

**Kimmo Riihiaho**

**Katsaus virtuaalitodellisuuden syöttölaitteiden  
toteutusteknologiaihin**

Tietotekniikan Kandidaatintutkielma

27. huhtikuuta 2016

Jyväskylän yliopisto

Tietotekniikan laitos

**Tekijä:** Kimmo Riihiaho

**Yhteystiedot:** kimmo.a.riihiaho@student.jyu.fi

**Ohjaaja:** Hannakaisa Isomäki

**Työn nimi:** Katsaus virtuaalitodellisuuden syöttölaitteiden toteutusteknologioihin

**Title in English:** Overview of virtual reality input devices

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Sivumäärä:** 27+0

**Tiivistelmä:** Virtuaalitodellisuuden syöttölaitteista on olemassa julkista tutkimusta varsin niukasti, vaikka ne ovat virtuaalitodellisuudelle korvaamattoman tärkeitä. Syöttölaitteiden tärkein tehtävä on tuottaa käyttäjälle luonnollinen käyttöliittymä virtuaalitodellisuuteen. Käyttöliittymän luonnollisuus mahdollistaa käyttäjän immersoitumisen eli täydellisen uppoutumisen virtuaalikokemukseen. Esittelen tässä tutkielmassa yleisimpiä nykyaikaisissa virtuaalitodellisuuden syöttölaitteissa käytettyjä paikannusteknologioita ja pohdin niiden vaikutusta immersioon.

**Avainsanat:** VR, virtuaalitodellisuus, immersio, paikannus, syöttölaite

**Abstract:** Although, virtual reality input devices are irreplaceable for virtual reality, there is little public research on the subject. The most important function of an input device is to provide a natural user interface for the user. This makes it possible for the user to truly immerse into the virtual experience. In this study I present the most common ways of user tracking, and consider the impact of different tracking technologies on immersion.

**Keywords:** VR, virtual reality, immersion, tracking, input device, controller, platform, prop, WIP, walking in place, real walking

## Kuvat

- Kuva 1. Oculus Rift VR-lasit peittävät todellisen maailman käyttäjältä. Kuva on ladattu osoitteesta: <https://www.oculus.com/en-us/rift/> ..... 5
- Kuva 2. Cyberithin Virtualizer kävelyalusta. Virtualizer mahdollistaa kolmen asteen erotellun liikkumisen: 1. katseen suunta, 2. manipulaatiosuunta, 3. etenemissuunta. Kuva on ladattu osoitteesta: <http://cyberith.com/press/>..... 8
- Kuva 3. Sixensen STEM kontrollerit, kolme paikannusyksikköä ja magneettikentän tuottava lähetinyksikkö. Kuva on ladattu Sixensen verkkokaupasta osoitteesta: <http://store.sixense.com/collections/stem> ..... 17
- Kuva 4. HTC:n ja Valven yhteistyössä toteuttama Vive-virtuaalitodellisuuslaitteisto. Kuvassa ylhäällä ovat majakat, keskellä VR-lasit ja alhaalla ohjaimet. Laitteissa näkyvät ympyrän muotoiset kolot ovat valosensoreita. Kuva on ladattu HTC:n sivuilta osoitteesta: <http://www.htcvive.com/eu/> ..... 17
- Kuva 5. Virtuixin Omni-kävelyalusta. Kuva on ladattu osoitteesta: <http://www.virtuix.com/products/18>

## Sisältö

1	JOHDANTO .....	1
2	VIRTUAALITODELLISUUS .....	3
	2.1 Näkeminen ja näytöt .....	4
	2.2 Kommunikoiminen .....	6
	2.3 Liikkuminen ja manipuloiminen .....	6
3	PAIKANNUSTEKNOLOGIAT .....	9
	3.1 Optinen paikantaminen .....	10
	3.2 Ultraääneen perustuva paikantaminen .....	11
	3.3 Liikkeeseen perustuva paikantaminen .....	11
	3.4 Sähkömagneettinen paikantaminen .....	12
	3.5 Mekaaninen paikantaminen .....	12
4	SYÖTTÖLAITTEET .....	14
	4.1 Propit .....	14
	4.2 Platformit .....	14
5	NYKYAIKAISET SYÖTTÖLAITTEIDEN TOTEUTUKSET .....	16
	5.1 Sixense .....	16
	5.2 Valve ja HTC .....	17
	5.3 Virtuix .....	18
	5.4 Cyberith .....	19
6	YHTEENVETO .....	20
	LÄHTEET .....	21

# 1 Johdanto

Virtuaalitodellisuus (engl. Virtual Reality, VR) nauttii tällä hetkellä suurta mediasuosiota, ja siitä ennustetaan internetin ja mobiiliteknologian veroista mullistusta (Williams 2015). Virtuaalitodellisuuslaitteita on ollut olemassa ainakin 1960-luvulta asti (Sherman ja Craig 2003), mutta vasta nykyisten grafiikkakorttien laskentateho mahdollistaa riittävän hyvän kuvan tuottamisen viihdetarkoituksiin, mikä tekee myös muiden virtuaalitodellisuuslaitteiden kehittämisen kaupallisesti mielenkiintoiseksi.

Koska virtuaalitodellisuuslaitteet ovat aiemmin olleet hyvin kalliita, niitä on käytetty lähinnä suurissa organisaatioissa erikoistehtävien simulointiin. Tällaisia erikoistehtäviä ovat esim. lentokoneen ohjaaminen, sotilasoperaatiot tai kirurgiset toimenpiteet. Lääketieteessä virtuaalitodellisuutta on käytetty myös fobioiden hoitamiseen. Viimeaikoina tapahtunut laitteiden halpeneminen tuo virtuaalitodellisuuden ensimmäistä kertaa myös tavallisten kuluttajien ulottuville.

Käsittelen tässä tutkielmassa virtuaalitodellisuuden syöttölaitteita, joiden keskeisin ominaisuus on kyky havaita käyttäjän liikkeitä. Tämä mahdollistaa virtuaalitodellisuuden ja käyttäjän välisen vuorovaikutuksen pelkillä käyttäjän kehon liikkeillä, mikä on virtuaalitodellisuuden keskeisin piirre. Koska tämä toiminnallisuus tuotetaan syöttölaitteilla — joko erillisillä laitteilla tai näyttölaitteisiin integroituina — niiden merkitys virtuaalitodellisuudelle on valtava. Kiinnostuin syöttölaitteista, koska julkinen keskustelu virtuaalitodellisuudesta keskittyy vahvasti virtuaalilasien ympärille, mikä on jättänyt syöttölaitteet pienempään rooliin.

Näyttölaitteiden painottuminen näkyy myös julkisessa tutkimuksessa: VR-laseista löytyy moninkertainen määrä tutkimusta verrattuna syöttölaitteisiin. Molemmista laitetyypeistä on ollut vähintään prototyypivaiheessa olevia kaupallisia toteutuksia markkinoilla jo usean vuoden ajan, joten laitteiden saatavuus on tuskin syynä vähäiseen tutkimukseen. Olettaisin että myös syöttölaitteiden tutkimus tulee yleistymään seuraavien vuosien aikana, kun laitteiden saatavuus paranee entisestään ja virtuaalitodellisuus tulee ilmiönä kaupallisesti merkittävämmäksi.

