -menetelmä, mutta sen toiminnan tehokkuus vaihteli suuresti sitä testanneiden käyttäjien välillä.

Keskisuurta tilaa käytettiin soveltuvuustestissä eniten. Keskisuurta tilaa käytettäessä tutkitavaksi manipulaatiovahvistukseksi valittiin translaatiovahvistus, ja kehitettiin kaksi uutta translaatiovahvistusta käyttävää ja Vive Trackerin käyttöön perustuvaa menetelmää. Langbehnin ym. (2017) kaarevan polun manipulointimenetelmä oli kaikista testatuista suurempiin tiloihin tarkoitettuista menetelmistä ainoa, joka saatiin toimimaan riittävän hyvin myös keskisuuressa tilassa.

4.1.3 Suuri tila

Keskisuurta tilaa voitiin käyttää rajoituksetta, ja sitä käyttämällä saatiin tehtyä lähes kaikki suunnitellut soveltuvuustestit ja käyttäjätestin kehittäminen. Keskisuuri tila ei kuitenkaan mahdollistanut käyttäjätestin täysimittaista testaamista, koska käyttäjätestissä haluttiin käyttää SteamVR:n maksimaalista tilakokoa 4 x 4 metriä. Jyväskylän yliopistolla oli tarjota riittävän suuri tila käyttäjätestin kehityksen aikaiseen testaamiseen sekä käyttäjätestin suorittamiseen. Tilaa käytettiin käyttäjätestin kehittämiseen hieman yli kymmenenä päivänä ennen käyttäjätestin järjestämistä. Tilankäyttöön haasteen toi tutkijan oma laitteisto, joka piti jokaisena testipäivänä siirtää keskisuuren kotitestitilan ja yliopiston suuren tilan välillä.

Aikaa kului laitteiston purkuun, siirtoon ja ympäristön rakentamiseen molemmissa kohteissa yhteensä noin kolme tuntia jokaisena testipäivänä. Suuren tilan testipäivinä kehitykseen ja testaukseen jäi aikaa 5–8 tuntia päivässä. Käyttäjätesti rakennettiin keskisuudessa tilassa toimivaksi niin, että se oli helppo laajentaa käyttämään suurta tilaa. Menetelmiä ei kuitenkaan voinut täysipainoisesti testata keskisuudessa tilassa, joten käyttäjätestin lopullinen toiminta piti tarkistaa suudessa tilassa.

Suudessa tilassa pystyttiin tekemään myös soveltuvuustestausta, joka ei ollut mahdollista keskisuudessa tilassa. Langbehnin ym. (2017) kaarevan polun -manipulointimenetelmä kokeiltiin alkuperäisessä esitetyssä koossa 2,0 metrin kolmion sivun pituudella ympärikäveltävänä ja havaittiin sen toimivan odotetusti. Kaarevan polun manipulointimenetelmä oli soveltuvuustestauksessa mukana yhtenä mahdollisena verrokkina Trackereihin perustuville TAM- ja TCM-menetelmille. Menetelmän erilaisuus ja käyttäjätestin ajallisen pituuden kasvaminen vertailtavien menetelmien määrän kasvaessa rajoittivat verrokkien määrän yhteen. Verrokiksi valikoitui yksinkertainen translaatiomanipulointi, perustuen Interranten ym. (2007) Seven League Boots -menetelmän kokeilusta tehtyihin havaintoihin.

Suuren tilan soveltuvuustestauksen tärkein havainto oli tutkimussuunnan valinta. Vaihtoehtoina translaatiovahvistuksen käyttöön manipuloinnissa oli sen käyttö fyysistä tilaa suuremman virtuaalisen tilan saavuttamiseksi tai kiinteän kokoisen virtuaalisen tilan vaatiman fyysisen tilantarpeen pienentäminen. Fyysisen tilantarpeen pienentäminen todettiin paremmaksi tutkimuskohteeksi, koska monet testatuista menetelmistä vaativat VR-pelaajien käytössä olevaa fyysistä tilaa suurempaa tilaa.

4.2 Kertoimien testaus

Soveltuvuustestissä kokeiltiin lukuisia eri suuruisia manipulointikertoimia tutkijan ja muuttaman vapaaehtoisen avustajan toimesta. Kertoimien testaus keskittyi translaatiovahvistukseen, koska käyttäjätestiin oli päätetty valita ainoastaan translaatiovahvistusta käytettäviä menetelmiä. Soveltuvuustestiä varten oli rakennettu ohjainmekanismi, jossa manipulointimenetelmää ja vahvistuskerrointa pystyi vaihtamaan liikeohjaimesta testisovellusta käytettäessä. Steinicken ym. (2010) mukaan translaatiovahvistusta voitiin kasvattaa 26 prosenttia

käyttäjän sitä huomaamatta. Vahvistuskertoimen tunnistamisen suuruusluokka vahvistettiin soveltuvuustestissä, jossa kokeiltiin vahvistuskertoimia 0,1 prosenttiyksikön portain. Translaatiovahvistuksen vahvistuskerroin 1,3 (23,1 prosenttia suurempi) ei ollut tunnistettavissa varmasti ja vahvistuskerroin 1,4 (28,6 prosenttia suurempi) oli tunnistettavissa. Soveltuvuustestauksen tulokset olivat näin ollen samaa suuruusluokkaa Steinicken ym. (2010) tuloksiin verrattuna.

Soveltuvuustestissä testattiin myös huomattavan suuria kertoimia, jotka ovat selvästi havaittavissa. Interrante ym. (2007) käyttivät Seven League Boots -menetelmässä kahta variaatiota kertoimen toteutuksesta. Ensimmäisessä variaatiossa oli automaattinen kertoimen säätö arvojen 1,0–7,0 välillä, muuttuen käyttäjän nopeuden mukaisesti eksponentiaalisesti kasvatettuna. Toinen heidän käyttämänsä variaatio oli kiinteä 10-kertainen vahvistus, jonka käyttäjä pystyi halutessaan kytkemään päälle napin painalluksella ohjaimesta. Kotikäytön vaatima pieni fyysinen tila ei mahdollista kertoimen hidasta kasvattamista, ja käyttäjätesti päätettiin toteuttaa 4 x 4 metrin kokoisessa virtuaalisessa tilassa tilaa tiivistäen, mikä ei vaadi erittäin suurien kertoimien käyttöä. Näiden kahden syyn perusteella päätettiin käyttää pientä kiinteää kerrointa.

Käyttäjätestiin harkittiin testattavaksi kahta erisuuruista kerrointa, joista yksi on tunnistamisrajan alapuolella ja toinen sitä suurempi. Parivertailua käytettäessä vertailujen määrä olisi kuitenkin kasvanut merkittävästi. Havaitsemiskynnystä pienemmät vahvistuskertoimet ovat niin pieniä, ettei niistä ole merkittävää hyötyä pienessä tilassa. Translaatiovahvistuksen kertoimeksi käyttäjätestiin valittiin 1,5. Tarkoituksena oli valita riittävän suuri kerroin, jotta koehenkilöt tunnistavat vahvistuksen vaikutuksen. Kertoimen tuli olla suurempi kuin Steinicken ym. (2010) raportoima 1,3, joka myös vahvistettiin tutkijan toimesta soveltuvuustestissä. Kertoimen piti kuitenkin olla tarpeeksi pieni 4 x 4 metrin kokoisessa virtuaalisessa tilassa käytettäväksi, jotta käyttäjä ei vahingossa kävele virtuaalisen tilan rajojen ulkopuolelle. Soveltuvuustestin havaintojen perusteella paras vahvistuskerroin käyttäjätestiin oli suuruudeltaan havaittava, muttei merkittävän suuri.

4.3 Uudet manipulointimenetelmät

Soveltuvuustestin aikana kehitettiin kaksi kävelyn manipulointimenetelmää, jotka ovat Tracker Assisted Manipulation (TAM) ja Tracker Centric Manipulation (TCM). TAM-menetelmä on yksinkertainen translaatiomanipulaatiomenetelmä, jonka innoittajana on toiminut Interrante ym. (2007) esittelemä Seven League Boots -menetelmä. TCM-menetelmä on kehitetty TAM-menetelmästä muuntamalla manipulointi tapahtuvaksi erillistä paikanninta käyttäen, kun TAM-menetelmässä manipulointi tapahtuu muiden menetelmien tapaan VR-lasien sijainnin perusteella.

Tässä luvussa esiteltävät menetelmät perustuvat HTC:n valmistamien Vive Tracker -paikantimen käyttöön. Vive Tracker -paikantimien edullisuus ja samojen tukiasemien jakaminen HTC Vive VR-lasien kanssa mahdollistaa usean erillisen paikannettavan sijainnin käytön kuluttajille sopivalla hintatasolla. Tieteellistä tutkimusta useamman paikannuspisteen käytöstä kävelyn manipulointiin ei löytynyt, huolimatta lukuisista hauista eri tietokantoihin. Yksi selittävä tekijä voi olla tieteelliseen käyttöön tarkoitettujen paikannuslaitteiden korkea hinta ja tekniikan asettamat rajoitukset. Useita paikannuspisteitä käyttävä kävelyn manipulointi immersiiivisessä virtuaalitodellisuudessa on aiheena hankalasti rajattavissa eikä siitä voi tehdä yksikäsitteistä kuvausta käyttäen vain muutamaa termiä. Tässä tutkielmassa esiteltävät kaksi menetelmää päätettiin nimetä sekaannusten välttämiseksi.

4.3.1 Tracker Assisted Manipulation (TAM) -manipulointimenetelmä

Seven League Boots -menetelmää käytettäessä käyttäjä pystyy katselemaan ympärilleen kävellessään ilman kävelyn manipulointikertoimen muutosta, mutta se toiminto vaatii tiedon käyttäjän liikesuunnasta (Interrante ym., 2007). Paras ratkaisu liikesuunnan laskemiseksi olisi Interrante ym. (2007) mukaan painotettu yhdistelmä käyttäjän katselusuunnasta (VR-lasien suunta) ja käyttäjän edellisten sijaintien mukaan lasketusta suunnasta. Soveltuvuustestissä havaittiin olevan mahdotonta laskea käyttäjän liikesuunta edellisten sijaintien perusteella pienessä tilassa. Käyttäjän oli mahdollista liikkua 1–2 sekunnissa pienen tilan päästä päähän. Käyttäjän liikesuuntaa ei onnistuttu laskemaan riittävän nopeasti ja luotettavasti pienessä tilassa, joten liikesuuntana käytettiin yksinomaan käyttäjän katselusuuntaa eli VR-

laseista saatavaa suuntatietoa. Katselusuuntaa käyttävä manipulointi on huono valinta kotikäyttöön pieniin tiloihin ja VR-peleihin, jotka vaativat ympäristön tutkimista ja ohjaavat käyttäjää katselemaan ympärilleen. Seven League Boots -menetelmän tapaisten menetelmien kotikäytössä ratkaistavaksi ongelmaksi muodostuu käyttäjän liikesuunnan selvittäminen tavalla, joka toimii myös pienessä tilassa.

Liikesuunta päätettiin selvittää ohjelmallisen algoritmin sijaan laitteiston avulla. Ratkaisuna käytettiin Vive Tracker -paikanninta, joka kiinnitettiin käyttäjän vyötärölle selkäpuolelle. Tracker Assisted Manipulation -menetelmä on yksinkertainen translaatiovahvistus, jossa vahvistuskertoimen vaikutussuuntana käytetään Trackeristä saatua käyttäjän vartalon suuntaa. Manipulointi tapahtuu TAM-menetelmässä VR-lasien sijainnin perusteella, mutta VR-lasien suuntatietoa ei hyödynnetä manipuloinnissa, vaan se korvataan Trackeristä saadulla suuntatiedolla. Trackeristä käyttäjän oikea liikkumissuunta saadaan reaaliaikaisesti ja luotettavasti. Trackerin antama liikesuunta päivitettiin jokaisen ruudunpäivityksen aikana, 90 kertaa sekunnissa. TAM-menetelmä mahdollistaa kävelyn manipuloinnin kiinteän translaatiovahvistuksen avulla, käyttäjän kävellessä pienessä fyysisessä tilassa ja katsellessa ympärilleen kävellessään.

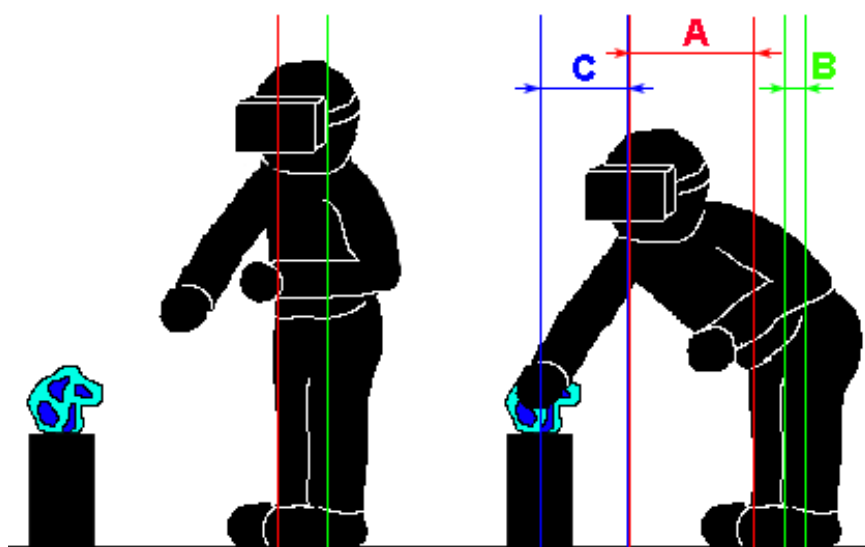
4.3.2 Tracker Centric Manipulation (TCM) -manipulointimenetelmä

Esineiden poimimisen lattialta havaittiin olevan hankalaa kiinteäkertoimista translaatiomanipulointia käytettäessä. Sama ongelma havaittiin sekä yksinkertaistettua Seven League Boots -menetelmää että TAM-menetelmää käytettäessä. Esineiden poimiminen on hankalaa, koska poimintaliikkeessä käyttäjän pää liikkuu eteenpäin suhteessa vartaloon ja tämä aiheuttaa liikkeiden korostumista manipuloinnista johtuen.

Ratkaisu edellä kuvattuun ongelmaan oli siirtyminen käyttämään Trackerin sijaintia manipuloinnin kohteena. Ratkaisuksi kehitettiin TAM-menetelmästä jatkokehitetty Tracker Centric Manipulation -menetelmä, jossa manipulointi tehdään käyttäjän vyötäröllä olevan Tracker -paikantimen avulla, eikä VR-lasien suuntaa tai sijaintia käytetä manipuloinnissa ollenkaan. Soveltuvuustestissä menetelmän havaittiin mahdollistavan paremman

käyttökokemuksen, joka toimi innoittajana muodostamaan käyttäjätutkimus keskittyen tähän menetelmään.

Käyttäjän VR-lasien sijainti on merkattu alla olevaan kuvaan (Kuva 5) punaisella pystyviivalla ja poimintaliikkeestä aiheutuva pään sijainnin muutos on merkattu kirjaimella A. Liike A vahvistuu käytettäessä kiinteäkertoimista translaatiomanipulointia. Toinen osa poimintaliikkeestä on sinisellä kuvaan merkattu käyttäjän käden liike C, joka ei vahvistu translaatiovahvistusta käytettäessä. TCM-menetelmässä manipulointi tapahtuu Trackerin avulla, joka on merkattu kuvaan vihreällä. Trackerin sijainti on merkattu kuvaan vihreällä pystyviivalla. Kuvassa näkyy Trackerin sijainnin muutos B, joka on huomattavasti pienempi kuin pään sijainnin muutos A. TCM-menetelmässä näistä kolmesta liikkeestä ainoastaan liike B vahvistuu kiinteäkertoimisesta translaatiovahvistuksesta, liikkeiden A ja C pysyessä vahvistumattomina. Täytyy kuitenkin huomioida, että liikkeiden A ja C välinen suhde riippuu siitä, kuinka kaukana poimittava kohde on käyttäjistä ja millä korkeudella kohde on lattiasta.



Kuva 5. Poimintaliikkeen aiheuttama VR-lasien liike (A), vyötäröllä sijaitsevan Trackerin liike (B) ja käden liike (C)

Seuraavassa esimerkissä kerrotaan vahvistuksen vaikutuksesta. Tässä esimerkissä annetut lukuarvot ovat VR-käyttäjän liikkeistä tehtyjen havaintojen perusteella tehtyjä arvioita. Manipuloinnista aiheutuvan virheen tarkan suuruuden tarkistus eri vahvistuskertoimilla vaatii jatkotutkimuksia. Kuvitellaan tilanne, jossa käyttäjän pää liikkuu lattian suuntaisella tasolla

eteenpäin käyttäjän kurottautuessa poimimaan esinettä kuvan (Kuva 5) mukaisesti. Käyttäjän pää liikkuu 50 cm (liike A) eteenpäin kohti kohdetta, hänen yrittäessään poimia esinettä lattialta 70 cm (liikkeet A+C) päästä hänen sijainnistaan, jolloin käden etäisyys päästä on 20 cm (liike C) lattian suuntaisella tasolla poimintahetkellä. Tämä on normaali tilanne, mutta pieni havaitsemisrajan alapuolella oleva translaatiovahvistuskerroin 1,3 vahvistaa pään 50 cm liikkeen ulottumaan 65 cm päähän virtuaalisessa ympäristössä. Mikäli käyttäjä jatkaa aloittamansa liikkeen loppuun – käden liikkeen yltäessä 20 cm päätä pidemmälle – osuu hänen kätensä lattiaan 85 cm päässä hänen sijainnistaan, 15 cm kohteen yli. Käyttäjällä on vahvistuksen ansiosta normaalia suurempi ulottuvuus, mutta sillä on negatiivisia vaikutuksia. Translaatiovahvistuksen käyttö hankaloittaa merkittävästi esineiden poimimista ja pakottaa käyttäjän reagoimaan vahvistusta vastaan, joko muuttamalla suunnittelemaansa varhailonliikettä tai käden liikerataa. Translaatiovahvistuksen käyttö tuo lisää epävarmuutta virtuaalitodellisuudessa liikkumiseen, koska käyttäjä ei voi ennakoida, kuinka hänen liikkeensä päättyvät. Ongelma on merkittävä, koska fyysistä liikettä täytyy korjata jo tilanteessa, jossa vahvistuskerroin on suuruudeltaan pieni ja käyttäjä ei voi havaita manipulointia.

TCM-menetelmästä ei ole etua verrattuna VR-laseista tapahtuvaan manipulointiin, mikäli aiemmin esitetyssä kuvassa (Kuva 5) olevaa liikettä A ei ole ollenkaan. Liike A on hyvin pieni, mikäli käyttäjä kävelee kohteen viereen ja poimii esineen liikuttamatta päätään eteenpäin. TCM-menetelmä toimii silloin kuitenkin yhtä tehokkaasti kuin manipulointi VR-lasien sijaintia käyttäen. Suurin hyöty menetelmästä saadaan tilanteessa, jossa käyttäjä joko omasta aloitteestaan tai kenttäsuunnittelun pakottama joutuu kurottautumaan pitkälle poimiakseen esineitä. Käyttäjän tapa liikkua ja suorittaa liikkeitä virtuaalitodellisuudessa vaikuttavat TCM-menetelmän tehokkuuteen.

TCM-menetelmä ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton. TCM-menetelmää käytettäessä liikkeen manipulointi tapahtuu vyötäröllä sijaitsevasta Trackeristä. Tästä johtuen lantion liikuttaminen kulkusuuntaan aiheuttaa näkymässä liikettä, joka ei ole pään liikkeiden aiheuttamaa. Kävellessä pään ja lantion liikkeet ovat hyvin lähellä toisiaan kulkusuuntaan tarkasteltuna lattiansuuntaisella tasolla, eikä manipulointi TCM-menetelmällä aiheuta merkittäviä ongelmia. Paikallaan seistessään käyttäjä voi liikuttaa lantiotaan edestakaisin ja aiheuttaa

näkymän muutosta VR-laseissa. Ehdotus korjaukseksi on ominaisuus, joka aktivoi manipuloinnin ainoastaan havaitessaan pään liikettä lantion liikkeen kanssa samaan aikaan.

Interrante ym. (2007) ratkaisee Seven League Boots -menetelmässä saman kävellessä ympärille katselemisesta aiheutuvan ongelman kertoimen suuruutta muuttamalla. He käyttivät muuttuvaa manipuloitikerrointa, joka oli hitaassa liikkeessä lähellä arvoa 1,0 ja kasvoi liikkeen nopeuden perusteella. Toinen heidän kokeilemansa ratkaisuvaihtoehto oli käyttäjän itse ohjaimen napin painalluksella aktivoima suurempi kiinteä kerroin. Nopeuden mukaan muuttuva manipuloitikerroin ei kuitenkaan toimi kotikäytössä, koska fyysinen tila on liian pieni ja kertoimen pitäisi muuttua nopeasti. Muuttuvan kertoimen on kerrottu tuntuvan käyttäjistä viiveenä manipuloinnissa (Interrante ym., 2007). Käyttäjät eivät ole myöskään pystyneet havaitsemaan manipuloitikerroimen muutoksia luotettavasti aiemmissä tutkimuksissa (Zhang ym., 2014). Voidaankin pohtia, aiheuttaako kertoimen muutoksen havaitsemisen vaikeus muutoksen tuntumisen viiveenä. Käyttäjän itse aktivoima manipulointi voi olla liian haasteellinen käyttää VR-peleissä, joissa pelaajan pitää keskittyä moneen eri asiaan yhtä aikaa. Tässä tutkimuksessa oli päätetty käyttää kiinteää manipuloitikerrointa. Tämän johdosta esi-
neiden poimimisen helpottamiseksi piti löytää ratkaisu, joka ei perustu manipuloitikerroimen muutokseen.

4.4 TAM- ja TCM-menetelmien toteutus pelimoottorissa

Tässä luvussa kerrotaan, kuinka edellisessä luvussa esitellyt TAM- ja TCM-menetelmät toteutettiin Unreal Engine¹⁷ pelimoottorissa. Ensin kerrotaan hyvin lyhyesti pelimoottorin tarjoamasta luokkarakenteesta niiden luokkien osalta, joita tässä tutkimuksessa hyödynnettiin. Seuravaksi kerrotaan, kuinka manipuloitu kävely toteutettiin testisovelluksessa. Lopuksi esitellään käytetty manipulointialgoritmi ja sen toteutus testisovelluksessa.

¹⁷ Unreal Engine. Lisätietoa: <https://www.unrealengine.com>.

