

Samuel Ovaskainen

Vapaan käden vuorovaikutus virtuaalitodellisuudessa

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

13. kesäkuuta 2022

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Samuel Ovaskainen

Yhteystiedot: samuel.s.ovaskainen@student.jyu.fi

Ohjaaja: Jonne Itkonen

Työn nimi: Vapaan käden vuorovaikutus virtuaalitodellisuudessa

Title in English: Freehand interaction in Virtual Reality

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 22+0

Tiivistelmä: Nykyisellään on tarjolla virtuaalitodellisuuden ratkaisuja, jotka mahdollistavat ympäristön kanssa vuorovaikuttamisen ilman käsissä pidettäviä ohjaimia. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten ohjainten puute muuttaa vuorovaikuttamista virtuaalitodellisuudessa. Tutkimuksessa havaittiin, että menetelmien välillä on merkittävää osin tehtävästä riippuvaa vaihtelua. Datahansikkaiden havaittiin pärjäävän yleisesti kamerapohjaisia menetelmiä paremmin, mutta varsinkin esineiden kanssa vuorovaikuttaminen oli kamerapohjaisilla menetelmillä haastavaa. Suuressa osassa tehtäviä ohjaimet pärjäsivät kuitenkin menetelmien kanssa yhtä hyvin tai jopa paremmin.

Avainsanat: virtuaalitodellisuus, VR, vuorovaikutus

Abstract: Nowadays there are virtual reality solutions on offer that allow interacting with the environment without handheld controllers. The purpose of this study was to determine how the lack of controllers changes interaction in virtual reality. The study demonstrated that there are significant partially task dependent differences between interaction methods. Generally datagloves outperformed camera-based methods in all tasks, but especially interacting with objects proved to be difficult with camera-based methods. However, in most cases controllers still matched or outperformed freehand interaction methods.

Keywords: virtual reality, VR, interaction

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	MENETELMÄT	3
	2.1 Fyysiset	3
	2.2 Kamerateat	4
	2.3 Menetelmien haasteita	5
3	VAIKUTUS	7
4	KÄYTTÄJÄKOKEMUS.....	11
5	YHTEENVETO.....	15
	LÄHTEET	16

1 Johdanto

Nykyisin suuri osa virtuaalitodellisuuden ratkaisuista käyttää yhä virtuaalisen ympäristön kanssa vuorovaikuttamiseen erinäisiä käsissä pidettäviä ohjaimia. Toisaalta kuitenkin jo pitkään on kehitteillä ollut menetelmiä, jotka mahdollistaisivat tietokoneiden käytön vapain käsin esimerkiksi käsieleiden avulla. Menetelmistä osan ollaan havaittu soveltuvan myös virtuaalitodellisuuden käyttötarkoituksiin ja tämän lisääntyneen kiinnostuksen myötä niitä on kehitetty edelleen pidemmälle juuri virtuaalitodellisuuden käyttöön sopivammiksi. Kehityksen myötä menetelmistä on tullut myös yhä saavutettavampia jo siihen pisteeseen, että tällä hetkellä markkinoiden yksistä halvimmista kulluttajakäyttöön suunnatuista virtuaalitodellisuuslaseista, *Oculus Questistä*, löytyy mahdollisuus käsien seurantaan sisäänrakennettujen kameroiden avulla.

Teknologioiden saavutettavuus on myös vastapainoisesti lisännyt niistä tehdyn tutkimuksen määrää, ja nykyisellään tutkimusta löytyykin siis menetelmien kehittämisen lisäksi myös niiden vaikutuksista. Tämän aiemman tutkimuksen pohjalta tässä tutkimuksessa on kirjallisuuskatsauksen avulla tarkoituksena selvittää, miten ohjainten puute muuttaa vuorovaikuttamista virtuaalitodellisuudessa. Kokonaisuuden ymmärtämiseksi tämän tutkimuksen rakenteessa määritellään ensiksi muutama olennainen termi, jonka jälkeen esitellään nykyisin käytössä olevia menetelmiä, sekä niiden käytössä mahdollisesti esiintyviä haasteita. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan miten vuorovaikuttamisen mentelemät vaikuttavat käyttäjien suoriutumiseen ja käyttäjäkokemukseen, sekä osin pyritään selittämään tuloksia aiemmin havaittujen heikkouksien avulla.

Tutkimuksen eräs keskeisimpiä käsitteitä, virtuaalitodellisuus (VR, Virtual Reality) ei ole terminä saanut yhtä täsmällistä määritelmää, vaan sille on tarjottu vuosien saatossa monia toisiaan limittäviä kuvauksia: esimerkiksi Sherman ja Craig (2018, s. 6–16) kiteyttävät virtuaalitodellisuuden koostuvan vuorovaikuttajan sijaintia ja tekoja seuraavista interaktiivisista tietokonesimulaatioista, jotka korvaavat tai muokkaavat yhden tai useamman aistin havaintoja luoden näin immersiiivisen kokemuksen läsnäolosta virtuaalimaailmassa. Hyvinkin samanlaiseen määritelmään olivat jo aiemmin päätyneet Burdea ja Coiffet (2003, s. 3), jotka kuvasivat virtuaalitodellisuutta korkealuokkaiseksi tietokoneen ja käyttäjän väliseksi raja-

pinnaksi, johon kuuluu reaaliaikaista simulaatiota, sekä monen aistimuksen kautta vuorovai-
kuttamista.

Virtuaalitodellisuuden löyhä määritelmä aiheuttaakin sekaannusta, koska varsinkin puhekie-
lessä sekä myös jossain tieteellisissä artikkeleissa termiä käytetään yleisistä tietokonesimu-
loiduista ympäristöistä, eli virtuaalimaailmoista. Virtuaaliympäristöiksi (VE, Virtual Envi-
ronment) voidaan kutsua yleisiä vuorovaikutuksen mahdollistavia virtuaalimaailmoja, joi-
den ei siis välttämättä tarvitse täyttää virtuaalitodellisuuden kriteereitä (Sherman ja Craig
2018, s. 20–21). Virtuaalitodellisuuden ja -ympäristöjen välistä eroa korostamaan on lisäksi
kehitetty termi immersiivinen virtuaalitodellisuus, jonka Furht (2008) antaa määritelmäk-
si teknologioille, joiden tavoitteena on täysin syventää käyttäjä virtuaalimaailmaan luoden
näin käyttäjälle vaikutelman, että hän on astunut siihen sisälle. Kuitenkin tässä tutkielmassa
virtuaalitodellisuus on määritelty Shermanin ja Craigin (2018, s. 6–16) mukaisesti eli siitä
puhuttaessa kyse on immersiivisestä virtuaalitodellisuudesta, ja esimerkiksi kun ympäristöä
tarkastellaan perinteiseltä näytöltä ilman, että se mukautuu käyttäjän pään liikkeisiin kutsu-
taan sitä virtuaaliympäristöiksi.

