

Hanna-Riikka Rantamaa

**VIRTUAALITODELLISUUDEN
HYÖDYNTÄMINEN
HAMMASLÄÄKETIEESSÄ**

Vuorovaikutustapojen vertailu
kokeellisella tutkimuksella

TIIVISTELMÄ

Hanna-Riikka Rantamaa: Virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen hammaslääketieteessä:
Vuorovaikutustapojen vertailu kokeellisella tutkimuksella
Pro gradu -tutkielma
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2021

Virtuaalitodellisuus kehitty jatkuvasti uusien teknologioiden ja sovellusten avulla. Uusilla ratkaisuilla pyritään löytämään parempia ja tehokkaampia vaihtoehtoja nykyisiin toimintamalleihin. Onkin tärkeää päivittää ja kehittää käytössä olevia työkaluja, ja virtuaalitodellisuus tarjoaa uudenlaisen käyttökokemuksen jo käytössä oleville työkaluille.

Hammaslääketieteessä kuvannetaan hampaiden aluetta ja näitä kolmiulotteisia kuvia hammaslääketieteen asiantuntijat käyttävät työssään. Ongelmia syntyy, kun kolmiulotteisia malleja tarkastellaan kaksiulotteisilta tietokoneen näytöiltä. Virtuaalitodellisuuden avulla kolmiulotteisia hampaiston kuvia on mahdollista tarkastella kolmiulotteisessa maailmassa, mikä poistaisi yhteensopivuusongelmia.

Tässä pro gradu -tutkielmassa toteutettiin kokeellinen tutkimus, jossa vertailtiin kolmea virtuaalitodellisuuden vuorovaikutusmenetelmää. Tarkoituksena oli kartoittaa näiden sopivuutta toimintoihin, joita hammaslääketieteen asiantuntijat voisivat käyttää työssään. Tutkimukseen osallistui 12 henkilöä. Tutkimuksessa mitattiin objektiivista dataa, kuten vuorovaikutusmenetelmien nopeutta ja tarkkuutta sekä subjektiivista dataa kuten luonnollisuutta, helppoutta ja mielekkyyttä.

Tutkimuksessa osallistujat tekivät samat tehtävät käyttäen kaikkia vertailtavia vuorovaikutusmenetelmiä. Vertailtavat menetelmät olivat hiiri, kädet ja ohjainyhdistelmä. Tehtävissä osallistuja oli vuorovaikutuksessa 3D-mallin kanssa ja teki siihen merkintöjä.

Tutkimuksessa löytyi tilastollisesti merkittäviä eroja tarkkuudessa, luonnollisuudessa, helppoudessa sekä sopivuudessa päivittäiseen käyttöön. Ohjainyhdistelmä oli useimmilla asteikoilla sopivin, kun taas käsillä vuorovaikuttaminen jäi monilla mitatuilla asteikoilla heikoimmaksi.

Avainsanat: vuorovaikutusmenetelmät, virtuaalitodellisuus, hammaslääketiede

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Vuorovaikutusmenetelmät virtuaalitodellisuudessa	3
2.1	Kädet vuorovaikutusmenetelmänä	5
2.2	Ohjaimet vuorovaikutusmenetelmänä	7
2.3	Katse vuorovaikutusmenetelmänä	8
2.4	Puhe vuorovaikutusmenetelmänä	9
2.5	Muut virtuaalitodellisuuden vuorovaikutusmenetelmät	10
2.6	Yhteenveto	12
3	Hammaslääketieteen kuvantamismenetelmät	13
3.1	Hampaiston ja leukojen alueen kuvantamismenetelmät	13
3.1.1	Intraoraalikuvantaminen	13
3.1.2	Panoraamatomografia	14
3.1.3	Tietokonetomografia	15
3.1.4	Kartiokeilatietokonetomografia	15
3.2	Virtuaalitodellisuus hammaslääketieteessä	17
3.3	Yhteenveto	18
4	Vuorovaikutus kolmiulotteisen hammasmallin kanssa	19
5	Kokeellisen tutkimuksen toteutus	21
5.1	Osallistujat	21
5.2	Tutkimustehtävät ja pilottitesti	22
5.3	Kyselylomake	25
5.4	Vertailtavat vuorovaikutus- ja merkintätavat	25
5.5	Yhteenveto	27
6	Tulokset ja analysointi	28
6.1	Datasta kerätyt objektiiviset tulokset	28
6.1.1	Nopeus	28
6.1.2	Merkintöjen määrä	29
6.1.3	Merkintöjen tarkkuus	30
6.2	Kyselylomakkeiden subjektiiviset tulokset	32
6.3	Yhteenveto	36
7	Keskustelu	37

