

Ella Junttari

**Virtuaalitodellisuuden vuorovaikutustekniikat ja
käytettävyys**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

11. toukokuuta 2020

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Ella Junttari

Yhteystiedot: ella.m.junttari@student.jyu.fi

Ohjaaja: Antti-Jussi Lakanen

Työn nimi: Virtuaalitodellisuuden vuorovaikutustekniikat ja käytettävyys

Title in English: Virtual reality interaction techniques and usability

Työ: Kandidaatintutkielma

Sivumäärä: 24+0

Tiivistelmä: Tutkielmassa tarkastellaan erilaisia virtuaalitodellisuuden vuorovaikutustekniikoita ja näiden vaikutusta käyttökokemukseen. Lähteenä käytetään erilaisia akateemisia artikkeleita, erityisesti tutkielman pohjana toimii Mark R. Minen artikkeli "Virtual environment interaction techniques". Tutkimustuloksia vertaillessa huomattiin erityisesti eri vuorovaikutustekniikoiden sekoittamisen tärkeys. Lisäksi esiin nousi erilaisten vaihtoehtojen tarjoamisen hyödyllisyys käytettävyyden näkökulmasta.

Avainsanat: kandidaatintutkielmat, virtuaalitodellisuus, käytettävyys, vuorovaikutus tekniikat

Abstract: In this thesis we take a look at the different interaction techniques that can be used with virtual reality. The sources are predominantly academic papers, the article "Virtual environment interaction techniques" by Mark R. Mine was used as a base for the thesis. Some of the most notable findings from comparing the results of different studies and research projects included the importance of mixing different interaction techniques and giving the user multiple options when possible to improve the usability of the interface.

Keywords: virtual reality, usability, interaction techniques

Termiluettelo

VR	Virtuaalitodellisuus
HMD	Virtuaalitodellisuuslasit (Head mounted display)
AR	Lisätty todellisuus (Augmented reality)
AV	Lisätty virtuaalisuus (Augmented virtuality)

Sisältö

1	JOHDANTO	1
2	VIRTUAALITODELLISUUS	2
2.1	Yleistä virtuaalitodellisuudesta	2
2.2	Teknologia	2
2.2.1	Ulostulolaitteet	3
2.2.2	Sisääntulolaitteet	3
2.3	Vuorovaikutuksen perusmuodot	4
3	KÄYTETTÄVYYS JA SEN ARVIOINTI VIRTUAALITODELLISUUDESSA	5
3.1	Yleistä käytettävyydestä	5
3.2	Sutcliffen ja Kaurin metodi virtuaalitodellisuuden käytettävyyden arviointiin	6
3.3	Sutcliffen ja Gaultin heurestiikat	7
4	VIRTUAALITODELLISUUDEN VUOROVAIKUTUSTEKNIIKAT	9
4.1	Suora vuorovaikutus	9
4.1.1	Liikkeen tunnistus	9
4.1.2	Osoitus	10
4.1.3	Eleet	11
4.1.4	Katseen suuntaus	12
4.2	Fyysiset kontrollit	13
4.2.1	Ohjaimet	14
4.2.2	Hiiret	14
4.2.3	Näppäimistöt	14
4.2.4	Muut ohjaimet	15
4.3	Virtuaaliset kontrollit	15
4.3.1	Tehostettu todellisuus	16
5	YHTEENVETO	18
	LÄHTEET	19

1 Johdanto

Tässä tutkielmassa käsitellään virtuaalitodellisuutta hyödyntävien applikaatioiden käytettävyyttä sekä käyttökokemusta ja erilaisten vuorovaikutustekniikoiden vaikutusta tähän. Koska tutkielman muotona on kirjallisuuskatsaus, tehdään aiheen käsittely kokoamalla yhteen tutkimustuloksia eri lähteistä ja pohtimalla mitä näistä voidaan oppia. Tavoitteena on käsitellä erilaisia vuorovaikutustekniikoita ja näihin sisältyviä teknologioita, näiden positiivisia ja negatiivisia аспекteja ja vaikutusta käyttökokemukseen.

Johdannon jälkeen esitellään lyhyesti virtuaalitodellisuus käsitteenä ja käydään läpi sen historiaa ja yleisiä teknologioita. Kolmannessa luvussa avataan käytettävyyttä ja pohditaan, miten sen arviointi poikkeaa perinteisten graafisten käyttöliittymien arvioinnista. Lisäksi käydään läpi muutamia metodeja virtuaalitodellisuuden käytettävyyden arviointiin. Neljännessä luvussa käsitellään virtuaalitodellisuuden vuorovaikutustekniikoita. Luku on jaettu kolmeen alalukuun pohjaten Minen 1995 määrittelemiin vuorovaikutuksen kategorioihin. Lopuksi yhteenvedossa pohditaan, mitä tutkimuksesta opittiin ja millaisia päätelmiä tämän perusteella voidaan tehdä.

2 Virtuaalitodellisuus

2.1 Yleistä virtuaalitodellisuudesta

Virtuaalitodellisuus eli VR voidaan määritellä monella tapaa. Sherman ja Craig antavat kirjassaan "Understanding virtual reality: Interface, application, and design" seuraavan määritelmän:

Virtuaalitodellisuus rakentuu interaktiivisista tietokonesimulaatioista, jotka tunnistavat käyttäjän asennon ja toiminnot ja korvaavat tai muokkaavat palautetta yhdelle tai useammalle aistille, antaen tunteen immersioista tai paikalla olosta simulaatioissa.

Voidaan siis sanoa virtuaalitodellisuuden olevan tietokonesimulaatio, jossa käyttäjä voi vuorovaikuttaa ympäristönsä kanssa. Lisäksi virtuaalitodellisuus vaatii jonkinlaisen teknologisen alustan, jonka välityksellä sitä käytetään, esimerkiksi VR lasit. Kaikki virtuaalitodellisuusjärjestelmät eivät ole pääasiassa visuaalisia, mutta tässä tutkielmassa käsitellään erityisesti visuaalisuuteen pohjaavia virtuaalisia ympäristöjä. (Sherman ja Craig 2018)

Perinteisen virtuaalitodellisuuden lisäksi on olemassa myös tehostettu todellisuus, joka sisältää lisätyn todellisuuden (AR) ja lisätyn virtuaalisuuden (AV). Lisätyssä todellisuudessa todelliseen ympäristöön lisätään virtuaalisia elementtejä, kun taas lisätyssä virtuaalisuudessa virtuaaliseen ympäristöön lisätään elementtejä oikeasta ympäristöstä.