2 Menetelmät

Sekä sormien seuranta että käsieleiden tunnistaminen ovat olleet pitkäaikaisia tutkimuskohteita ja erinäisiä menetelmiä löytyykin kattavasti (esim. Rautaray ja Agrawal 2015; Li ym. 2019). Käsiele-pohjaisten käyttöliittymien hyödyntämistä on kokeiltu erinäisissä konteksteissa, kuten esimerkiksi *LG G8 ThinQ* -älypuhelimien ohjaamisessa, kuitenkin saavuttamatta erityisen laajaa suosiota kuluttajilta. Tässä tutkimuksessa tarkastelua on lisäksi rajattu menetelmiin, jotka soveltuvat immerstiivisen virtuaalitodellisuuden käyttötarkoituksiin, joissa niiden on lisäksi pystyttävä seuraamaan käyttäjää hänen liikkuaan virtuaalisessa ympäristössä vapaasti.

Li ym. (2019) jakavat nykyiset virtuaalitodellisuudessa käytetyt eleinteraktiomenetelmät kolmeen luokkaan: käsiä ulkoapäin seuraaviin konenäköalgoritmejä hyödyntäviin kameroihin, fyysisiin puettaviin sensoreihin ja kosketusnäyttöihin. Näistä kolmesta yllä mainitun vapaan liikkumisen kriteerin täyttävät kamerat ja päälle puettavat sensorit, joten alla tarkastelu on lisäksi rajattu vain niihin.

2.1 Fyysiset

Käsiin laitettavia sormien asentoja seuraavia käsineitä eli datahansikkaita on suunniteltu Sturmanningin ja Zeltzerin (1994) mukaan jo 1977 kehitettyjen *Sayre glove* -hansikkaiden julkaisusta lähtien. *Sayre glove* -hansikkaat käyttivät valokennoja mittaamaan hansikkaiden sormissa olevien taipuvien putkien läpi kulkevaa valon määrää sormien asennon selvittämiseksi. Ensimmäisenä kuluttajille suunnattuina datahansikkaana voidaan pitää Mattelin Nintendo Entertainment System -videopelikonsolille 1989 julkaistua *Power Glove* -ohjainta, joka käytti sormien asennon tunnistamiseen taipumisantureita ja käden seuraamiseen ultraääntä (Sturman ja Zeltzer 1994).

Osassa nykyisistä virtuaalitodellisuuden käyttötarkoituksiin suunnitelluista datahansikkaista on myös mahdollisuus haptisen palautteen antamiseen: ammattikäyttöön tarkoitettut *HaptX Gloves* -hansikkaat sisältävät 130 haptista palautetta antavaa aktuaattoria kättä kohden, sekä voimapalautetta antavan objektien muodon tuntemisen mahdollistavan ulkoisen tukiran-

gan. Sormien sijainnin seurantaan hansikkaat käyttävät suuren tarkkuuden mahdollistavaa magneettista liikkeenseurantaa (Varga 2022). Myöskin ammattikäyttöön suunnattujen *Noitom Hi5 VR Glove* -hansikkaiden ranteisiin on sijoitettu värinämoottorit. Sormien sijainnin seurantaan hansikkaat käyttävät inertiamittauksyksikköjä (IMU) ("Hi5 VR Glove Business Edition | Hi5 VR Glove" 2022). Sekä HaptX:n että Noitomin hansikkaat voivat hyödyntää käsien sijainnin seurantaan ulkoista ratkaisua, kuten HTC VIVE Tracker -jäljittimiä.

2.2 Kamerat

Kameroiden käytöstä reaaliaikaiseen eleiden tunnistukseen on historiallisessa kontekstissa hankala löytää yhtä ensimmäistä tutkimusta, luultavasti koska teknologia kehittyi hiljalleen sen toimintaa tukevien teknologioiden kuten algoritmien, tietokoneiden prosessointikyvyn, sekä kameroiden resoluution parantuessa. Vielä vuonna 1994 Sturman ja Zeltzer (1994) listasivat hansikkaattoman käsien seurannan ongelmiksi videokameroiden liian matalan resoluution sekä alhaisen kuvataajuuden, kokenäkö tekniikoiden kehittymättömyyden ja helposti käsien tai muiden sormien alle peittyvien sormien seurannan hankaluuden. Samana vuonna Rehg ja Kanade (1994) esittivät menetelmän joka mahdollisti käsien ja sormien asentojen tunnistamisen 10 kertaa sekunnissa yhden tai useamman kameran avulla. Kuitenkin he mainitsivat yhä mentelmän ongelmiksi sormien peittymisen, sekä seurannan hankalia taustoja vasten.

Nykyisin käytössä on eri menetelmiä, jotka käyttävät muun muassa mustavalko-, väri-, infrapuna- ja syvyyskameroita (Li ym. 2019). Esimerkiksi tutkimuskäytössä suosittu ulkoinen Ultraleapin *Leap Motion Controller* -moduuli, sekä muut Ultraleapin tarjoamat ratkaisut koostuvat kahdesta kamerasta, sekä infrapuna LED-valoista. Kameroiden tallentama kuva lähetetään tietokoneelle prosessoitavaksi. Kuvasta siistitään pois taustaobjektit ja informaatiosta luodaan kolmiulotteinen esitys, josta proseduuri etsii sormien sijainnit ja pääättelee peittyneiden osien sijainnin ("How Hand Tracking Works" 2020). Leap Motion Controller voidaan kiinnittää VR-laseihin erillisen kiinnikkeen avulla, jolloin se saadaan seuraamaan käyttäjän pään liikkeitä. Ideaalisissa olosuhteissa Leap Motion Controller pystyy paikantamaan staattisten objektien sijainnin jopa alle millimetrin tarkkuudella (Weichert ym. 2013; Guna ym. 2014).