4.4.1 Unreal Engine 4 pelimoottori ja sen ohjainluokat

Testisovelluksessa päätettiin käyttää valmista pelimoottoria ja lisensoitua sisältöä, koska se mahdollisti testipelin nopean kehittämisen ja lopputulos on laadultaan lähempänä kaupallisia pelejä graafisen tason puolesta. Pelimoottoriksi valittiin Unreal Enginen nykyinen versio Unreal Engine 4, koska se oli tutkielman tekijälle tuttu aiemmista projekteista ja sen visuaalinen ohjelmointikieli Blueprint mahdollistaa nopean prototyyppien ohjelmoinnin ilman lähdekoodin kirjoittamista. Unreal Engine 4 tarjoaa valmiin luokkarakenteen peleissä yleisesti käytettyjen toiminallisuuksien rakentamiseen. Tässä testipelissä testattavat algoritmit hyödyntävät vain osaa tästä valmiista pelimekanismien rakenteesta (engl. *Gameplay Framework*¹⁸), josta käytän nimeä pelikehys tästä lähtien. Sovelluksen rakenteen ymmärtämisen ja toistettavuuden vuoksi yksittäisten pelimoottorin tarjoamien luokkien nimiä ei ole tässä tutkielmassa käännetty suomeksi. Niistä käytetään Unreal Engine -pelimoottorissa käytettyjä alkuperäisiä englanninkielisiä nimiä.

Testipelissä hyödynnetään pelikehysten ohjain- ja pelinappulaluokkia (engl. *Controller* ja *Pawn*). *Pawn*-luokka on tarkoitettu pelinappuloille, joita joko pelaaja tai tekoäly pystyvät liikkuttamaan. Pelinappula on pelissä näkyvä visuaalinen ilmentymä pelihahmosta, joka voi vaihtua pelin aikana. Pelinappula voi olla yksinkertainen ilman omaa toiminnallisuutta oleva esine, kuten esimerkiksi Tammi-pelin pelinappula. Pelinappula voi olla myös paljon monimutkaisempi kokonaisuus, kuten esimerkiksi lukuisia erilaisia toiminnallisuuksia ja animaatioita sisältävä ihmishahmo. Pelinappuloiden ohjaamiseen käytetään *Controller*-luokan toteutuksia, joita ovat *PlayerController* pelaajan ohjastamille pelinappuloille ja *AIController* tekoälyn ohjaamille pelinappuloille. Ohjainluokka voi hallita (engl. *Possess*) yhtä pelinappulaa kerrallaan, mutta hallittavaa pelinappulaa voidaan vaihtaa pelin aikana. Pelaajan antamat ohjainkomennot tunnistetaan ohjelmoijan valitsemassa paikassa pelikehystä. Ohjainkomennot tunnistetaan ja käsitellään yleensä *PlayerController*-luokassa, mikäli ohjainkomennot ovat valitusta pelinappulasta riippumattomia. Ohjainkomentoja voidaan käsitellä myös esimerkiksi *Pawn*-luokassa, mikäli ne ovat pelinappulakohtaisia. Tässä testipelissä *Pawn*-luokka toimii ainoastaan pelaajan visuaalisena ilmentymänä, kaiken toiminnallisuuden

¹⁸ Unreal Engine: Gameplay framework. Lisätietoa:
<https://api.unrealengine.com/INT/Gameplay/Framework/index.html>.

ollessa *PlayerController*-luokassa. Uudelleensuuntausalgoritmit ovat *PlayerController*-luokan funktioita. Pelaajan näkymän näyttävä kamera on tässä testipelissä *Pawn*-luokassa, mutta toinen mahdollinen sijoituspaikka kameralle olisi *PlayerController*-luokka.

Pelikehys sisältää liikeohjaimien toteutukseen *MotionController*-luokan, joka tarjoaa automaattisen ohjaimen paikannuksen sekä ohjaimen visualisoinnin. *MotionController*-luokkaa ei voitu kuitenkaan testisovelluksessa käyttää. Käyttäjän liikkeen manipulointi vaikuttaa myös liikeohjaimiin, jolloin myös niiden sijaintia pitää manipuloida. Manipuloinnin toteutukseen ei löytynyt toimivaa ratkaisua *MotionController*-luokkaa käytettäessä. Liikeohjaimille jouduttiin rakentamaan *MotionController*-luokan tilalle oma hallintaluokka, jonka tehtäviä olivat: ohjaimien tunnistaminen, paikantaminen ja visualisointi sekä mahdollisuus poimia esineitä ohjaimen avulla.

4.4.2 Manipulointimenetelmien toteutus Unreal Engine 4 pelimoottorilla

Soveltuvuustestissä testattiin useita manipulointimenetelmiä, jotka toteutettiin *PlayerController*-luokasta perityssä omassa ohjainluokassa *RDW_PC*. Nimi *RDW_PC* on tutkijan valinta luokan nimeksi. Nimen alun ”*RDW*” on yleistynyt lyhenne uudelleensuunnatulle kävelylle (ReDirected Walking) ja nimen loppuosa ”*_PC*” on yleinen tapa nimetä *PlayerController*-luokasta perityt omat luokat Blueprint-kielessä. Manipulointi tapahtuu *RDW_PC*-ohjainluokan *Tick*-tapahtumassa, joka suoritetaan jokaisella ruudunpäivityksellä. Tavoitteena oleva ruudunpäivitysnopeus VR-sovelluksissa on 90 kertaa sekunnissa, jonka seurauksena aikaa käyttäjän näkymän piirtämiseen ja manipulointilogiikan suorittamiseen on yhteensä noin 11,1 millisekuntia. Renderointi, eli 3D-ympäristön piirtäminen 2D-kuvaksi näytölle vie tästä ajasta suurimman osan.

Testisovellusta oli tarvetta optimoida, jotta päästiin alle 11,1 ms rajan ruudunpäivitysajassa ja voitiin vapauttaa enemmän aikaa manipuloinnin laskennalle. Käyttäjätetikentän valaistus oli suunniteltu yhdistelmäksi staattisia ja dynaamisia valonlähteitä. Staattinen valaistus lasketaan etukäteen ja sen aiheuttamat varjot tallennetaan, mikä tekee niistä hyvin kevyitä käyttää käytettävän ajan suhteen. Dynaaminen valaistus täytyy laskea sovelluksen ajon aikana, mikä tekee siitä raskasta, mutta mahdollistaa varjojen piirtämisen liikkuville esineille.

Staattisilla valonlähteillä valaistiin ympäristö ja dynaamisilla valonlähteillä oli tarkoitus muodostaa käyttäjän liikuttelemista esineistä varjoja. Dynaamisen valaistuksen laskenta kahta dynaamista valonlähdettä käyttäen nosti ruudunpäivitysajan noin 20 millisekuntiin, joka oli liian paljon. Tämän johdosta käyttäjätestin testikentän kaikki valaistus muutettiin staattiseksi, jolloin ruudunpäivitysaika saatiin tippumaan noin 9–10 millisekuntiin, sisältäen yksinkertaisen kävelyn manipuloinnin. Testisovelluksessa kävelyn manipulointi ei ollut syy 11,1 ms aikarajan ylitykseen ruudunpäivitysajassa. Optimointia suoritettaessa tehtiin tärkeä huomio manipuloidun kävelyn käytöstä. Kävelyn manipulointi ei ole suorituskyvyn kannalta ilmainen ominaisuus käyttää, vaan siihen käytettävä laskenta-aika pitää vapauttaa muualta sovelluksesta.

Manipuloinnin toteuttava *RDW_PC*-ohjainluokka ylläpitää tietoa peräkkäisten ruudunpäivityksien välillä käyttäjän oikeasta sijainnista ja rotaatiosta paikannettavassa ympäristössä (*RealTransform*) ja sijainnista ja rotaatiosta virtuaalisessa ympäristössä (*VirtualTransform*) sekä käytetystä manipulointimenetelmästä. Manipuloidun kävelyn toteuttamiseksi *RDW_PC* manipuloi virtuaalisen kameran (*CameraOffset*) ja liikeohjaimien (*ControllerOffset*) suhteellista sijaintia pelihahmon sijaintiin nähden omassa *Pawn*-luokasta perityssä *BP_VRPawn*-luokassa. Nimessä oleva alkuliite ”*BP_*” kertoo kyseessä olevan Blueprint-luokan, ja sillä on tarkoitus erottaa Blueprint luokat C++ luokista. Monet Unreal Engine -kehittäjät käyttävät alku- ja loppuliiteitä tiedostojen nimissä. Huomioitavaa on, että suhteellisia sijainteja *CameraOffset* ja *ControllerOffset* manipuloidaan ainoastaan lattian suuntaisella xy-tasolla, suhteellisen korkeuden hahmon sisällä (z-akseli) pysyessä samana.

Manipuloinnissa käytetään pääosin neljää Unreal Enginen tietotyyppiä, jotka ovat *Float* (suuruus: liukuluku), *Vector* (suunta tai sijainti: kolme *Float* tyyppistä muuttujaa), *Rotator* (rotaatio: kolme *Float* tyyppistä muuttujaa), *Transform* (sijainti, rotaatio ja mittakaava: *Vector*, *Rotator*, *Vector*). Muuttujien nimet kirjoitetaan Blueprint-luokissa käyttäen Pascal case -tyyliä, jossa jokainen muuttujan nimessä oleva sana aloitetaan isolla kirjaimella, mukaan lukien ensimmäinen sana. Tärkeimpien muuttujien tietotyypit esitellään seuraavan sivun taulukossa (Taulukko 4).

Taulukko 4. Tärkeimpien muuttujien tietotyypit

Vector	Rotator	Transform
<i>CameraOffset</i>	<i>HMDRotation</i>	<i>RealTransform</i>
<i>ControllerOffset</i>		<i>VirtualTransform</i>
<i>TrackerHMDDifference</i>		<i>RealDifference</i>
		<i>VirtualDifference</i>

Manipuloitua kävelyä käytettäessä *RDW_PC*-luokan *Tick*-tapahtuman aikana tapahtuu seuraavat toimenpiteet jokaisella ruudunpäivityksellä seuraavassa järjestyksessä:

1. Tallennetaan TAM- ja TCM-menetelmissä käytettävä paikannusjärjestelmältä saatava vyötäröllä sijaitsevan Trackerin sijainti. Sijainnin selvittämiseen tarvittava Trackerin id saadaan *BP_VRPawn*-luokasta.
2. Tallennetaan paikannusjärjestelmältä saatava VR-lasien fyysinen rotaatio (*HMDRotation*).
3. Tallennetaan käyttäjän fyysinen sijainti ja rotaatio.
 - a. TCM-menetelmässä fyysinen sijainti on vyötäröllä sijaitsevan Trackerin sijainti ja rotaatio on Trackerin rotaatio.
 - b. Verrokki- ja TAM-menetelmissä fyysinen sijainti on VR-lasien sijainti ja rotaatio on VR-lasien rotaatio.
4. Lasketaan ja tallennetaan VR-lasien ja vyötäröllä sijaitsevan Trackerin fyysisten sijaintien välinen suuntavektori (*TrackerHMDDifference*).
5. Lasketaan fyysisen sijainnin ja rotaation muutos (*RealDifference*) suhteessa edelliseen ruudunpäivitykseen, käyttäen nykyistä fyysistä sijaintia vaiheesta 3 ja *RealTransform*-muuttujan arvoa, joka sisältää tiedon edelliseltä ruudunpäivitykseltä.
6. Päivitetään *RealTransform* arvo nykyisen fyysisen sijainnin ja rotaation tiedoilla vastamaan meneillään olevaa ruudunpäivitystä.

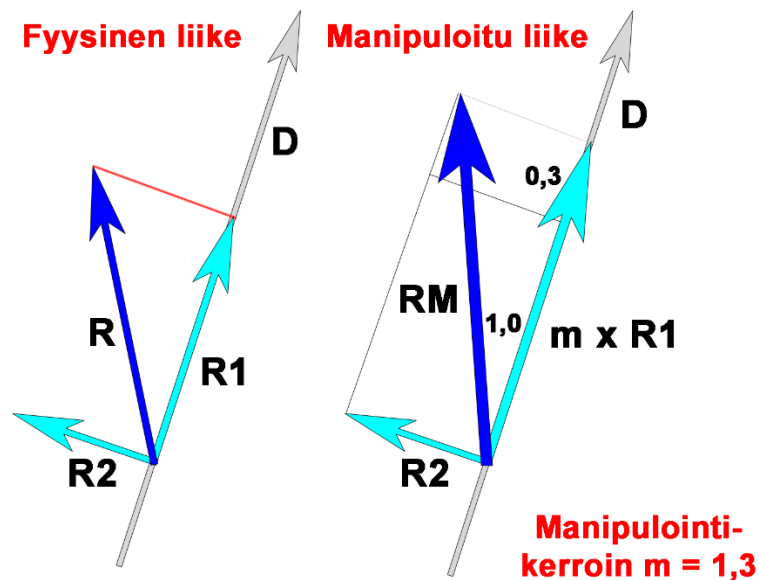
7. Suoritetaan manipulointi (siitä tarkemmin seuraavassa luvussa), jonka tuloksena saadaan uusi virtuaalinen sijainti.
 - a. TAM- ja TCM-menetelmissä manipulointimenetelmälle annetaan parametrimina suuntavektori, joka on laskettu Trackerin fyysisestä rotaatiosta.
 - b. Verrokkimenetelmässä suuntavektori lasketaan *RealTransform*-muuttujan rotaatiosta.
8. Lasketaan edellisen ja nykyisen ruudunpäivityksen välinen muutos virtuaalisessa sijainnissa ja rotaatiossa (*VirtualDifference*), käyttäen uutta virtuaalista sijaintia ja *VirtualTransform*-muuttujan arvoa, joka sisältää tiedon edelliseltä ruudunpäivitykseltä.
9. Päivitetään *VirtualTransform* arvo manipuloinnin tuloksella.
10. Lähetetään käsitellyn ruudun fyysiset ja virtuaaliset sijaintitiedot *GameInstance*-luokalle myöhempää tallennusta varten.
11. Lasketaan käyttäjän *Pawn*-luokassa sijaitsevalle virtuaaliselle kameralle (*CameraOffset*) uusi sijainti.
 - a. TCM-menetelmässä *VirtualTransform*-muuttuja osoittaa vyötäröllä olevan Trackerin sijaintia, joten kamerasijainnin laskemiseksi pitää ottaa huomioon VR-lasien ja vyötäröllä olevan Trackerin välinen poikkeama *TrackerHMDDifference* ja VR-lasien manipuloimaton rotaatio *HMDRotation*.
 - b. Verrokkimenetelmässä ja TAM-menetelmässä voidaan käyttää *VirtualTransform*-muuttujan arvoa.
12. Lopuksi lasketaan liikeohjaiminen manipulointi ja korjataan niiden sijainti (*ControllerOffset*). Laskennassa käytetään vaiheen 11 virtuaalisen kamerasijaintia, mutta lattian suuntainen rotaatio (yaw) saadaan *VirtualTransform* ja *RealTransform* välisestä rotaatiosta.

4.4.3 Manipulointialgoritmin toteutus

RealTransform-muuttuja sisältää nykyisen fyysisen sijainnin ja rotaation manipulointia suoritettaessa (edellisen luvun vaihe 7), *RealDifference*-muuttujan sisältäessä eron edelliseen

fyysiseen sijaintiin ja rotaatioon. *VirtualTransform*-muuttuja sisältää tiedon virtuaalisesta sijainnista ja rotaatiosta edellisessä ruudunpäivityksessä.

Kaikissa kolmessa menetelmässä käytettiin samaa yksinkertaista manipulointialgoritmia, jolle annetaan parametreina *Vector*-tyyppinen manipulointisuunta ja *Float*-tyyppinen manipulointikerroin. Manipulointialgoritmi palauttaa uuden virtuaalisen sijainnin *Transform*-tyyppisenä muuttujana. Käytetty manipulaatioalgoritmi vastaa toiminnaltaan Interrante ym. (2007) Seven League Boots -menetelmässä käytettyä manipulointialgoritmia, manipuloiden kävelyä ainoastaan haluttuun suuntaan.



Kuva 6. Manipulointialgoritmin toiminta

Blueprint-kielellä tehty manipulointialgoritmin toteutus on annettu tutkielman liitteenä (Liite G) aiheesta kiinnostuneille. Algoritmin toiminta on kuvattu yllä olevassa kuvassa (Kuva 6). Algoritmin toiminta etenee Blueprint-koodissa seuraavalla tavalla:

1. Fyysisen sijainnin muutos R projisoidaan manipuloinnin suuntavektorille D , jolloin saadaan:
 - a. Manipuloinnin suuntainen fyysisen liikkeen komponentti $R1$.
 - b. Manipuloinnin suuntaan nähden kohtisuora fyysisen liikkeen komponentti $R2$ saadaan laskettua vähentämällä $R1$ R :stä.

2. Manipulointi suoritetaan kertomalla manipuloinnin suuntaisen vektorin $R1$ suuruus manipulointikertoimella m .
3. Muodostetaan manipuloitu sijainnin muutos RM laskemalla yhteen $m \times R1$ ja $R2$.
4. Lisätään manipuloitu sijainnin muutos RM edelliseen virtuaaliseen sijaintiin.
5. Lisätään fyysinen rotaation muutos edelliseen virtuaaliseen rotaatioon.
6. Muodostetaan lasketuista manipuloidusta sijainnista ja rotaatiosta *Transform*-tyyppinen muuttuja.

5 Käyttäjätutkimus

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten kävelyn manipulointimenetelmillä voidaan pienentää fyysisen tilan tarvetta VR-peleissä, ja miten pelaajat suhtautuvat manipulointimenetelmien käyttöön. Tavoitteena on edesauttaa tutkimusta kohti VR-pelejä, joissa virtuaalisten kenttien kokoon vaikuttaisi fyysisen tilan koon lisäksi myös käyttäjän manipuloinnin sietokyky. Erikokoiset fyysiset tilat mahdollistavat erilaisten manipulointimenetelmien käytön ja käyttäjän suuremmalla manipuloinnin sietokyvyllä olisi mahdollista osittain kompensoida pienempää käytettävissä olevaa fyysistä tilaa. Aiempien havaintojen (Luku 2.7) mukaan suurimmalla osalla pelaajista on käytössään hyvin pieniä fyysisiä tiloja, mutta manipulointialgoritmien käyttö antaisi näille pelaajille mahdollisuuden käyttää suurempia virtuaalisia maailmoja ja silti liikkua käyttäen luonnollista kävelyä, jota pidetään parhaana liikkumismenetelmänä (Luku 2.6).

5.1 Tutkimusmenetelmä

Tutkimus suoritettiin kvantitatiivisena käyttäjätutkimuksena, jossa ryhmä testikäyttäjiä koekeli testipeliä. Testipeli sisälsi pelinsisäisiä kyselyitä, automaattista tiedonkeruuta testauksen etenemisestä, sekä testin jälkeen käyttäjät täyttivät kyselyn, jota käytettiin saadun mitausaineiston ohella analysoinnissa.

5.1.1 Tutkimuskysymykset

On olemassa kävelyn manipulointimenetelmiä, joita voidaan käyttää VR-peleissä, mutta kaikki menetelmät eivät sovi kotikäyttöön, eikä kaikkia menetelmiä ole mahdollista käyttää kaikissa peleissä käytettävissä tiloissa. Ensimmäinen tutkimuskysymys pyrkii vastaamaan tähän ongelmaan:

1. Mitkä kävelyn manipulointimenetelmät toimivat liikkumismenetelmänä VR-peleissä kotikäytössä ja mitkä ovat niiden rajoitteet?

Kävelyn manipulointimenetelmien käyttämisestä VR-peleissä ei ole hyötyä, mikäli pelaajat pitävät sitä huonona ominaisuutena. Pelaajien halukkuutta manipulointimenetelmien

käyttöön selvitetään sekä tietoisella että tiedostamattomalla tasolla. Tietoinen mielipide saadaan suoralla kyselyllä ja tiedostamatonta mielipidettä liikkumismenetelmistä selvitetään testisovelluksen antaman informaation perusteella. Hypoteesi on, että pelaajat ovat kiinnostuneita käyttämään manipuloitua kävelyä, mutta testitulokset osoittavat luonnollisen kävelyn olevan suositumpi liikkumisvaihtoehto. Seuraavat kaksi tutkimuskysymystä selvittävät pelaajien suhtautumista manipuloituun kävelyyn:

2. Ovatko manipuloitua kävelyä kokeilleet pelaajat halukkaita käyttämään sitä VR-peleissä?
3. Pitävätkö pelaajat luonnollista kävelyä manipuloitua kävelyä parempana liikkumismenetelmänä kokeiltuaan molempia?

Lopuksi tutkitaan manipuloinnin onnistumisen tehokkuutta vertaamalla manipuloinnilla säädettyä etua tilankäytössä:

4. Kuinka paljon fyysisen tilan kokoa voidaan pienentää VR-peleissä manipuloidun kävelyn avulla?

5.1.2 Rajaukset

Ensimmäinen tutkimuskysymys rajaa tutkittavat menetelmät ja kontekstin, joiden perusteella muodostuvat rajaukset:

1. Tutkimus keskittyy liikkumiseen VR-pelien kontekstissa.
2. Tutkimus käsittelee liikkumismenetelmistä ainoastaan manipuloitua kävelyä, jonka yhtenä verrokkina on luonnollinen kävely.
3. Kävelyn liikkeen manipulointi rajataan maanpinnan suuntaiseen kaksiulotteiseen tasoon, pelaajan näkymän sijaintia korkeuden suhteen ei manipuloida.
4. Laiterajoituksena on kuluttajalaitteet, jotka ovat saatavilla loppuvuodesta 2017.
5. Fyysisen tilan kokorajoituksena on käytetyn VR-alustan SteamVR:n maksimitila, joka on kooltaan 4 x 4 metriä.

Käyttäjätesti haluttiin tehdä samanlaisena kaikille koehenkilöille, riippumatta heidän taustatiedoistaan tai VR-kokemuksestaan, joten lisättiin seuraavat rajaukset:

6. Tutkimuksessa ei tutkita käyttäjän tottumista manipulointiin.
7. Manipulointimenetelmien kertoimia ei muuteta dynaamisesti testin aikana.
8. Manipulointikertoimet ovat samat jokaiselle käyttäjälle, riippumatta käyttäjän aiemmasta kokemuksesta manipuloinnin suhteen.

5.1.3 Parivertailu

Parivertailun tieteellisenä tutkimusmenetelmänä esitti Thurstone (1927) nimellä *A Law of Comparative Judgement*. Parivertailu on valittu menetelmäksi, koska se mahdollistaa koehenkilölle helpon kahden testikerran vertailun keskenään. Yhden testikerran kestäessä jopa useita minutteja, useamman testikerran vertaaminen voisi olla koehenkilölle liian haastavaa, samoin kuin koehenkilölle uudenlaisen kokemuksen arvioiminen numeerisella mittarilla. Tätä menetelmää käytettäessä koehenkilön ei tarvitse vertailla mielessään kuin juuri päättynyttä sekä sitä edeltänyttä testikertaa.