2.2 Teknologia

Tällä hetkellä virtuaalitodellisuusteknologian kehittyminen tapahtuu erittäin nopeasti. Yleisin virtuaalisten ympäristöjen toteutukseen käytettävä teknologia ovat pitkään olleet HMD:t (head mounted displays) eli virtuaalitodellisuuslasit, mutta perinteisen HMD teknologian ohelle on kehitetty muun muassa ohjaimia, suuntaamattomia juoksumattoja, optisia skanneriteita sekä liivejä ja muita kosketuspalautetta hyödyntäviä laitteita,. (Anthes ym. 2016)

Käsitellään tässä pääasiassa teknologian kategorioita, ja myöhemmin ohjaimista puhuttaessa

tarkemmin tiettyjä laitteita.

VR laitteisto voidaan jakaa sisään- ja ulostulo laitteisiin. Suurimmassa osassa tapauksista kyseessä on kuitenkin näiden kahden hybridi- eli yhdistelmälaite.

2.2.1 Ulostulolaitteet

Ulostulo- eli output laitteisiin kuuluvat kaikki laitteet jotka tuovat palautetta virtuaalisesta ympäristöstä käyttäjälle, eli esimerkiksi kosketuspalautelaitteet ja eri aisteja hyödyntävät laitteet. Myös virtuaalitodellisuuslasit voidaan lukea ulostulolaitteisiin vaikka ne useimmiten ovat lähempänä hybridilaitteita. (Anthes ym. 2016)

Virtuaalitodellisuuslasit voidaan jakaa kahteen kategoriaan; langattomiin ja langallisiin laitteisiin. Langattomiin HMD laitteisiin lukeutuvat muun muassa mobiilipuhelimien kanssa käytettävät lasit sekä HMD:t jotka eivät vaadi erikseen tietokonetta tai pelikonsolia vaan sisältävät itsessään koko järjestelmän. (Anthes ym. 2016)

Kosketuspalautetta hyödyntäviä laitteita esiintyy monessa muodossa. Näihin kuuluvat esimerkiksi liivit sekä kontrollerit jotka toimivat hybridilaitteina hyödyntäen teknologiaa sekä sisään- että ulostulo laitteista. Lisäksi ulostulolaitteisiin lukeutuu myös muu useita aisteja hyödyntävä teknologia. (Anthes ym. 2016)

2.2.2 Sisääntulolaitteet

Sisääntulo- eli input laitteet voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan: ohjaimiin, navigointi laitteisiin, sekä liikkeentunnistusteknologiaan. Monet ohjaimet kuitenkin hyödyntävät myös ulostulolaitteiden tekniikoita, esimerkiksi värinäefektejä. (Anthes ym. 2016)

Navigointilaitteet auttavat käyttäjää liikkumaan virtuaalisessa ympäristössä ja antaen samalla tunteen liikkumisesta, toisin kuin perinteisellä ohjaimella navigointi. Tämä voi tapahtua esimerkiksi suuntaamattomien juoksumattojen, kuten The Space Walker VR:n ja WalkMouse:n avulla. (Anthes ym. 2016) Erilaisia ohjaimia ja liikkeentunnistusta käsitellään tarkemmin tutkielman neljännessä luvussa.

2.3 Vuorovaikutuksen perusmuodot

Virtuaalitodellisuuden vuorovaikutus koostuu pääasiassa neljästä perusmuodosta: liikkumisesta, valinnasta, objektien manipuloinnista sekä skaalauksesta. (Mine 1995) Jokainen näistä voidaan toteuttaa useilla eri tavoilla, hyödyntäen erilaista tekniikkaa. Lisäksi näillä on eri vaatimukset käytettävältä teknologialta. Käydään läpi muutamia tärkeimpiä huomioon otettavia seikkoja.

Liikkumista implementoitaessa täytyy ottaa huomioon miten liikkeen suunta ja nopeus määritetään. Valinnassa täytyy ottaa huomioon onko valittava objekti käyttäjän ulottuvilla virtuaalisessa ympäristössä, vai onko se kaukana. Lisäksi täytyy päättää, käytetäänkö valitsemiin esimerkiksi ohjainta vai katsetta. Objektia manipuloitessa tarvitaan kolme parametria, sijainnin muutos, orientaation muutos sekä rotaation muutos. Skaalauksessa parametreina toimivat skaalauksen keskipiste sekä skaalauksen kerroin. Sekä manipulaation että skaalauksen yhteydessä täytyy myös päättää, toteutetaanko manipulaatio fyysisillä kontrollereilla vai esimerkiksi virtuaalisessa ympäristössä näytettävillä painikkeilla tai liukusäätimillä. (Mine 1995)

Virtuaalitodellisuuden käyttöjärjestelmää suunniteltaessa täytyykin ottaa huomioon, millaisilla kontrolleilla saadaan aikaan mahdollisimman kattava mutta helppokäyttöinen ohjelma.

3 Käytettävyys ja sen arviointi virtuaalitodellisuudessa

3.1 Yleistä käytettävyydestä

Tutkielman tavoitteena on käsitellä erilaisten virtuaalitodellisuuden käytettävien teknologioiden hyviä ja huonoja puolia käytettävyyden näkökulmasta. Tästä syystä on tärkeää avata hieman käytettävyyttä käsitteenä, sekä pohtiakuinka käytettävyyttä voidaan arvioida juuri virtuaalitodellisuuden yhteydessä.

Käytettävyys terminä tarkoittaa kykyä suorittaa tehtäviä tehokkaasti, toimivasti ja tyydyttävästi. Mitä paremmin ihmiset käyttäjät osaavat suorittaa tehtävän ja mitä tyytyväisempiä he ovat, sitä parempi on käytettävyys. (Marsh 1999) Käytettävyys ja käyttäjäkokemus ovat osa laajempaa ihmisen ja tietokoneen välistä vuorovaikutusta eli HCI:tä (human-computer interaction). HCI on tieteenala, joka yhdistää tietotekniikkaa ja kognitiotiedettä. Käytettävyystekniikka eli usability engineering hyödyntää vahvasti HCI -alan tutkimusta. (Rosson, Carroll ja Hill 2002)

Jotta käyttöliittymän ja vuorovaikutuksessa hyödynnettävien tekniikoiden käytettävyyttä voidaan arvioida paremmin, käytetään apuna Cabralin ym. ideaalisen käyttöliittymän määrittelmää:

Helppokäyttöisen käyttöliittymän tulisi olla helppo oppia, antaa kokeneille käyttäjille mahdollisuus suorittaa tehtävänsä tehokkaasti ja uusille käyttäjille mahdollisuus uudelleen käyttää käyttöjärjestelmää joutumatta opettelemaan ulkoa komentoja.