Selvitän tutkielmassani millaisia paikannusteknologioita syöttölaitteiden toteutuksessa on

mahdollista käyttää ja miten ne ovat edustettuina nykyaikaisissa syöttölaitteissa. Alkuperäisenä tarkoitukseni oli myös selvittää, kuinka nämä toteutusteknologiat vaikuttavat laitteiden käytettävyyteen ja käyttäjän kokemaan immersioon, mutta koska en löytänyt ainuttakaan tutkimusta, joka olisi suoraan käsitellyt aihetta, sen käsittely jää tässäkin tekstissä varsin yleiselle tasolle. Tämän tutkielman tarkoitus on summata virtuaalitodellisuuden syöttölaitteiden nykytilaa menemättä syvällisesti yksityiskohtiin.

Käyttämäni lähdemateriaalin olen hakenut ja valikoinut systemaattisen kirjallisuuskatsauksen keinoin IEEE:n ja ACM:n tietokannoista. Valitsin IEEE:n ja ACM:n, koska ne ovat alan suurimpia vertaisarvioitujen tutkimusten julkaisijoita, ja kandidaatintutkielman suppeuden huomioon ottaen löysin niistä riittävästi aineistoa. Virtuaalitodellisuuteen liittyvien määritelmien ja peruskäsitteistön osalta olen käyttänyt pääasiallisena lähteenäni William Shermanin ja Alan Graigin vuonna 2003 julkaisemaa virtuaalitodellisuuden perusteosta *Understanding Virtual Reality*. Esimerkkilaitteista olen hakenut tietoa laitevalmistajien verkkosivuilta, heidän työntekijöidensä YouTube-videopalvelussa julkaistuista haastatteluista sekä yleisesti teknologiaa ja tekniikkaa käsittelevistä verkkojulkaisuista.

Seuraavassa luvussa 2 määrittelen virtuaalitodellisuuden käsitteen sekä siihen liittyvät käyttäjän kannalta tärkeimmät toiminnot. Luvussa 3 esittelen yleisimmät paikannusteknologiat hyvine ja huonoine puolineen. Luvussa 4 esittelen kaksi syöttölaitteiden päätyyppiä, jotka edustavat suurta osaa kaupallisten syöttölaitteiden toteutuksista. Luvussa 5 esittelen muutamien nykyaikaisten syöttölaitteiden toteutuksia. Luvussa 6 summaan tutkielman tärkeimmät havainnot.

## 2 Virtuaalitodellisuus

Ensimmäiset virtuaalitodellisuuslaitteet on rakennettu jo 1960-luvulla, mutta alan terminologia ei silti ole vakiintunutta (Sherman ja Craig 2003). Tässä luvussa määrittelen virtuaalitodellisuuden käsitteen, ja alaluvuissa esittelen yleisimmät virtuaalitodellisuuden näyttölaitteet sekä tärkeimmät toiminnot, joita käyttäjän täytyy pystyä virtuaalitodellisuudessa tekemään.

Virtuaalitodellisuus tarkoittaa vuorovaikutteista tietokonesimulaatiota, joka havaitsee käyttäjän liikkeitä ja sijainnin sekä antaa käyttäjän aisteille keinotekoisia ärsykeitä (Sherman ja Craig 2003), joita kutsun tässä tutkielmassa aistipalautteeksi. Sherman ja Craig (2003, s. 6) erottelevat virtuaalitodellisuudelle neljä avainelementtiä: virtuaalimaailma, immersio, aistipalaute ja vuorovaikutteisuus.

**Virtuaalimaailma** on heidän mukaansa mielikuvituksen tuote, joka on olemassa, vaikka kukaan ei olisi kokemassa sitä — samaan tapaan kuin kirjan maailma on olemassa silloinkin, kun kukaan ei lue kirjaa. Virtuaalimaailma voi olla myös esimerkiksi representaatio arkkitehtonisesti mielenkiintoisesta ympäristöstä, joka on ehkä jo tuhoutunut, tai vaikka tutkimusympäristö, jossa kemisti voi tutkia molekyylien välisiä voimia.

**Immersiolla** tarkoitetaan käyttäjän uppoutumista virtuaalikokemukseen. Sherman ja Craig (2003, s. 9) määrittelevät immersion niin, että immersoitunut käyttäjä *usko*o virtuaalimaailmaan. Tämä johtaa heidän mukaansa siihen, että käyttäjä ei koe olevansa sekä virtuaalisessa että todellisessa maailmassa, vaan pelkästään virtuaalimaailmassa. Joissain sovelluksissa, kuten peleissä, immersio on hyvinkin toivottavaa, jotta kokemus olisi mahdollisimman vaikuttava. Sen sijaan aiemman esimerkin kemistille molekyylin todellisuuteen uskominen on tuskin tarpeellista.

**Aistipalaute** liittyy läheisesti immersioon, sillä VR-laitteiston aisteille antamat ärsykkeet vähentävät tarvetta kuvitella virtuaalimaailmaa, jolloin virtuaalimaailma tuntuu uskottavammalta ja sen kokeminen lähentyy reaali maailman kokemista (Sherman ja Craig 2003, s. 10). Käytän VR-laitteisto-termiä kuvamaan yhtenä kokonaisuutena tietokonetta, siihen liitetyjä virtuaalitodellisuuden syöttö- ja näyttölaitteita, sensoreita ja ohjelmistoja. VR-laitteella tarkoitan pienempää kokonaisuutta, kuten yksittäistä VR-ohjainta, joka voi edelleen koostua

pienemmistä osalaitteista, kuten erilaisista sensoreista.

Kaikki edellä olevat kolme elementtiä voivat myös esiintyä sovelluksessa, joka ei ole virtuaalitodellisuutta. Peli voi olla hyvinkin immerssiivinen kokemus: käyttäjä voi samastua hahmoihin ja nähdä unta pelistä aivan kuten oikean elämän tapahtumistakin. Pelissä on virtuaalimaailma, johon tapahtumat sijoittuvat, ja se antaa aistipalautetta yleensä ainakin näkö- ja kuuloaisteille. Lopullisesti virtuaalitodellisuuden voi erottaa muista medioista viimeisen elementin avulla, joka on vuorovaikutteisuus. **Vuorovaikutteisuudella** tarkoitetaan sitä, että VR-laitteisto seuraa käyttäjän liikkeitä ja reagoi niihin (Sherman ja Craig 2003). Monet VR-laitteistot tosin reagoivat käyttäjään kiinnitettyjen laitteiden liikkeeseen, eli ne eivät havaitse suoraan itse käyttäjän liikkeitä. Ero perinteiseen hiiri ja näppäimistö -yhdistelmään on silti merkittävä.