Neljä testattavaa algoritmia vaatii kuusi parikyselyä Thurstonen (1927) esittämän kaavan

$$\frac{1}{2}n(n - 1)$$

mukaisesti, n:n ollessa 4. Tässä tutkimuksessa testikertoja tarvitaan useampia, kahden testin luonteesta johtuvan ehdon johdosta. Testikerrat suoritetaan peräkkäin, joten ensimmäinen kysely voidaan esittää vasta toisen testikerran jälkeen. Tästä seuraa, että tarvitsee lisätä yksi ylimääräinen testikerta ensimmäiseksi testikerraksi. On lisäksi mahdotonta järjestää kuutta parivertailua peräkkäin niin, että vertailussa olisi aina kaksi viimeisintä testikertaa. Tästä johtuen tarvitsee lisätä testikertojen väliin yksi testikerta, jonka jälkeen ei tule kyselyä. Väliin olevan ylimääräisen testikerran sijainniksi on valittu kuuden testikerran puoliväli, jolloin testikerrat saadaan jaettua kahdeksi yhtä suureksi kokonaisuudeksi, molempien puolikaiden sisältäessä yhden testikerran ilman parivertailua ja kolme testikertaa parivertailun kanssa. Testikertoja neljälle menetelmälle vaaditaan näiden lisättyjen ehtojen johdosta

kaikkiaan kahdeksan. Testattavien menetelmien testaamisjärjestys (menetelmät A-D) on satunnainen, parivertailujen seuratessa alla olevan taulukon (Taulukko 5) mukaista järjestystä.

Taulukko 5. Testikertojen parivertailujen suoritus

Testikerran numero	Testattava menetelmä	Parivertailu
1	A	Ei vertailua
2	B	A ja B
3	C	B ja C
4	D	C ja D
5	B	Ei vertailua
6	D	B ja D
7	A	D ja A
8	C	A ja C

Kyselyssä koehenkilön pitää verrata juuri suoritettua testikertaa edelliseen testikertaan ja vastata kysymykseen ”*Kumpaa liikkumismenetelmää käyttäisit mieluummin pelissä?*”. Koehenkilöille muistutettiin, että kysymys koskee ainoastaan liikkumista, eikä vertailussa tule ottaa huomioon kerättäviä esineitä. Vaihtoehdot esitetään 7-tasoisella asteikolla, jossa kunkin algoritmin paremmuudelle on kolme vaihtoehtoa.

Koehenkilölle esitettävät vaihtoehdot olivat seuraavat:

- Paljon mieluummin
- Mieluummin
- Hieman mieluummin
- Yhtä hyvät
- Hieman mieluummin
- Mieluummin
- Paljon mieluummin

Vaihtoehtoja tarvitaan vähintään kolme, koska huomaamattoman manipulointialgoritmin taivoite on tuntua käyttäjistä täysin samalle kuin tilanne ilman manipulointia, joten tarvitaan yhtäsuuruutta merkkäava vaihtoehto paremmuutta merkkäavien vaihtoehtojen lisäksi. Suuri määrä valintoja, kuten esimerkiksi paremmuuden jakaminen yhdeksään tasoon Saatyn (1977) mallin mukaisesti koettiin lyhyelle ja uudelle virtuaalitodellisuuskokemukselle liian hankalaksi testaajille, joten testissä päädyttiin Fülöpin, Koczkodajn ja Szarekin (2010) esittämään kolmeen tasoon paremmuutta ilmoitettaessa. Fülöp ym. (2010) perustelevat suppeamman asteikon käyttöä muun muassa sen sopimisella paremmin kielen rakenteeseen, kielen tarjotessa kolme tasoa vertailuun.

5.1.4 Testattavat menetelmät

Testattaviksi menetelmiksi valittiin yksinkertainen translaatiovahvistus verrokkimenetelmäksi TAM- ja TCM-menetelmille, neljännen vaihtoehdon ollessa manipuloimaton kävely. Kaikki kolme manipulointimenetelmää käyttävät samaa manipulointialgoritmia ja samaa manipulointikerrointa. Menetelmät eroavat toisistaan sillä, miten ne käyttävät Tracker-paikanninta manipuloinnissa. Verrokkimenetelmä ei käytä Trackeriä ollenkaan, TAM-menetelmä käyttää sitä manipuloinnin suunnan osoittamiseen ja TCM-menetelmä käyttää sitä manipuloinnin suunnan osoittamisen lisäksi myös manipuloinnin kohteena. Muuta eroa kolmella eri menetelmällä ei ole.

5.1.5 Ennakkokysely

Paperille täytettävässä ennakkokyselyssä kerättiin koehenkilöiden perustiedot, joita olivat: ikä, sukupuoli ja kätisyys. Näiden tietojen lisäksi ennakkokyselyssä kysyttiin aiemmista kokemuksista virtuaalitodellisuudesta. Kysymykset kartoittivat koehenkilöiden käyttämiä VR-laseja kategorioittain ja niiden käyttöastetta. Lisäksi kysyttiin, olivatko koehenkilöt tutustuneet liikkumisen manipulointiin ennen käyttäjätestiä. Käytetty ennakkokysely on tutkielman liitteenä (Liite E).

5.1.6 Testipelin automaattisesti suorittama tiedonkeruu

Testipelissä tarkasteltiin koehenkilön sijaintia fyysisessä ympäristössä, sijaintitiedon tullessa kuudesta eri pisteestä, jotka ovat HTC Vive VR-lasit, kaksi Viven liikeohjainta ja kolme Vive Trackeriä. Yksi Tracker oli kiinnitetty koehenkilön vyöhön selkäpuolelle ja kaksi Trackeriä oli kiinnitetty kenkiin jalkapöydän päälle, yksi kumpaankin. Jokaisesta paikannuspisteestä tallennettiin niiden sijainti suhteessa seurantajärjestelmän keskipisteeseen fyysisessä ympäristössä, orientaatio fyysisessä ympäristössä, manipuloitu sijainti virtuaalisessa ympäristössä ja manipuloitu orientaatio virtuaalisessa ympäristössä. Tiedot tallennettiin jokaisella ruudunpäivityksellä, jolloin tallennettiin myös kyseisen ruudun aikaleima ja edelliseen ruudun päivitykseen kulunut aika. Jokaisesta testikerrasta tallennettiin kaksi CSV-tiedostoa, joista yksi sisälsi liiketiedon fyysisessä ympäristössä ja toinen sisälsi manipuloidun liiketiedon. Tiedostoja luodaan kaikkiaan 16 kappaletta jokaiselle käyttäjälle, yksittäisen käyttäjän testitapahtuman sisältäessä kahdeksan testikertaa.

Käyttäjätestissä käytetyn liikesuunnasta riippuvaisen manipulointialgoritmin käyttö samassa tilassa edestakaisin liikuttaessa aiheuttaa oikean ja virtuaalimaailman välille siirtymän. Siirtymästä johtuen koehenkilön fyysisen maailman sijainti testikerran alussa poikkeaa hänen fyysisen maailman sijainnistaan testikerran lopussa, vaikka sijainti virtuaalimaailmassa olisi sama. Tämä siirtymä pitää nollata testikertojen välissä.

5.1.7 Kysely käyttäjätestin jälkeen

Koehenkilöille annetaan paperinen kysely VR:ssä tehdyn käyttäjätestin jälkeen. Kyselyn kysymykset koskevat manipuloinnin miellyttävyyttä ja huomaamattomuutta sekä simulaatiopahoinvointia. Paperiset kyselyt haluttiin pitää lyhyinä, jolloin painopiste on muutamalla kysymyksellä, joihin koehenkilö voi rauhassa keskittyä ja samalla kyselyn täyttäminen ei vie liian paljon aikaa.

Simulaatiopahoinvointia mitattiin Kennedyn, Lanen, Berbaumin ja Lilienthalin (1993) kehittämällä *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)* -kyselyllä. Testistä ei löytynyt suomenkielistä versiota, vaikka testiä onkin käytetty paljon tutkimuksissa viimeisen kahden kymmenen vuoden aikana. Käyttäjätestissä käytetty pro gradu -tutkielman tekijän tekemä suomenkielinen löytyy liitteenä (Liite F). SSQ on kehitetty *Pensacola Motion Sickness Questionnaire (MSQ)* -testistä faktorianalyysellä käyttäen, tavoitteena luoda menetelmä, joka sopii paremmin mittaamaan simulaatiopahoinvointia (Kennedy ym., 1993). SSQ-kysely jakaa mitattavat suureet kolmeen oireryhmään, jotka ovat pahoinvointi (engl. nausea), sekavuus (engl. disorientation) ja silmien motoriikkaan liittyvät oireet (engl. oculomotor).

Paperisessa kyselyssä oli kaksi kysymystä koskien käyttäjätestin liikkumisen manipulointia ja käyttäjätestistä suoriutumista. Manipuloitua liikkumista koskeva kysymys yritti selvittää koehenkilön näkökulmaa manipuloinnin käyttöön, mikäli manipulointi antaa hyötyä, mutta käyttö tuntuu erilaiselta kuin normaali liikkuminen. Parivertailun käyttö menetelmänä VR-käyttäjätestissä oli uutta, joten haluttiin kysyä sitä, kuinka helppona koehenkilöt pitivät vertailua.

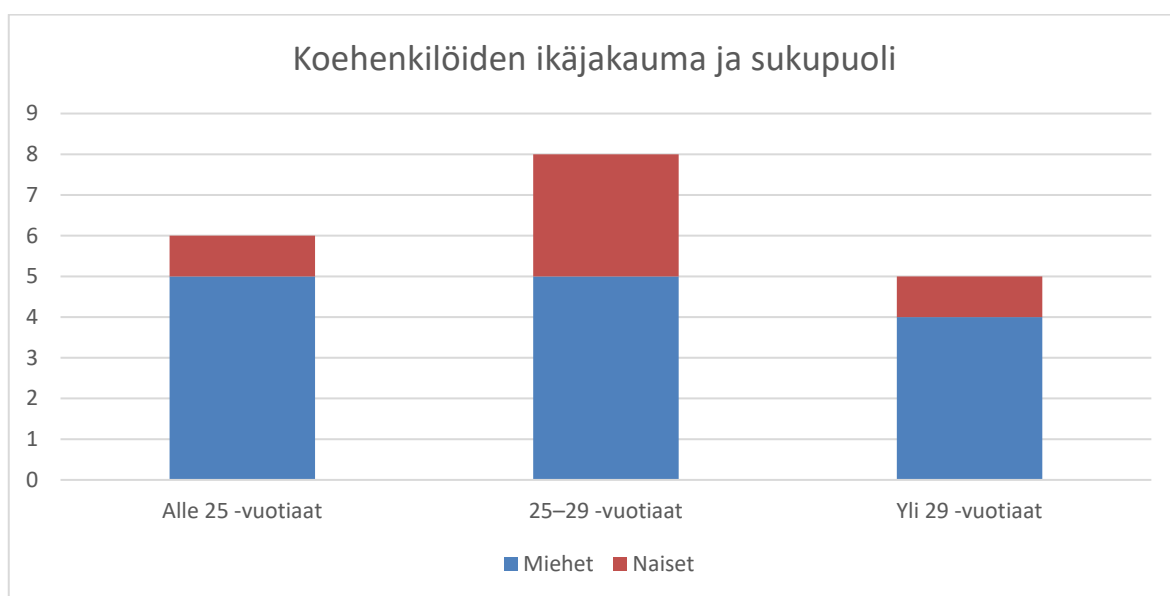
5.2 Kohderyhmä ja käyttäjätestin koehenkilöt

Tutkimuksen kohderyhmä on PC:llä VR-pelejä pelaavat pelaajat. Kohderyhmä keskittyy PC:n käyttäjiin, koska PC:n VR-lasit ovat ainoat kuluttajien saatavilla olevat tarkalla paikannuksella varustetut VR-lasit, jotka mahdollistavat uudelleensuunnatun kävelyn.

Käyttäjätestit suoritettiin Jyväskylän yliopiston tiloissa Mattilanniemen kampuksella kolmena eri päivänä. Käyttäjätestit suoritettiin keskiviikkona 25.4.2018, perjantaina 27.4.2018

ja keskiviikkona 2.5.2018. Alkuperäinen kutsu saapua koehenkilöksi (Liite C) sisälsi ainoastaan kaksi ensin mainittua päivämäärää, mutta vapaaehtoisten odotettua suuremmasta määrästä ja vapun poikkeusaikatauluista johtuen päätettiin järjestää myös kolmas testipäivä. Pro gradu -tutkielman tekijä järjesti testauksen itsenäisesti, yliopiston henkilökunnan välittäessä kutsusähköpostin yleisille sähköpostilistoille ja hoitaen tilan varaukset.

Haku koehenkilöksi pro gradu -tutkielmaan välitettiin kolmen sähköpostilistan kautta maanantaina 23.4.2018. Sähköpostilistoista kaksi oli Jyväskylän yliopiston sähköpostilistoja, joista ensimmäinen kattoi kaikki yliopistossa kirjoilla olevat tietotekniikan oppiaineen opiskelijat ja toinen sähköpostilista kattoi informaatioteknologian tiedekunnan ja humanistis-yhteiskuntatieteellisen tiedekunnan yhteistyössä järjestämiin peliopintoihin osallistuneita opiskelijoita. Kolmas sähköpostilista oli pro gradu -tutkielman tekijän työnantajan sisäinen Jyväskylän toimipisteen kattava lista. Tämän lisäksi kaksi käyttäjätestin suorittanutta koehenkilöä oli henkilökohtaisesti kutsuttu pro gradu -tutkielman tekijän toimesta. Sähköpostilistojen kautta ilmoittautuneita vapaaehtoisia oli yhteensä 19 henkilöä. Testiaikojen aikataulutus suoritettiin Doodle¹⁹-palvelun avulla ja kaikkiaan 17:lle vapaaehtoiselle 19:sta saatiin sopiva aika. Kaksi vapaaehtoista ilmoitti, etteivät jäljellä olleet vapaat ajat sopineet heille.



Kuva 7. Koehenkilöiden ikäjakauma ja sukupuoli

¹⁹ Doodle. Lisätietoa: <https://doodle.com>.

Koehenkilöitä oli kaikkiaan 19, joista miehiä oli 14 ja naisia oli 5. Koehenkilöiden iät olivat väliltä 21–42 vuotta, jakautuen yllä olevan kuvan (Kuva 7) mukaisesti. Koehenkilöiden keskimääräinen ikä oli 27,5 vuotta ja mediaani 25 vuotta. Ikäjakauma oli varsin odotettu, suurimman osan koehenkilöistä ollessa yliopisto-opiskelijoita.

5.3 Käyttäjätestin ajankohta ja tila



Kuva 8. Käyttäjätestissä käytetty tila

Tilana toimi oppimistila Agora-rakennuksen kellarikerroksessa (Kuva 8), jossa myös osa soveltuvuustesteistä oli järjestetty. Tilan kalustus oli mahdollista siirtää sivuun helposti, jotta tilassa oli mahdollista käyttää SteamVR:n suurinta sallimaa 4 x 4 metrin kokoista pelialuetta. Testipäivinä VR-alueen koko oli laajennettu noin 6 x 6 metriin, sisältäen metrin levyisen turva-alueen VR-alueen jokaisella reunalla. Viven majakoiden suurin ohjeistettu etäisyys toisistaan on 5,5 metriä, mutta tässä tilassa majakat olivat noin 7,5 metrin etäisyydellä toisistaan ja toimivat ongelmitta. Majakoiden ohjeistusta suurempaa väliä oli testattu samassa tilassa aiemmin ja todettu ettei se tuota ongelmia.



Kuva 9. Odotustila VR-tilan eteisessä

Ensimmäisen testipäivän aikana havaittiin hyväksi käytännöksi siirtää yksi pöytä ja tuoli tilan eteiseen (Kuva 9), jossa vuoroaan odottava koehenkilö voi tutustua rauhassa ohjeistukseen ja täyttää esitietokyselyn. Aikataulu oli hieman liian tiukka ja olisi riittänyt ainoastaan ilman poikkeustilanteita. Erinäisten poikkeusten takia aikataulusta oltiin myöhässä kaikkina kolmena testipäivänä, mutta erillisen odotustilan käyttö vähensi odotusaikaa, koska uusi koehenkilö pystyi täyttämään esitietokyselyä samaan aikaan kun edellinen koehenkilö suoritti vielä VR-testiä tai täytti testin jälkeistä kyselyä.

VR-järjestelmän pystyttäminen tilaan kesti noin 45 minuuttia jokaisena päivänä, sisältäen huonekalujen uudelleenjärjestämisen ja VR-tilan kalibroinnin SteamVR:n ”room setup”-toiminnolla. Valmistelu-aikaa oli varattu yksi tunti, josta jäljelle jäänyt 15 minuuttia kului testisovelluksen toiminnan varmistamiseen. Laitteiston purkamiseen ja pakkaamiseen matkalaukkuun sekä huoneen sisustuksen palauttamiseen kului noin 45 minuuttia jokaisena testipäivänä.

5.4 Tutkimusetiikka

Tutkimusta tehdessä noudatettiin Tutkimuseettisen neuvottelukunnan (TENK)²⁰ tuottamaa hyvän tieteellisen käytännön ohjeistusta ja Jyväskylän yliopiston eettisiä periaatteita²¹. Tutkimukseen haettiin koehenkilöitä sähköpostijakelulistojen avulla (kutsu liitteenä C). Kaikki kutsuun vastanneet pääsivät osallistumaan, mikäli heille saatiin sovittua sopiva aika.

Koehenkilöitä ei valikoitu vastaajista, ja rajoitteiksi kutsussa ilmoitettiin täysi-ikäisyys, suomen kielen ymmärtäminen ja liikkuminen ilman avustusta. Täysi-ikäisyys oli vaatimuksena johtuen testin mahdollisesti pahoinvointia tuottavasta toiminnasta ja vähäisestä tutkimuksesta lasten VR:n käytöstä. Suomen kielen osaamisrajoite johtui käyttäjäsovelluksen rakenteesta – joka sisälsi suomenkielisen käyttöliittymän – ja suomenkielisestä ohjeistuksesta. Suomen kielen osaamisella haluttiin varmistaa koehenkilön ymmärtävän käyttäjätestin toiminnan ja erityisesti hänelle annettavat turvallisuusohjeet. Liikkuminen ilman avustusta oli käyttäjätestin kannalta oleellinen vaatimus, käyttäjätestin keskittyessä kävelyn manipulointiin.

Koehenkilöitä pyydettiin allekirjoittamaan liitteenä (Liite D) löytyvä vastuuvapauslomake ennen käyttäjätestin aloittamista. Samalla vastattiin koehenkilöiden esittämiin kysymyksiin testin sisältöä tai turvallisuusohjeita koskien ja vahvistettiin heidän ymmärtäneen ohjeistuksen. Koehenkilöillä oli vapaus lopettaa käyttäjätesti haluamassaan vaiheessa.

5.5 Käytetty laitteisto

Laitteisto oli pääosin tutkimuksen tekijän omistamaa. Yliopiston tiloissa testattaessa osa yleisistä tarvikkeista – kuten näyttö ja Viven tukiasemille käytetyt jalustat – olivat lainassa Jyväskylän yliopistolta, helpottaen laitteiston kuljetusta. Tutkielman viimeistelyyn saatiin Jyväskylän yliopistolta informaatioteknologian tiedekunnan dekaanin myöntämä 1000 euron apuraha, josta osa käytettiin laitteistoon. Apuraha mahdollisti Vive Trackerien

²⁰ Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen suomessa. Lisätietoa: <http://www.tenk.fi>.

²¹ Jyväskylän yliopisto: Eettiset periaatteet. Lisätietoa: https://www.jyu.fi/hallinto/strategia/periaatteet/eettiset_periaatteet.

hankinnan. Laitteisto vastaa sitä tasoa, jota voidaan odottaa kohderyhmän käyttäjällä olevan. Tässä luvussa käydään läpi mistä osista testilaitteisto koostui.

5.5.1 PC-tietokone

Testisovellusta kehitettiin ja käytettiin PC-tietokoneella, jossa oli suorittimena 6-ytiminen Intel i7-8700K 3,7 GHz prosessori 5,0 GHz kellotaajuudelle ylikellotettuna ja tietokoneessa oli 16 GB 3200 MHz DDR4-keskusmuistia. Näytönohjain oli NVidia GTX 1080, 8 GB kehysmuistilla. Laitteisto vastaa tasoltaan pelikäyttöön myytäviä tehokkaita PC-tietokoneita loppuvuodesta 2017 ja ylittää VR-laitteiston minimi- ja suositusrajat selvästi.

5.5.2 Virtuaalitodellisuuslasit

Virtuaalitodellisuuslasien piti tutkimuksen rajoitusten perusteella olla kuluttajille suunnatut, ja niiden haluttiin tarjoavan paras mahdollinen VR-kokemus. Parhaat vaihtoehdot syksyllä 2017 tätä pro gradu -tutkielmaa aloitettaessa olivat HTC Vive, Oculus Rift ja Sony PSVR, kahden ensimmäisen ollessa PC-tietokoneeseen liitettäviä ja jälkimmäisen ollessa Sony PlayStation 4 pelikonsoliin kytkettävä. HTC Vive Pro VR-lasit julkaistiin huhtikuussa 2018, joka oli liian myöhäistä tämän tutkimuksen kannalta. Vive Pro VR-laseihin ei ollut käyttäjätiestä suoritettaessa toukokuussa 2018 saatavilla langatonta vastaanotinta.

VR-laseiksi valittiin HTC Vive. Tutkimuksen kannalta valintaperusteista merkittävin oli se, että pro gradu -tutkielman tekijä oli hankkinut kyseiset VR-lasit kesällä 2017, mahdollistaen rajattoman testaamisen kotikäytössä. Tämän tutkimuksen aihe syntyi myös kyseisten VR-lasien käyttökokemusten perusteella. Alkuperäiset hankintaperusteet VR-laseille olivat olleet hyvä tuki huonemittakaavan virtuaalitodellisuudelle, fyysisten esineiden paikantaminen virtuaalitodellisuudessa ja tieto kehitteillä olevasta langattomasta lähettimestä. Nämä kolme valintaperustetta olisivat olleet myös tämän tutkimuksen asettamia vaatimuksia, mikäli tutkimusta varten olisi täytynyt suunnitella VR-lasien hankintaa.

HTC Vive VR-laseissa on 1080 x 1200 pikselin resoluutio per silmä, muodostaen 2160 x 1200 pikselin kokonaisresoluution. Niissä on 110° diagonaalinen katselukulma ja 90 Hz ruudunpäivitysnopeus.