(Cabral, Morimoto ja Zuffo 2005)

Perinteisten graafisten käyttöliittymien ja virtuaalisten ympäristöjen käyttöliittymien välillä on paljon eroavaisuuksia, joka johtaa siihen, etteivät samat suunnittelu- ja arviointimetodit jotka pätevät perinteisiin käyttöliittymiin todennäköisesti ole yhteensopivia virtuaalisten ympäristöjen kanssa. (Abrás, Maloney-Krichmar, Preece ym. 2004) Käydään läpi kaksi virtuaalitodellisuuden käytettävyyden arvioinnissa hyödynnettävää metodia, joita voimme hyö-

dyntää vuorovaikutustekniikoita tarkasteltaessa.

3.2 Sutcliffen ja Kaurin metodi virtuaalitodellisuuden käytettävyyden arviointiin

Käydään lyhyesti läpi Sutcliffen ja Kaurin metodi virtuaalitodellisuuden käytettävyyden arviointiin. On otettava huomioon, että kyseinen artikkeli on kirjoitettu vuonna 2000 joten kaikki artikkelissa käsiteltävät aiheet eivät välttämättä ole ajankohtaisia nykyaikaisesta virtuaalitodellisuusteknologiasta puhuttaessa. Pääpiirteissään artikkelin esittämät menetöt käytettävyyden arviointiin ovat kuitenkin yleispäteviä ja täten käytettävissä myös tämän tutkielman kontekstissa. Toinen huomioon otettava seikka on, että kyseinen malli on suunniteltu käytettäväksi pääasiassa työpöytä (desktop) virtuaalitodellisuudelle, mutta tutkijoiden mukaan osa suosituksista pätee myös immersiiivisemmälle virtuaalitodellisuudelle. (Sutcliffe ja Kaur 2000)

Sutcliffen ja Kaurin metodi perustuu kolmen syklin mallille.

- 1. Tehtävä pohjainen toiminta
- 2. Tutkiminen ja navigointi
- 3. Vuorovaikutus reaktiona järjestelmän aloitteeseen

Tehtävä pohjaisessa toiminnassa käyttäjän pyrkimyksenä on saavuttaa jokin tietty tavoite. Toisessa syklissä tavoitteena on yksinkertaisesti navigoida virtuaalisessa ympäristössä. Joskus navigointi voi kuitenkin olla myös tehtävä pohjaista, jolloin tämä lasketaan ensimmäiseen sykliin. Kolmantena kategoriana järjestelmän aloite, jolloin käyttäjän tavoitteena on tulkita käyttäjärjestelmän toimintoja ja reagoida näihin. (Sutcliffe ja Kaur 2000)

Arviointimetodi itsessään koostuu jokaiseen sykliin kohdistetuista listoista kysymyksiä, joiden avulla voidaan tuoda esille puutteita järjestelmän käytettävyydessä. Suuri osa kysymyksistä käsittelee laajemmin virtuaalisen ympäristön suunnittelua, mutta osa näistä pätee myös vuorovaikutustekniikoihin. Esimerkiksi navigointi sykliin liittyy kysymys ”Voiko käyttäjä suorittaa liikkumis ja navigointi toimintoja”. Jos käyttäjä ei esimerkiksi tiedä oikeita eleitä liikkeen suorittamiseen, tulee tälle tarjota harjoitusta tai esimerkki toiminnasta. (Sutcliffe ja

Kaur 2000)

3.3 Sutcliffen ja Gaultin heurestiikat

Toinen Sutcliffen artikkeli aiheeseen liittyen on vuodelta 2004 ja käsittelee virtuaalitodellisuus applikaatioiden heuristista arviointia. Sutcliffe ja Gault määrittelevät artikkelissa kaksitoista heuristiikkaa. (Sutcliffe ja Gault 2004)

- 1. Luonnollisuus
- 2. Yhteensopivuus käyttäjän tehtävän ja ympäristön kanssa
- 3. Käyttäjän toiminnan ilmaisun luontevuus
- 4. Läheinen koordinaatio käyttäjän toimintojen ja niiden virtuaalisen ilmaisun välillä
- 5. Todenmukainen palaute
- 6. Todenmukainen näkökulma
- 7. Navigoinnin ja orintaation tuki
- 8. Selkeä sisään- ja ulospääsy virtuaalisesta ympäristöstä
- 9. Poikkeavuuksien johdonmukaisuus
- 10. Oppimisen tukeminen
- 11. Selkeät vuorot käyttäjän ja järjestelmän aloitteessa
- 12. Läsnäolon kokemus

Käytetään erityisesti näitä heurestiikkoja pohjana käytettävyyden määrittelylle eri vuorovaikutustekniikoiden yhteydessä. Erityisesti kiinnitetään huomiota heurestiikkoihin 1-6, sillä heurestiikat 7-12 liittyvät vahvemmin käyttöliittymän suunnitteluun, jota ei käsitellä tässä tutkielmassa. Avataan hieman käsiteltävien heurestiikkojen merkitystä. (Sutcliffe ja Gault 2004)

Luonnollisuus heurestiikkana tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että virtuaalisen vuorovaikutuksen tulisi mukailla mahdollisimman hyvin oikean maailman vuorovaikutusta, eli ideaalissa käyttöliittymässä tämä olisi niin todellisentuntuista ettei käyttäjä kykenisi tunnistamaan ympäristöään virtuaaliseksi. Tähän liittyy myös toinen heurestiikka, eli yhdensopivuus käyttäjän suorittamien tehtävien ja ympäristön kanssa. Tällä tarkoitetaan sitä, että virtuaalisen ympäristön ja tässä sijaitsevien objektien tulisi olla mahdollisimman lähellä käyttäjän odo-

tuksia oikean maailman objekteista. (Sutcliffe ja Gault 2004)