## 2.1 Näkeminen ja näytöt

Kutsun aistipalautteita tuottavia laitteita yleisesti näytöiksi (engl. display) tai näyttölaitteiksi. Lähes kaikille aisteille voidaan rakentaa näyttö, mutta yleisimpiä ovat näkö-, kuulo- ja tuntonäytöt. Syöttölaitteiden kannalta merkittävimmät näyttötyypit ovat tunto- ja näkönäytöt. Tuntonäyttö (haptinen näyttö) on yksinkertaisimmillaan konsoliohjaimen värinän tuottava epäkeskoinen pyörivä paino; monimutkaisemmilla tuntonäytöillä voidaan jopa tuottaa käyttäjän liikkeitä vastustavia voimia. Syöttölaitteisiin on usein upotettuna tuntonäyttöjä, koska yksinkertaisillakin tuntonäytöillä voidaan vahvistaa käyttäjän immersion tunnetta. Näkönäyttöjen osalta erityisen tärkeää on, peittääkö näyttölaitte todellisen maailman käyttäjältä, kuten kuvassa 1, koska muut VR-laitteet täytyy suunnitella sen mukaan, voiko käyttäjä nähdä niitä vai ei.

Kaupallisissa VR-järjestelmissä suositaan päässä pidettäviä näyttölaitteita oletettavasti halpuutensa, pienuutensa ja hyvän immersion tuottokykynsä takia. Päässä pidettävät näyttölaitteet ovat yleensä jonkinlaisia silmikoita, jotka voivat peittää tai olla peittämättä todellisen maailman. Peittämätön malli on yleisesti käytössä lisätyssä todellisuudessa (engl. Augmented Reality, AR), jonka tavoitteena on lisätä todellisen maailman aistiärsykkeiden joukkoon keinotekoisia ärsykeitä. AR-sovelluksissa ei pyritä korkeaan immersion, mikä edellyttäisi



todellisen maailman aistiärsykkeiden minimoimista. VR-sovelluksissa käytetään silmikköä, joka peittää todellisen maailman näkyvistä. Näitä kutsutaan yleisesti VR-laseiksi.

Fishtank-näyttö on esimerkiksi tavallinen tietokoneen näyttö (Sherman ja Craig 2003). Se ei tarjoa erityisen immersiiivistä kokemusta, mutta se on halpa ja yleinen tapa tuottaa näköärsykeitä (Sherman ja Craig 2003). Koska kaikilla tietokoneen omistajilla on näyttö olemassa, se ei lisää VR-järjestelmän kustannuksia kuluttajalle. Fishtank-näyttö ei peitä reaali-ilmaa käytännössä lainkaan, ja siltä osin se sopii käytettäväksi minkä tahansa syöttölaitteen kanssa.

CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) on projektionäyttö, joka koostuu yhdestä tai useammasta seinästä (myös lattia ja katto), joihin heijastetaan kuvaa (Sherman ja Craig 2003). Käyttäjä voi liikkua laitteen sisällä vapaasti, ja VR-laitteisto havaitsee käyttäjän liikkeet. CAVE-järjestelmät ovat kalliita ja vievät paljon tilaa, minkä lisäksi niiden kasaamiseen ja purkamiseen voi kuluu päiviä (Sherman ja Craig 2003). CAVE-järjestelmä peittää reaali-ilmailman laitteen seinien ulkopuolella joko kokonaan tai osittain, mutta käyttäjä näkee syöttölaitteet ja itsensä.



**Kuva 1:** Oculus Rift VR-lasit peittävät todellisen maailman käyttäjältä. Kuva on ladattu osoitteesta: <https://www.oculus.com/en-us/rift/>

## 2.2 Kommunikoiminen

Viihdekäyttöön tarkoitetuista sovellusohjelmista, kuten peleistä, puhuttaessa ollaan aina tekemisissä käyttäjän ja tietokoneen välisen kommunikaation kanssa. Tietokoneelta ihmiselle päin tämä kommunikaatio tapahtuu suurelta osin näköaistin välityksellä, kun taas ihminen kommunikoi tietokoneelle yleensä fyysisen käyttöliittymän kautta esimerkiksi painelemalla näppäimistön painikkeita.

Sherman ja Craig (2003) jakavat käyttäjän ja tietokoneen välisen kommunikoinnin käyttäjän syötteentuottotavan mukaan aktiiviseen ja passiiviseen kommunikaatioon. Aktiivisella syötteellä he tarkoittavat sitä, että käyttäjä tekee *erikseen* jonkin tietyn toiminnon, esim. painaa painiketta, minkä tietokone tulkitsee syötteenä. Passiivisella syötteellä he tarkoittavat sitä, että käyttäjän ei tarvitse erikseen *tehdä* mitään, vaan tietokone tarkkailee käyttäjää ja laukaisee tapahtumia näiden mittaustietojen perusteella. Passiivinen syöte kerätään VR-laitteistolla yleensä mittaamalla käyttäjän joidenkin ruumiinosien sijainti ja asento. Kutsun tätä paikantamiseksi (engl. tracking) ja käsittelen sitä tarkemmin paikannusteknologiota koskevassa luvussa 3. Paikannettavat ruumiinosat riippuvat pitkälti sovelluksen tarpeista, mutta yleisiä paikannuksen kohteita ovat ainakin pää, silmät, kädet, sormet, vartalo ja jalat.

## 2.3 Liikkuminen ja manipuloiminen

Virtuaalitodellisuuden tärkeimmät toiminnot ovat liikkuminen ja manipuloiminen (Kulik, Frohlich ja Blach 2006; Bowman ym. 2004; Sherman ja Craig 2003). Manipulointia on esimerkiksi esineiden kerääminen, oven avaaminen ja miekalla taisteleminen. Manipuloinnin periaate on yksinkertainen: valitaan haluttu kohde ja annetaan suorituskomento. Esimerkiksi täysin passiivisesta manipuloinnista: valitaan kohteeksi oven kahva viemällä virtuaalikäsi lähelle ja suorituskomentona kierretään kättä. Esimerkkinä aktiivisen ja passiivisen tavan yhdistelmästä voisi olla ase, jonka ampumis- eli manipulaatiosuunta annetaan passiivisesti käden suunnalla ja laukaisukomento aktiivisesti painamalla ohjaimessa olevaa liipaisinta.

Manipulaatio toteutetaan usein juuri aktiivisen ja passiivisen tavan yhdistelmänä. Ehkä yleisin manipulointiin tarkoitettu laite on proppi, joka on yleisnimitys erilaisille kädessä pidettäville ohjaimille. Käsittelen proppeja tarkemmin luvussa 4.1. Jotta käyttäjä voi manipuloida

virtuaalimaailmaa, hänen täytyy päästä manipuloitavien objektien lähelle, mikä johtaa siihen, että käyttäjän täytyy voida liikkua virtuaalitodellisuudessa.

Liikkuminen voi olla joko katseen suuntaista (engl. view-direction travel) tai eroteltua (engl. decoupled travel) (Ruddle, Volkova ja Bülhoff 2013). Eroteltu liikkuminen tarkoittaa sitä, että käyttäjä voi liikkua myös johonkin muuhun kuin katseen suuntaan eli "streiffata"(engl. strafe). Liikkumisen erottelua on havainnollistettu sivulla 8 kuvassa 2. Käytännössä liikkuminen on siis kameran tai virtuaalikehon (engl. avatar) siirtämistä virtuaalimaailmassa.