Samaa Ultraleapin kehittämää teknologiaa käyttävät Varjon ammattilaiskäyttöön suunnatut *VR-2 Pro*, *VR-3* ja *XR-3* -lasit, joihin on se sisäänrakennettuna (”Hand Tracking” 2022). Myös ammattikäyttöön suunnitelluista *HTC Vive Focus 3* -laseista löytyy ilmeisesti HTC:n omiin menetelmiin perustuva sisäänrakennettuja kameroita hyödyntävä käsien seuranta.

Saatavilla on jo myös kuluttajille suunnatuja käsien seurantaa tukevia VR-laseja, kuten *Oculus Quest* -sarjan ilman erillistä tietokonetta toimivat lasit. Lasien ohjelmisto ajaa sisäänrakennettujen kameroiden tuottaman kuvan konenäkö algoritmin läpi, joka tunnistaa käsien, rystysten ja sormenpäiden sijainnit. (”Controllers and hand tracking” 2022; sekä ”Hand Tracking Privacy Notice” 2022)

2.3 Menetelmien haasteita

Li ym. (2019) listasivat kameroihin ja konenäköön perustuvien käsien seurannan haasteiksi edelleen erilaiset valaistukset, käyttäjien ihonvärin sekä sormien peittymisen. Buckingham (2021) esittää haasteelliseksi myös objektien kanssa vaikuttamisen teoretisoi sen ongelmallisuuden johtuvan suuressa määrin haptisen palautteen puutteesta. Argelaguet ym. (2016) ja Jin ym. (2016) havaitsivat tutkimuksissaan Leap Motion Controllerin sormien seurannan tarkkuuden heikkenevän kämmenen muodon lähestyessä moduulin suuntaista tasoa, kun sitä lähemmäs sormet peittävät taempana olevat. Lisäksi Jin ym. (2016) tuloksista selviää merkittävää tarkkuuden heikkenemistä kämmenen osoitessa suoraan moduulista pois päin.

Monet nykyiset kamerapohjaiset ratkaisut käyttävät joko VR-laseihin sisäänrakennettuja tai niihin kiinnitettäviä eteenpäin osoittavia kameroita, joilla on rajallinen näkökenttä ja esimerkiksi Leap Motion Controller näkee moduulin edessä vertikaalisesti 120° alueen (”How Hand Tracking Works” 2020). Hyödynnettävää näkökenttää pienentää entisestään Buckinghamin (2021) mukaan se, että osassa ratkaisuista käsien seuranta on lisäksi tarkimillaan vain suoraan pään edessä. Hän toteaa tämän saattavan johtaa epäluonnollisiin päänliikkeisiin, koska käyttäjän on jatkuvasti pidettävä kätensä kameran näkökentässä. Devine ym. (2017) havaitsivatkin, että Leap Motion Controllerin kääntämisellä 30° alaspäin oli merkittävä positiivinen vaikutus seurannan laatuun, mutta Ultraleapin moduulille tarjoama kiinnike ei tähän pysty.

Myös Buckingham (2021) mainitsee ihonvärin saattavan vaikuttaa osan kamerapohjaisen käsien seurannan menetelmien toimivuuteen. Hänen mukaansa lisäksi ongelmia saattaa muodostua, jos algoritmien kehittämiseen käytetty data koostuu vain esimerkiksi vaaleaihoisten miesten käsistä johtaen algoritmien toiminnan heikkenemiseen osalla käyttäjistä ja nostaa yleisemmin käsien seurannan haasteeksi erilaisten ihmisten ja ihmisryhmien huomioimisen, eli inklusiivisuuden. Ihonvärin lisäksi huomioon otettavia seikkoja ovat myös sukupuoli, ikä, fyysinen koko sekä mahdolliset vammat, eikä Dombrowskin ym. (2019) mukaan virtuaalitodellisuuden ratkaisuja kehittäessä pitäisikään olettaa, että käyttäjällä on neljä normaaliin vaikuttamiseen kykenevää raajaa. Inklusiivisuuden saralla onkin vielä vastaamattomia kysymyksiä, kuten pystyvätkö seuranta-algoritmit reagoimaan oikein dysmeliaan tai edes yhden tai useamman sormen puuttumiseen? Onko saatavilla lapsille tai muuten pienempikäisille ihmisille sopivia datahansikkaita? Lisäksi sovelluspuolella on kiinnitettävä huomiota esimerkiksi mahdollisuuteen vaihtaa toiminnallisuuteen tarvittavaa elettä (Barrie ym. 2022).

Datahansikkaiden muita haasteita ovat monimutkainen valmistusprosessi, kallis hinta, sormien liikkuvuuden heikentyminen, sekä toistuvan tarkkuutta vaativan kalibroinnin tarve (Buckingham 2021; Li ym. 2019). Lisäksi sensoripohjaisiin, jopa VR-laseihin jo valmiiksi sisäänrakennettuihin ratkaisuihin verrattuna datahansikkaat lisäävät tarvittavan varustuksen määrää (Masurovsky ym. 2020). Lisäksi kovassa käytössä datahansikkaat voivat likaantua, jolloin käyttäjät saattavat myös haluta pestä niitä, mikä pitää mahdollisesti ottaa huomioon hansikkaiden suunnittelussa.

3 Vaikutus

Vapaiden käsien vaikutusta vuorovaikuttamiseen virtuaalitodellisuudessa on tutkittu erityisesti vertaamalla sitä yhteen tai useampaan muuhun ohjaintyyppiin toistettavilla ja käytännönläheisillä kokeilla. Vertailevista tutkimuksista monet rajasivat tarkastelun yhteen vaikutusalueeseen, erityisesti usein esineiden käsittelyyn ja osa tarkasteli kokonaissuoritumista laajemmissa tehtävissä. Menetelmien toisiinsa vertaamiseen tutkimukset käyttivät usein esimerkiksi mitattua suoritumisaikaa tai käyttäjän tarkkuutta.