Kolmas heurestiikka eli käyttäjän toiminnan ilmaisun luontevuus tarkoittaa, että käyttäjän virtuaalisen representaation tulisi pystyä toimimaan ja liikkumaan mahdollisimman luonnollisesti eikä tämän tulisi rajoittaa normaalia liikettä. Neljäntenä käyttäjän hahmon ja toimintojen virtuaalisen manifestaation tulisi olla mahdollisimman lähellä todellisuutta. Sutcliffe ja Gault määrittelevät ideaaliseksi reaktioajaksi alle 200 ms, jolloin voidaan välttää pahoinvointia. (Sutcliffe ja Gault 2004)

Todenmukaisella palautteella tarkoitetaan, että käyttäjän toiminnan seurausten tulisi olla heti näkyviä ja seurata fysiikan lakeja sekä käyttäjän oletuksia. Todenmukaisella näkökulmalla taas tarkoitetaan sitä, että virtuaalisen ympäristön visuaalisen representaation tulisi mukailla mahdollisimman hyvin käyttäjän normaalia näkökenttää ja näkökulman muutoksissa ei tulisi olla viivettä. (Sutcliffe ja Gault 2004)

Seitsemäs heurestiikka on navigaation ja orientaation tuki, eli käyttäjän tulisi aina pystyä löytämään missä hän on virtuaalisessa ympäristössä ja kyetä palaamaan valmiiksi määriteltyyn tunnettuun asentoon. (Sutcliffe ja Gault 2004)

Näistä määritelmistä voidaan huomata, että iso osa tästä ideaalista on yhä lähes tavoittamattomissa. On siis tärkeää ottaa huomioon etteivät nämä heurestiikat ole sääntöjä, vaan neuvoja siitä, mihin suuntaan virtuaalitodellisuus applikaatiota voidaan viedä käytettävyyden parantamiseksi. Joskus voi myös olla tarpeellista jättää joitain heurestiikkoja huomioimatta joko kokonaan tai hetkellisesti; esimerkiksi perus asentoon palaamiseksi voi olla tarpeellista antaa käyttäjän avatarin liikkua läpi ympäristössä sijaitsevista objekteista vaikka tämä rikkoo joitain muista heurestiikoista. (Sutcliffe ja Gault 2004)

4 Virtuaalitodellisuuden vuorovaikutustekniikat

Implementoitaessa VR applikaatioon virtuaalisen ympäristön ja käyttäjän välistä vuorovaikutusta, voidaan hyödyntää lukuisia tekniikoita. Käytetään näiden jakamiseen pohjana Mark R. Minen määrittelemiä kategorioita jakamalla tekniikat suoraan vuorovaikutukseen, fyysiseen vuorovaikutukseen ja virtuaalisiin kontroleihin. (Mine 1995) Tarkastellaan lähemmin millaisia teknologioita jokaiseen kategoriaan kuuluu, ja mitä erityisiä huomioonotettavia asioita näissä ilmenee. Pohditaan erityisesti, millaisia hyviä ja huonoja puolia näihin teknologioihin liittyy käyttäjän ja käyttöliittymän välisessä vuorovaikutuksessa, käyttäen apuna edellisessä luvussa määriteltyjä metodeja virtuaalitodellisuuden käytettävyyden arviointiin.

4.1 Suora vuorovaikutus

Suora vuorovaikutus koostuu sellaisista vuorovaikutuksen muodoista, joissa käyttäjä ohjaa kehollaan toimintaansa virtuaalisessa ympäristössä. Erityisen tärkeää tällaisissa vuorovaikutuksen muodoissa on luontainen intuitiivisuus käyttäjän toiminnan ja tästä johdettavan virtuaalisen toiminnan välillä. Yleisimmin suora vuorovaikutus tapahtuu ohjaamalla käyttöliittymää käsien ja/tai pään liikkeiden avulla. (Mine 1995)

4.1.1 Liikkeen tunnistus

Liikkeentunnistus on suosittu vuorovaikutuksen muoto virtuaalitodellisuuden yhteydessä intuitiivisuutensa ja tämän mahdollistaman immersion ansiosta. Lisäksi sitä hyödynnetään laajasti myös virtuaalitodellisuuden ulkopuolella, esimerkiksi videopeleissä sekä elokuvien ja animaation yhteydessä.

Liikkeentunnistusta hyödyntävät käyttöliittymät voidaan jakaa kahteen kategoriaan; fyysisesti käytettäviin ja kosketusvapaisiin käyttöliittymiin. Fyysisesti käytettäviin lukeutuvat erityisesti puettava teknologia ja ohjaimet, esimerkiksi Nintendon WiiMote. Kosketusvapaat käyttöliittymät toimivat useimmiten optisen liikkeentunnistuksen avulla, eli käyttäjän liikkumista seurataan päällä pidettävien sensoreiden sijaan kameralla. Eräs tunnetuimmista, täysin kosketusvapaata käyttöliittymää hyödyntävistä laitteista on Microsoft Kinect. Vaikka Kinect-

tin kehitys on lakkautettu, on markkinoilla useita muita optisia liikkeentunnistimia, kuten OptiTrack, jota voidaan hyödyntää virtuaalitodellisuuden ohella myös muun muassa animaatioissa. (Coelho ja Verbeek 2014)

Viimeaikoina on kehitetty myös paljon uusia, erityisesti virtuaalitodellisuuteen suunnattuja liikkeentunnistulaitteita. Näihin lukeutuvat fyysinen, Oculus Riftin kanssa yhteensopiva, optinen käsien liikkeentunnistaja Leap Motion sekä kosketusvapaassa kategoriassa muun muassa käsien elektronisia signaaleja tunnistava ranneke Myo sekä Glove One datahanskat. (Anthes ym. 2016)

Liikkeentunnistuksessa käytettävyyttä edistävät erityisesti luonnollisuus, käyttäjän toiminnan ilmaisun luontevuus digitaalisessa ympäristössä sekä läsnäolon kokemus. Puutteelliseksi voi kuitenkin jäädä erityisesti kosketuspalaute, ellei tunnistuksessa käytetä apuna ohjaimia tai puettavaa teknologiaa.