Liikkumisen voi toteuttaa mm. kävelymetaforan avulla tai lentämällä (engl. point and fly). Tässä yhteydessä lentäminen siis ei tarkoita esim. lentokoneen lentämistä vaan kameran tai virtuaalikehon siirtämistä virtuaalimaailmassa. Lentäminen voidaan toteuttaa VR-sovelluksessa esimerkiksi niin, että käyttäjä osoittaa siihen suuntaan, johon hän haluaa liikkua ja suorittaa jonkin VR-laitteiston tunnistaman eleen. Konsolipeleistä tuttu ohjaussauvoilla lentäminen on myös yleinen lentämisen toteutustapa.

Barrera, Takahashi ja Nakajima (2004) korostavat, että käveleminen on ihmiselle luontaisin tapa liikkua. Virtuaalitodellisuudessa käveleminen toteutetaan kävelymetaforan avulla, eli käyttäjä tekee todellisessa maailmassa jonkin VR-laitteiston tunnistaman toiminnon silloin, kun hän haluaa ottaa askeleen. Keräämässäni aineistossa kävelymetaforan toteuttamiseen käytetään kahta päätapaa: aito kävely (engl. real walking) ja paikallaan kävely (engl. Walking In Place, WIP).

Paikallaan kävely on näistä tavoista käytetyin niin keräämässäni aineistossa kuin markkinoilla olevissa laitteissakin. Paikallaan kävely mahdollistaa loputtoman liikkumisen kävelemällä, koska käyttäjä ei liiku todellisessa maailmassa. Paikallaan kävelyn etuna on, että käyttäjä saa haptista palautetta kävelyalustan ja kehon välisistä vuorovaikutuksista (Sherman ja Craig 2003). Lennettäessä haptinen palaute täytyy erikseen tuottaa ja toimittaa käyttäjälle jonkin laitteen avulla. Kävellessä myös nopeuden hallinta on käyttäjälle luonnollista, koska sen voi tehdä samalla tavalla kuin todellisessakin maailmassa: säätämällä askeltiheyttä ja -pituutta.

Aito kävely vaatii suuren tilan, koska käyttäjän kävelyn ja virtuaalitodellisuudessa tapahtuvan liikkeen välillä on 1:1 vastaavuus. Aito kävely toteutetaan paikantamalla käyttäjä todellisessa maailmassa ja siirtämällä käyttäjän liikkeen suoraan virtuaalimaailmaan. Käyttäjä voi

siis kävellä virtuaalitodellisuudessa vain fyysisen käyttöympäristön kokoisella alueella. Tämä tilarajoitus on mahdollista kiertää niin, että käyttäjä liikkuu pitkät matkat lentämällä ja kävelee vain siinä tilassa, minkä VR-laitteisto kykenee esittämään.

Kävelymetaforan voi toteuttaa myös ilman että käyttäjän tarvitsee käyttää jalkojaan. Kodaka, Ogata ja Okuno (2005) ovat kehittäneet kosketussensoreihin perustuvan tavan kävelymetaforan tuottamiseen. Heidän toteutuksessaan on kaksi kosketussensoria, joita käyttäjä koskee vuoron perään käsillään (Kodaka, Ogata ja Okuno 2005). Heidän mukaansa lentämällä liikkuva käyttäjä ei saa riittävää kuvaa virtuaalikehon liikkeestä ja edetystä matkasta. Lisäksi kosketussensoriratkaisu on moniin muihin kävelymetaforatoteutuksiin verrattuna halpa. Heidän ratkaisunsa mahdollistaa vain katseen suuntaisen etenemisen, ja koska kädet ovat varattuina kävelyä varten, käyttäjä ei voi tehdä käsillään mitään muuta, mikä kaventanee ratkaisun soveltuvuusala melkoisesti.

Terziman ym. (2010) ovat myös toteuttaneet kävelymetaforan ilman että käyttäjän tarvitsee ottaa askelia — tai edes seistä. Heidän toteutuksessaan käyttäjää kuvataan tavallisella webkameralla. Käyttäjän pää tunnistetaan kuvasta ohjelmistollisesti, ja sen sivusuuntaiset heilahdukset tulkitaan askeleiksi. He ovat toteuttaneet myös kääntymisen, hyppäämisen ja ryömimisen erilaisilla pään eleillä. Heidän ratkaisunsa on erittäin halpa, koska kameran lisäksi mitään muuta laitteistoa ei tarvita.



**Kuva 2:** Cyberithin Virtualizer kävelyalusta. Virtualizer mahdollistaa kolmen asteen erotellun liikkumisen: 1. katseen suunta, 2. manipulaatiosuunta, 3. etenemissuunta. Kuva on ladattu osoitteesta: <http://cyberith.com/press/>

### 3 Paikannusteknologiat

Virtuaalitodellisuuden syöttölaitteiden olennaisin tehtävä on käyttäjän paikantaminen (engl. tracking), koska vain se mahdollistaa virtuaalitodellisuuden ja käyttäjän välisen vuorovaikutuksen virtuaalitodellisuudelle ominaisella tavalla käyttäjän kehon liikkeitä tulkiten. Käytän paikannus-termiä kuvaamaan kaikkea käyttäjän sijainnista ja liikkeistä mitattua dataa. Kutsun absoluuttiseksi paikannukseksi paikannustapaa, jossa käyttäjän sijainti mitataan fyysisessä käyttöympäristössä sijaitsevaan referenssipisteeseen nähden. Referenssipisteenä voidaan käyttää esim. kameraa tai magneettikentän tuottavaa käämiä. Referenssipisteen sijaintia voi toki muuttaa, ja se ei siinä mielessä ole absoluuttinen, mutta sijainnin muuttaminen vaatii aina VR-laitteiston uudelleenkalibroinnin. Toinen mahdollinen paikannustapa on suhteellinen paikannus, jossa mitataan käyttäjän ruumiinosien sijainti suhteessa toisiinsa. Tätä paikannustapaa voidaan käyttää, jos esimerkiksi halutaan tietää sormien asento toisiinsa nähden, mutta käden sijainti käyttöympäristössä ei ole oleellista tai se mitataan jollain absoluuttisella menetelmällä.

Kaikilla paikannusteknologioilla on etunsa ja haittansa, ja paikannusteknologian valinta on kompromissi kolmesta ominaisuudesta, jotka ovat suorituskyky, häiriötyvyys ja laitteen aiheuttama epämukavuus käyttäjälle (Sherman ja Craig 2003, s. 77). Suorituskyky tarkoittaa mittauksen nopeutta ja tarkkuutta (Sherman ja Craig 2003). Häiriötyvyys liittyy yleensä paikannusteknologioissa hyödynnettyihin fysikaalisiin ilmiöihin, kuten valon heijastumiseen esteestä. Epämukavuutta käyttäjälle aiheuttavat mm. luonnollisen liikkuvuuden rajoittuminen esimerkiksi johtojen takia ja laitteen painon aiheuttama rasitus (Sherman ja Craig 2003).