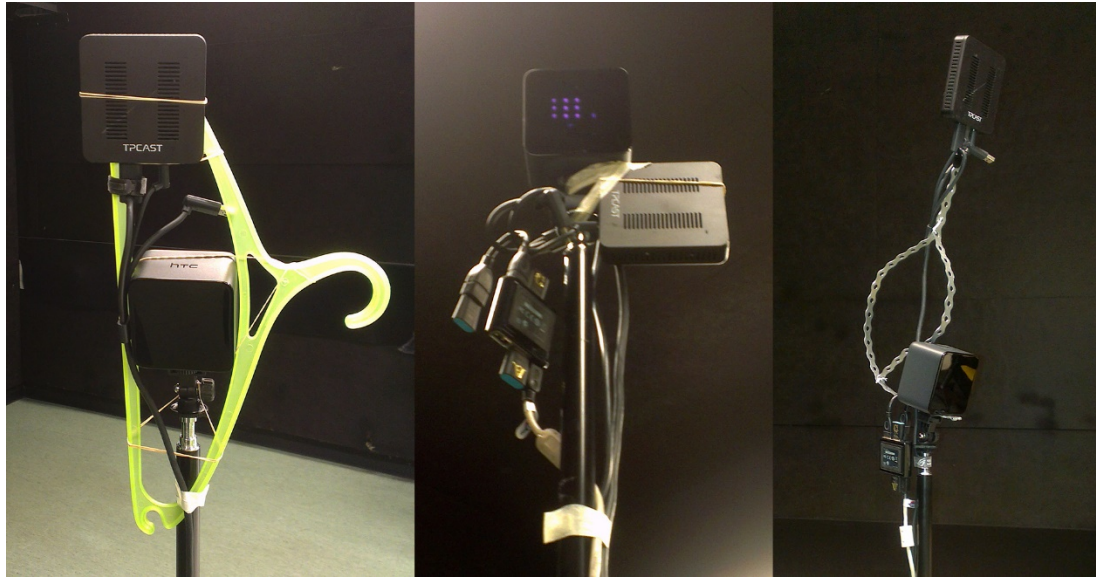


Kuva 10. Testissä käytetyt HTC Vive VR-lasit

Testissä käytettiin kuvan (Kuva 10) HTC Vive VR-laseja. Testissä käytetyissä VR-laseissa olivat käytössä kuvassa näkyvät lisävarusteet: TPCast²² langaton vastaanotin, HTC Deluxe Audio Strap pääpanta, Vive 'n' Chill tuulettimet, HTC:n suurempi nenätuki sekä VR Coverin²³ valmistama 14mm paksu keinoahkainen kasvopehmuste. VR Coverin pehmuste vastasi kooltaan HTC Viven alkuperäisistä kahdesta kasvopehmusteesta leveille kasvoille tarkoitettua mallia. Koehenkilöille oli tarjolla myös HTC Viven alkuperäinen kapeille kasvoille tarkoitettu malli. Aiempien projektien kokemusten perusteella HTC Vive VR-laseja kokeilleet suomalaiset käyttäjät ovat kertoneet näkevänsä valoa ja lattiaa nenän viereen jäävästä raosta. VR Coverin kasvopehmuste ja suurempi nenätuki peittävät tämän raon. Joillekin silmälaseja käyttäville koehenkilöille pehmusteiden asentoa piti muuttaa, minkä seurauksena heidän saattoi olla mahdollista nähdä valoa lasien alta. Tässä tutkimuksessa ei ollut olennaista tarkistaa jokaiselta koehenkilöltä kysymällä näkevätkö he valoa, vaan keskityttiin saamaan testin keston suhteen riittävä käyttömukavuus.

²² TPCast. Lisätietoa: <https://www.tpcastvr.com/>.

²³ VR Cover. Lisätietoa: <https://vrcover.com/>.



Kuva 11. TPCast-järjestelmän langattoman lähettimen sijoittelu

Soveltuvuustestin aikana kokeiltiin TPCastin lähettimelle erilaisia kiinnitysmekanismeja, jotka on esitetty kuvassa (Kuva 11). Kuvassa vasemmassa reunassa on ensimmäinen kokeilu, jossa lähetin oli asennettuna vaateripustimen avulla Viven majakan yläpuolelle ja toimi moitteettomasti. Kuvassa keskellä on tilapäisratkaisu, jossa lähetin teipattiin maalarinteipillä Viven majakkaan, hieman sen alapuolelle. Tilapäisratkaisu aiheutti kuvan katkeilua ja tästä johtuen päätettiin rakentaa kestävämpi ja nopeammin pystytettävä kiinnitysratkaisu. Kuvan oikeassa reunassa on lopullinen vannenauhasta rakennettu teline, jota käytettiin testisovelluksesta viimeistellessä, sekä kaikkina kolmena testipäivänä. Lopullinen ratkaisu toimi ongelmitta testipäivinä, mutta vannenauhan suuren taipuvuuden johdosta rakenteessa on vielä parantamisen varaa.

5.5.3 Seurantajärjestelmä

Käyttäjättestissä oli käytössä HTC Vive VR-lasien käyttämä Valven kehittämä SteamVR Tracking -seurantajärjestelmä. HTC Vive VR-lasit olivat ensimmäiset kaupalliset VR-lasit, jotka käyttivät tätä seurantajärjestelmää. Valve avasi järjestelmän lisensoitavaksi kolmansille osapuolille ilmaiseksi vuonna 2016, ja syksyllä 2018 järjestelmä on käytössä HTC Vive Pro VR-laseissa ja myös muiden valmistajien myyntiin tulevissa VR-laseissa. SteamVR Trackingistä on julkaistu kaksi versiota, HTC Vive käyttää versiota 1.0 ja HTC Vive Pro

käyttää versiota 2.0. SteamVR:n versioiden välillä on teknisiä eroja ja eri versioiden laitteet eivät ole keskenään täysin yhteensopivia. Tässä tutkielmassa käytettiin ainoastaan SteamVR:n versiota 1.0 tukevia laitteita.

SteamVR tracking versio 1.0 -paikannusjärjestelmä koostuu tukiasemista, paikannettavissa laitteissa olevista sensoreista ja isäntälaitteesta, joka laskee paikannettavien laitteiden sijainnin niiden lähettämän tiedon perusteella. Tukiasemia version 1.0 järjestelmässä on kaksi, ja kumpikin niistä keilaa paikannettavaa aluetta 120° suuruisella horisontaalisella kulmalla. Jokainen paikannettava laite voi sisältää maksimissaan 32 sensoria ja ne viestivät isäntälaitteelle langattomasti. Isäntälaitte on PC-tietokone ja se tarjoaa SteamVR API -rajapinnan seuranta järjestelmän käyttöön ohjelmallisesti peleissä tai hyötysovelluksissa. Paikannettavan alueen maksimikoko on 4 x 4 metriä version 1.0 laitteissa.

HTC kehitti Vive Tracker -lisälaitteen valmistamilleen Vive VR-laseille ja julkaisi sen kehittäjille maaliskuussa 2017. Vive Tracker on pieni paikannin, jonka voi kiinnittää fyysisen ympäristön kohteisiin niiden paikantamiseksi virtuaaliympäristössä. Vive Tracker vaatii kuitenkin suoran näköyhteyden SteamVR:n tukiasemiin. HTC julkaisi Vive Trackeriä käyttäviä lisälaitteita, kuten tennis- ja pöytätennismailat sekä VR-aseen marraskuussa 2017, ja ne tulivat myyntiin joulukuussa 2017. Vive Tracker tuli joulukuun 2018 lopussa myyntiin HTC:n omaan kuluttajille tarkoitettuun verkkokauppaan samoihin aikoihin ilman erillistä julkaisua.

5.6 Testipeli

Tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi päätettiin ohjelmoida testipeli. Testipelin haluttiin olevan toiminnallisuuden ja ulkoasun osalta hyvin lähellä kaupallista VR-peliä. Syynä tähän oli tutkimuksen tarkoitus tukea VR-pelien kehitystä. Tähän laadulliseen tavoitteeseen pääsemiseksi käyttäjätesti tehtiin yleisellä ja monissa peleissä käytetyllä pelimoottorilla, käyttäen kaupallisten pelien kehittämistä varten aiemmin ostettua kaupallista lisensioitua pelisisältöä. Tutkielman liitteinä ovat lista testipelin kehittämiseen käytetyistä ohjelmistoista ja niiden versioista (Liite A) ja lista testisovelluksessa käytetystä lisensoidusta sisällöstä (Liite B).

5.6.1 Käyttäjätutkimuksen testikenttä

Testipelissä koehenkilön roolina on olla varastotyöntekijä, jonka tehtävänä on kerätä varastosta esineitä pahvilaatikkoon. Testipeli sisältää yhden 4 x 4 metrin kokoisen kentän, jossa suoritetaan ensin yleinen virtuaaliodellisuuteen tutustuminen ja sen jälkeen käyttäjätutkimuksessa käytettäviin mekanismeihin tutustuminen. Tutustumisen jälkeen testipelissä suoritetaan käyttäjätutkimus, joka sisältää kahdeksan testikertaa ja kuusi vertailua. Käyttäjätutkimus on rakenteeltaan hyvin suoraviivainen, joten se sopii hyvin ensimmäiseksi kentäksi myös tietokonepeleihin tottumattomille koehenkilöille.

Käyttäjätutkimuksen kentän sisältöä ja rakennetta kehitettiin iteratiivisesti soveltuvuustestauksen aikana. Alkuperäisenä suunnitelmana oli rakentaa huone, jossa hyllyrakenteet muodostavat E-kirjaimen muotoiset kulkuväylät. Esineiden keräyspiste suunniteltiin sijoitettavaksi yhdelle huoneen sivuista. Suunniteltu huoneen rakenne havaittiin soveltuvuustestissä ongelmalliseksi, koska manipulointialgoritmit aiheuttavat siirtymää. Siirtymän johdosta käyttäjän fyysinen sijainti ei ole samassa paikassa manipuloinnin alussa ja lopussa. Siirtymä mahdollistaa käyttäjän ajautumisen 4 x 4 metrin kokoisen fyysisen tilan ulkopuolelle. Tämän johdosta testikentän arkkitehtuuria oli välttämätöntä muuttaa ja lisätä manipuloinnin kalibrointi jokaisen testikerran väliin.



Kuva 12. Kohtisuoran projektion kuva testikentästä

Testikentän arkkitehtuuria muutettiin käyttäjätutkimukseen, uuden kentän arkkitehtuurin muistuttaessa H-kirjainta. Kentän rakenne esitetään ortogonaalista projektiota käyttäen yllä olevassa kuvassa (Kuva 12), josta pystyy tunnistamaan kentän vasemman ja oikean reunan keskellä olevat hyllyt, jotka muodostavan kentän H-mallisen rakenteen. Kuvassa voidaan nähdä myös kentän keskellä oleva pahvilaatikko kerättäville eläinfiguureille sekä keltaisina ääriiviivakuvioina kaikki seitsemän sijaintia, joista eläinfiguureita noudetaan. Koehenkilö aloittaa testikerrat läheltä kentän keskipistettä, pahvilaatikon edestä.

5.6.2 Kerättävät esineet

Testikerrat havainnollistettiin koehenkilölle käyttäen erilaisia ja erivärisiä esineitä kuvaamaan testikertoja. Esineiksi valikoituivat eriväriset eläinfiguurit. Valinta perustui siihen, että oletettiin koehenkilöille tuttujien eläinhahmojen olevan helpompia muistaa ja erottaa toisistaan kuin hyvin samankaltaiset esineet. Koehenkilön oli näin mahdollista viitata testikertoihin testin suorittamisen jälkeen käyttäen eläimen nimeä tai vaihtoehtoisesti sen väriä. Jokainen figuuri esiteltiin koehenkilölle aina yhdessä eläimen kirjoitetun nimen kanssa. Tällä menetelmällä poistettiin mahdolliset epäselvyydet, jotka voisivat johtua eläimen tunnistamisesta ainoastaan figuurin ulkomuotojen perusteella.



Kuva 13. Testipelissä kerättävät eläinfiguurit

Tutkielman tekijällä oli aiemmin Unreal Marketplace²⁴ ostettuina viisi eläinfiguuria, ja kolme puuttuvaa figuria löydettiin BlendSwap²⁵-sivustolta ilmaisella CC0-lisenssillä. Eläinfiguurit on esitelty yllä olevassa kuvassa (Kuva 13) ja tarkemmat tiedot käytetyistä figureista löytyvät tutkielman liitteenä (Liite B). Jokaista testattavaa menetelmää käytetään kahdesti, mutta menetelmää kuvaava esine vaihtuu jokaisella testikerralla, jottei koehenkilö tiedä mitä menetelmää milläkin testikerralla käytetään. Eläinfiguurien järjestys kuitenkin pysyi samana jokaiselle koehenkilölle, mikä helpotti testin valvontaa. Eläinfiguurit ovat kuvassa (Kuva 13) samassa järjestyksessä, jossa ne esiintyivät testipelissä. Norsu oli ensimmäinen kerättävä figuuri ja karhu viimeinen. Eläinfiguurien pituus testipelissä oli noin 20–25 cm ja korkeus noin 15 cm.

Eläinfiguurien värit ovat lähellä Okaben ja Iton (2002) esittämän värisokeille sopivan väripaletin mukaisia värejä. Heidän esittelemänsä väripaletti sisältää kahdeksan eri väriä, jotka ovat erotettavissa toisistaan, oli henkilö normaalin värinäön omaava tai protanope, deuteranope tai tritanope -tyyppisestä värisokeudesta kärsivä. Okaben ja Iton (2002) antamaa ohjeistusta ei ollut mahdollista noudattaa täydellisesti, joten värien valinnassa ja käytössä testipelissä on muutamia poikkeuksia. Yksi kahdeksasta käytetystä väristä kuuluisi olla musta, mutta musta eläinfiguuri olisi ollut liian hankala erottaa testipelissä ympäristöstä, joten mustan värin sijaan käytettiin valkoista. Muut seitsemän väriä ovat väripaletin mukaisia, mutta 3D-ympäristössä valaistus aiheutti niihin pieniä sävy muutoksia. Väripaletin värejä tulisi myös käyttää ainoastaan valkoista taustaa vasten, mutta eläinfiguurien esittäminen valkoisella taustalla olisi tehnyt niistä hyvin hankalia erottaa taustasta valaistuksesta johtuen, joten mallikuvien taustaväriksi valikoitui tummanharmaa. Tässä testipelissä kaikki testikerrat olivat tunnistettavissa kolmella tapaa: eläinfiguurin muodoista, eläinfiguurin väristä ja eläimen nimestä. Eläinfiguurien erottaminen värien perusteella toi ainoastaan lisäarvoa erottamiseen, eikä ollut välttämätöntä. Tästä johtuen testipeliä ei tarkoituksellisesti testattu värisokeilla henkilöillä, mutta testikutsussa (Liite C) luvattiin, ettei värisokeus ole este testin suorittamiselle.

²⁴ Unreal marketplace. Lisätietoa: <https://www.unrealengine.com/marketplace>.

²⁵ Blendswap. Lisätietoa: <https://www.blendswap.com>.

Kerättävien figuurien sijainteja kokeiltiin etukäteen useita, ja käyttäjätettiin kokeiluista sijainneista jäi seitsemän. Seitsemän figuuria arvioitiin olevan lukumäärältään riittävän pieni määrä, jotta testitapahtuman kesto ei veny liian pitkäksi, eikä koehenkilö ehdi kyllästymään testikertojen samankaltaisuuteen. Neljä figuuria oli sijoitettu tilan kulmiin, jotta saatiin algoritmien aloituspisteestä kaukaisimpien pisteiden etäisyys tallennettua. Figuurien sijoittelussa harkittiin satunnaisesti valittujen sijaintien käyttöä. Silloin haettavia figuureita olisi ollut kuudesta kahdeksaan kappaletta, jotka olisivat voineet sijaita joissakin kymmenestä etukäteen valitusta sijainnista. Neljä kulmissa olevaa sijaintia olisi ollut käytössä jokaisella testikerralla, mutta muiden figuurien sijainti olisi arvottu jäljelle jääneistä vapaista sijainneista. Tätä menetelmää ei otettu käyttöön käyttäjätestissä, koska haluttiin varmistaa myöhemmin esiteltävien virtuaalisesti hankalasti sijoitettujen sijaintien käyttö jokaisella testikerralla.

Testipelin esineille rakennettiin fysiikkamallinnus, joka sai esineiden poimimisen tuntumaan realistisemmalta ja esti niiden poimimisen virtuaalisten esteiden läpi. Esineiden fysiikkamallinnuksen toteutuksessa suurena apuna oli Jonas Mølgaardin tekemän ja Youtubesta löytyvän *VR/Vive Interactables*²⁶-opetusvideosarjan antamat opit.

5.6.3 Tutustuminen virtuaalitodellisuuteen ja käytettäviin mekanismeihin

Testitapahtuma alkaa virtuaalitodellisuuteen tutustumisella, jossa koehenkilö perehdytetään VR-laitteiston toimintaan, kerrotaan testipelin kulku ja annetaan ohjeet, miten tulee toimia testin eri vaiheissa. Kentässä ei ole aikarajaa, ja virtuaalitodellisuutta ensimmäistä kertaa kokeileva koehenkilö voi rauhassa totutella kokemukseen. Mitään tämän kentän tapahtumia ei taltioida eikä oteta huomioon tutkimuksessa.

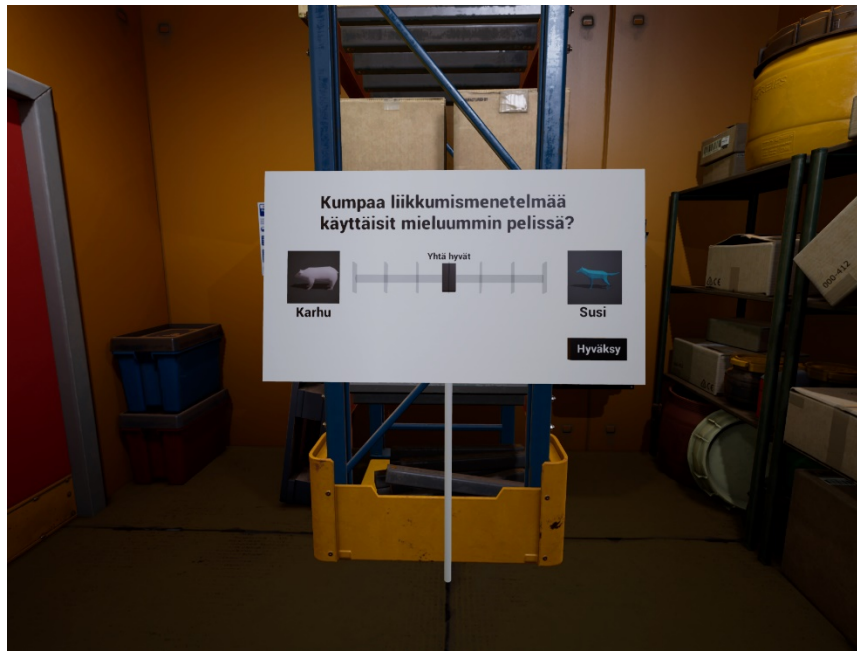
Ensimmäisessä vaiheessa koehenkilö saa vapaasti kävellä varastohuoneessa, eikä näkyvillä ole mitään testimekanismin liittyviä esineitä. Tarkoituksena on opettaa koehenkilölle tilan rajat, sekä totuttaa koehenkilö liikkumaan kävellen virtuaalisessa ympäristössä. Samalla koehenkilö näkee virtuaaliympäristön graafisen tason.

²⁶ Mølgaard, J. VR/Vive interactables. Lisätietoa: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLT4SeajOa6mavQ09VO3mmPi5vinawYZoM>.



Kuva 14. Esimerkki testipelin keräysmekanismista

Toisessa vaiheessa koehenkilölle esiteltiin mekanismi esineiden keräämiseksi, käyttäen punaisia pulloja kerättävinä esineinä. Pullot valittiin eläinfiguurien sijaan esimerkkiesineiksi, ettei käyttäjä sekoittaisi pullojen keräämistä eläinfiguurien keräämiseen vertailuja tehdessään. Pullojen sijainneiksi valittiin kuvassa (Kuva 14) näkyvä huoneen kulma, lattialla keskellä oikealla oleva sijainti (Kuva 18, sivu 67) ja kuvan (Kuva 19, sivu 67) hyllyssä oleva sijainti. Hyllyssä olevan pullon avulla opetettiin pelin käyttävän fysiikkamallinnusta ja lattialla olevan pullon avulla varmistettiin koehenkilön kykeneväisyys poimimaan esineitä lattialta sekä järjestelmän fyysisen ja virtuaalisen lattian korkeuden synkronointi. Ohjainten ja Trackerin tunnistumisen kanssa oli ollut aiemmin ongelmia, joten pulloja keräämällä varmistettiin myös ohjainten toimivuus ja pyydettiin koehenkilöä vahvistamaan näkevänsä sekä käsissä olevat ohjaimet että jaloissa sandaaleina näkyvät Trackerit. Jaloissa olevien Trackerien tarkistamisen avulla varmistettiin samalla myös vyötäröllä olevan Trackerin toiminta, koska sen tunnistumatta jääminen olisi aiheuttanut virhetilanteen, jossa molemmat sandaalit näkyvät samassa jalassa.



Kuva 15. Esimerkki testipelin sisäisestä kyselystä

Kolmannessa vaiheessa koehenkilölle esitellään pelin sisäinen kysely (Kuva 15) ja neuvotaan koehenkilölle, kuinka sitä käytetään. Kyselyyn vastattiin valitsemalla vastausvaihtoehto taulun keskellä olevasta liukupalkista, vetämällä siinä olevaa valitsinta kohti vaihtoehtoa, jota käyttäjä piti miellyttävämpänä. Valinnan jälkeen koehenkilön piti painaa *Hyväksy*-painiketta.

5.6.4 Testikertojen rakenne

Tutustumisen jälkeen koehenkilö suoritti kahdeksan testikertaa ja niihin sisältyvät kuusi kyselyä luvun 5.1.3 mukaisesti. Sovellus tallensi liiketiedot ainoastaan testikertojen suorituksen ajalta, alkaen *Aloita*-painikkeen painamisesta ja päättyen viimeisen esineen asettamiseen laatikkoon.



Kuva 16. Testitapahtuman aloitus ja seuraavien testikertojen aloitus

Jokainen testikerta alkoi tilan keskeltä, jossa koehenkilön tuli painaa *Aloita*-painiketta (Kuva 16). Kyltin sisältö poikkesi ensimmäisellä testikerralla muista testikerroista. Muilla kuin ensimmäisellä testikerralla koehenkilölle näytettiin testin eteneminen numeerisesti, kuvan esittämällä tavalla. Kyltin avulla koehenkilö saatiin ohjattua tilan keskelle, riippumatta siitä missä hän oli edellisen testikerran päättyessä. Manipuloinnin toiminnan kannalta oli olennaista, että koehenkilö aloittaa tilan keskeltä, koska se varmisti koehenkilön pysymisen fyysisen tilan rajojen sisäpuolella.



Kuva 17. Testikerran ohjekyltti

Testikerran alkaessa huoneen keskelle ilmestyi avoin tyhjä pahvilaatikko ja kyltti ilmoittamaan koehenkilölle millaisia, esineitä kerätään, kuinka monta niitä on kerätty ja kuinka monta niitä on kaikkiaan.

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 17) esitetään koehenkilön näkymä testikerran alussa. Ensimmäisen testikerran alkaessa kyltin antama ohjeistus kerrottiin myös suullisesti.