4.1.2 Osoitus

Osoitus vuorovaikutustekniikkana liittyy monella tapaa liikkeentunnistukseen, sillä tähän käytetään usein samoja teknologioita kuin myös laajemmassa liikkeentunnistuksessa. Osoituksessa erona on kuitenkin tähän vaadittava tarkkuus, joka tuo erilaisia haasteita. Lisäksi osoitus voi tapahtua muillakin tavoilla kuin liikkeentunnistuksena. Lisäksi osoituksen käyttökohteet ovat suppeammat. Osoitus voi kuitenkin olla hyödyllinen vuorovaikutustapa esimerkiksi ympäristössä navigointiin, objektien valitsemiseen tai vaikka virtuaalisella näppäimistöllä kirjoittamiseen. (Coelho ja Verbeek 2014)

Eräs yleisimmistä osoittamiseen käytettävistä teknologioista ovat ohjaimet. Useimmiten ohjain pidetään kädessä ja tällä osoitetaan kohdetta näytöllä tai ympäristössä. Toinen tapa osoittamiseen on hiiren käyttö, joka ei ole virtuaalitodellisuuden yhteydessä kovin yleistä, mutta tarjoaa nopeutensa ja tarkkuutensa ansiosta monia etuja. Hiirtä käyttäessä jää kuitenkin kokemuksesta usein puuttumaan todenmukaisuus ja immersio, sekä yhteneväisyyden toteuttaminen käyttäjän toiminnan ja digitaalisen toiminnan välillä voi olla hankalaa toteuttaa hyvin. Kolmantena osoittamisen muotona mainittakoon suora käsillä osoittaminen, joka voi tapahtua esimerkiksi datahanskojen tai optisen liikkeentunnistuksen välityksellä. (Coelho ja

Verbeek 2014)

Osoituksen käytettävyys riippuu paljon siitä, mihin osoitusta käytetään. Esimerkiksi kirjoittaminen osoituksella on usein erittäin turhauttavaa ja huonontaa käyttökokemusta, kun taas objektien valintaan osoitus on erinomainen vaihtoehto tarkkuutensa vuoksi. Myös käytettävä ohjain tai ohjaimen puuttuminen vaikuttavat käyttökokemukseen. Kuten mainittu, hiiren käyttö voi vaikuttaa negatiivisesti immersioon, kun taas ohjaimettoman osoituksen tarkkuus on huomattavasti huonompi. (Coelho ja Verbeek 2014)

4.1.3 Eleet

Ele-pohjaiset käyttöjärjestelmät käyttävät myös apunaan liikkeentunnistusta. Tässä tapauksessa kuitenkin järjestelmä tulkitsee käyttäjän liikettä ja etsii tästä määrättyjä liikeratoja, jotka muutetaan symboleiksi, joita käyttämällä voidaan viedä informaatiota laitteille ja ohjelmalle. (Cabral, Morimoto ja Zuffo 2005) Käyttäjän liikettä ei siis välttämättä muuteta virtuaaliseen muotoon, vaan komennot määräävät mitä virtuaalisessa ympäristössä tapahtuu. Esimerkki eleestä voisi olla vaikka kirjaimen ”M” piirtäminen ilmaan, joka komentona avaisi ohjelman valikon eli menun. Eleitä voidaan tunnistaa esimerkiksi puettavien laitteiden tai liikettä tunnistavien kameroiden avulla. (Cabral, Morimoto ja Zuffo 2005)

Ele-pohjaisella käyttöjärjestelmällä voidaan eliminoida tarve osoittamiseen käytettävillä ohjaimilla, jolloin voidaan säästää käyttäjältä vuorovaikutukseen kuluva vaivaa ja aikaa. (Cabral, Morimoto ja Zuffo 2005) Lisäksi tällaiset käyttöjärjestelmät ovat hyvin luonnollisia ja intuitiivisia, hyödyllisiä erityisesti usean käyttäjän applikaatioissa, sekä nopeuttavat esimerkiksi ympäristöön sulautettujen resurssien saatavuutta. (Cabral, Morimoto ja Zuffo 2005)

Nielsen ym. listaavat seuraavat ohjeet, joiden avulla voidaan rakentaa hyvä ele pohjainen käyttöjärjestelmä rasittamatta käyttäjää liikaa:

- 1. Vältä ulkonevia asentoja
- 2. Rentouta lihakset
- 3. Rento neutraali asento ulkonevien asentojen välillä
- 4. Vältä toistoa
- 5. Vältä yhdessä asennossa pysymistä

- 6. Vältä sisäistä ja ulkoista voimaa nivelille, sillä tämä voi estää kehon nesteiden kiertoa (Nielsen 1994)

Ele-pohjaisella käyttöliittymällä voidaan toteuttaa suurin osa Sutcliffen ja Gaudin heurestii-koista, tosin puuttumaan voi jäädä esimerkiksi koordinaatio käyttäjän toimintojen ja niiden virtuaalisen ilmaisun välillä. Lisäksi oppimisen tukeminen on tärkeässä osassa. Eleiden kannattaa olla yksinkertaisia ja helppoja muistaa, sekä lisäksi voi olla hyödyllistä pitää helposti saavutettavissa listaa erinäisistä eleistä siltä varalta, että käyttäjä unohtaa millä eleellä jokin toiminto suoritetaan.

Eleiden käyttö voi kuitenkin olla fyysisesti rasittavaa ja se saattaisikin olla parempi vapaa-valintaisena vaihtoehtona osoittimille. Lisäksi yksinkertaisten eleiden suorittamiseen kuluva aika on huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi hiirtä käytettäessä. (Cabral, Morimoto ja Zuffo 2005) Verrataan esimerkiksi objektin valintaa käyttäen hiiren osoitinta, ja objektista kiinnittämistä vapaassa 3D-ympäristössä. Hiirellä toimintoon käytetään pieniä, nopeita lihaksia kun taas eleillä tähän käytetään paljon suurempia ja hitaampia lihaksia, sillä eleiden suorittaminen vaatii usein huomattavasti laajempia käden liikkeitä. (Argelaguet ja Andujar 2013)