Langattomat laitteet ovat hyvä esimerkki kompromissista, joka ominaisuuksien välillä on tehtävä: langallisilla laitteilla saavutetaan nopeampi tiedonsiirto VR-laitteiston eri osien välillä, mutta käyttömukavuus huononee johtojen takia. Feng, Cho ja Wartell (2015) ovat todenneet, että syöttölaitteiden tulisi olla langattomia, vaikka langattomuus pienentääkin paikannusalaan ja -tarkkuutta.

### 3.1 Optinen paikantaminen

Optinen paikantaminen perustuu valoon, ja se voidaan toteuttaa mm. kameroilla tai valosensoreilla. Yhdellä kameralla voidaan tuottaa paikkatieto vain kahdessa ulottuvuudessa, eli linssin kanssa yhdensuuntaisessa tasossa (Sherman ja Craig 2003, s. 81). Komiulotteisen paikkatiedon tuottamiseen tarvitaan vähintään kaksi kameraa, jolloin paikannettavan kohteen sijainti voidaan laskea trigonometrian avulla. Sama vaatimus pätee valosensoreille.

Kamerat voivat olla kiinnitettynä käyttäjään, jolloin ne havaitsevat oman sijaintinsa muutoksen ympäristön suhteen, tai ne voidaan sijoittaa käyttöympäristöön, jolloin ne havaitsevat käyttäjän sijainnin muutoksen suhteessa itseensä (Sherman ja Craig 2003). Kameran kuvaamien kohteiden erottaminen toisistaan on monimutkaista (Sherman ja Craig 2003): käyttäjä pitää erottaa taustasta ja käyttäjän ruumiinosat toisistaan. Kuvan käsittelemisen vaatimaa laskentatehoa voidaan vähentää käyttämällä merkkipisteitä (Sherman ja Craig 2003, s. 83), koska ne on helpompi erottaa kuvasta kuin yleiset muodot. Merkkipisteet voivat olla esim. valkoisia palloja syöttölaitteen ympärillä.

Valosensoreihin perustuva ratkaisu voidaan toteuttaa esimerkiksi niin, että tilassa on useita valonlähteitä, jotka tuottavat valopulsseja tietyin tunnetuin väliajoin. Koska valon nopeus ilmassa on vakio, valosensorin havaitsemista pulsseista voidaan trigonometrisesti laskea sensorin sijainti. Kun paikannettavaan laitteeseen sijoitetaan useita sensoreita, voidaan määrittää myös laitteen asento. Valosensoreilla toteutettuna paikannus voidaan tehdä nopeasti ja tarkasti (Sherman ja Craig 2003, s. 83). Tämä toteutus on laskennallisesti kameratoteutusta kevyempi, sillä kuormittavaa kuvan tulkintaa ei tarvitse tehdä.

Optinen paikannus vaatii, että kamerasen ja kohteen (tai sensorin ja valonlähteen) välisen linjan täytyy olla optisesti esteetön (Sherman ja Craig 2003, s. 82). Toinen optisen paikannuksen asettama vaatimus on, että käyttäjän täytyy pysyä kamerasen kuvausalueella, mikä vähentää käyttäjän liikkumisvapautta (Sherman ja Craig 2003, s. 82).

## **3.2 Ultraääneen perustuva paikantaminen**

Ultraäänipaikannus on paikannusteknologiana samankaltainen kuin optinen paikannus, mutta se käyttää valon sijasta ääntä. Kolmella lähettimellä ja vastaanottimella voidaan määrittää paikannettavan laitteen paikka ja asento (Sherman ja Craig 2003, s. 84). Äänilähteiden ja vastaanottimien täytyy olla tietyn minimietäisyyden päässä toisistaan, jotta paikannus onnistuu, mikä voi tuottaa ongelmia, kun ne asennetaan pieneen laitteeseen (Sherman ja Craig 2003, s. 84).

Ultraäänipaikannuksen hyvä puoli on se, että äänilähteet ja vastaanottimet ovat halpoja valmistaa (Sherman ja Craig 2003, s. 84). Toisaalta kaiut ja melu haittaavat paikannusta (Sherman ja Craig 2003, s. 84). En löytänyt ainoatakaan tieteellistä artikkelia tai kaupallista syöttölaitetta, joka käyttäisi ääneen perustuvaa paikannusta, joten se lienee melko harvinainen toteutustapa.

## **3.3 Liikkeeseen perustuva paikantaminen**

Liikkeeseen perustuva paikannus perustuu sensoreihin, jotka mittaavat paikan tai asennon muutosta itsensä suhteen. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi gyroskooppi (mittaa kulmakiihtyvyyttä eli käytännössä pyörimisen määrää) ja kiihtyvyyssanturi (mittaa lineaarista kiihtyvyyttä). Kun sensoria liikutetaan, sen loppusijainti voidaan laskea sen alkusijainnin, liikkeeseen kuluneen ajan ja sensoriin kohdistuneen kiihtyvyyden avulla. Fysiikasta tuttu liikemäärän säilymisen laki mahdollistaa myös liikkeen ennustamisen (Foxlin 1996), koska ihminen voi tuottaa vain äärellisiä kiihtyvyyksiä.

Koska liikkeeseen perustuvassa paikannusmallissa ei käytetä lähetin-vastaanotinparia, toisin kuin kahdessa edellä esitetystä paikannusteknologiassa, laitteen fyysisen käyttöympäristön ei tarvitse olla esteetön (Foxlin 1996). Liikkeeseen perustuvien paikannusteknologioiden muita etuja ovat nopea mittaus, häiriöttömyys ja rajoittamaton paikannusetäisyys (Foxlin 1996). Lisäksi gyroskoopit ja kiihtyvyyssensorit ovat melko halpoja, pieniä ja kevyitä. Pienuus mahdollistaa sensorin asentamisen pieneenkin laitteeseen ja keveys vähentää käyttäjälle aiheutuvaa fyysistä rasitusta.

Kiihtyvyyssensoreiden haittapuoleksi Foxlin (1996) mainitsee niissä esiintyvän vaeltamisilmiön, eli tiuhaan toistuvien mittausten sisältämän pienen virheen kasautumisen ajan myötä. Vaeltamista voidaan vähentää Kalman-suotimella (Foxlin 1996) ja kalibroimalla sensorit tietyin väliajoin (Sherman ja Craig 2003). Vaeltamisesta johtuen liikkeeseen perustuva paikannus ei ole parhaimmillaan yksinään käytettynä, mutta yhdistämällä sen tarkkuus ja ennustuskyky johonkin hitaampaan paikannusteknologiaan voidaan tuottaa nopeasti tarkkaa paikannustietoa.

### **3.4 Sähkömagneettinen paikantaminen**

Sähkömagneettinen paikantaminen perustuu lähettimen ja vastaanottimien väliseen sähkömagneettiseen vuorovaikutukseen. Lähettimessä on kolme ortogonaalisesti (x-, y- ja z-akselin suuntaisesti) asetettua käämiä, joissa kulkeva virta luo heikon magneettikentän. Magneettikenttä aiheuttaa vastaanottimen vastaavissa käämeissä sähkövirran, joka voidaan mitata. Mitatun virran perusteella voidaan laskea vastaanottimen sijainti ja asento lähettimeen nähden. (Sherman ja Craig 2003, s. 78.)