Masurovsky ym. (2020) vertasivat kahta Leap Motion Controllerin rajapintaa sekä Oculus Touch -ohjaimia yksinkertaisessa esineestä kiinni tarraamista ja sen maalialueelle asettamista vaativassa tehtävässä virtuaalitodellisuudessa. Rajapinnoista toinen oli Leap Motion Controllerin oma kehitykseen tarkoitettu *Leap API* ja toinen siitä heidän kehittämänsä tehtävään optimoidummaksi uskottu rajapinta. Paranneltu rajapinta antoi esineestä kiinniottamisen eri vaiheista sekä visuaalista että auditiivista palautetta ja lisäksi pyrki estämään esineestä vahingossa irti päästämisen rajoittamalla tarraamisen toimimaan vain käden liikkeessä tarpeeksi hitaasti.

Tutkimuksen tuloksista havaitaan, että Oculus Touch -ohjaimia käytettäessä käyttäjät pystyivät tarraamaan esineestä nopeammin sekä siirtämään sen maalialueelle nopeammin ja tarkemmin kuin kumpikaan rajapinnoista. Parannelulla rajapinnalla esineestä kiinniottaminen oli hitaampaa kuin Leap API:lla, mutta maalialueelle siirtäminen vastavuoroisesti nopeampaa niin, ettei kokonaissuoritusajassa rajapintojen välillä löytynyt tilastollisesti merkittävää eroa. Myös tarkkuudessa rajapinnat pärjäsivät yhtä hyvin, mutta esineen vahingossa pudottamista tapahtui parannelulla rajapinnalla vähemmän. Kuitenkin Oculus Touch -ohjaimella vahingossa pudottamista ei tapahtunut juuri ollenkaan.

Liu ym. (2019) kehittivät datahansikkaat ja vertasivat niiden suoritumista Leap Motion Controlleria vastaan erimuotoisista jokapäiväisistä esineistä kiinni tarraamisessa ja siirtämisessä. Datahansikkaat pärjäsivät kaikenmuotoisten esineiden kanssa molemmissa operaatioissa erinomaisesti, kun taas Leap Motion Controllerilla tarraamisen onnistumisessa oli eri muotoisten esineiden välillä merkittävää vaihtelua ja siirtämisessä hankaluuksia muodosta

riippumatta. Sekä näistä että Masurovskyn ym. (2020) havaitsemista tuloksista huomataan Leap Motion Controllerin pärjäävän esineistä kiinniotta ja siirtämistä vaativissa tehtävissä sekä ohjaimia että datahansikkaita heikommin.

Liu ym. (2019) esittävätkin kehittämiensä datahasikkaiden eduksi Leap Motion Controlleriin nähden sormien asennon ja käsien seurannan käyttäjän näkökentän ulkopuolella, sekä asentojen seurannan tarkkuuden ja rajoittamattomuuden. Suoriutumisen vaihtelu esineiden välillä Leap Motion Controllerilla johtuneen osin Jin ym. (2016) havaitsemasta kämmenen asennosta riippuvasta sormien seurannan heikentymisestä. Esineistä tarraamisessa suurimpia ongelmia aiheutti vain 13 % onnistumisprosentin saanut tennismaila, josta on luonnollista ottaa kiinni puristamalla kämmen sen ympärille nyrkkiin johtaen tilanteeseen, jossa kämmenselkä osoittaa suoraan VR-laseihin kiinnitettyyn moduuliin päin ja peittää näin helposti taakse jäävät sormet. Lisäksi erittäin huonosti pärjäsi kulho, jonka reunasta kämmenellä kiinni otettaessa kämmenselkä osoittaa myös suoraan moduuliin päin. Toisaalta kulhon reunasta voi myös tarrata peukalolla, jolloin sormet muodostavat moduulin muotoisen tason, jonka Jin ym. (2016) osoittivat myös heikentävän sormien seurannan tarkkuutta.

Huomattavaa on myös Buckinghamin (2021) nostama haptisen palautteen puutteen vaikutus interaktioon: sekä Liun ym. (2019) kehittämät datahansikkaat että Oculus Touch -ohjaimet mahdollistavat haptisen palautteen antamiseen sisäänrakennettujen värinämoottorien muodossa, mutta Leap Motion Controller ei tähän pelkiltään pysty. Pacchierotti ym. (2016) havaitsivat jopa yksinkertaisen värinäpalautetta antavan etusormeen pujotettavan sormuksen parantavan käyttäjien suoriutumisenopeutta myös Leap Motion Controllerilla samankaltaisessa esineestä tarraamista ja maalialueelle viemistä vaativassa tehtävässä virtuaaliympäristössä.

Muunlainen yhteen vaikutusalueeseen keskittyvä tutkimus on esimerkiksi Zhao ja Allison (2020) toteuttama kyllä-ei -kysymyksiin eri ohjaustyypeillä vastaamisen vertailu. Siinä selvitettiin perinteisen konsolipeliohjaimen, käden- ja pääneleiden avulla vastaamisen vaikutusta virtuaalitodellisuudessa. Tuloksista selviää käden- ja pääneleiden olevan ohjainta selvästi hitaammat. Lisäksi käsieleillä vastausten tarkkuus on heikompi, kuin muilla vaikutusmuodoilla. Kuitenkin huomattavaa on, että tutkimuksessa käsieleissä piti sormien oikean asennon lisäksi myös heiluttaa kättä, mikä lisäsi niiden monimutkaisuutta ja vastavuoroisesti vähensi

intuitiivisuutta.

Kim ja Choi (2019) vertasivat kaksiulotteisen hiiren, kaksi- ja kolmiulotteisten hiirien yhdistelmän, datahansikkaiden ja Oculus Touch -ohjaimien käyttämistä KmodStudio nimisessä geologisessa mallinnusohjelmassa virtuaalitodellisuudessa. Tutkimukseen osallistuvat henkilöt olivat käyttäneet sovellusta ennen kaksiulotteisen hiiren avulla perinteisesti tietokone näytön välityksellä, mutta eivät virtuaalitodellisuudessa. Tästä huolimatta tuloksista vaikuttaa, että käsielein ohjattavat datahansikkaat pärjäsivät mittauksissa lähes yhtä hyvin kuin käyttäjien ennen käyttämä kaksiulotteinen hiiri: datahansikkaiden ja kaksiulotteisen hiiren kanssa käyttäjien kokonaistyöskentelyaika oli lähes sama, vaikka uusien ohjausmenetelmien oppimiseen oli varattu vain 30 minuuttia ennen mitattua suoritusta. Lisäksi kaksi- ja kolmiulotteisten hiirien yhdistelmä oli merkittävästi hitaampi ja Oculus Touch -ohjaimet pärjäsivät ajallisesti huonoiten. Klikkaustarkkuudessa kaksiulotteinen hiiri pärjäsi parhaiten läheisesti datahansikkaiden sekä kaksi- ja kolmiulotteisten hiirien yhdistelmän seuraamana. Oculus Touch -ohjaimien tuloksissa oli suurin käyttäjien välinen varianssi, mutta yleisesti ne pärjäsivät jälleen huonoiten.