Kuva 18. Kerättävät figuurit testikerran aloituspisteen oikealla puolella

Aloituspisteeseen nähden oikealla puolella on kolme figuuria (Kuva 18), joista kaksi sijaitsee kulmissa. Keskimmäinen kuva figuureista on sijoitettu lattialle avoimeen kohtaan, jossa käyttäjän on helppo kyykistyä poimimaan figuuri, ilman että hänen tarvitsee välittää ympärillä olevista virtuaalisista kalusteista tai esineistä.



Kuva 19. Kerättävät figuurit testikerran aloituspisteestä takavasemmalle

Kuvassa (Kuva 19) näkyy huoneen keskellä hyllyssä oleva figuuri ja testikerran aloitus-
teestä takavasemmalla olevan kulman figuuri sekä laatikon takana oven vieressä oleva fi-
guuri. Figuurit noudattivat fysiikkamallinnusta, joten niitä ei voinut siirtää kiinteiden esinei-
dän läpi, kuten esimerkiksi kuvassa näkyvien sinisten hyllyn rakenteiden läpi. Keskimmäi-
nen figuuri pakotti koehenkilön valitsemaan figuuria kerätessä kahden keräystavan väliltä.
Koehenkilöiden ensimmäinen vaihtoehto oli figuurin tarkka poimiminen hyllyn tukiraken-
teiden välistä figuuria kääntämällä. Toinen vaihtoehto oli fyysinen siirtyminen oven puolelle
hyllyä ja figuurin kerääminen helpommin hyllyn tukirakenteiden oikealta puolelta.



Kuva 20. Figuuri virtuaalisesti hankalassa sijainnissa

Toinen lattialla oleva figuuri oli tarkoituksella sijoitettu sijaintiin, jossa käyttäjällä on mah-
dollisuus välttää törmääminen virtuaaliseen ympäristöön, mutta käyttäjän tarvitsee silloin
hallita tarkasti liikkeitään. Figuurin sijainti on esitetty kuvassa (Kuva 20), josta näkee koe-
henkilön edessä olevan keltaisen metallipalkin, oikealla puolella tilaa rajoittavan oven ja sen
kahvan sekä figuurin yläpuolella olevan harmaan sähkökeskuksen. Figuurin fysiikkamallin-
nus estää sen keräämisen keltaisen tolpan vasemmalta puolelta, jonka johdosta käyttäjät jou-
tuvat poimimaan sen kuvan osoittamasta suunnasta. Tarkoituksena oli saada käyttäjä varo-
maan päätään törmäyksiltä virtuaalisiin, kovilta näyttäviin metallisiin esteisiin, vaikkei siitä
tässä testissä mitenkään rankaistu tai edes huomioitu.

Testikerta päättyy, kun viimeinen esine on kerätty ja sovellus tallentaa kerätyn liiketiedon tiedostoon ja poistaa manipulointialgoritmin käytöstä sekä kalibroi koehenkilön sijainnin. Testikerran päätyminen aiheuttaa ensin VR-lasien kuvan pysähtymisen liiketiedon tallennuksen aikana, ja tämän jälkeen käyttäjän näkymä siirtyy hieman kalibroinnista johtuen. Liiketiedon tallennus jokaisen testikerran välissä on varotoimi, jolla halutaan varmistaa, ettei tietoa katoa testitapahtuman keskeytyessä. Blueprint-kielellä ei ollut mahdollista tehdä tiedostoon tallennusta tapahtumaan taustalla, mikä johti näkymän pysähtymiseen tallennuksen ajaksi. Tallennus olisi kuitenkin mahdollista taustalla, mikäli tallennuksen koodin kirjoittaisi C++-kielellä.

6 Tulokset

Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksen tuloksia aloittaen aineiston huomioilla. Ensimmäisessä alaluvussa kerrotaan aineiston huomiot, jotka liittyvän datan keräämiseen ja siihen millaista dataa on kerätty. Tämän jälkeen tutkitaan tuloksia tutkimuskysymyksiin peilaten.

6.1 Aineiston huomiot

Käyttäjätesti suoritettiin yhteensä 20 kertaa 19 eri henkilölle. Yksi koehenkilöistä suoritti käyttäjätestin kaksi kertaa eri päivinä, mutta analysoinnin kannalta testisuorituksia on vain 19. Tarkemmin tästä poikkeustapauksesta ensimmäisessä alaluvussa. Toisessa alaluvussa kerrotaan testipelissä automaattisesti kerätystä liiketiedosta. Kolmannessa alaluvussa kerrotaan paperisista kyselyistä, ja neljäs alaluku kertoo aineiston suunnitellusta jatkokäytöstä.

6.1.1 Poikkeustapaus koehenkilöiltä kerätyssä datassa

Eräs koehenkilö suoritti käyttäjätestin ensimmäisen kerran ensimmäisenä testipäivänä, joka oli samalla hänen ensimmäinen virtuaalitodellisuuden kokeilukertansa. Koehenkilö raportoi testin jälkeen varastohuoneiden laatikoiden vinoudesta, mutta ongelmaa ei voitu tarkastaa, koska Viven tukiaseman jalusta heilahti koehenkilöitä vaihdettaessa ja SteamVR-järjestelmä jouduttiin kalibroimaan seuraavalle käyttäjälle. Kerätty liiketieto ei paljastanut syytä koehenkilön mainitsemalle virtuaaliympäristön vinoudelle, mutta liiketieto paljasti virtuaalisen lattian olleen väärällä korkeudella, yli 30 cm fyysisen lattian yläpuolella.

Pro gradu -tutkielman tekijän omasta kokemuksesta ja aiemmissa VR-testaustilaisuuksissa muiden henkilöiden antamista huomioista voidaan olettaa huoneen lattian korkeuden olevan tärkeä tekijä virtuaalitodellisuudesta saatavan kokemuksen, immersion ja VR:ssä liikkumisen suhteen. Tästä johtuen koehenkilö kutsuttiin uusimaan käyttäjätesti. Koehenkilö toisti käyttäjätestin toisena testipäivänä, samalla varmistaen suullisesti kameran korkeuden olleen toisella kerralla eri korkeudella verrattuna ensimmäiseen kertaan. Koehenkilön molemmat testitapahtumat tuottivat yksiselitteisen liikkumismenetelmien järjestyksen, joskin menetelmien järjestys ei ollut sama. Kyseinen koehenkilö ei raportoinut minkäänlaisia oireita

simulaatiopahoinvointikyselyssä kummallakaan kerralla. Tästä voidaan päätellä, ettei lattian väärällä korkeudella ollut suurta merkitystä manipulointiin.

Analysoinnin suhteen tehtiin päätös käyttää vain yhtä testikertaa kyseiseltä koehenkilöltä, minkä johdosta koehenkilöiden sekä analysoitavien testitapahtumien määrä on 19. Analysointiin päätettiin ottaa koehenkilön ensimmäisen testitapahtuman ennakkokyselyn vastaukset. Liikedata ja VR-testin jälkeisen kyselyn vastaukset otettiin toiselta testitapahtumalta. Tällä tavoin tulkittuna koehenkilö lasketaan ensikertalaiseksi, joka vastaa paremmin sitä tilannetta, että hänen suorittamansa kaksi testitapahtumaa olivat hänen ensimmäinen ja toinen kokemuksensa virtuaalitodellisuudesta.

6.1.2 Testipelistä automaattisesti kerätty liiketieto

Liiketietoa kerättiin kuudesta pisteestä jokaisella ruudunpäivityksellä, minkä johdosta kerätty tietomäärä kasvoi suureksi. Jokaisen 19 koehenkilön kahdeksan testikertaa tallennettiin, ja jokaisesta testikerrasta tallennettiin sekä fyysisen maailman että virtuaalisen maailman manipuloitu liiketieto omiin tiedostoihinsa. Suurimman osan ajasta tietoa tallennettiin 90 Hz ruudunpäivitysnopeudella. Liiketietoa kertyi kaikkiaan 304 CSV-tiedostoa, yhteensä 1 211 806 datapistettä eli tässä tapauksessa CSV-tiedoston riviä. Jokainen datapiste sisältää kaikkien tallennettavien paikannuspisteiden sijainnin ja orientaation sekä edellisen näyttöruudun piirtoajan ja aikaleiman. Tallennustilaa kaikki kerätty aineisto vie noin 487 MB.

Datan keräys onnistui erittäin hyvin ja sijaintiedon tallennus Trackereistä oli lähes virheetöntä. Ainoa virhetilanne oli 5,4 sekuntia pitkä ajanjakso erään testikerran alussa, jolloin mikään kolmesta Trackeristä ei rekisteröinyt liikettä. Tästä johtuen Trackerien sijaintieto puuttuu yhteensä 486:sta datapisteestä, joka on kuitenkin ainoastaan 0,04 prosenttia kaikista kerätyistä datapisteistä. Nämä tulokset osoittavat Trackerien olevan luotettavia paikannuslaitteita.

Tietomäärä on liian suuri manuaaliseen käsittelyyn, joten tiedon käsittelyyn täytyi kirjoittaa python-ohjelmointikielellä sovellus, joka lukee kaikki tiedostot ja laskee tallennettavien pisteiden minimi- ja maksimi-arvot. Kyseinen sovellus kirjoittaa koosteen yksittäiseksi CSV-tiedostoksi.

6.1.3 Paperiset kyselyt

Koehenkilöille annetussa ennakkokyselyssä (Liite E) havaittiin muutamia ongelmia. Käti-syyttä koskevasta kysymyksestä useat koehenkilöt kysyivät testin järjestäjältä, mitä tarkoittaa viisiportaisessa asteikossa kohta ”pääosin oikeakätinen” ja miten kätsisyys liittyy tutkimukseen. Näihin kysymyksiin annettiin lyhyt suullinen selitys, sisältäen kätsisyyden roolin ennen kaikkea tutkimusdatan jatkokäytössä. Toinen epäselvä kysymys koski sitä, mitä VR-laseja koehenkilö on käyttänyt aiemmin. Kysymysten järjestys olisi voinut olla selkeämpi, mikäli VR-lasien käytön määrää olisi kysytty ennen tätä tarkentavaa kysymystä. VR-lasit oli jaettu eri kategorioihin esimerkkien avulla, ja lisäksi oli jätetty yksi valinta sille, ettei koehenkilö tarkalleen tiennyt millaisia VR-laseja oli kokeillut. Käytetty jako älypuhelin-, pelikonsoli- ja PC VR-laseihin oli koehenkilöille vieras, eivätkä esimerkit auttaneet kysymystä. Monet koehenkilöt kysyivät testin järjestäjältä tarkennusta kysymykseen. Tarkennuksen jälkeen koehenkilöt osasivat vastata kysymykseen. Esimerkit sekoittivat koehenkilöiden vastaamista enemmän kuin helpottivat sitä. Useat koehenkilöt kysyivät, mihin kategoriaan älypuhelin- ja VR-lasit kuuluvat, vaikka vaihtoehdot suunniteltiin yksikäsitteisiksi. Syy epäselvyyteen oli luultavimmin esimerkeissä, joissa oli vastaajille tuntemattomia tuotemerkkejä.

Testin jälkeinen kysely koostui kahdesta osasta. Ensimmäisen osan simulaatiopahoinvointikysely aiheutti muutamia kysymyksiä koskien käytettyjä termejä. Tämä oli odotettua, koska suomenkielistä käännöstä testistä ei löytynyt ja käytetty versio oli tutkijan itsensä kääntämä. Yksi koehenkilö jätti vastaamatta simulaatiopahoinvointikyselyn ensimmäiseen kysymykseen, eikä tätä huomattu testin yhteydessä. Kaikki muut koehenkilöt vastasivat jokaiseen kysymykseen. Tämän lisäksi parivertailun helppoutta koskevaan kysymykseen yksi vastaajista vastasi valitsemalla kaksi vaihtoehtoa.

Paperisesta kyselystä puuttui täyttöohje, mutta vaihtoehdoissa oli käytetty yleisiä symboleja. Symboleina vaihtoehdoille olivat ympyrä, mikäli ainoastaan yksi vaihtoehto tuli valita ja neliö mikäli vaihtoehtoja voi valita useita. Lisäksi simulaatiopahoinvoinnista kertovassa osassa oli ohjeistuksena ympyröidä oikea vaihtoehto, kuten alkuperäisessä englanninkielisessä versiossa.

6.1.4 Aineiston jatkokäyttö

Kerätyllä aineistolla nähtiin useita erilaisia jatkokäyttömahdollisuuksia, tämän tutkimuksen keskittyessä tilan tiivistämiseen. Aineisto pitää sisällään taustatietokysymykset ja testisovel-luksen keräämän datan. Jatkokäyttöä varten aineisto anonymisoidaan, minkä sisältää koe-henkilöiden tarkan iän muuntamisen luokitelluksi tiedoksi. Aineisto ei sisällä koehenkilöitä yksilöiviä tietoja, kuten henkilötietoja. Kerätty biometrinen tieto liikkeistä on ajallisesti vä-häistä ja liikkuminen poikkeavaa, joten tämän datan perusteella ei voida yksilöidä koehenkilöitä.

Aineistoa pystyy hyödyntämään muun muassa tutkittaessa henkilöiden liikkumista VR-pe-lissä. Aineistosta on mahdollista tutkia erilaisia tapoja poimia esineitä ja koehenkilöiden ha-lukkuutta vältellä törmäämistä virtuaalisiin esteisiin. Havaintojen perusteella koehenkilöt välttelivät virtuaalisiin kalusteisiin – kuten hyllyihin tai seiniin – osumista, vaikkei heitä ohjeistettu välttelemään törmäyksiä. Aineisto sisältää liikkeiden aikaleimat, mutta testiker-roissa ei ollut aikarajaa tai tavoitetta suorittaa annettu tehtävä mahdollisimman nopeasti. Suorituksia ei näin ollen voi vertailla keskenään käytetyn ajan suhteen.

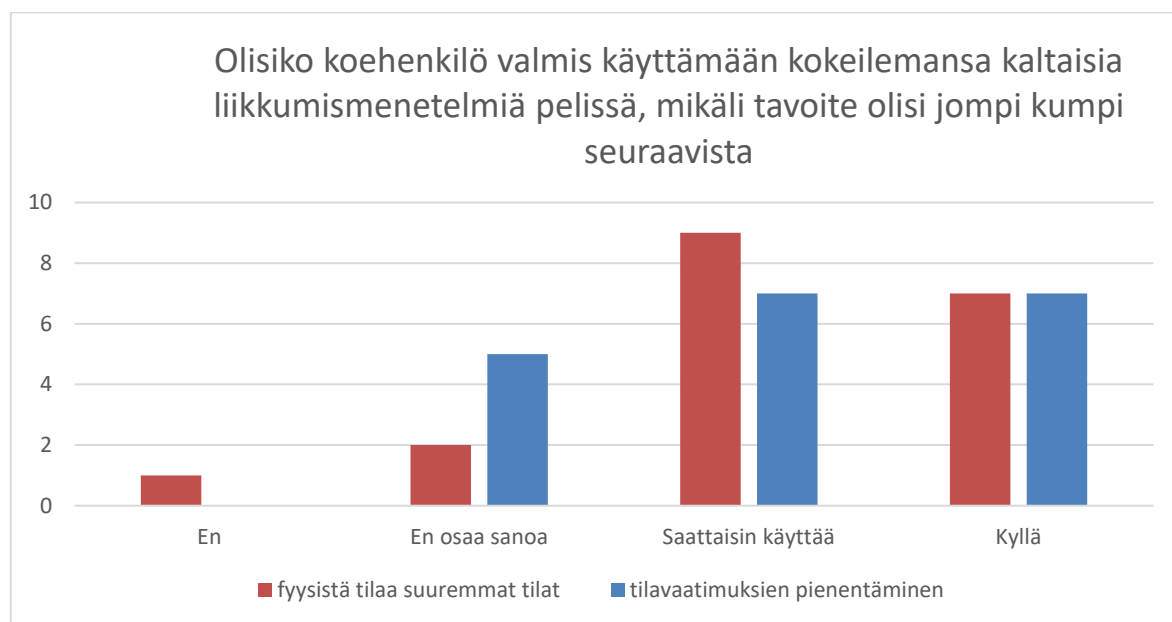
Esitietokyselyssä kerättiin tieto koehenkilön kätisyydestä, ja yksi mahdollinen tätä tietoa hyödyntävä tutkimusaihe olisi tutkia, pystyvätkö oikea- ja vasenkätiset koehenkilöt käyttä-mään yhtä hyvin oikeakätisen kenttäsuunnittelijan – jollainen tutkimuksen tekijä itse on – suunnittelemaa kenttää. Kaikki koehenkilöt olivat vastauksiensa perusteella oikeakätisiä, jo-ten tämän aineiston perusteella ei ole mahdollista tehdä mitään johtopäätöksiä liittyen koe-henkilöiden kätisyyteen.

6.2 Halukkuus manipuloidun kävelyn käyttöön VR:ssä

Koehenkilöt tiesivät ainakin osittain, mitä käyttäjätestillä testataan, ja vapaaehtoiseen testiin hakeminen osoitti jo omalta osaltaan kiinnostusta aihetta kohtaan. Tästä johtuen paperinen kysely halukkuudesta manipuloidun kävelyn käytöstä peleissä suoritettiin vasta käyttäjätēs-tin jälkeen. Tämä antoi koehenkilöille mahdollisuuden kokeilla kävelyn manipulointia ennen kirjallisen vastauksen antamista, jotta koehenkilö pystyi antamaan vastauksen kokemuksen eikä mielikuvan perusteella.

Testin jälkeinen paperinen kysely (Liite F) sisälsi kaksi kysymystä, joiden tarkoituksena oli selvittää koehenkilön halukkuus käyttää manipuloitua kävelyä VR-peleissä. Kysymykset olivat ”*Olisitko valmis käyttämään kokeilemasi kaltaisia liikkumismenetelmiä peleissä pystyäksesi käyttämään fyysistä tilaa suurempia virtuaalisia tiloja? (esimerkiksi pellon kokoinen alue olohuoneessa)*” ja ”*Olisitko valmis käyttämään kokeilemasi kaltaisia liikkumismenetelmiä peleissä pystyäksesi pienentämään tilavaatimuksia kotonasi käyttäessäsi saman kokoista virtuaaliympäristöä? (välttyisit esimerkiksi sohvan siirtämiseltä joka kerta pelatessasi VR-peliä)*”.

Kysymyksiin oli lisätty esimerkit selventämään kahden eri tavan eroja ja tarvittaessa kysymyksistä kerrottiin lisää suullisesti. Koehenkilöt eivät kyselleet käyttötapojen eroista, mutta ensimmäinen esimerkki pellon kokoisesta alueesta olohuoneessa herätti kysymyksiä, koska koehenkilöt ymmärsivät, ettei heidän kokeilemansa manipulointi mahdollista sitä. Koehenkilöille kerrottiin lisätietoa heidän kysyessään selvennystä kysymykselle. Heille kerrottiin kysymyksen koskevan kävelyn manipulointia yleisemmällä tasolla, ja olevan mahdollista suuremmilla manipulointikertoimilla.



Kuva 21. Vastaukset kysymykseen liikkumisen manipuloinnin käytöstä.

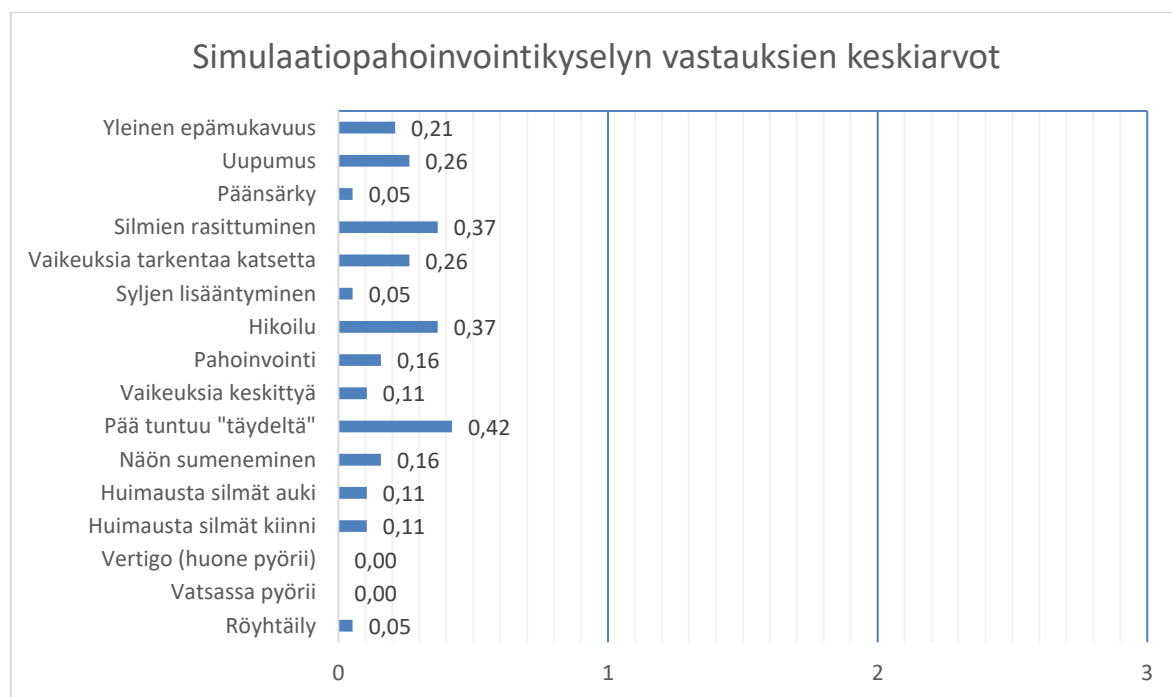
Kävelyn manipulointia koskevien kysymyksiä vastaukset on esitetty yllä olevassa kuvassa (Kuva 21). Yhdeksästätoista koehenkilöstä seitsemän (36,8 %) ilmoitti kyselyssä

halukkuutensa käyttää manipuloitua kävelyä VR-pelissä saavuttaakseen fyysistä tilaa suuremman tilan ja yhdeksän koehenkilöä (47,3 %) saattaisi käyttää manipuloitua kävelyä tähän tarkoitukseen. Kaksi koehenkilöä (10,5 %) ei osannut sanoa käyttäisivätkö manipuloitua kävelyä tähän tarkoitukseen ja yksi koehenkilö (5,3 %) ilmoitti kannakseen, ettei haluaisi käyttää sitä.

Seitsemän koehenkilöä yhdeksästätoista (36,8 %) käyttäisi manipuloitua kävelyä tilavaati-
muksien pienentämiseen. Seitsemän koehenkilöä (36,8 %) saattaisi käyttää manipuloitua kä-
velyä siihen ja viisi koehenkilöä (26,3 %) ei osannut sanoa kantaansa.