Sähkömagneettisen paikantamisen etuna on se, että lähettimen ja vastaanottimien väliset näköesteet eivät estä paikannusta; toisaalta tilassa olevat metalliesineet ja magneettikentän lähteet voivat tuottaa häiriöitä. Lisäksi sähkömagneettinen paikantaminen toimii tarkasti vain tietyllä säteellä. (Sherman ja Craig 2003, s. 79.) Tosin esimerkiksi sähkömagneettisella paikannuksella toteutetun Sixensen STEM Systemin toimintasäteeksi on ilmoitettu n. 3 m (Sixense 2016b), mikä lienee riittävä useimpiin olohuoneisiin.

### **3.5 Mekaaninen paikantaminen**

Mekaaninen paikantaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi nivelletyillä puomilla (Sherman ja Craig 2003, s. 79), jonka yksi tai useampi osa kiinnitetään käyttäjään. Käyttäjän liikkeet välittyvät puomin niveliin, ja niistä voidaan laskea käyttäjän ruumiinosien sijainti ja kiertokulma suhteessa toisiinsa. Tämän tyyppisen paikantamisen merkittävin heikkous on se, että käyttäjä voi liikkua vain laitteen sallimissa rajoissa (Sherman ja Craig 2003, s. 81). Kuluttajakäyttöä ajatellen huonona puolena voidaan pitää myös sitä, että tällä paikannustavalla lait-



teista tulee melko kookkaita ja kalliita. Mekaanisen paikantamisen etuina ovat paikannuksen tarkkuus ja nopea mittaus, sekä helpohkosti toteutettavissa oleva kyky tuottaa monimutkaista haptista palautetta kuten vastavoimia (Sherman ja Craig 2003, s. 80).

## 4 Syöttölaitteet

Virtuaalitodellisuuden syöttölaite on jokin laite tai useiden laitteiden kokonaisuus, jonka avulla käyttäjä voi vuorovaikuttaa virtuaalimaailman kanssa luonnollisella tavalla kehonsa liikkeillä. Koska tällainen vuorovaikutus on virtuaalitodellisuuden perusta, syöttölaitteet ovat virtuaalitodellisuudelle ensiarvoisen tärkeitä. Syöttölaitteet mahdollistavat vuorovaikutuksen tuottamalla paikannustietoa edellisessä luvussa 3 esitetyillä tavoilla. Esittelen seuraavaksi kaksi syöttölaitteiden päätyyppiä: proppi ja platformi.

### 4.1 Propit

Proppien tarkoitus on mahdollistaa virtuaalitodellisuudessa liikkuminen ja sen manipulointi luvussa 2.3 esitetyllä tavalla. Sherman ja Craig (2003, s. 98) määrittelevät propin fyysiseksi kappaleeksi, jossa voi olla painikkeita, liipaisimia ja ohjaussauvoja. He toteavat, että proppien perimmäinen tavoite on antaa käyttäjän vuorovaikuttaa virtuaalimaailman kanssa mahdollisimman luonnollisella tavalla niin, että hän ei parhaimmassa tapauksessa edes huomaa proppia, vaan kokee olevansa vuorovaikutuksessa suoraan virtuaalimaailman kanssa. Koska vuorovaikutuksen luonnollisuus vahvistaa immersion tunnetta, tätä voidaan pitää erittäin toivottavana ominaisuutena varsinkin peli- ja viihdekäyttöön tarkoitetuille syöttölaitteelle.

Kaupalliset propit toteutetaan ulkoisesti varsin yhtenäisellä tyylillä: ne ovat jonkinlaisia kädessä pidettäviä sauvamaisia ohjaimia, joissa on edellä mainittuja painikkeita, liipaisimia ja ohjaussauvoja. Paikannusteknologioiden osalta proppien toteutus vaihtelee valmistajittain. Kuvia propeista löytyy sivulta 17 kuvat 3 ja 4.

### 4.2 Platformit

Platform-tyyppiset syöttölaitteet ovat isoja ja käytännössä liikkumattomia laitteita, joiden sisällä käyttäjä voi olla (Sherman ja Craig 2003). Platformit ovat pienimmillään metrin halkaisijaltaan olevia kaiteellisia ympyröitä ja suurimmillaan hydraulisella varustettuja useiden tuhansien kilogrammojen painoisia replikoita lentokoneen ohjaamosta. Keräämässäni aineis-

tossa platformeja on käytetty paikallaan kävelyn toteuttamiseen erilaisilla kävelyalustoilla. Jaan keräämässäni lähdemateriaalissa esiintyvät toteutustavat alustan kitkaisuuden mukaan suuri- ja pienikitkaisiin kävelyalustoihin.

Suurikitkainen alusta voi olla yksi- tai monisuuntainen. Yksisuuntainen kävelyalusta on verrattavissa kuntosalin juoksumattoon. Sen ongelma on, että käyttäjän täytyy kääntyä virtuaalitodellisuudessa jollain muulla tavalla kuin jaloillaan, esimerkiksi käyttämällä ohjaussauvaa, mitä ei voi pitää kovin luonnollisena tapana kääntyä. Monisuuntaisessa kävelyalustassa tätä ongelmaa ei ole, mutta kääntymisen toteuttaminen tyydyttävästi on todettu vaikeaksi (De Luca ym. 2013). Sekä yksi- että monisuuntainen kävelyalusta perustuu siihen, että alustaa siirretään vastakkaiseen suuntaan kuin mihin käyttäjä kävelee, jolloin käyttäjä saadaan pidettyä keskimäärin laitteen keskellä. Monisuuntaisen alustan tapauksessa kävelysuunnan havaitsemiseen tarvitaan lisäksi kamera tai muu paikannuslaite. Tämän tyyppiset kävelyalustat ovat verrattain kalliita toteuttaa, koska niissä on paljon liikkuvia osia, kuten moottoreita ja mahdollisesti myös hydrauliiikkaa.

Pienikitkaisen kävelyalustan toiminta perustuu alustan ja jalan välisen kitkan minimointiin. Kun käyttäjä kiinnitetään lantiostaan alustaa kiertävään kehikkoon, saadaan tuotettua pienen kitkan voittava vastavoima, jolloin käyttäjä pysyy laitteen keskellä. Pienikitkaiset alustat ovat suurikitkaisia alustoja kevyempiä ja halvempia valmistaa, koska niissä ei tarvita moottoreita, vaan yksinkertainen jalkojen liikkeen havaitseva anturi riittää. En löytänyt tutkimustietoa pienikitkaisista alustoista, mutta esittelen seuraavassa luvussa kaksi kaupallista toteutusta.