8	Lopuksi.....	40
9	Viiteluettelo	41
	LIITE 1	46
	LIITE 2	47

1 Johdanto

Virtuaalitodellisuus (engl. virtual reality, VR) on konsepti, joka luo tietokoneen avulla vaikutelman kolmiulotteisesta maailmasta, jossa käyttäjä voi olla suoraan vuorovaikutuksessa virtuaalisten kohteiden kanssa [Bryson 1996]. Tietokoneella luotu visuaalinen vaikutelma ympäröi täysin käyttäjän korvaten ympäröivän todellisen maailman [Unity Technologies 2020]. Virtuaalitodellisuus on yhä arkisempaa ja tavallinenkin ihminen voi ottaa sen käyttöönsä kotona. Tästä huolimatta virtuaalitodellisuuden hyödyntäminen eri aloilla on vielä hyvin keskeneräistä, vaikka sen potentiaali onkin tunnistettu. Tutkielmassa esitellään virtuaalitodellisuudessa käytettäviä vuorovaikutusmenetelmiä ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia.

Tässä tutkielmassa perehdytään myös hammaslääketieteen kuvantamismenetelmiin teoriatasolla. Kuvantaminen on yleisesti käytetty tapa, joka tähtää huomaamaan normaalin anatomian ja sairauden oireet. Kuvantaminen on myös oleellinen osa tieteellisen tutkimuksen tekoa. Monimutkaisista kuvantamismenetelmistä huolimatta, tavanomaisen kuvantamisen roolia ei pitäisi aliarvioida. Monissa tapauksissa tavanomaiset röntgenkuvat ovatkin tärkein kuvantamismenetelmä, mutta tarvittaessa se voidaan korvata monimutkaisemmilla 3D-kuvantamismenetelmillä. [Shokri *et al.* 2020]

Itse tutkimus tehtiin osana Tampereen yliopiston Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery -projektia [DPI 2021]. Tutkimuksessa pyrittiin löytämään kolmesta vuorovaikutusmenetelmästä sopivin virtuaalitodellisuudessa tehtävään hammasleikkauksen suunnitteluun. Tutkimukseen osallistui 12 henkilöä ja he olivat vuorovaikutuksessa 3D-mallien kanssa tutkimustehtävien aikana. Tehtävä pyrki demonstroimaan yksinkertaistettua tilannetta, jossa hammaslääketieteen asiantuntija suunnittelee vaativaa hammasleikkausta. Tämä tapahtuu tutustumalla potilaan hampaistoon siitä otetun kolmiulotteisen mallin avulla sekä tekemällä malliin leikkauksen kannalta olennaisia merkintöjä. Merkintä- ja vuorovaikutusmenetelmistä haluttiin kerätä erikseen dataa, vaikka tutkimustehtäviä suoritettaessa niitä käytettiin samanaikaisesti. Tutkimuskysymyksenä oli: *Mikä on sopivin vuorovaikutusmenetelmä olla vuorovaikutuksessa 3D-mallin kanssa virtuaalitodellisuudessa?*

Tuloksista huomattiin, että Valve Index -ohjaimen ja Logitech VR Ink -kynän yhdistelmä toimi useimmilla mitta-asteikoilla selkeästi parhaiten. Se oli sekä tehokas että mieluisa käyttää. Yhdistelmää keuhuttiin myös luonnolliseksi, vaikka käsissä joutuikin pitämään ylimääräisiä laitteita. Myös kirjallisuuskatsaus tuki tulosta. Vuorovaikutusmenetelmänä hiiri oli yksittäisissä merkinnöissä tarkempi kuin ohjainyhdistelmä. Hiirestä pidettiin muutenkin, sillä se oli tuttu vuorovaikutuslaite. Hiiren suurimmaksi ongelmaksi muodostui kolmiulotteisten mallien merkintä kaksiulotteisesti liikkuvalla hiirellä, sillä merkintä onnistui vain tietystä kuvakulmasta. Tutkimuksessa huonoiten menestyi vuorovaikutusmenetelmä käsillä objektiivisen sekä subjektiivisen datan perusteella. Kuitenkaan käsien

ja hiiren ero ei ollut suuri subjektiivisilla mitta-asteikoilla, kun taas objektiivisilla mitta-asteikoilla ero oli selkeä. Tilastollista merkittävyyttä löytyi ohjaimen hyväksi niin vuorovaikutustavan luonnollisuudessa, subjektiivisessa tarkkuudessa, käytön helppoudessa ja jokapäiväisen käytön mahdollisuudessa.

Tutkielman toisessa luvussa esitellään virtuaalitodellisuus sekä erilaisia vuorovaikutusmenetelmiä virtuaalitodellisuudessa. Tämän jälkeen kolmannessa luvussa käsitellään hammaslääketieteen kuvantamismenetelmiä sekä virtuaalitodellisuuden käyttöä hammaslääketieteessä. Neljännessä luvusta alkaa itse tutkimuksen kuvaus, niin että ensin esitellään tutkimusongelma. Viidennessä luvussa käydään läpi tutkimuksen toteutuksen vaiheet ja sen jälkeen kuudennessä luvussa on esitelty tulokset ja niitä on analysoitu. Seitsemännessä luvussa verrataan tuloksia aiempiin tutkimuksiin ja viimeisenä on tutkielman summaava luku.