Oculus Touch -ohjaimia vertasivat myös Khundam ym. (2021) tutkimuksessaan, jossa lääketieteen opiskelijoiden ajallista suoriutumista potilaan intubaatiosta virtuaalitodellisuudessa tarkasteltiin ohjaimien ja Oculus Quest -lasien sisäisen käsien seurannan välillä. Tehtävä oli jaettu välietappeihin, joiden suoritusajaksi on taulukoitu tuloksissa erikseen. Välietapeista nähdään suoritusajan keskiarvon vaihdelleen ohjausmenetelmien välillä tehtävästä riippuen niin, että kumpikin suoritui osasta tehtävistä keskiarvoisesti hieman paremmin, mutta tulosten kokonaishajonta oli niin suurta, että eroja ei havaittu tilastollisesti merkittäväksi. Myöskään kokonaissuoriutumisaikassa ei menetelmien välillä löytynyt tilastollisesti merkittävää eroa. Osaltaan mielenkiintoista on kuitenkin se, että pärjäämisestä huolimatta Khundam ym. (2021) kertovat havainneensa käsien seurannassa tapahtuneiden ongelmien hämmäntäneen käyttäjiä ja myös haastatteluissa osa käyttäjistä kertoi joutuneensa toistamaan tekoja seurannan ongelmien takia.

Yleisesti havaitaan tutkimusten tarkastelemien käsien seurannan menetelmien pärjäävän eri tehtävistä vaihtelevasti. Nykyisten kamerapohjaisten menetelmien rajoitukset vaikuttavat kuitenkin vielä merkittävästi niiden suoriutumiseen verrattaessa muihin menetelmiin ja olisikin

mielenkiintoista nähdä esimerkiksi Khundamin ym. (2021) tutkimus toistettuna datahansikkaiden kanssa, jolloin selviäisi käsien seurannan ongelmien merkitys laajemmamman tehtävän kokonaissuorituksessa. Jää nähtäväksi paljonko algoritmien kehittyminen tai uudet teknologiat tulevaisuudessa voivat lieventää muun muassa sormien toistensa taakse peittymisen aiheuttamia ongelmia vai tulevatko fyysiset puettavat laitteet aina suoriutumaan olosuhteista riippumatta paremmin. Kuitenkin jo nyt varsinkin kokonaissuoriutumista tarkastelevien tutkimusten tuloksista näyttää, että ohjainten ja vapaiden käsien välillä ei edes nykytilanteessa voi enää valita yhtä jokaiseen tilanteeseen paremmin sopivaa ratkaisua.

4 Käyttäjäkokemus

Hassenzahlin ja Tractinskyn (2006) mukaan käyttäjäkokemus on seurausta käyttäjän sisäisestä tilasta, joihin vaikuttavat esimerkiksi käyttäjän odotukset, tarpeet ja tunteet, järjestelmän ominaisuuksista, joita ovat muun muassa sen monimutkaisuus, käytettävyys ja tarkoitus, sekä käyttökontekstista missä vuorovaikutus tapahtuu. Ahn ym. (2017) kartoittivat merkittäviä järjestelmän ominaisuuksien käyttäjäkokemukseen vaikuttavia tekijöitä virtuaalituodellisuudessa. He listasivat ohjaimissa näitä olevan ainakin käytön oppimisen helppouden, käytön helppouden ja tehokkuuden. Samojen ohjaimiin vaikuttavien tekijöiden lisäksi heidän mukaansa eleinteraktion käyttäjäkokemukseen muita merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa yksinkertaisuus, konsistenttius, responsiivisuus, intuitiivisuus, luonnollisuus ja hyödyllisyys.

Aiemmin mainitussa Masyrovskyn ym. (2020) toteuttamassa tutkimuksessa kartoitettiin käyttäjien suoriutumisen lisäksi myös heidän subjektiivista kokemustaan. Osa mitatuista tuloksista korreloi selvästi myös käyttäjien subjektiivisten havaintojen kanssa ja käyttäjät kokivat kummankin Leap Motion Controllerin rajapinnan tarkkuudeltaan Oculus Touch -ohjaimia heikommaksi, mikä havaittiin myös tuloksista. Lisäksi käyttäjät kokivat kiinniottamisen, sekä irtipäästämisen ohjaimia merkittävästi haastavammaksi mikä voidaan myös havaita operaatioihin kuluneen ajan kasvamisena. Huomattavaa on Leap Motion Controllerin pärjääminen usein vapaan käden interaktion eduksi luetelluissa ominaisuuksissa: käyttäjät kokivat rajapinnat yhtä intuitiiviseksi kuin ohjaimien käytön eikä fyysisessä rasittavuudessa ollut merkittävää eroa. Huolestuttavammin käsien seuranta koettiin ohjaimia epämukavammaksi ja jopa vähemmän luonnolliseksi.

Voigt-Antons ym. (2020) tutkivat käsien seurannan vaikutusta käyttökokemukseen virtuaalituodellisuudessa vertaamalla erilaisia tapoja visualisoida käsiä Oculus Touch -ohjaimia käytettäessä ja Oculus Questin sisäistä käsien seurantaa kirjoittamisessa, sekä esineistä tarraamisessa. Tuloksista voidaan havaita käsien seurannan vähentäneen käyttäjien kokemaa hallitsemattomuuden tunnetta ohjaimiin verrattuna. Tämän he uskoivat saattavan johtuvan käsien seurannan heikommasta tarkkuudesta. Toisaalta käyttäjät kokivat käsien seurannan miellyttävämmäksi ja vähemmän psyykkisesti kuormittavaksi. Kuitenkaan käsien seurannan ei todettu

lisäävän realismiin eikä läsnäolon tunnetta.