4.1.4 Katseen suuntaus

Katseen suuntausta tulkitsevia teknologioita hyödyntävät HMD:t ovat yleistyneet viime aikoina, erityisesti HMD-teknologian kehityksen myötä. (Piumsomboon ym. 2017) Erona muihin vuorovaikutuksen tekniikoihin on se, että katsepohjaisessa järjestelmässä tietokone tulkitsee käyttäjän toimintaa sen sijaan että odottaisi suoraa komentoa. (Tanriverdi ja Jacob 2000) Aiheesta aiemmin tehty tutkimus viittaisi siihen, että hyvin toteutettu katsepohjainen vuorovaikutus virtuaalitodellisuudessa voisi olla tehokkaampaa kuin esimerkiksi osoitukseen pohjaava vuorovaikutus. (Piumsomboon ym. 2017)

Katsepohjaisen käyttöjärjestelmän käyttö on usein nopeampaa kuin osoittamiseen pohjautuvan, tosin Tanriverdin ym. tutkimuksessa esiin nousi mielenkiintoinen haittavaikutus, jossa käyttäjät eivät muistaneen objektien sijainteja läheskään yhtä hyvin kuin osoitusta vaativaa käyttöjärjestelmää käyttäessä. Käyttäjät selittivät ”vain katselleensa” ympäristöään samalla

tapaa kuin virtuaalitodellisuuden ulkopuolellakin. (Tanriverdi ja Jacob 2000)

Lisäksi tällaisen käyttöjärjestelmän käytettävyyttä arvioitaessa nousee esille erilaisten toimintojen suorittaminen. Erityisen hyödyllistä katseen suuntaus on navigoinnin ja objektien valinnan yhteydessä, mutta monimutkaisemmat tehtävät voi olla haastavaa toteuttaa. Lisäksi liikkeen puutteen voisi olettaa vaikuttavan immersion ja läsnäolon tunteeseen. Jos käyttöliittymä vaatii liikaa luonnottomia silmän liikkeitä, voi tästä seurata väsymystä ja silmien räsytystä. Tämän ohella liian monimutkaisten kontrollien oppiminen voi vaatia liian pitkän ajan. Luontaiset silmänliikkeet voidaan jakaa neljään kategoriaan:

- nopeisiin liikkeisiin, joilla on selkeä kohde
- tasaiseen liikkeeseen seuraten liikkuvaa kohdetta
- luontaiseen liikkeeseen, joka tapahtuu kun päätä liikutetaan katseen kohteen pysyessä paikallaan, ja
- liikkeeseen, joka tapahtuu kun katsotaan kohteita eri etäisyyksillä

(Piumsomboon ym. 2017)

Paras käytettävyys saavutetaan yhdistelemällä näitä liiketyyppejä tavalla, joka väsyttää käyttäjää mahdollisimman vähän.

Erityisenä etuna katseeseen pohjaavalla käyttöliittymällä on kuitenkin sen käytön esteettömyys. Hyvänä esimerkkinä voidaan pitää Iso Britannialaisen hyväntekeväisyysjärjestön Special Effectin kehittämää EyeMine ohjelmistoa, joka antaa liikuntarajoitteisille pelaajille mahdollisuuden pelata Minecraft-peliä katseentunnistuksen avulla. (SpecialEffect 2020)

4.2 Fyysiset kontrollit

Fyysiset kontrollit, kuten erilaiset ohjaimet, voivat parantaa käyttäjän immersiota virtuaaliseen ympäristöön, sekä helpottaa tarkkuutta vaativien toimintojen suorittamista. Ne eivät kuitenkaan välttämättä sovi kaikkiin toimintoihin ja fyysisen ohjaimen paikantaminen voi osoittautua haastavaksi HMD:tä käytettäessä. (Mine 1995) Aihetta sivuttiin jo hieman osiosta käsiteltäessä, mutta tutkitaan nyt tarkemmin muutamia erilaisia käyttöliittymän fyysiseen kontrollointiin käytettäviä laitteita.

4.2.1 Ohjaimet

Useimmiten ohjaimet ovat käsissä pidettäviä ja tarjoavat vuorovaikutukseen esimerkiksi liikkeen tunnistusta ja erilaisia nappeja ja ohjaussauvoja. Ohjaimet voivat olla langallisia tai langattomia ja useimmiten näitä on kaksi, jotta käyttöjärjestelmää voidaan ohjata molemmilla käsillä. (Anthes ym. 2016) Monet virtuaalitodellisuudessa käytettävät ohjaimet hyödyntävät myös tavallisten videopelihjainten tapaan värinäefektejä tuomaan kosketus palautetta. (Benko ym. 2016) Eräs fyysisten ohjainten huonoista puolista on se, että niiden löytäminen voi olla hankalaa käytettäessä perinteistä HMD:tä. (Mine 1995)

Perinteisten ohjaimien ohella on olemassa monia erilaisia ohjaintyyppisiä joita voidaan hyödyntää virtuaalitodellisuudessa. Käydään läpi muutamia.

4.2.2 Hiiret

Kuten osoitusta käsitellessä mainittiin, myös hiirtä on mahdollista käyttää virtuaalitodellisuudessa samaan tapaan kuin muissa 3D ohjelmissa. Eräs hiiren käytön eduista on tämän tarkkuus, joka voi lyhentää huomattavasti osoittamiseen kuluvaa aikaa verrattuna esimerkiksi ele pohjaiseen käyttöliittymään. (Coelho ja Verbeek 2014)

Vaikka 3D ympäristöihin tarkoitetut hiiret eivät ole suuressa käytössä, on näitä kuitenkin kehitetty paljon esimerkiksi 3D mallinnuksen tarpeisiin. Eräs suosittu merkki ovat SpaceMouse hiiret, jotka on suunniteltu erityisesti CAD-ohjelmiston käyttöön, mutta toimivat myös virtuaalisissa ympäristöissä. (“3DConnexion SpaceMouse” n.d.)

Hiirtä käytettäessä huonona puolena on kuitenkin liikkuvuuden puute, joka voi rajoittaa immersiota huomattavasti. Vaikka hiiri voi olla joihinkin tehtäviin erittäin hyödyllinen ja nopea, ei se mallinna käyttäjän toimintaa kovin realistisesti eikä mahdollista monia toimintoja, jotka liikkeen tunnistuksen avulla onnistuvat luonnostaan. (Coelho ja Verbeek 2014)

4.2.3 Näppäimistöt

Eräs haastavimpia vuorovaikutuksen aspekteja virtuaalitodellisuudessa on kirjoittaminen. Monesti käytössä olevat virtuaaliset näppäimistöt joihin osoitetaan ohjaimella ovat hyvin

hitaita käyttää ja asettavat haasteita henkilöille, joille tarkat osoitus liikkeet ovat haastavia esimerkiksi käsien tärinän takia. Perinteistä näppäimistöä voidaan käyttää kirjoittamisen nopeuttamiseen virtuaalisessa todellisuudessa. Tämäkään ratkaisu ei kuitenkaan ole täydellinen, sillä erityisesti kokemattomammille kirjoittajille visuaalisuuden puuttuminen hidastaa kirjoittamista huomattavasti. (Knierim ym. 2018) Kirjoittamisen ohella näppäimistöä on mahdollista käyttää myös navigointiin, tosin tällöin käyttäjän immersio jää helposti vajaaksi.