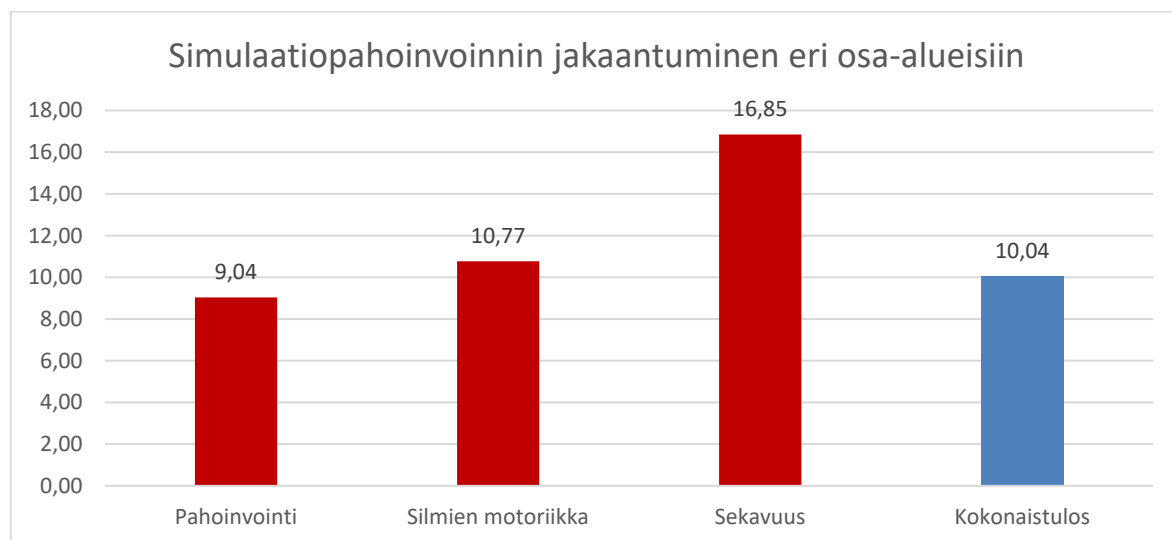
6.3 VR-Pahoinvointi

Testin jälkeen koehenkilöille esitettiin luvussa 5.1.7 esitelty SSQ simulaatiopahoinvointiky-
sely. Kyselyn tuloksista voidaan laskea (Kennedy ym., 1993) mukaisesti simulaatiopahoin-
voinnin vaikutus kolmeen eri oireryhmään. Alla olevassa kuvassa (Kuva 22) on kaikkien 19
koehenkilön vastauksista lasketut painottamattomat keskiarvot kyselyn käyttämällä 0–3 as-
teikolla.



Kuva 22. Simulaatiopahoinvointikyselyn vastauksien keskiarvot

Koehenkilöt kokivat sekavuuden oireita enemmän kuin silmien motoriikkaan tai pahoinvointiin liittyviä oireita. Pisteytyksessä on käytetty Kennedy ym. (Kennedy ym., 1993) antamia painotuksia, jotka on laskettu kymmenellä eri simulaattorilla suoritettujen 3961 simulaatiokerran perusteella. Simulaatiopahoinvointikyselyn tulokset painotuksia käyttäen on esitelty alla olevassa kuvassa (Kuva 23).

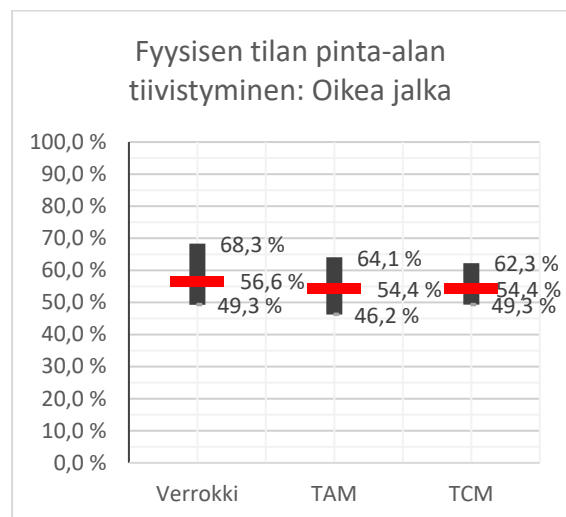
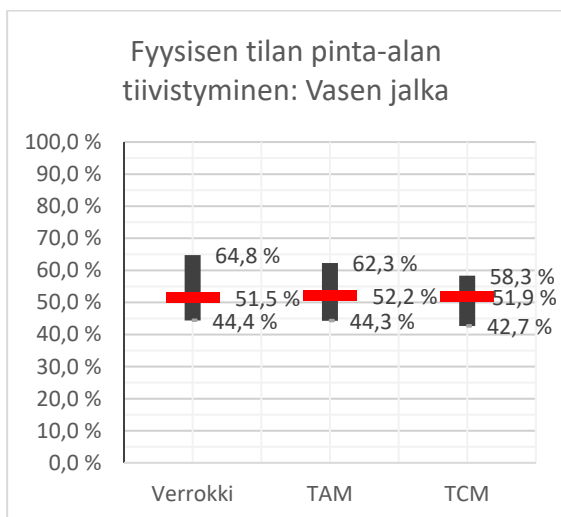
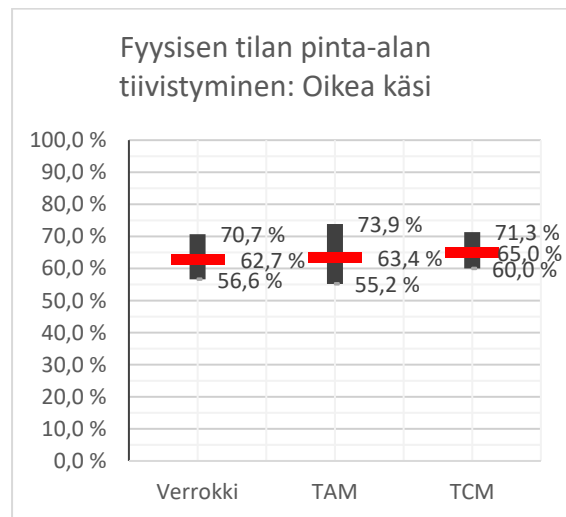
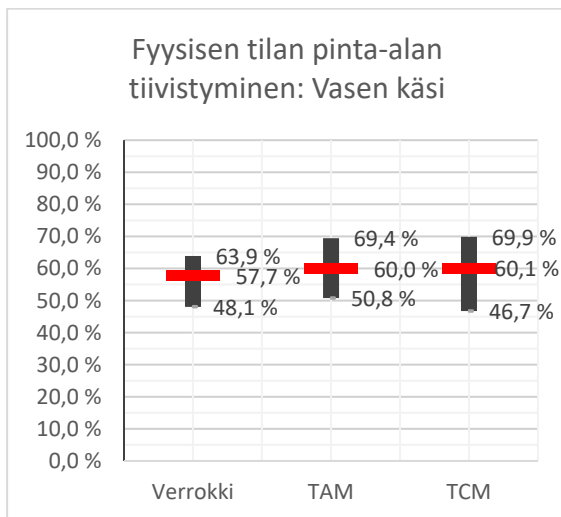
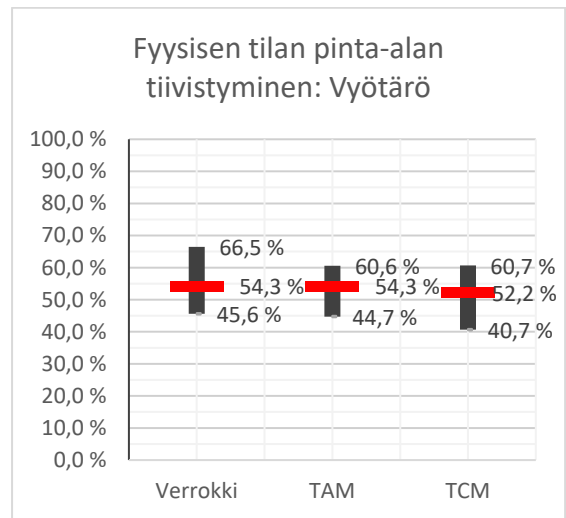
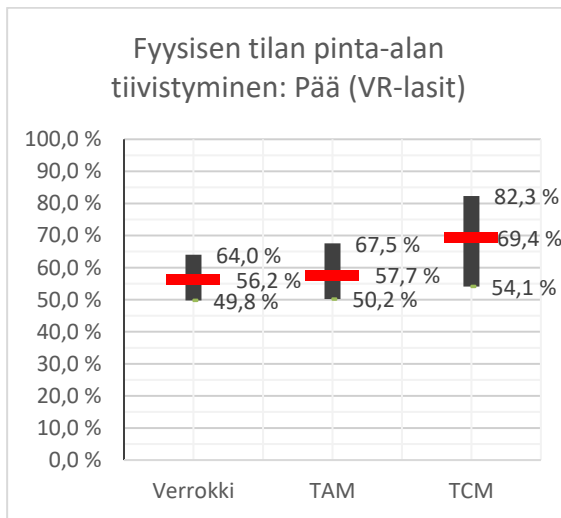


Kuva 23. Simulaatiopahoinvointikyselyn painotetut tulokset osa-alueittain

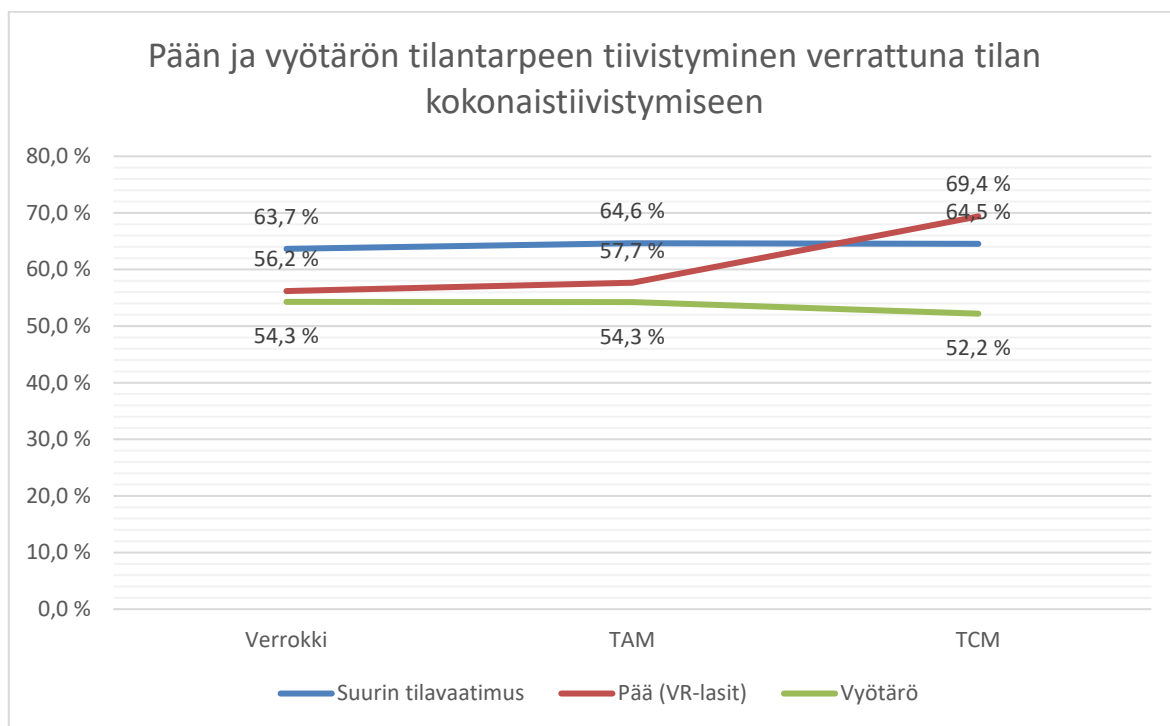
6.4 Tilantarpeen pienentyminen

Tilantarvetta tutkittiin mittaamalla käyttäjän liikkeitä kuudesta paikannuspisteestä. Jokaiselle testikerralle laskettiin pienimmän mahdollisen suorakaiteen muotoisen alueen pinta-ala virtuaalisessa maailmassa suhteessa fyysiseen maailmaan. Jokaisen koehenkilön samalla algoritmilla tehdyistä kahdesta testikerrasta laskettiin keskiarvo, ja algoritmin keskimääräinen tilan tiivistyminen saatiin, kun kaikkien käyttäjien saman algoritmin keskiarvoista laskettiin keskiarvo.

Seuraavan sivun kuvassa (Kuva 24) on paikannuspisteittäin jaettuna eri menetelmien tilan tiivistämistehokkuus. Kuvassa mustan palkin alin arvo kuvaa koehenkilöistä parasta tilannetta, eli suurinta tilan tiivistymistä, ja ylin arvo kuvaa huonointa tilannetta, eli pienintä tilan tiivistymistä. Punainen palkki merkitsee kaikkien käyttäjien keskiarvoa. Tiivistyminen ilmoitetaan käytetyn fyysisen tilan kokona suhteessa käytettyyn virtuaaliseen tilaan.



Kuva 24. Tilantarpeen tiivistyminen paikannuspistekohtaisesti



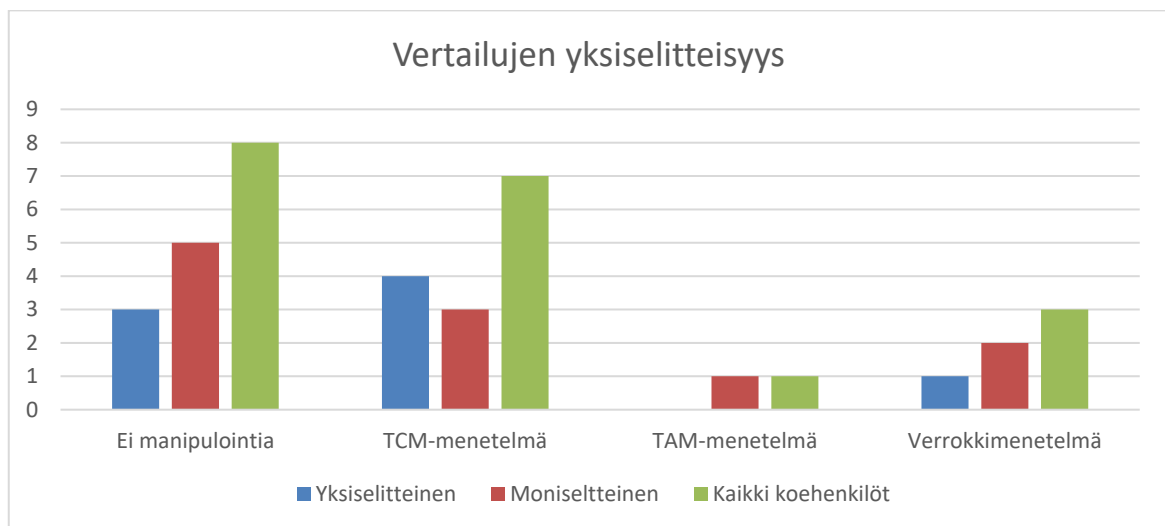
Kuva 25. Pään ja vyötärön tilantarpeen tiivistyminen verrattuna tilan kokonaistiivistymiseen

Manipulointimenetelmien tehokkuutta tutkittiin valitsemalla jokaisen käyttäjän kahden testikerran tilavaatimuksien keskiarvoista suurin ottaen huomioon kaikki paikannuspisteet. Kunkin menetelmän maksimitilavaatimus saatiin laskemalla keskiarvo valituista suurimmista tilavaatimuksista. Yllä olevassa kuvassa (Kuva 25) on manipulointimenetelmien aikaansaama pään liikkeiden tiivistyminen verrattuna vyötäröllä olevan Trackerin tilavaatimuksen tiivistymiseen ja suurimman tilavaatimuksen tiivistymiseen. Verrokkimenetelmä pystyi tiivistämään tilan 63,7 prosenttiin, TAM-menetelmä 64,6 prosenttiin ja TCM-menetelmä 64,5 prosenttiin. Kaikki algoritmit käyttivät samaa manipulointikerrointa 1,5, joten algoritmien tehokkuudessa ei odotetusti havaittu merkittävää eroa. Vyötäröllä olevasta paikannuspisteestä mitattuna tiivistyminen oli samoilla algoritmeilla vastaavasti 54,3 prosenttia, 54,3 prosenttia ja 52,2 prosenttia. Merkittävä ero havaittiin pään liikkeiden tiivistymisessä, jossa verrokkimenetelmä tiivisti pään liikkeet 56,2 prosenttiin ja TAM-menetelmä 57,7 prosenttiin, mutta TCM-menetelmällä tiivistymistä tapahtui merkittävästi vähemmän, pään liikkeiden tiivistyessä 69,4 prosenttiin.

6.5 Koehenkilöiden valintojen yksiselitteisyys

Koehenkilöt vertailivat manipulointimenetelmiä parivertailuilla, joiden tuloksista voimme muodostaa järjestetyn listan menetelmistä, sen perusteella mihin arvojärjestykseen koehenkilöt sijoittivat menetelmät. Tässä tutkimuksessa käytettiin neljää menetelmää, jokaista kaksi kertaa. Koehenkilöt eivät tienneet etukäteen kokeilevansa samoja menetelmiä uudelleen.

Valinnoista saatu lista on yksiselitteinen, mikäli kaikkiin vertailuihin pätee seuraava. Tapauksessa, jossa A on parempi kuin B ja B on parempi kuin C, niin A:n on oltava parempi kuin C. A, B ja C voivat olla mitkä tahansa menetelmistä. Kaikkiaan kahdeksan koehenkilöä muodosti yksiselitteisen järjestyksen parivertailun tuloksena ja yhdentoista koehenkilön lista menetelmistä oli moniselitteinen.



Kuva 26. Vertailujen yksiselitteisyys

Yllä olevassa kuvassa (Kuva 26) on esitetty jokaisen käyttäjän valitsema paras manipulointimenetelmä ja merkitty onko valinnan tehneen koehenkilön menetelmien järjestys ollut yksiselitteinen. Kahdeksan käyttäjää piti manipulointimatonta kävely parhaana ja seitsemän koehenkilöä piti TCM-menetelmää parhaana. Samat menetelmät ovat parhaita riippumatta tutkitaanko kaikkia koehenkilöitä, vaiko ainoastaan niitä koehenkilöitä, joiden menetelmät muodostavat yksiselitteisen järjestyksen.

7 Johtopäätökset ja pohdinta

Tässä luvussa esitellään tuloksien perusteella tehdyt johtopäätökset. Ensin tutkitaan soveltuvuustestissä tehtyjä havaintoja manipulointimenetelmistä. Tämän jälkeen analysoidaan koehenkilöiden halukkuutta manipuloidun kävelyn käyttöön sekä manipuloinnin tehokkuutta. Seuraavaksi tutkitaan VR-pahoinvointia kerätyn aineiston pohjalta. Viimeisessä alaluvussa pohditaan, mitä tutkimuksesta on opittu.

7.1 Kotikäytössä toimivat liikkumisen manipulointimenetelmät

Tutkimuksessa haluttiin selvittää, mitkä tieteellisesti tutkitut kävelyn manipulointimenetelmät toimisivat VR-peleissä. Ensimmäinen tutkimuskysymys oli: *”Mitkä kävelyn manipulointimenetelmät toimivat liikkumismenetelmänä VR-peleissä kotikäytössä ja mitkä ovat niiden rajoitteet?”*. Tähän kysymykseen pyrittiin vastaamaan luvussa 4 esitellyssä soveltuvuustestissä, jossa testattiin tutkijan itsensä kotikäytössä kokeilemana useita erilaisia manipuloidun kävelyn algoritmeja.

Seven League Boots -menetelmässä (Interrante ym., 2007) oli tilan koosta johtuvia rajoituksia, eikä sitä voitu kotikäytössä kokeilla muuten kuin toiminnallisuudeltaan karsittuna versiona. Menetelmällä oli kuitenkin tärkeä rooli TAM- ja TCM-menetelmien kehityksessä. Alkuperäinen uudelleensuunnatun kävelyn algoritmi (Razzaque ym., 2001) havaittiin kotikäyttöön toimivaksi menetelmäksi, sen toimiessa myös kaikista pienimmässä testatussa tilassa. Keskikokoisessa tilassa voitiin testata kaarevan polun -manipulointimenetelmää (Langbehn ym., 2017) hieman alkuperäisestä pienennettynä, ja suuressa tilassa sitä pystyttiin testaamaan oikeassa mittakaavassa.

Geneerisistä algoritmeista kokeiltiin reaktiivisesti toimivaa Steer-to-Center -algoritmia (Razzaque, 2005), jonka havaittiin vaativan liikaa fyysistä tilaa kotikäyttöön. Soveltuvuustestin perusteella voidaankin todeta, että reaktiivisesti toimivien geneeristen manipulointialgoritmien soveltuvuus kotikäyttöön on heikko. Fyysistä tilaa on käytettävissä vain muutamia neliömetrejä, jolloin reaktiiviset algoritmit eivät ehdi reagoida käyttäjän liikkeisiin.

Tavoitteena oli testata alkuperäisen Steer-to-Center -algoritmin lisäksi muita siitä jatkokehittyjä algoritmeja, mutta alkuperäisen algoritmin huono toimivuus esti laajemmat tutkimukset.

Ennakoivat algoritmit osoittautuivat toimivan hyvin, mutta niiden käyttö edellyttää pelaajan liikkumisreittien tietämistä etukäteen. Pelisuunnittelun avulla voidaan rakentaa peliin karttoja, jotka hyödyntävät ennakoivia menetelmiä, mutta kartat pitää rakentaa käytettyjen menetelmien ehdoilla. Tästä hyvänä esimerkkinä on Langbehnin ym. (2017) kaarevan polun menetelmä ja sen käyttöön ehdotetut kaarevat käytävät avaruusteemaiseen peliin. Ainoa testattu menetelmä, jolla päättymätön kävely olisi ollut mahdollista toteuttaa kotikäytössä, olisi ollut kaarevan polun menetelmä, jonka vaatimuksena olisi ollut 4 x 4 metrin kokoinen fyysinen tila ja algoritmin ehdoilla rakennettu kartta.

Yksinkertaisia kertoimien avulla tehtyjä manipulointeja voidaan hyödyntää kotikäytössä monimutkaisia menetelmiä helpommin, mutta niistä saatava hyöty tilansäästön suhteen on pienempi. Niiden avulla ei ole mahdollista myöskään toteuttaa päättymätöntä kävelyä kotikäytössä. Manipulaatiokertoimilla voi kuitenkin tehostaa muiden menetelmien toimintaa. Manipulaatiokertoimien avulla on myös mahdollista saada aikaan tuntemuksia liikkumisen muutoksista, kuten esimerkiksi noususta, laskusta tai tavallista pidemmästä käytävästä.

Parhaat käyttötavat manipuloidulle kävelyllä soveltuvuustestin perusteella ovat pelien karttojen suunnitteleminen käytössä olevan manipulointialgoritmin ehdoilla sekä pienet ja huomaamattomat kartan koon kasvatuksella käyttäen yksinkertaisia manipulaatiokertoimia. Mikään yksittäinen geneerinen algoritmi ei toimi riittävän hyvin kaikissa tilanteissa pienessä fyysisessä tilassa.