Oculus Questin sisäistä seurantaan sekä Oculus Touch -ohjaimia vertasivat myös Khundam ym. (2021) aiemmin mainitussa tutkimuksessaan, jossa tarkasteltiin lääketieteen opiskelijoiden suoriutumista potilaiden intubaatiosta. He eivät tutkimuksessaan havainneet ajallisesti merkittävää eroa menetelmien välillä ja tämä vaikuttaa refleктоituvan myös mitattuihin subjektiivista kokemusta kartoittaviin arvoihin: Käyttäjät kokivat ohjaimet ja käsien seurannan yhtä hyödylliseksi ja Voigt-Antons ym. (2020) tutkimuksesta poiketen myös yhtä miellyttäväksi. Menetelmien välillä ei myöskään löytynyt eroa niiden käyttämisen oppimisen tai käytön helppoudessa.

Näistä havainnoista osin eroten Kimin ja Choin (2019) datahansikkaita muihin interaktiomenetelmiin vertailevasta tutkimuksessa käyttäjät kokivat datahansikkaiden ja Oculus Touch -ohjaimien oppimisen yhtä helpoksi, mutta datahansikkaiden käyttämisen jopa ohjaimia helpommaksi, kuitenkin häviten kaikkien käyttäjien aiemmin käyttämälle kaksiulotteiselle hiirille kummassakin metriikassa. Lisäksi heidän tuloksistaan selvisi käyttäjien kokeneen datahansikkaat kaikkia muita ohjausmuotoja immersiiivisemmäksi päihittäen sekä kummatkin hiiret että niitä immersiiivisemmäksi koetut Oculus Touch -ohjaimet. Myöskin Masyrovskyn ym. (2020) Leap Motion Controllerilla tekemistä havainnoista poiketen Kim ja Choi (2019) havaitsivat käyttäjien kokeneen datahansikkaat kaikkia muita vaikutustapoja mukaan lukien Oculus Touch -ohjaimia fyysisesti rasittavammaksi. He huomauttavat tutkimuksen sisäisten erojen johtuvan osin käyttäjien liikkumisen rajoittumisen takia, koska hiiriä käytettäessä käyttäjien on pysyttävä paikallaan pöydän ääressä, kun taas VR käyttöön suunnitellut datahansikkaat ja ohjaimet mahdollistavat vapaan liikkumisen tilassa. Tämä ei kuitenkaan selitä, miksi käyttäjät kokivat datahansikkaat saman vapauden mahdollistavia ohjaimia rasittavammaksi.

Toisaalta Tanjung ym. (2020) vaikuttivat saavan edelliseen tutkimukseen nähden täysin päinvastaisia tuloksia datahansikkaista. Tutkimuksessaan he vertasivat Leap Motion Controlleria, Senso Glove -datahansikkaita sekä HTC Vive -ohjaimia ihmisen anatomian oppimiseen virtuaalitodellisuudessa. Heidän tuloksistaan selviää käyttäjien kokeneen Leap Motion Controllerin ohjaimia huonommaksi ja datahansikkaat vielä huonommaksi niin käytön oppimisessa, käytössä, kuin miellyttävyydessäkin. Kuitenkin tutkimuksessa käytetyssä kyselyssä

sanamuodot vaihtelivat niin, että tuloksista vaikuttaa esimerkiksi kaikkien vaikutusvaihtoehtojen antaman haptiseen palautteen olleen käyttäjien mielestä yhtä miellyttävää, vaikka toisin kuin muut tutkimuksessa käytetyt vaihtoehdot Leap Motion Controller ei sitä pysty edes antamaan. Lisäksi tulosten mukaan käyttäjät kokivat datahansikkaiden tarkkuuden selvästi Leap Motion Controlleriakin heikommaksi, mihin syy saattaakin olla joko Senso Glove -hansikkaiden huonossa tarkkuudessa tai hansikkaiden väärässä kalibroinnissa. Kuitenkin yllä mainittujen tutkimuksessa havaittujen epätyypillisyyksien takia tulosten yleistäminen on hankalaa.

SUS (System Usability Scale) on kehittäjänsä John Brooken mukaan nopea ja likainen tapa arvioida subjektiivista käytettävyyttä. SUS-kysely koostuu kymmenestä viisiportaisesta kysymyksestä ja sen tuloksena on yksittäinen numero välillä 0–100. Se onkin koetty hyödylliseksi vaihtoehtojen vertailuun ja täten myös osa aiemmin mainituista tutkimuksista hyödynsivät sitä tutkimuksen sisäisessä menetelmien vertailussaan. Yksittäisten SUS-arvon antama informaatio on kuitenkin hankalammin tulkittavissa, mutta aiemman datan perusteella on havaittu ainakin laatuunkäypien tuotteiden saavuttavan seitsemääkymmentä suurempia SUS-arvoja ja vastavuoroisesti sitä alemman arvoasanan saavista tuotteista voidaan usein olettaa löytyvän yhä parannettavaa. (Bangor, Kortum ja Miller 2008)

Masyrovskyn ym. (2020) tuloksissa Oculus Touch -ohjaimien SUS-arvojen keskiarvoksi tuli 82,3, kun taas Leap Motion Controllerin rajapintojen merkittävästi alemmat 69,9 sekä 70,5. Tästä osin poiketen, vaikka Khundam ym. (2021) tuloksissa nähdään ohjaimeiden SUS-arvojen keskiarvoksi tulleen 67,17 ja Oculus Quest -lasien sisäisen käsien seurannan saaneen jokseenkin alemman keskiarvon 60,17 eivät he kuitenkaan havainneet eroa tilastollisesti merkittäväksi. Myöskään tutkimusten välisiä SUS-arvoja ei voi välttämättä verrata keskenään, koska sekä testihenkilöt että ohjaimilla käytettävä järjestelmä vaihtuvat täysin. Järjestelmällä ja tehtävällä onkin havaittu olevan merkittävää vaikutusta käsien seurannan pärjäämiseen tuloksissa ja Voigt-Antons ym. (2020) havaitsivat käsien seurannan saaneen esineistä kiinnittämisen keskiarvoisesti 56,50 ja kirjoittamisesta selvästi korkeamman 75,62. Yleisesti havaitaan, ettei kamerapohjaisten ratkaisujen käytettävyys ole ainakaan molempien tutkimusten käyttämiä Oculus Touch -ohjaimia parempi.