Ympäristön havainnointia näppäimistöä käytettäessä voidaan auttaa implementoimalla elementtejä lisäystä virtuaalisuudesta. (McGill ym. 2015) Perehdytään tähän lisää seuraavassa alaluvussa.

4.2.4 Muut ohjaimet

Monet tällä hetkellä käytössä olevista VR ohjaimista ovat lähinnä kehittyneempiä versioita perinteisistä videopeli kontrollereista, mutta monet kehityksen alla olevat teknologiat tuovat erilaisia näkökulmia siihen, millaisia ohjaimet voisivat tulevaisuudessa olla. (Anthes ym. 2016)

Erikoisempiin fyysisiin ohjaimiin lukeutuvat muun muassa virtuaalisessa ympäristössä liikkumiseen käytettävät laitteet, kuten The Space Walker VR, joka on käytännössä pyörivä juoksumatto. (Anthes ym. 2016) Toinen kiinnostava ohjaintyyppi ovat fyysiset ohjaimet, joiden avulla käyttäjä voi tuntea 3D-pintoja ja tekstuureita virtuaalisessa ympäristössä. Tällaisiin ohjaimiin lukeutuvat muun muassa NormalTouch ja TextureTouch. (Benko ym. 2016)

4.3 Virtuaaliset kontrollit

Virtuaalisten kontrollien suurin hyöty ovat niiden laajat käyttömahdollisuudet. Huonona puolelana kuitenkin nousee esille erityisesti kosketuspalautteen puuttuminen sekä haasteet objektien kanssa vuorovaikuttaessa. (Mine 1995)

Erytyisesti virtuaaliodellisuuslasien kanssa voidaan kokea ongelmalliseksi ohjata käyttöliittymää näppäimistön tai hiiren välityksellä. Tähän asti kyseinen ongelma on ratkaistu pääasiassa käyttämällä eleitä tai kontrollereita jotka eivät vaadi näköä käyttöliittymän navigoin-

tiin. Tällaiset metodit eivät kuitenkaan ole tarpeeksi jos halutaan esimerkiksi kirjoittaa tai piirtää virtuaalitodellisuudessa. Lisäksi myös muu ympäristön havainnointi ja tämän kanssa vuorovaikuttaminen ovat virtuaalitodellisuuden käyttäjälle lähes mahdottomia, joka vaikuttaa huomattavasti VR-lasien käytettävyyteen. (McGill ym. 2015)

4.3.1 Tehostettu todellisuus

Ympäristön kanssa vuorovaikuttaminen sekä näppäimistön ja hiiren tehokas käyttäminen HMD:n kanssa voidaan mahdollistaa lisäämällä virtuaalitodellisuuteen pieniä elementtejä tehostettua todellisuutta. (McGill ym. 2015) Tässä tapauksessa kyseessä on siis lisätty virtuaalisuus (AV), ei kenties paremmin tunnettu lisätty todellisuus (AR). Lisätyssä virtuaalisuudessa virtuaaliseen ympäristöön lisätään elementtejä oikeasta ympäristöstä, kun taas lisätyssä todellisuudessa oikeaan ympäristöön lisätään elementtejä virtuaalisuudesta. (McGill ym. 2015) Tällöin voidaan esimerkiksi havainnollistaa lähellä olevat ihmiset virtuaalisessa ympäristössä.

Knierim ym. tutkivat ns. avatar käsien vaikutusta näppäimistöllä tuotetun kirjoituksen nopeuteen virtuaalitodellisuudessa. Avatar käsillä tarkoitetaan käyttäjän käsien mallintamista reaaliajassa virtuaalitodellisuuteen erilaisten sensoreiden avulla, joka edistää käyttäjän immersiota ja tekee ympäristön kanssa vuorovaikuttamisesta helpompaa ja luonnollisempaa. Koska HMD:t estävät käyttäjää näkemästä näppäimistöä, tehtiin tutkimuksessa myös mallinnettiin myös näppäimistö virtuaaliseen ympäristöön. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että erityisesti kokemattomampien näppäimistön käyttäjien suoritus virtuaalitodellisuudessa parani huomattavasti jos apuna käytettiin avatar käsiä. Kokeneemmille käyttäjille ero ei ollut suuri riippumatta siitä näkivätkö he näppäimistöä vai eivät. (Knierim ym. 2018)

Koska näppäimistön näkeminen jatkuvasti virtuaalisessa ympäristössä voi häiritä käyttäjän immersiota, voidaan tähän hyödyntää ns. engagement dependent AV:ta eli AV elementit voidaan ottaa käyttöön käyttäjän tarvitessa näitä. Käyttäjä voisi siis esimerkiksi aktivoida virtuaalisen näppäimistön ojentamalla kätensä kohti oikeaa näppäimistöään. (McGill ym. 2015)

McGill ym. tutkivat, kuinka suuri osa todellisuutta tulisi implementoida esimerkiksi näppäimistöä käytettäessä. Kohderyhmä sai kokeilla kolmea eri todellisuuden sulautuksen tasoa.