7.2 Koehenkilöiden halukkuus manipuloidun kävelyn käytölle VR-peleissä

Toinen tutkimuskysymys oli: *”Ovatko manipuloitua kävelyä kokeilleet pelaajat halukkaita käyttämään sitä VR-peleissä?”*. Koehenkilöiltä kysyttiin paperisessa kyselyssä heidän mielipidettään manipuloidun kävelyn käyttöön kahdessa eri käyttötarkoituksessa, jotka olivat

manipuloinnin käyttö tavoitteena pystyä käyttämään fyysistä tilaa suurempia virtuaalisia tiloja sekä manipuloinnin käyttö fyysisen tilantarpeen pienentäminen. Ennen käyttäjätestiä ei ollut varmaa kokevatko koehenkilöt manipuloitun kävelyn käyttötarkoitukset kahtena erillisenä tapana käyttää samaa menetelmää. Vastauksissa oli havaittavissa hajontaa, jonka perusteella voidaan todeta koehenkilöiden ymmärtäneen käyttötarkoitukset erillisinä tapoina. Viisi koehenkilöä (26,3 %) oli antanut eri vastauksen edellä mainittuihin kahteen kysymykseen ja 14 koehenkilöä (73,7 %) antoi saman vastauksen molempiin kysymyksiin. Kumpikin käyttötapa sai selvästi positiivisen vastaanoton kyselyn perusteella. Kyselyn tuloksista voidaan tehdä johtopäätös, että manipuloitun kävelyn käyttöön on kiinnostusta ja käyttöä kannattaa tutkia molempiin käyttötarkoituksiin.

Kolmas tutkimuskysymys oli: *”Pitävätkö pelaajat luonnollista kävelyä manipuloitua kävelyä parempana liikkumismenetelmänä kokeiltuaan molempia?”*. Vastausta tähän kysymykseen tutkittiin käyttäjätestin avulla. Käyttäjätestin sisäisten vertailujen tuloksena jokaiselle koehenkilölle syntyi järjestetty lista neljästä testatusta algoritmista. Yhdeksästätoista koehenkilöstä kaikkiaan kahdeksan (42,1 %) piti manipuloimatonta kävelyä parhaana ja seitsemän (36,9 %) piti TCM-menetelmää parhaana. Neljä koehenkilöä piti parhaana joko TAM-menetelmää tai verrokkimenetelmää. Käyttäjätesti oli kestoaltaan hyvin lyhyt ja menetelmiä oli hankala erottaa toisistaan, mikä aiheutti paljon vastauksia, jotka eivät olleet yksikäsitteisiä. Järjestetyistä listoista on kuitenkin selkeästi havaittavissa kaksi suuntausta. Yli kolmannes koehenkilöistä kannatti manipuloimatonta kävelyä ja vastaavasti yli kolmannes kannatti manipuloitua kävelyä. Käyttäjätestin perusteella manipuloitu kävely ja manipuloimaton kävely olivat lähes yhtä suosittuja. Vastaukset osoittavat, ettei manipuloitu kävely ole kaikkien koehenkilöiden mielestä paras vaihtoehto, ja ainakin tässä muodossaan toteutettuna sen käytön tulisi olla valinnaista.

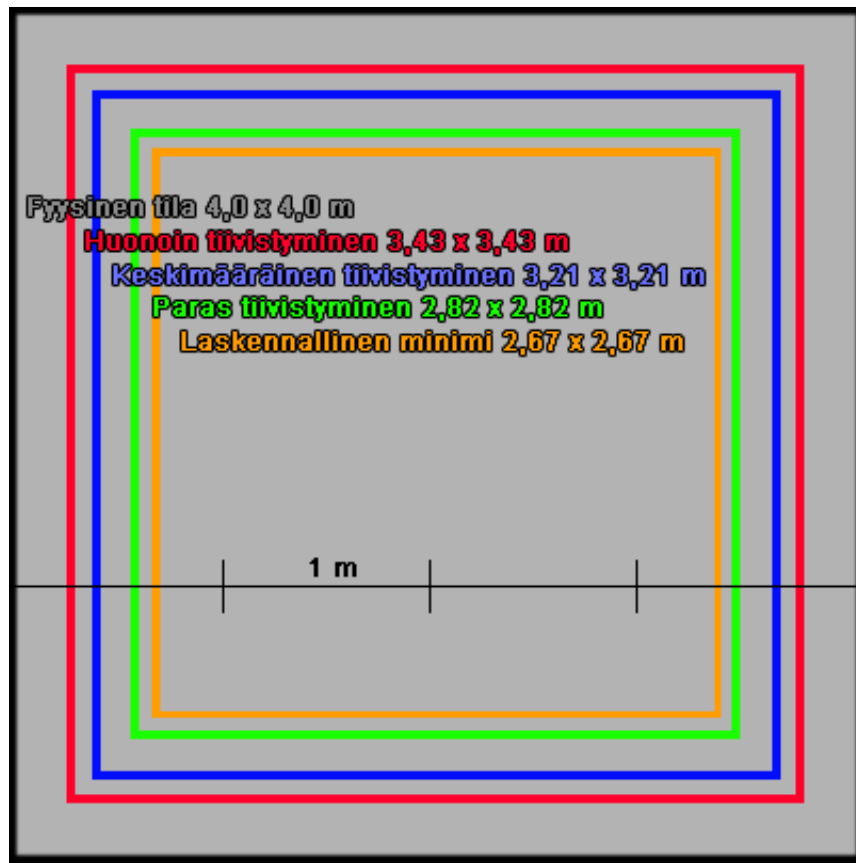
7.3 Tilansäästö käytettäessä manipuloitua kävelyä

Neljäs tutkimuskysymys oli: *”Kuinka paljon fyysisen tilan kokoa voidaan pienentää VR-peleissä manipuloitun kävelyn avulla?”*. Tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon fyysistä tilaa voidaan pienentää manipuloitun kävelyn avulla ja onko saatu hyöty huomattava.

Tuloksien perusteella testatut manipuloidun kävelyn menetelmät ovat yhtä tehokkaita tilan tiivistämisessä, mikä oli odotettu tulos menetelmien ollessa saman algoritmin erilaisia toteutuksia. Kaikki menetelmät käyttivät myös samaa manipulointikerrointa, joka oli 1,5. Kaikista testikerroista laskettu suurimman tilavaatimuksen keskiarvo oli kaikilla menetelmillä välillä 63,7–64,6 prosenttia fyysisestä pinta-alasta. Kaikkien testikertojen suurimman tilavaatimuksen keskiarvo kaikki menetelmät huomioon ottaen oli 64,3 prosenttia. Tämä tarkoittaa kolmanneksen säästöä fyysisen tilan pinta-alassa.

Yksittäisten koehenkilöiden testikertoja vertailtaessa voidaan havaita suuriakin eroja. Algoritmit ovat tilan tiivistämisessä yhtä hyviä, kun otetaan huomioon kaikista testikerroista lasketut keskiarvot. Käytetty fyysinen tila oli neliön muotoinen ja sivun pituus oli 4,0 metriä. Manipulointimenetelmiä käytettäessä tarvittavan neliön muotoisen fyysisen tilan sivun pituus pieneni 3,21 metriin suurimman tilantarpeen mukaan laskettuna. 4 x 4 metrin kokoinen fyysinen tila on luvun 2.7.2 mukaan käytössä vain 0,3 prosentissa kaikista istunnoista. Tilantarpeen pienentäminen 3,21 metriin per sivu osoittaa saman luvun perusteella yhden prosentin istunnoista käyttäneen siihen riittävän isoa tilaa. Keskimääräisellä tilan tiivistymisellä mahdollisten istuntojen määrä kolminkertaistui.

Valittaessa tavoitteeksi 4 x 4 metrin kokoisen fyysisen tilan tiivistäminen manipulointimenetelmän avulla 3 x 3 metrin kokoiseksi fyysiseksi tilaksi, tarvitsisi tilan tiivistymisen onnistua 56,25 prosenttiin pinta-alasta. Lasketun keskimääräisen suurimman tilantarpeen perusteella tämä ei toteudu. Mikäli tutkitaan koehenkilöiden tuloksia menetelmäkohtaisesti, niin havaitaan yhden koehenkilön alittaneen 56,25 prosentin rajan verrokkimenetelmällä, toisen koehenkilön alittaneen sen TAM-menetelmällä ja kaikkiaan neljä koehenkilöä alittivat sen TCM-menetelmällä. Tulokset osoittavatkin, että parhaassa tapauksessa manipulointin suhteen kokematonkin käyttäjä pystyy pienentämään tilantarpeen 4 x 4 metristä 3 x 3 metriin tai sitä pienemmäksi. 3 x 3 metrin kokoista tilaa oli käytetty luvun 2.7.2 perusteella viidessä prosentissa istuntoja, kun 4 x 4 metrin kokoista tilaa oli käytetty ainoastaan 0,3 prosentissa istunnoista. Lähdemateriaali käytettyjen tilakokojen suhteen on varsin epätarkka, mutta siitä on nähtävissä, että fyysisen tilan sivun pituuden pienentämien yhdellä metrillä kasvattaa mahdollisen istuntojen määrän yli kymmenkertaiseksi.



Kuva 27. Tilan tiivistymisen onnistuminen

Käyttäjäkohtaiset erot tilan tiivistymisessä olivat hyvin suuria. Kaikki koehenkilöt ja kaikki menetelmät huomioon ottaen paras tulos tilan tiivistymisessä oli 49,6 % (2,82 x 2,82 m) ja huonoin tulos oli 73,6 % (3,43 x 3,43 m). Paras tulos oli saavutettu TCM-menetelmällä ja huonoin tulos TAM-menetelmällä. Kooste tilan tiivistymisen onnistumisesta on yllä olevassa kuvassa (Kuva 27), jossa fyysinen tila on merkattu mustalla, huonoin yksittäisen koehenkilön tulos punaisella, kaikkien koehenkilöiden ja menetelmien keskiarvo sinisellä, paras yksittäisen koehenkilön tulos vihreällä ja laskennallinen fyysisen tilan minimi oranssilla.

Laskennalliseen fyysisen tilan minimikokoon olisi mahdollista päästä, mikäli manipulointikerrointa käyttäen liikuttaisiin suoraan fyysisen tilan yhdeltä reunalta vastakkaiselle reunalle. Laskennallinen fyysisen tilan minimikoko saadaan manipulointikerrointa 1,5 käytettäessä laskemalla sivun mitta seuraavalla kaavalla:

$$\frac{4,0 \text{ m}}{1,5} = 2,67 \text{ m}$$

Tutkimuksessa havaittiin, että toista vyötäröllä sijaitsevaa paikannuspistettä manipulointiin käyttävä TCM-menetelmä aiheuttaa selvästi muita menetelmiä vähemmän pään liikkeiden tiivistymistä. Tulos vastaa odotuksia. TCM-menetelmä on testatuista menetelmistä ainoa, joka ei manipuloi pään liikkeitä. Jokainen testatuista menetelmistä mahdollisesti ainakin yhdellä käyttäjällä tilan tarpeen pienentämisen 3 x 3 metriin tai sen alle, mutta TCM-menetelmän avulla neljä koehenkilöä yhdeksästätoista pystyi siihen. TCM-menetelmä osoitti olevansa huonoimmassa tilanteessa yhtä hyvä muihin menetelmiin nähden ja antoi paremmat tulokset useammalla koehenkilöllä parhaassa tilanteessa. TCM-menetelmä suunniteltiin miellyttävämmäksi käyttää verrattuna verrokkimenetelmään ja TAM-menetelmään. Tavoitteena ei ollut parempi tilan tiivistyminen. Tuloksien perusteella toisen paikannuspisteen käyttöä kävelyn manipuloinnin toteuttamiseen kannattaa tutkia lisää. Myös manipulointimenetelmään tottuminen ja sen käytön harjoittelu nousevat esille tutkimusaiheina. Pysyisivätkö koehenkilöt parempaan tilansäästöön harjoittelemalla manipulointialgoritmien käyttöä?

7.4 VR-pahoinvointi

SSQ-testi (Kennedy ym., 1993) suoritettiin jokaiselle koehenkilölle hänen suoritettuaan kaikki testikerrat. Kaikki koehenkilöt kokeilivat samoja menetelmiä, eli testissä ei ollut kontrolliryhmää. VR-pahoinvointi mitattiin ainoastaan kerran testin lopuksi, joten VR-pahoinvoinnin suuruutta eri menetelmillä ei voi erotella toisistaan. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä koko testin aiheuttamien oireiden olleen erittäin lieviä. Oireita kuvattiin asteikolla 0–3, yksittäisten oireiden keskiarvojen ollessa vaihteluvälillä 0,00–0,42. Yksikään koehenkilöistä ei vastannut kokeneensa oireita *vertigo* tai *vatsassa pyörii*. Ainoa arvoa 1 suurempi VR-pahoinvoinnin arvo oli yksittäinen arvo 2 oireeseen *pää tuntuu ”täydeltä”*, johon vastattuaan koehenkilö raportoi suullisesti hänellä olleen päänsärkyä koko päivän ennen käyttäjätestiä. Seuraavana päivänä sama koehenkilö raportoi hänellä koko päivän olleen päänsäryn lakanneen VR-käyttäjätestin jälkeen. Tämä on kuitenkin vain yksittäistapaus, josta ei voi tehdä mitään johtopäätöksiä.

VR-pahoinvoinnin mittauksen toteuttamistavassa jäi parannettavaa. Jatkossa voisi olla hyödyllistä siirtyä käyttämään SSQ-testiä sekä ennen että jälkeen VR-testauksen. Eri

menetelmien välisestä VR-pahoinvoinnista olisi myös hyvä saada tuloksia. Käyttäjättestissä monet koehenkilöistä raportoivat suullisesti eri menetelmien vaikutuksista testin aikana, mutta paperisen kyselyn muoto ei mahdollistanut VR-pahoinvoinnin osoittamista millekään tietylle menetelmälle.

7.5 Pohdinta

Soveltuvuustestissä testattiin erilaisia kävelyn manipulointimenetelmiä, joista vain muutama toimi riittävän hyvin pienessä tilassa. Geneeriset reaktiiviset manipulointimenetelmät eivät toimineet tarpeeksi hyvin pienessä tilassa, jotta niitä voisi käyttää kotikäytössä. Ennakoivat manipulointialgoritmit olivat käyttökelpoisia, kuten alkuperäinen uudelleensuunnatun kävelyn menetelmä (Razzaque ym., 2001) ja kaarevan polun -menetelmä (Langbehn ym., 2017). Nämä menetelmät vaativat pelin kartan rakentamisen käytetyn menetelmän ehdoilla, mikä tekee niistä työläitä toteuttaa. Jatkotutkimusaiheeksi nousee ennakoivien menetelmien hyödyntäminen kotikäytössä. Tutkimuksessa ei löytynyt yhtä yksittäistä menetelmää, joka toimisi riittävän hyvin kotikäytössä. Parhaimmaksi vaihtoehdoksi jää useiden manipulointimenetelmien käyttö pelin eri kartoilla tai niiden yhteiskäyttö. Usean manipulointimenetelmän yhteiskäyttöön ei kuitenkaan ole valmiita ratkaisuja. Yhteiskäyttöä voisi olla esimerkiksi Langbehnin (2017) kaarevan polun menetelmä huoneiden välillä liikkumiseen rakennuksen käytävällä, josta huoneen ovelle tultaessa vaihdettaisiin manipulointimenetelmäksi translaatiomanipulaatio – esimerkiksi TCM-menetelmä. Translaatiomanipulaation avulla pelissä voisi olla fyysistä tilaa suurempi virtuaalinen huone. Kaarevan polun menetelmä tulisi käyttöön käyttäjän palatessa ovelle ja siitä takaisin käytävään.

Koehenkilöt osoittivat kiinnostuneisuutta manipuloidun kävelyn käyttöön VR-peleissä ja sen käyttämisestä sekä fyysisen tilantarpeen pienentämiseen että virtuaalisen tilan laajentamiseen. Käyttäjättestissä testattu tilantarpeen pienentäminen manipuloitua kävelyä käyttäen osoittautui havaintojen perusteella toimivaksi menetelmäksi, tilantarpeen pienentyessä keskimäärin noin kolmanneksella pinta-alasta. TCM-menetelmällä useat käyttäjät pääsivät alle 50 % tilantarpeeseen. Manipulointikerroin käyttäjättestissä oli varsin maltillinen 1,5. Sopivaa manipulointikertoimen suuruutta olisi hyvä tutkia lisää, samoin kuin käyttäjien tottumista manipulointiin.

VR-pahoinvointi ei muodostunut ongelmaksi manipuloitua kävelyä käytettäessä. Aihe kuitenkin vaatii tarkempaa tutkimusta, erityisesti TCM-menetelmän osalta. Soveltuvuustestissä TCM-menetelmän havaittiin tuntuvan miellyttävämmälle ja käyttäjätesti osoitti sen olevan vähintään yhtä hyvä kuin muut testatut menetelmät ja parhaimmassa tapauksessa tehokkaampi.

TCM-menetelmä osoittautui hyvin toimivaksi menetelmäksi, sen ollessa toiminnaltaan vähintään yhtä hyvä kuin muut menetelmät ja tarjoten niihin nähden käytettävyyседun. Toisen paikannuspisteen käyttö manipuloinnissa avaa mahdollisuuden uusille monimutkaisemmille manipulointimenetelmille. TCM-menetelmää pystyisi parantamaan rakentamalla manipulointialgoritmin, joka käyttää painotetusti sekä Trackerin että VR-lasien sijaintia manipulointiin. Trackereitä voi käyttää manipuloinnissa TCM-menetelmän käyttämää vyötärölle kiinnitettävää Trackeriä laajemminkin. Jalkoihin kiinnitetyistä Trackereistä saa selville käyttäjän jalkojen asennon, jota voi käyttää käyttäjän liikesuunnan ennustamiseen käyttäjän liikkuessa. TCM-menetelmällä olisi myös mahdollista korvata muissa manipulointimenetelmissä käytössä oleva kiinteäkertoiminen translaatiovahvistus.

8 Yhteenveto

Tässä pro gradu -tutkielmassa tutkittiin mahdollisuuksia pienentää virtuaalitodellisuuspelien tilavaatimuksia käyttämällä manipuloitua kävelyä liikkumiseen. Suuret virtuaaliympäristöt vaativat paljon fyysistä tilaa huonemittakaavan virtuaalitodellisuutta käytettäessä. Kotikäytössä tilaa ei kuitenkaan ole tarpeeksi. Tutkimuksen motivaatio syntyi tutkijan omista kokemuksista. Monia erilaisia kävelyn manipulointimenetelmiä on käytetty tieteellisessä tutkimuksessa kotikäyttöä suuremmissa tiloissa. Tässä tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää, voiko tieteellisesti tutkittuja menetelmiä hyödyntää kotikäytössä.

Tutkimuksessa selvitettiin tutkijan toimesta mitkä kävelyn manipulointimenetelmistä toimivat kotikäytössä ja mitkä olivat niiden rajoitteet. Geneerisiä menetelmiä ei saatu toimimaan kotikäytössä, joten tutkittiin tarkemmin, mistä toimimattomuus johtui. Menetelmät jaettiin toimintamallin mukaan reaktiivisiin ja ennakoiviin (Azmandian ym., 2016b), jolloin voitiin havaita ongelman olevan reaktiivisissa algoritmeissa. Reaktiiviset algoritmit reagoivat käyttäjän toimintaan, minkä takia ne vaativat tilaa ja aikaa mukautua käyttäjän liikkeisiin. Kotikäytössä ei ole tarpeeksi tilaa ja aikaa reagointiin on liian vähän. Ennakoivat algoritmit toimivat kotikäytössä, kuten alkuperäinen uudelleensuunnatun kävelyn algoritmi (Razzaque ym., 2001) ja taipumisvahvistukseen perustuva kaarevan polun menetelmä (Langbehn ym., 2017). Ennakoivat algoritmit ovat tällä hetkellä paras valinta kotikäyttöön, mutta ennustavien algoritmien käyttö vaatii pelin kenttien rakentamisen manipulointimenetelmän ehdoilla.

Tutkimuksessa haluttiin tietää, haluavatko VR-pelaajat käyttää manipuloitua kävelyä ja kokevatko he sen luonnollista kävelyä parempana liikkumismenetelmänä VR-pelissä. Tämän kysymyksen selvittämiseksi järjestettiin käyttäjätesti. Koehenkilöt vertailivat eri menetelmiä toisiinsa käyttäen testipelin sisäisesti toteutettua parivertailua (Thurstone, 1927). Parivertailujen avulla saatiin muodostettua järjestetyt listat halukkuudesta eri manipulointimenetelmien käyttöön VR-peleissä. Käyttäjät osoittivat halukkuutensa manipuloidun kävelyn käyttöön sekä paperikyselyn vastauksien perusteella että innokkuudella osallistua käyttäjätestiin. Parivertailujen tuloksien perusteella 58 prosenttia koehenkilöistä piti jotakin kolmesta testatusta manipulointimenetelmästä parhaimpana menetelmänä, 42 prosentin koehenkilöistä suosiossa luonnollista kävelyä. Tulokset osoittavat selvästi manipuloidun kävelyn tarpeen

VR-peleissä. Tulokset tuovat myös esille, etteivät kaikki käyttäjät pidä manipuloidusta kävelyästä. VR-pahoinvoinnin suuruutta tutkittiin erillisen kyselyn (Kennedy ym., 1993) avulla, eikä manipuloidun kävelyn havaittu aiheuttavan merkittävää määrää VR-pahoinvointia. VR-pahoinvoinnin ja manipuloidun kävelyn välistä suhdetta tarvitsee kuitenkin tutkia lisää.

Tilansäästö manipuloitua kävelyä käytettäessä oli huomattava. Keskimääräinen tilavaatimus fyysiselle tilalle kaikki menetelmät huomioon ottaen oli 64,3 % virtuaalisesta tilasta, käytettäessä varsin pientä 1,5:n manipulointikerrointa. Valitun manipulointikertoimen laskennallinen paras tilan tiivistyminen on 44,4 % fyysisen tilan pinta-alasta. Paras koehenkilön tulos TCM-menetelmällä – joka oli kahden testikerran keskiarvo – antoi tilan tiivistymiselle tuloksen 49,6 %. Ero oli laskennalliseen parhaaseen tulokseen ainoastaan 15 cm, kun käytössä oli 4 x 4 metrin kokoinen fyysinen tila. Keskiarvotulosta voidaan parantaa harjoittelemalla manipulointimenetelmän käyttöä ja parempia yksittäisiä tuloksia voidaan saada ainoastaan suurentamalla manipulointikerrointa.