Osana tutkimustaan Voigt-Antons ym. (2020) pysyivät myös käyttäjiä järjestämään menetel-

mät mieltäsuusjärjestykeen. Järjestyksessä mieltäsuimmaksi käyttäjät kokivat Oculus Touch -ohjaimet käsien ja ohjaimien näkyessä visualisoituina virtuaalitodellisuudessa. Myös Masurovsky ym. (2020) havaitsivat enemmistön pitäneen ohjaimista käsien seuranta enemmän: 32 osallistuneesta henkilöstä 18 valitsivat ohjaimet mieltäsuimmaksi ja rajapinnoista kummankin valitsi 7 henkilöä. Toisaalta tutkimuksen esitetöjen mukaan kaikilla Masurovskyn ym. (2020) tutkimukseen osallistuneilla henkilöillä oli aiempaa kokemusta videopeliöhjaimista ja puolet ilmoittivat pelaavansa videopeljä usein, joten huomattavaa on myös lähes puolien valinnee mieltäsuimmaksi heille ohjaimia oletettavasti tuntemattomamman käsien seurannan.

5 Yhteenveto

Tutkimuksessa oli tarkoituksena selvittää miten vapaan käden interaktio muuttaa vuorovaikuttamista virtuaalitodellisuudessa. Keskeisiä havaintoja olivat vapaan käden menetelmien suoriutumisen selvä riippuvuus tehtävästä, sekä suuret erot menetelmien välisessä suoriutumisessa. Yleisesti datahansikkaat vaikuttivatkin pärjäävän kamerapohjaisia menetelmiä paremmin jokaisessa tehtävässä, mutta erityisesti esineistä kiinnottaminen ja niiden siirtely ilmeni nykyisten kamerapohjaisten ratkaisujen selväksi heikkoudeksi. Toisaalta laajemmista kokonaissuoritumista mittaavissa tutkimuksissa kaikki vapaan käden interaktion menetelmät pärjäsivät ohjaimiin verrattuna hyvin osoittaen, että yksittäisten vaikuttamisen osa-alueiden arviointi antaa suuntaa vielä kehitystä vaativista tapauksista, mutta ei välttämättä kerro kokonaiskuvaa vaikutuksista.

Tulokset osoittivat nykypäivän vapaan käden vuorovaikutusmenetelmien olevan edelleen kompromissejä ja osa alussa mainituista haasteista ilmeni myös tutkimuksissa. Erityisesti kamerapohjaisten ratkaisujen seurannan laatu vaikutti merkittävästi niiden pärjäämiseen osassa tehtävistä. Osaan haasteista on myös kehitteillä ratkaisuja ja esimerkiksi haptisen palautteen puutteeseen yksinkertaisen Pacchierotin (2016) tarjoaman etusormeen kiinnitettävän värinämoottorin lisäksi on tutkittu myös monimutkaisempia ultraääneen perustuvia menetelmiä jotka saattavat tulevaisuudessa parantaa haptisen palautteen laatua kamerapohjaisissa menetelmissä (Rakkolainen, Sand ja Raisamo 2019).

Osasyynä kamerapohjaisten menetelmien tähänastiseen suosioon ongelmista huolimatta onkin varmasti niiden erittäin kilpailukykyinen hinta, jolloin monimutkaisten ja kalliiden lisäosien hinta saattaa tehdä datahansikkaista jopa houkuttelevempia vaihtoehtoja. Datahansikkaiden käytöstä virtuaalitodellisuudessa löytyy nykyisellään vähemmän tutkimusta tähänastisten tuloksien lupaavuudesta huolimatta, joten tulevaisuudessa olisi myös hyödyllistä siirtää keskittymistä tutkimaan nimenomaan datahansikkaiden vaikutuksia.

Lähteet

- Ahn, Junyoung, Seungho Choi, Minjae Lee ja Kyungdoh Kim. 2017. ”Investigating key user experience factors for virtual reality interactions”. *Journal of the Ergonomics Society of Korea* 36 (4): 267–280. <https://doi.org/10.5143/JESK.2017.36.4.267>.
- Argelaguet, Ferran, Ludovic Hoyet, Michael Trico ja Anatole Lecuyer. 2016. ”The role of interaction in virtual embodiment: Effects of the virtual hand representation”. Teoksessa *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, 3–10. Maaliskuu. <https://doi.org/10.1109/VR.2016.7504682>.
- Bangor, Aaron, Philip T. Kortum ja James T. Miller. 2008. ”An Empirical Evaluation of the System Usability Scale”. *International Journal of Human–Computer Interaction* 24 (6): 574–594. <https://doi.org/10.1080/10447310802205776>.
- Barrie, Ellis, Gareth Ford-Williams, Lynsey Graham, Dimitris Grammenos, Ian Hamilton, Ed Lee, Jake Manion ja Thomas Westin. 2022. ”Game accessibility guidelines | Full list”. Viitattu 7. maaliskuuta 2022. <https://gameaccessibilityguidelines.com/full-list/>.
- Buckingham, Gavin. 2021. ”Hand Tracking for Immersive Virtual Reality: Opportunities and Challenges”. *Frontiers in Virtual Reality* 2 (lokakuu): 728461. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.728461>.
- Burdea, G.C., ja P. Coiffet. 2003. *Virtual Reality Technology*. Second Edition. IEEE Press. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-119-48572-8.
- ”Controllers and hand tracking”. 2022. Viitattu 11. helmikuuta 2022. <https://support.oculus.com/articles/headsets-and-accessories/controllers-and-hand-tracking/index-controllers-hand-tracking>.
- Devine, Scott, Chris Nicholson, Karen Rafferty ja Chris Herdman. 2017. ”Improving the ergonomics of hand tracking inputs to VR HMD’s”. Teoksessa *International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision WSCG 2017: Proceedings*, 2702:167–174. Computer Science Research Notes: Short Papers Proceedings. University of West Bohemia.

Dombrowski, Matt, Peter A. Smith, Albert Manero ja John Sparkman. 2019. ”Designing Inclusive Virtual Reality Experiences”, toimittanut Jessie Y.C. Chen ja Gino Fragomeni, 33–43. Cham: Springer International Publishing. ISBN: 978-3-030-21607-8.

Furht, Borko, toimittanut. 2008. ”Immersive Virtual Reality”. Teoksessa *Encyclopedia of Multimedia*, 345–346. Boston, MA: Springer US. ISBN: 978-0-387-78414-4. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78414-4_85.