## 5 Nykyaikaiset syöttölaitteiden toteutukset

Esittelen muutamia vuonna 2016 vähintään ennakkotilausvaiheessa olevia laitteita valmistajittain. Koska valmistajien verkkosivuilla ei pääsääntöisesti ollut faktatietoa laitteista, olen käyttänyt lähteinä myös tekniikan alan tuotteita esitteleviä verkkojulkaisuja ja youtube.com -sivustolla julkaistuja valmistajien edustajien haastatteluvideoita.

### 5.1 Sixense

Sixensen kehittämä STEM System koostuu lähettimestä sekä kahdesta propista (Sixense 2016b). Jalkojen ja pään paikannukseen myydään lisäksi erillisiä paikannusyksiköitä — STEM:ejä. Koko laitteisto näkyy kuvassa 3. Suurin laitteiston mahdollistama määrä paikannettuja pisteitä on viisi (Sixense 2016b). Jos näiksi viideksi pisteeksi valitaan pää, kädet ja jalat, virtuaalikehon liikkeet saadaan vastaamaan käyttäjän liikkeitä melko tarkasti.

STEM System perustuu magneettiseen paikannukseen, ja tuotteen esittelytekstissä mainitaan erikseen, että siinä ei käytetä liikkeeseen perustuvia sensoreita, jolloin vaeltamista ei esiinny (Sixense 2016b). STEM Systemin suurin käyttöetäisyys lähettimestä on n. 3 m (Sixense 2016b). Sixense tekee yhteistyötä mm. Oculuksen ja Virtuixin kanssa, jotta laitteet täydentäisivät toisiaan mahdollisimman hyvin (Tested 2014). Esittelen Virtuixin kehittämän kävelyalustan jäljempänä.

STEM System on Sixensen ja Razerin aiemmin yhteistyönä toteuttaman Hydra-nimisen syöttölaitteen kehittyneempi versio. Hydran paikannustarkkuus oli etäisyyden osalta 1 mm ja kiertokulman osalta  $1^\circ$  (Sixense 2016a). Sixense (2016b) lupaa STEM System:n olevan Hydrasta tarkempi, mutta ei mainitse tarkkoja lukuja. Hydrasta poiketen STEM:n paikannusyksiköt ja ohjaimet ovat langattomia (Sixense 2016b), mikä parantaa niiden käytettävyyttä ja sen kautta käyttäjän immersiota. STEM Systemsin toimitukset kuluttajille aloitetaan huhtikuussa 2016 (Sixense 2016b).



**Kuva 3:** Sixensen STEM kontrollit, kolme paikannusyksikköä ja magneettikentän tuottava lähetinyksikkö. Kuva on ladattu Sixensen verkkokaupasta osoitteesta: <http://store.sixense.com/collections/stem>



**Kuva 4:** HTC:n ja Valven yhteistyössä toteuttama Vive-virtuaalitodellisuuslaitteisto. Kuvassa ylhäällä ovat majakat, keskellä VR-lasit ja alhaalla ohjaimet. Laitteissa näkyvät ympyrän muotoiset kolot ovat valosensoreita. Kuva on ladattu HTC:n sivuilta osoitteesta: <http://www.htcvive.com/eu/>

## 5.2 Valve ja HTC

Valven ja HTC:n yhteistyössä toteuttama lighthouse-teknologia on valosensoreilla toteutettu optinen paikannusteknologia (Gizmodo 2015). Valosensorit ovat kuvan 4 laitteissa näkyvät ympyrän muotoiset kolot. Paikannuksen referenssipisteinä toimivat kaksi valopulsseja tuottavaa lähetintä (Gizmodo 2015), joita kutsutaan majakoiksi. Lighthouse-teknologialla toteutettujen VR-lasien ja -kontrollereiden toimitus aloitetaan huhtikuussa 2016 (HTC 2016).

Lighthouse-paikannus perustuu siihen, että majakka tuottaa lyhykestoisen valopulssin, jonka laitteen valosensorit havaitsevat. Pulssien välillä majakka tuottaa pyörivillä lasereilla eriaikaisesti x- ja y-akselin suuntaisen säteen, joka pyyhkäisee tilan yli. Pulssin ja laserin välisestä aikaerosta lasketaan yksittäisen valosensorin etäisyys majakkaan. Kaikkien sensoreiden mittaustulosten perusteella lasketaan syöttölaitteen sijainti ja asento. Sekä kontrollerit että virtuaalilasit käyttävät paikannukseen samoja majakoita. (Gizmodo 2015.)

### 5.3 Virtuix

Virtuixin valmistama Omni-kävelyalusta on noin metrin halkaisijaltaan oleva kuppi, jota kiertää suunnilleen ihmisen lantion korkeudella kehä kuten kuvassa 5. Kehän päällä lepää käyttäjään kiinnitettävät valjaat, jotka pitävät käyttäjän paikallaan. Omnin käyttäminen vaatii matalakitkaiset erikoiskengät (Virtuix 2016). Jalkojen paikannukseen Omnin mukana toimitetaan kenkiin kiinnitettävät kiihtyvyyssensoreilla varustetut paikannusyksiköt (Virtuix 2016). Paikannuksen vaeltamisesta tai kalibraation tarpeesta en löytänyt mainintaa Virtuixin verkkosivuilta tai muistakaan lähteistä.

Omni mahdollistaa kävelemisen, juoksemisen ja hyppäämisen, mutta ei kyykistymistä, koska kehä on kiinteällä korkeudella. Valjaiden varassa voi myös istua. Omnin arvioitu toimitusaika on vuoden 2016 toinen kvartaali. (Virtuix 2016)



**Kuva 5:** Virtuixin Omni-kävelyalusta. Kuva on ladattu osoitteesta:  
<http://www.virtuix.com/products/>

## 5.4 Cyberith

Cyberithin valmistama Virtualizer (ks. kuva 2 sivulla 8) vastaa Omnia suurelta osin, mutta sen alusta on tasainen. Virtualizer ei vaadi erikoiskenkiä toimiakseen, koska alustan ja tavallisen sukan välinen kitka on riittävän pieni. Virtualizer havaitsee askeleet optisilla sensoreilla (Cyberith 2016). Koska Virtualizerin kehä liikkuu korkeussuunnassa käyttäjän mukana, sillä voi myös kyykistyä.

## 6 Yhteenveto

Virtuaalitodellisuuden neljä avainelementtiä ovat vuorovaikutus, virtuaalimaailma, aistipalautte ja immersio. Koska syöttölaitteen tehtävä on mahdollistaa vuorovaikutus VR-sovelluksen kanssa, ilman sitä ei voida edes puhua virtuaalitodellisuudesta. Virtuaalimaailma ei itsessään liity syöttölaitteisiin lainkaan, vaan se on ohjelmiston ominaisuus, ja aistipalautteen tuottaminen on näyttölaitteiden ominaisuus. Vuorovaikutuksen lisäksi etenkin viihdekäyttöön tarkoitettujen syöttölaitteiden kannalta tärkein elementti on immersio, joka vaikuttaa hyvin paljon käyttäjän virtuaalikokemukseen.