Tutkimuksen aikana kehitettiin kaksi HTC Vive Tracker -paikanninta käyttävää manipulointimenetelmää: Tracker Assisted Manipulation (TAM) ja siitä jatkokehitetty Tracker Centric Manipulation (TCM). Menetelmien esikuvana oli translaatiovahvistusta käyttävä Seven League Boots -menetelmä (Interrante ym., 2007). Käyttäjätutkimuksessa koehenkilöt vertailivat TAM- ja TCM-menetelmiä verrokkimenetelmänä olleeseen yksinkertaiseen translaatiovahvistukseen ja luonnolliseen kävelyyn. Käytetyt manipulointimenetelmät olivat kiinteäkertoimisia ja toiminnaltaan hyvin yksinkertaisia, joten niitä ei voida luokitella reaktiivisiin eikä ennakoiviin menetelmiin.

Tutkituilla menetelmillä pystyttiin pienentämään huonemittakaavan virtuaalitodellisuuden tilavaatimuksia, riippumatta käytetystä pienestä fyysisestä tilasta. Tutkitut menetelmät osoittavat manipuloidun kävelyn menetelmien soveltuvan kotikäyttöön suunniteltuihin VR-peleihin. Koehenkilöiden havaittiin olevan halukkaita manipuloidun kävelyn käyttöön. Manipulointi ei myöskään aiheuttanut merkittävää VR-pahoinvointia. Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan suositella manipuloitua kävelyä käytettäväksi VR-peleissä. Työn ohjaajat ovat suositelleet julkaisemaan esitetyt tulokset kansainväliselle tiedeyhteisölle englanninkielisenä artikkelina.

Lähteet

- Azmandian, M., Grechkin, T., Bolas, M. & Suma, E. (2016a). Automated path prediction for redirected walking using navigation meshes. *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Greenville, SC, USA. (s. 63-66). IEEE. doi:10.1109/3DUI.2016.7460032
- Azmandian, M., Grechkin, T., Bolas, M. & Suma, E. (2016b). The redirected walking toolkit: A unified development platform for exploring large virtual environments. *2016 IEEE 2nd Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR)*, Greenville, SC, USA. (s. 9-14). IEEE. doi:10.1109/WEVR.2016.7859537
- Azmandian, M., Yahata, R., Bolas, M. & Suma, E. (2014). An enhanced steering algorithm for redirected walking in virtual environments. *2014 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, Minneapolis, MN, USA. (s. 65-66). IEEE. doi:10.1109/VR.2014.6802053
- Bruder, G., Steinicke, F. & Wieland, P. (2011). Self-motion illusions in immersive virtual reality environments. *2011 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, Singapore, Singapore. (s. 39-46). IEEE. doi:10.1109/VR.2011.5759434
- Delaney, B. (2014). *Sex, drugs and tessellation: The truth about virtual reality, as revealed in the pages of CyberEdge journal*. CyberEdge Information Services.
- Frissen, I., Campos, J. L., Sreenivasa, M. & Ernst, M. O. (2013). Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments: An overview of the CyberWalk project. Teoksessa F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos & A. Lécuyer (toim.), *Human walking in virtual environments* (s. 113-144) Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8432-6_6
- Fülöp, J., Koczkodaj, W. & Szarek, S. J. (2010). A different perspective on a scale for pairwise comparisons. Teoksessa N. T. Nguyen & R. Kowalczyk (toim.), *Transactions on Computational Collective Intelligence I*. (s. 71-84). Springer. doi:10.1007/978-3-642-15034-0_5
- Grechkin, T., Thomas, J., Azmandian, M., Bolas, M. & Suma, E. (2016). Revisiting detection thresholds for redirected walking: Combining translation and curvature gains. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, Anaheim, CA, USA. (s. 113-120). ACM. doi:10.1145/2931002.2931018
- Hodgson, E. & Bachmann, E. (2013). Comparing four approaches to generalized redirected walking: Simulation and live user data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(4), s. 634-643. doi:10.1109/TVCG.2013.28

- Interrante, V., Ries, B. & Anderson, L. (2007). Seven league boots: A new metaphor for augmented locomotion through moderately large scale immersive virtual environments. *3D User Interfaces, 2007. 3DUI'07. IEEE Symposium on*, Charlotte, NC, USA. (s. 167-170). IEEE. doi:10.1109/3DUI.2007.340791
- Iwata, H. (2013). Locomotion interfaces. Teoksessa F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos & A. Lécuyer (toim.), *Human walking in virtual environments* (s. 199-219) Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8432-6_9
- Jerald, J. (2015). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool. doi:10.1145/2792790
- Jerald, J., Peck, T., Steinicke, F. & Whitton, M. (2008). Sensitivity to scene motion for phases of head yaws. *Proceedings of the 5th symposium on Applied perception in graphics and visualization*, Los Angeles, CA, USA. (s. 155-162). ACM. doi:10.1145/1394281.1394310
- Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S. & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), s. 203-220. doi:10.1207/s15327108ijap0303_3
- Langbehn, E., Lubos, P., Bruder, G. & Steinicke, F. (2017). Bending the curve: Sensitivity to bending of curved paths and application in room-scale vr. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(4), s. 1389-1398. doi:10.1109/TVCG.2017.2657220
- Matsumoto, K., Narumi, T., Tanikawa, T. & Hirose, M. (2017). Walking uphill and downhill: Redirected walking in the vertical direction. *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, Vancouver, Canada. (artikkeli 37). ACM. doi:10.1145/3102163.3102227
- Milgram, P. & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77(12), s. 1321-1329.
- Multon, F. & Olivier, A. (2013). Biomechanics of walking in real world: Naturalness we wish to reach in virtual reality. Teoksessa F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos & A. Lécuyer (toim.), *Human walking in virtual environments* (s. 55-77) Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8432-6_3
- Nescher, T., Huang, Y. & Kunz, A. (2014). Planning redirection techniques for optimal free walking experience using model predictive control. *2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, Minneapolis, MN, USA. (s. 111-118). IEEE. doi:10.1109/3DUI.2014.6798851

- Nilsson, N. C., Peck, T., Bruder, G., Hodgson, E., Serafin, S., Whitton, M., . . . Rosenberg, E. S. (2018). 15 years of research on redirected walking in immersive virtual environments. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 38(2), s. 44-56. doi:10.1109/MCG.2018.111125628
- Oculus. (2018). Hardware report: Rift. Saatavilla: <https://developer.oculus.com/hardware-report/pc/>. Haettu: 5.11.2018.
- Okabe, M. & Ito, K. (2002). Color universal design (CUD): How to make figures and presentations that are friendly to colorblind people. Saatavilla: <http://jfly.iam.u-tokyo.ac.jp/color/>. Haettu: 4.11.2018.
- Razzaque, S. (2005). *Redirected walking*. (väitöskirja, University of North Carolina at Chapel Hill).
- Razzaque, S., Kohn, Z. & Whitton, M. C. (2001). Redirected walking. *Proceedings of EUROGRAPHICS*, Manchester, UK. (s. 105-106). Citeseer.
- Ruddle, R. A. & Lessels, S. (2009). The benefits of using a walking interface to navigate virtual environments. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 16(1), artikkeli 5. doi:10.1145/1502800.1502805
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), s. 234-281. doi:10.1016/0022-2496(77)90033-5
- Steinicke, F. (2016). *Being really virtual: Immersive natives and the future of virtual reality*. Springer. doi:10.1007/978-3-319-43078-2
- Steinicke, F., Bruder, G., Hinrichs, K., Jerald, J., Frenz, H. & Lappe, M. (2009). Real walking through virtual environments by redirection techniques. *JVRB-Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 6(2) doi:10.20385/1860-2037/6.2009.2
- Steinicke, F., Bruder, G., Jerald, J., Frenz, H. & Lappe, M. (2010). Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(1), s. 17-27. doi:10.1109/TVCG.2009.62
- Steinicke, F., Bruder, G., Ropinski, T. & Hinrichs, K. (2008). Moving towards generally applicable redirected walking. *Proceedings of the Virtual Reality International Conference (VRIC)*, Laval, France. (s. 15-24). IEEE Press.
- Suma, E. A., Bruder, G., Steinicke, F., Krum, D. M. & Bolas, M. (2012). A taxonomy for deploying redirection techniques in immersive virtual environments. *Virtual Reality Short Papers and Posters (VRW), 2012 IEEE*, Costa Mesa, CA, USA. (s. 43-46). IEEE. doi:10.1109/VR.2012.6180877

- Suma, E., Finkelstein, S., Reid, M., Babu, S., Ulinski, A. & Hodges, L. F. (2010). Evaluation of the cognitive effects of travel technique in complex real and virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(4), s. 690-702. doi:10.1109/TVCG.2009.93
- Thurstone, L. L. (1927). A law of comparative judgment. *Psychological Review*, 34(4), s. 273.
- Usoh, M., Arthur, K., Whitton, M., Bastos, R., Steed, A., Slater, M. & Brooks, J., Frederick. (1999). Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments. *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Los Angeles, CA, USA. (s. 359-364). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. doi:10.1145/311535.311589
- Valve. (2017). SteamVR play area size stats. Saatavilla: <https://steamcommunity.com/app/358720/discussions/0/350532536103514259/>. Haettu: 23.10.2018.
- Waller, D. & Hodgson, E. (2013). Sensory contributions to spatial knowledge of real and virtual environments. Teoksessa F. Steinicke, Y. Visell, J. Campos & A. Lécuyer (toim.), *Human walking in virtual environments* (s. 3-26) Springer. doi:10.1007/978-1-4419-8432-6_1
- Williams, B., Narasimham, G., McNamara, T., Carr, T., Rieser, J. & Bodenheimer, B. (2006). Updating orientation in large virtual environments using scaled translational gain. *Proceedings of the 3rd symposium on Applied perception in graphics and visualization*, Boston, MA, USA. (s. 21-28). ACM. doi:10.1145/1140491.1140495
- Zhang, R. & Kuhl, S. (2013a). Human sensitivity to dynamic rotation gains in head-mounted displays. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, Dublin, Ireland. (s. 71-74). ACM. doi:10.1145/2492494.2492514
- Zhang, R. & Kuhl, S. A. (2013b). Flexible and general redirected walking for head-mounted displays. *2013 IEEE Virtual Reality (VR)*, Orlando, FL, USA. (s. 127-128). IEEE. doi:10.1109/VR.2013.6549395
- Zhang, R., Li, B. & Kuhl, S. (2014). Human sensitivity to dynamic translational gains in head-mounted displays. *Proceedings of the 2nd ACM symposium on Spatial user interaction*, Honolulu, Hawaii, USA. (s. 62-65). ACM. doi:10.1145/2659766.2659783
- Zmuda, M. A., Wonser, J. L., Bachmann, E. R. & Hodgson, E. (2013). Optimizing constrained-environment redirected walking instructions using search techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(11), s. 1872-1884. doi:10.1109/TVCG.2013.88

Liitteet

A Testipelin ohjelmointiin ja käyttöön käytetyt sovellukset

Sovellus	Versio	Julkaisija
Unreal Engine 4	4.18 ja 4.19	Epic Games
SteamVR	Useita	Valve
OpenVR Advanced Settings	V2.5	Open Source (GNU GPL v3.0) https://github.com/matzman666/OpenVR-AdvancedSettings

B Testipelissä käytetty lisensoitu pelisisältö

Kaikki Unreal Marketplacessa myytävä pelisisältö on lisensoitu Marketplacen omalla lisenssillä²⁷, joka sallii mm. muutokset ja rajoittamattoman käytön, mukaan lukien kaupallisen käytön.

Pelisisältö	Kehittäjä	Sivusto ja sisällön lisenssi	Saatavilla
Storage House Set	Alexander Sychov	Unreal Marketplace	https://www.unrealengine.com/marketplace/storage-house-set
Animal Triangle	Artem Bayankin	Unreal Marketplace	https://www.unrealengine.com/marketplace/animal-triangle
Ultimate Game Music Collection	John Leonard French	Unreal Marketplace	https://www.unrealengine.com/marketplace/ultimate-game-music-collection
LE Extended Standard Library	Low Entry	Unreal Marketplace	https://www.unrealengine.com/marketplace/low-entry-extended-standard-library
LE File Manager	Low Entry	Unreal Marketplace	https://www.unrealengine.com/marketplace/low-entry-file-manager
Slippers	Mikl190	Blend Swap, Public Domain CC0 1.0	https://www.blendswap.com/blends/view/74014
Low Poly Rigged Horse Model for Video Games	MarkLaBarr	Blend Swap, Public Domain CC0 1.0	https://www.blendswap.com/blends/view/74846
Deer - Stag - Low Poly	Nodelete	Blend Swap, Public Domain CC0 1.0	https://www.blendswap.com/blends/view/62827
Wolf Low Poly (Rigged)	pomilecrown	Blend Swap, Public Domain CC0 1.0	https://www.blendswap.com/blends/view/84007
Pig Low Poly	rioprofano	Blend Swap, Public Domain CC0 1.0	https://www.blendswap.com/blends/view/86369
Speaker design based on the marantz LD50 model	simonrepp	Blend Swap, Public Domain CC0 1.0	https://www.blendswap.com/blends/view/73074

²⁷ Unreal marketplace frequently asked questions (FAQ). Lisätietoa: <https://www.unrealengine.com/en-US/marketplace-faq>.

C Kutsu käyttäjätestiin

Hei,

Opiskelen Jyväskylän yliopistossa pelit ja pelillisuus -maisteriohjelmassa. Teen tietotekniikan pro gradu -tutkimusta virtuaalitodellisuudessa (VR) liikkumisesta. Liikkuminen virtuaalitodellisuudessa kävellessä vaatii paljon fyysistä tilaa, jota monilla kotikäyttäjillä ei ole. Tutkimuksen tavoitteena on pienentää VR-pelien tilavaatimuksia kotikäytössä.

Etsin koehenkilöitä pelinomaiseen VR-käyttäjätettiin, jolla selvitetään liikkumismenetelmien eroja. Käyttäjätesti koostuu virtuaalitodellisuudessa tehtävästä testistä sekä ennen testiä ja testin jälkeen täytettävistä kyselyistä. Virtuaalitodellisuudessa suoritettavan testin kesto on noin 15 minuuttia, kokonaiskeston ollessa noin 30 minuuttia. Testaus suoritetaan omalla vastuulla ja testin voi keskeyttää halutessaan missä tahansa vaiheessa.

Kerätty aineisto käsitellään luottamuksellisesti. Koehenkilöiden vartalon liikkeet tallennetaan testin aikana. Kerättyä aineistoa käytetään lähtökohtaisesti vain tähän tutkimukseen. Voit myös vapaaehtoisesti antaa suostumuksesi käyttää kerättyä ja anonymisoitua aineistoa muissa tieteellisissä tutkimuksissa, joka myös omalta osaltaan edesauttaa VR-pelien kehitystä. Yksittäistä koehenkilöä ei voida aineistosta tunnistaa.

Koehenkilöiden tulee olla täysi-ikäisiä, ymmärtää suomen kieltä ja pystyä liikkumaan ilman avustusta. Näkökyvyn tulee olla hyvä tai silmälasilla / piilolinssillä korjattu. Huomioithan että kaikki silmälasit eivät mahdu VR-lasien (HTC Vive) sisään (lisätietoa sähköpostilla). Värisokeus ei ole este testin suorittamiselle. Aiempi kokemus virtuaalitodellisuudesta ei ole välttämätöntä.

Järjestän käyttäjätestin keskiviikkona 25.4. ja perjantaina 27.4. Jyväskylän yliopiston Mattilanniemen kampuksella. Testiaikoja on iltapäivällä ja illalla. Ota yhteyttä allekirjoittaneeseen, mikäli kiinnostuit ja haluat auttaa VR-pelitutkimuksessa.

Ystävällisin terveisin

Esa Hiiva

esa.i.hiiva@student.jyu.fi

D Vastuuvapauslomake

VR-KÄYTTÄJÄTESTI

Aika: 2.5.2018

Paikka: Agora, Mattilanniemi

Testin järjestäjä: Esa Hiiva

AINEISTON JATKOKÄYTTÖ

Kerätty aineisto sisältää tietoa paperisista kyselyistä ennen ja jälkeen VR-testauksen sekä VR-testauksen aikana kerättyä tietoa vartalonliikkeistä. Kaikki jatkokäyttöön annettava tieto tulee olemaan anonymisoitua, eikä yksittäistä koehenkilöä voida aineistosta tunnistaa.

Tämä pro gradu -tutkimus pystyy käsittelemään vain murto-osan kaikesta liikkeistä kerätystä aineistosta, josta saattaisi olla hyötyä muun muassa muille opinnäytteen tekijöille.

- Sallin kerätyn aineiston jatkokäytön tämän tutkimuksen lisäksi myös muuhun tieteelliseen tutkimukseen

TURVALLISUUSOHJEET

1. Virtuaalisessa ympäristössä ei saa juosta
2. Virtuaalinen ympäristö rajoittuu yhteen tilaan, josta ei saa poistua
3. Testaajan tulee välittömästi pysähtyä, mikäli VR-lasien näytön kuva pysähtyy tai näyttö muuttuu yksiväriseksi (esim. musta/harmaa)

OHJEET MIKÄLI KOET SIMULAATIOPAHOINVOINTIA

1. Sulje silmät
2. Kyykisty tai istuudu lattialle
3. Muista ilmoittaa oireista heti testin järjestäjälle

Virtuaaliodellisuusympäristössä liikkuminen voi tuottaa joillekin henkilöille matkapahoinvoinnin tapaista simulaatiopahoinvointia.

VASTUUVAPAUSLAUSEKE

VR-käyttäjätestiä suunnitellessa on otettu huomioon mahdolliset etukäteen tiedossa olevat ongelmatilanteet, kuten oikean maailman esineisiin törmääminen ja simulaatiopahoinvointi. Ongelmatilanteisiin koskien oikean maailman esineisiin törmäämistä on varauduttu VR-käyttäjätestin sisäisillä mekanismeilla, VR-laitteiston johdottomuudella, testitilan järjestelyillä sekä yllä olevalla turvallisuusohjeistuksella. VR-käyttäjätesti suoritetaan omalla vastuulla ja valvottuna. Testaaja ei kuitenkaan vastaa testilaitteistolle tapahtuvista vaurioista, ellei kyseessä ole ilkivalta.

Allekirjoittamalla tämän dokumentin todistan lukeneeni ohjeistuksen ja vapautan Jyväskylän yliopiston ja testin järjestäjän vastuusta.

Allekirjoitus ja nimenselvennys

Tästä dokumentista on tehtyä kaksi samansisältöistä kappaletta, yksi testin järjestäjälle ja yksi koehenkilölle itselleen

E Ennakkokysely

No _____

Päivämäärä _____

Perustietokysymykset

1. Ikä
 - _____ -vuotias
2. Sukupuoli
 - Nainen
 - Mies
 - En halua kertoa
3. Kätisyys
 - Täysin vasenkätinen
 - Pääosin vasenkätinen
 - Molempikäätinen
 - Pääosin oikeakätinen
 - Täysin oikeakätinen

Ikä ja sukupuoli vaikuttavat liikkumiseen sekä oikeassa että virtuaalisessa maailmassa.

Kätisyyden tietäminen ei ole tämän tutkimuksen kannalta olennainen asia, mutta voi auttaa aineiston jatkokäyttäjää, mikäli olet sen sallinut.

Aiempi kokemus virtuaalitodellisuudesta

1. Minkälaisia VR-laseja olet käyttänyt?
 - VR-laseja joihin laitetaan älypuhelin (mm. Google Cardboard tai Samsung GearVR)
 - Pelikonsolin VR-laseja (Sony PSVR)
 - Kuluttajille suunnattuja PC:n kytkettäviä VR-laseja (mm. HTC Vive, Oculus Rift)
 - Tieteelliseen tutkimukseen tai ammattikäyttöön tarkoitetut VR-lasit
 - Jotain VR-laseja, joista en tiedä mitä ne olivat
2. Kuinka paljon olet käyttänyt VR-laseja?
 - En ole aiemmin kokeillut
 - Olen kokeillut korkeintaan muutaman kerran
 - Käytän satunnaisesti
 - Käytän usein
3. Oletko aiemmin käyttänyt huonemittakaavan (engl. Room Scale) VR-laseja, jotka mahdollistavat fyysisen kävelyn VR:ssä?
 - En ole
 - Olen (merkkää kummalla tavalla)
 - Johdollisena
 - johdottomana
4. Onko VR:ssä käytettävät näkymän manipulointimenetelmät, kuten uudelleensuunnattu kävely (Redirected Walking, RDW) sinulle tuttuja?
 - En ole kuullutkaan
 - Olen kuullut, mutten tiedä niistä mitään
 - Tiedän mitä hyötyä niistä olisi, mutten tiedä miten ne toimivat
 - Tiedän miten ne toimivat teoriassa, mutten ole itse kokeillut
 - Olen kokeillut niitä

F Käyttäjätestin jälkeinen kysely

No _____

Päivämäärä _____

Simulaatiopahoinvointi

*Ympyröi vaihtoehto kuinka paljon kukin vaihtoehtoista vaikuttaa sinuun **tällä hetkellä***

1. Yleinen epä mukavuus	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
2. Uupumus	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
3. Päänsärky	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
4. Silmien rasittuminen	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
5. Vaikeuksia tarkentaa katsetta	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
6. Syljen lisääntyminen	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
7. Hikoilu	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
8. Pahoinvointi	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
9. Vaikeuksia keskittyä	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
10. Pää tuntuu ”täydeltä”	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
11. Näön sumeneminen	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
12. Huimausta silmät auki	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
13. Huimausta silmät kiinni	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
14. Vertigo (huone pyörii)	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
15. Vatsassa pyörii	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti
16. Röyhtäily	Ei vaikutusta	Hieman	Kohtalaisesti	Vahvasti

Seuraavat kysymykset ovat mielipidekysymyksiä

1. Olsitko valmis käyttämään kokeilemasi kaltaisia liikkumismenetelmiä peleissä...
 - a. pystyäksesi käyttämään fyysistä tilaa suurempia virtuaalisia tiloja (esimerkiksi pellon kokoinen alue olohuoneessa)
 - En
 - En osaa sanoa, tarvitsisin lisää kokemusta tai tottumista menetelmiin
 - Saattaisin käyttää niitä, jos sellainen vaihtoehto olisi
 - Kyllä
 - b. pystyäksesi pienentämään tilavaatimuksia kotonasi käyttäessäsi saman kokoista virtuaaliympäristöä (välttyisit esimerkiksi sohvan siirtämiseltä joka kerta pelatessasi VR-peliä).
 - En
 - En osaa sanoa, tarvitsisin lisää kokemusta tai tottumista menetelmiin
 - Saattaisin käyttää niitä, jos sellainen vaihtoehto olisi
 - Kyllä
2. Oliko kahden menetelmän vertailu pareittain sinusta hankalaa vai helppoa?
 - Helppoa
 - Osa vertailuista oli helppoja ja osa hankalia
 - Hankalaa, en havainnut riittävästi eroja
 - Hankalaa, menetelmien miellyttävyyttä voi ajatella monella tapaa

G Manipulointialgoritmin Blueprint-lähdekoodi