Guna, Jože, Grega Jakus, Matevž Pogačnik, Sašo Tomažič ja Jaka Sodnik. 2014. ”An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion Sensor and Its Suitability for Static and Dynamic Tracking”. *Sensors* 14, numero 2 (helmikuu): 3702–3720. <https://doi.org/10.3390/s140203702>.

”Hand Tracking Privacy Notice”. 2022. Viitattu 11. helmikuuta 2022. <https://support.oculus.com/articles/accounts/privacy-information-and-settings/hand-tracking-privacy-notice>.

Hassenzahl, Marc, ja Noam Tractinsky. 2006. ”User experience - a research agenda”. *Behaviour & Information Technology* 25, numero 2 (maaliskuu): 91–97. Viitattu 16. maaliskuuta 2022. <https://doi.org/10.1080/01449290500330331>.

”Hi5 VR Glove Business Edition | Hi5 VR Glove”. 2022. Viitattu 22. helmikuuta 2022. <https://hi5vrglove.com/store/hi5glove>.

”How Hand Tracking Works”. 2020, 3. syyskuuta 2020. Viitattu 4. helmikuuta 2022. <https://www.ultraleap.com/company/news/blog/how-hand-tracking-works/>.

Jin, Haiyang, Qing Chen, Zhixian Chen, Ying Hu ja Jianwei Zhang. 2016. ”Multi-LeapMotion sensor based demonstration for robotic refine tabletop object manipulation task”. *CAAI Transactions on Intelligence Technology* 1, numero 1 (tammikuu): 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.trit.2016.03.010>.

Khundam, Chaowanan, Varunyu Vorachart, Patibut Preeyawongsakul, Witthaya Hosap ja Frédéric Noël. 2021. ”A Comparative Study of Interaction Time and Usability of Using Controllers and Hand Tracking in Virtual Reality Training”. *Informatics* 8, numero 3 (syyskuu): 60. Viitattu 3. maaliskuuta 2022. <https://doi.org/10.3390/informatics8030060>.

- Kim, Heonmoo, ja Yosoon Choi. 2019. "Performance Comparison of User Interface Devices for Controlling Mining Software in Virtual Reality Environments". *Applied Sciences* 9 (kesäkuu): 2584. <https://doi.org/10.3390/app9132584>.
- Li, Yang, Jin Huang, Feng Tian, Hong-An Wang ja Guo-Zhong Dai. 2019. "Gesture interaction in virtual reality". *Virtual Reality & Intelligent Hardware* 1, numero 1 (helmikuu): 84–112. <https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0006>.
- Liu, Hangxin, Zhenliang Zhang, Xu Xie, Yixin Zhu, Yue Liu, Yongtian Wang ja Song-Chun Zhu. 2019. "High-Fidelity Grasping in Virtual Reality using a Glove-based System". Teoksessa *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5180–5186. Toukokuu. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794230>.
- Masurovsky, Alexander, Paul Chojecki, Detlef Runde, Mustafa Lafci, David Przewozny ja Michael Gaebler. 2020. "Controller-Free Hand Tracking for Grab-and-Place Tasks in Immersive Virtual Reality: Design Elements and Their Empirical Study". *Multimodal Technologies and Interaction* 4, numero 4 (joulukuu): 91. <https://doi.org/10.3390/mti4040091>.
- Pacchierotti, Claudio, Gionata Salvietti, Irfan Hussain, Leonardo Meli ja Domenico Prattichizzo. 2016. "The hRing: A wearable haptic device to avoid occlusions in hand tracking". Teoksessa *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, 134–139. Huhtikuu. <https://doi.org/10.1109/HAPTICS.2016.7463167>.
- Rakkolainen, Ismo, Antti Sand ja Roope Raisamo. 2019. "A Survey of Mid-Air Ultrasonic Tactile Feedback". Teoksessa *2019 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, 94–944. Joulukuu. <https://doi.org/10.1109/ISM46123.2019.00022>.
- Rautaray, Siddharth S., ja Anupam Agrawal. 2015. "Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: a survey". *Artificial Intelligence Review* 43, numero 1 (tammi-kuu): 1–54. Viitattu 10. huhtikuuta 2022. <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9356-9>.
- Rehg, James M., ja Takeo Kanade. 1994. "Visual tracking of high DOF articulated structures: An application to human hand tracking". Teoksessa *Computer Vision — ECCV '94*, toimittanut Jan-Olof Eklundh, 35–46. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-48400-4. <https://doi.org/10.1007/BFb0028333>.

- Sherman, William R., ja Alan B. Craig. 2018. *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. Second Edition. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. Boston: Morgan Kaufmann. ISBN: 978-0-12-800965-9.
- Sturman, David J, ja David Zeltzer. 1994. "A survey of glove-based input". *IEEE Computer graphics and Applications* 14 (1): 30–39. <https://doi.org/10.1109/38.250916>.
- Tanjung, K, F Nainggolan, B Siregar, S Panjaitan ja F Fahmi. 2020. "The Use of Virtual Reality Controllers and Comparison Between Vive, Leap Motion and Senso Gloves Applied in The Anatomy Learning System". *Journal of Physics: Conference Series* 1542, numero 1 (toukokuu): 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1542/1/012026>.
- Varga, Scott. 2022. "Haptic technology for VR and robotics - Tactile, force, and motion". Viitattu 19. helmikuuta 2022. <https://haptx.com/technology/>.
- "Hand Tracking". 2022. Viitattu 11. huhtikuuta 2022. <https://developer.varjo.com/docs/get-started/hand-tracking>.
- Weichert, Frank, Daniel Bachmann, Bartholomäus Rudak ja Denis Fisseler. 2013. "Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller". *Sensors* 13, numero 5 (toukokuu): 6380–6393. <https://doi.org/10.3390/s130506380>.
- Voigt-Antons, Jan-Niklas, Tanja Kojic, Danish Ali ja Sebastian Möller. 2020. "Influence of Hand Tracking as a Way of Interaction in Virtual Reality on User Experience". Teoksessa *2020 Twelfth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, 1–4. Toukokuu. <https://doi.org/10.1109/QoMEX48832.2020.9123085>.
- Zhao, Jingbo, ja Robert S. Allison. 2020. "Comparing head gesture, hand gesture and gamepad interfaces for answering Yes/No questions in virtual environments". *Virtual Reality* 24, numero 3 (syyskuu): 515–524. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00416-7>.