Tärkeimmät toiminnot, jotka käyttäjän täytyy pystyä suorittamaan virtuaalitodellisuudessa, ovat virtuaalitodellisuuden manipuloiminen ja siinä liikkuminen. Virtuaalitodellisuuden manipulointiin tarkoitetut kaupalliset syöttölaitteet ovat pääasiassa proppi-tyyppisiä. Proppit mahdollistavat lentämällä liikkumisen, mutta se ei välttämättä tuota käyttäjälle riittävän immersivistä kokemusta, koska se ei ole ihmiselle luonnollinen tapa liikkua. Platform-tyyppiset syöttölaitteet mahdollistavat virtuaalitodellisuudessa liikkumisen kävelemällä. Kullattajatasoisissa laitteissa paikallaan käveleminen matalakitkaisella alustalla on suosituin kävelymetaforan toteutustapa oletettavasti siksi, että se on todellista kävelyä ja suurikitkaisia alustoja halvempi toteuttaa ja se vaatii vähemmän tilaa fyysisessä käyttöympäristössä.

Syöttölaitteen keskeisin tehtävä on käyttäjän paikantaminen. Käyttäjäystävällinen ja immersiota tukeva syöttölaite on mahdollista toteuttaa monilla erilaisilla paikannusteknologioilla, joista tällä hetkellä suosituimpia vaikuttaisivat olevan magneettinen ja optinen paikantaminen. Käyttäjäkokemuksen kannalta paikannusteknologioiden merkittävimmät eroavuudet liittyvät paikannuksen häiriönsietokykyyn ja tarkkuuteen sekä laitteen painoon. Laitteen langattomuus on myös tärkeää, sillä laitteista roikkuvat johdot voivat häiritä käyttäjää ja heikentää immersiota.

Julkinen tutkimus syöttölaitteista, ja etenkin niiden immersiotuottokyvystä, on varsin vähäistä näyttölaitteisiin verrattuna. Koska syöttölaitteet ovat näyttölaitteiden kanssa virtuaalitodellisuudelle aivan yhtä tärkeitä, niitä on syytä tutkia tulevaisuudessa enemmän. Julkinen tutkimus aiheesta on varmasti arvokasta niin laitevalmistajille kuin sovelluskehittäjillekin.



## Lähteet

Barrera, S., H. Takahashi ja M. Nakajima. 2004. “Hands-free navigation methods for moving through a virtual landscape walking interface virtual reality input devices”. Teoksessa *Computer Graphics International, 2004. Proceedings*, 388–394. doi:10.1109/CGI.2004.1309239.

Bowman, D., E. Kruijff, J.J. LaViola ja I. Poupyrev. 2004. *3D User Interfaces: Theory and Practice, CourseSmart eTextbook*. Pearson Education. ISBN: 9780133390568. [https://books.google.fi/books?id=JYzmCkf7yNcC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=JYzmCkf7yNcC&printsec=frontcover&hl=fi&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

Cyberith. 2016. *Press kit*. Ladattavissa WWW-sivulta, <http://cyberith.com/press/>, ladattu 26.2.2016.

De Luca, A., R. Mattone, P. Robuffo Giordano, H. Ulbrich, M. Schwaiger, M. Van den Bergh, E. Koller-Meier ja L. Van Gool. 2013. “Motion Control of the CyberCarpet Platform”. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 21, numero 2 (): 410–427. ISSN: 1063-6536. doi:10.1109/TCST.2012.2185051.

Feng, Jinbo, Isaac Cho ja Zachary Wartell. 2015. “Comparison of Device-Based, One and Two-Handed 7DOF Manipulation Techniques”. Teoksessa *Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Spatial User Interaction, 2–9. SUI '15*. Los Angeles, California, USA: ACM. ISBN: 978-1-4503-3703-8. doi:10.1145/2788940.2788942. <http://doi.acm.org/10.1145/2788940.2788942>.

Foxlin, E. 1996. “Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter”. Teoksessa *Virtual Reality Annual International Symposium, 1996., Proceedings of the IEEE 1996*, 185–194, 267. doi:10.1109/VRAIS.1996.490527.

Gizmodo. 2015. *This Is How Valve's Amazing Lighthouse Tracking Technology Works*. Saatavilla WWW-muodossa, <http://gizmodo.com/this-is-how-valve-s-amazing-lighthouse-tracking-technol-1705356768>, viitattu 25.2.2016.

- HTC. 2016. *HTC Europe Online Store*. Saatavilla WWW-muodossa, [https://store.htcvivecart.com/store/htcemea/en\\_IE/quickcart/ThemeID.40563500/OfferID.48383079101](https://store.htcvivecart.com/store/htcemea/en_IE/quickcart/ThemeID.40563500/OfferID.48383079101), viitattu 29.2.2016.
- Kodaka, K., T. Ogata ja H.G. Okuno. 2005. "Walking with body-sense in virtual space using the nonlinear oscillator". Teoksessa *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*, 324–329 Vol. 1. Volyymi 1. doi:10.1109/ICSMC.2005.1571166.
- Kulik, A., B. Frohlich ja R. Blach. 2006. "'two - 4 - six- A Handheld Device for 3D-Presentations". Teoksessa *3D User Interfaces, 2006. 3DUI 2006. IEEE Symposium on*, 167–170. doi:10.1109/VR.2006.2.
- Ruddle, Roy A., Ekaterina Volkova ja Heinrich H. Bühlhoff. 2013. "Learning to Walk in Virtual Reality". *ACM Trans. Appl. Percept.* (New York, NY, USA) 10, numero 2 (): 11:1–11:17. ISSN: 1544-3558. doi:10.1145/2465780.2465785. <http://doi.acm.org/10.1145/2465780.2465785>.
- Sherman, William R., ja Alan B. Craig. 2003. *Understanding virtual reality : interface, application, and design*. 582 s. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann. ISBN: 1-55860-353-0 (inb.)
- Sixense. 2016a. *Razer Hydra*. Saatavilla WWW-muodossa, <http://sixense.com/razerhydra>, viitattu 25.2.2016.
- . 2016b. *STEM System™*. Saatavilla WWW-muodossa, <http://sixense.com/wireless>, viitattu 29.2.2016.
- Terziman, Léo, Maud Marchal, Mathieu Emily, Franck Multon, Bruno Arnaldi ja Anatole Lécuyer. 2010. "Shake-your-head: Revisiting Walking-in-place for Desktop Virtual Reality". Teoksessa *Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 27–34. VRST '10. Hong Kong: ACM. ISBN: 978-1-4503-0441-2. doi:10.1145/1889863.1889867. <http://doi.acm.org/10.1145/1889863.1889867>.
- Tested, Youtube-käyttäjä. 2014. *Hands-On with Sixense STEM VR Motion-Tracking System*. Video. Saatavilla WWW-muodossa, <https://www.youtube.com/watch?v=C8z-On6FBTM>, viitattu 24.3.2016.

Williams, A. 2015. "Reality check [Consumer Electronicsvirtual Reality 3D]". ID: 1, *Engineering & Technology* 10 (2): 52–55.

Virtuix. 2016. *Products | Virtuix Omni*. Saatavilla WWW-muodossa, <http://www.virtuix.com/products/>, viitattu 24.3.2016.