Minimaalisessa vain suoraan käden ympärillä oleva alue sulautettiin virtuaaliseen ympäristöön, osittaisessa taas sulautettiin kaikki vuorovaikutuksen mahdollistavat objektit, kun taas kokonaisvaltaisessa sulautuksessa kaikki ympäröivä. Tutkimuksen tuloksena osallistujat preferoivat minimaalista tai osittaista todellisuuden sulauttamista huomattavasti verrattuna kokonaisvaltaisempaan sulautukseen, mutta minimaalisen ja osittaisen sulautuksen välillä ei ollut suuria eroja. (McGill ym. 2015)

Lisäksi tutkimuksessa käsiteltiin tarkemmin muiden ihmisten mallintamista virtuaaliseen ympäristöön. Tässä esille nousi eritoten käyttäjien preferoivan hienovaraisempaa huomiointia ympäristöä havainnoitaessa. Esimerkiksi toisen ihmisen kävellessä huoneeseen käyttäjät haluavat tietää tästä, mutta sen sijaan että henkilö näkyisi virtuaalisessa ympäristössä, osa käyttäjistä preferoisi että tästä ilmoitettaisiin esimerkiksi tekstin avulla. Tämä ei kuitenkaan vaikuttanut käyttäjien läsnäolon tunteeseen, vaikkakin suurempi todellisuuden sulauttaminen häiritsi hieman tehtäviin keskittymistä. Lisäksi monet käyttäjät ilmaisivat toivovansa että pystyisivät itse hallinnoimaan, kuinka paljon todellisuutta virtuaaliseen ympäristöön näytetään riippuen esimerkiksi suoritettavasta tehtävästä. (McGill ym. 2015)

5 Yhteenveto

Erityisesti tutkimuksessa nousi esille se, miten eri tekniikat ovat hyödyllisiä erilaisten tehtävien suoritukseen ja miten jokaisesta löytyy sekä hyviä että huonoja puolia. Usein paras tulos voidaankin saavuttaa nimenomaan sekoittamalla eri vuorovaikutustekniikoita ja jopa antamalla käyttäjälle valinnanvaraa käytettävän tekniikan kanssa. Muun muassa näppäimistön tai hiiren käyttö vaihtoehtona eleille voi olla hyödyllinen, jos käyttäjän liikkuvuus on rajallista. Erittäin yleinen yhdistelmä ovat ohjaimet ja liikkeentunnistus, jota voidaan havainnoida esimerkiksi Oculus Riftin sekä HTC Viven ohjaimissa. Lisäksi paras vuorovaikutustekniikka riippuu paljon applikaation käyttötarkoituksesta.

Monesti on haastavaa saada aikaan järjestelmä, jossa jokainen vuorovaikutuksen muoto on toteutettu ideaalisella tavalla ilman, että joudutaan yhdistämään liian montaa vuorovaikutustekniikkaa ja täten tekemään käyttöliittymästä liian monimutkainen käyttäjille. Esimerkiksi liikkeentunnistus ja osoitus saattavat toimia hyvin lähes kaikkiin suoritettaviin tehtäviin, mutta eivät ole paras mahdollinen ratkaisu kirjoittamiseen. Usein joudutaankin tekemään kompromisseja tällaisten ratkaisujen suhteen ja valitsemaan sellaiset vuorovaikutustekniikat, jotka toimivat mahdollisimman hyvin applikaation päätehtäviin, vaikka tämä tarkoittaisi, että jotkut harvemmin suoritettavista tehtävistä olisivat hieman haastavampia.

Lähteet

- “3DConnexion SpaceMouse”. n.d. https://www.3dconnexion.eu/spacemouse_pro/eu/.
- Abras, Chadia, Diane Maloney-Krichmar, Jenny Preece ym. 2004. “User-centered design”. *Bainbridge, W. Encyclopedia of Human-Computer Interaction. Thousand Oaks: Sage Publications* 37 (4): 445–456.
- Anthes, Christoph, Rubén Jesús García-Hernández, Markus Wiedemann ja Dieter Kranzlmüller. 2016. “State of the art of virtual reality technology”. Teoksessa *2016 IEEE Aerospace Conference*, 1–19. IEEE.
- Argelaguet, Ferran, ja Carlos Andujar. 2013. “A survey of 3D object selection techniques for virtual environments”. *Computers & Graphics* 37 (3): 121–136.
- Benko, Hrvoje, Christian Holz, Mike Sinclair ja Eyal Ofek. 2016. “Normaltouch and texturetouch: High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers”. Teoksessa *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 717–728.
- Cabral, Marcio C, Carlos H Morimoto ja Marcelo K Zuffo. 2005. “On the usability of gesture interfaces in virtual reality environments”. Teoksessa *Proceedings of the 2005 Latin American conference on Human-computer interaction*, 100–108.
- Coelho, Joanna C, ja Fons J Verbeek. 2014. “Pointing task evaluation of leap motion controller in 3D virtual environment”. *Creating the difference* 78:78–85.
- Knierim, Pascal, Valentin Schwind, Anna Maria Feit, Florian Nieuwenhuizen ja Niels Henze. 2018. “Physical keyboards in virtual reality: Analysis of typing performance and effects of avatar hands”. Teoksessa *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–9.
- Marsh, Tim. 1999. “Evaluation of virtual reality systems for usability”. Teoksessa *CHI’99 extended abstracts on Human factors in computing systems*, 61–62.

- McGill, Mark, Daniel Boland, Roderick Murray-Smith ja Stephen Brewster. 2015. "A dose of reality: Overcoming usability challenges in vr head-mounted displays". Teoksessa *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2143–2152.
- Mine, Mark R. 1995. "Virtual environment interaction techniques". *UNC Chapel Hill CS Dept.*
- Nielsen, Jakob. 1994. *Usability engineering*. Morgan Kaufmann.
- Piumsomboon, Thammathip, Gun Lee, Robert W Lindeman ja Mark Billingham. 2017. "Exploring natural eye-gaze-based interaction for immersive virtual reality". Teoksessa *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 36–39. IEEE.
- Rosson, Mary Beth, John M Carroll ja Natalie Hill. 2002. *Usability engineering: scenario-based development of human-computer interaction*. Morgan Kaufmann.
- Sherman, William R, ja Alan B Craig. 2018. *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*. Morgan Kaufmann.
- SpecialEffect. 2020. "EyeMine - A way to play Minecraft with your eyes". <https://www.specialeffect.org.uk/eyemine>.
- Sutcliffe, Alistair G, ja K Deol Kaur. 2000. "Evaluating the usability of virtual reality user interfaces". *Behaviour & Information Technology* 19 (6): 415–426.
- Sutcliffe, Alistair, ja Brian Gault. 2004. "Heuristic evaluation of virtual reality applications". *Interacting with computers* 16 (4): 831–849.
- Tanriverdi, Vildan, ja Robert JK Jacob. 2000. "Interacting with eye movements in virtual environments". Teoksessa *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, 265–272.