2 Vuorovaikutusmenetelmät virtuaalitodellisuudessa

Tässä luvussa esitellään virtuaalitodellisuus ja siihen liittyviä termejä. Lisäksi tutustutaan tarkemmin neljään vuorovaikutusmenetelmään, jotka ovat yleisiä virtuaalitodellisuudessa.

Virtuaalitodellisuuden määrittämisessä on tärkeää, että virtuaalitodellisuus on tietokoneella tuotettu, kolmiulotteinen ja vuorovaikutteinen [Bryson 1996]. Bryson määrittelee kolme komponenttia, joista virtuaalitodellisuuskonsepti yleensä koostuu:

1. Käyttäjän päässä olevasta laitteesta, joka sisältää näytön. Näytön avulla käyttäjä näkee tapahtumat omasta näkökulmastaan.
2. Tehokkaasta tietokoneesta, joka laskee ja kuvantaa virtuaalimaailman.
3. Laitteesta, jonka avulla käyttäjä on vuorovaikutuksessa kolmiulotteisen virtuaalitodellisuuden kanssa.

Ajan kuluessa virtuaalitodellisuus on kehittynyt niin paljon, että nykyään käyttäjä voi olla vuorovaikutuksessa omien käsiensä, silmiensä tai puheen avulla, eli välttämättä erilisiä ohjaimia ei tarvita. Brysonin määritelmä on muuten pysynyt hyvinkin samanlaisena yli kaksikymmentä vuotta. Unity Technologies [2020] lisäävät tähän määritelmään vielä ajantasaisuuden. Käyttäjä pystyy päättään kääntämällä tarkastelemaan virtuaalitodellisuutta reaaliaikaisesti ja vuorovaikutus on myös reaaliaikaista.

Virtuaalitodellisuuden kolmiulotteinen käyttöliittymä on hyvin erilainen kuin perinteinen kaksiulotteinen graafinen käyttöliittymä, joka on käytössä pöytätietokoneissa, kannettavissa tietokoneissa ja mobiililaitteissa. Toisin kuin kaksiulotteisessa käyttöliittymässä, kolmiulotteisessa ympäristössä kohteet voivat olla lähempänä, suurempia ja ne voivat liikkua syvyys suunnassa [Khamis *et al.* 2018]. Tämän takia samat tavat, säännöt ja käytännöt eivät toimi kaksi- ja kolmiulotteisessa käyttöliittymässä [Bryson 1996], vaan kehittäjät ovat joutuneet luomaan uusia vuorovaikutustapoja ja käytäntöjä. Virtuaalitodellisuudessa esimerkiksi kursorin käytössä ilmenee yhteensopivuusongelmia. Kursori ei tavoita kolmiulotteisen ympäristön syvyyttä ja tämä kursorin ja kohteen yhteensopimattomuus vaikeuttaa kohteiden valintaa, mikä taas ei ole toivottua [Argelaguet ja Andujar 2012]. Uusien valintatapojen kehittäminen on ollut pakollista virtuaalitodellisuuden kehittyessä.

Virtuaalitodellisuuslasien avulla käyttäjälle esitetään virtuaalimaailma. Virtuaalitodellisuuslasit esittävät virtuaalitodellisuuden joko yhden tai kahden silmien eteen sijoitetun näytön avulla [Smith 2015]. Näyttöjen tarkoitus on täyttää mahdollisimman paljon käyttäjän näkökentästä. Virtuaalitodellisuuslaseja on saatavilla monelta eri valmistajalta ja ne kehittyvät koko ajan. Viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana markkinoille on tullut virtuaalitodellisuuslaseja, joissa sisäinen näyttö voidaan korvata puhelimella. Myös langattomat virtuaalitodellisuuslasit ja lasit, joita voidaan ohjata käyttäjän käsillä ilman

ohjauslaitteita ovat jo nykypäivää. Kuvassa 1 on tehokkaat Oculus Rift S -virtuaalitodellisuuslasit ja niiden kanssa käytettävät ohjaimet. Nämä virtuaalitodellisuuslasit yhdistetään tietokoneeseen virtajohdolla, mikä hieman rajoittaa käyttäjän liikkumista. Ilman ohjaimia käyttäjä voi vuorovaikuttaa käsillään, mutta ohjaimet tuovat lisäominaisuuksia. Anturit ja kamerat siirtävät käyttäjän liikkeen virtuaalitodellisuuteen.



Kuva 1. Oculus Rift S -virtuaalitodellisuuslasit ja Touch-ohjaimet [Oculus 2021].

Eri virtuaalitodellisuuslasit ja virtuaalitodellisuussovellukset tukevat erilaisia vuorovaikutusmenetelmiä. Artikkelissaan Argelaguet ja Andur [2012] tutkivat 3D-mallin valintatapoja virtuaalitodellisuudessa. Heidän mukaansa vuorovaikuttaminen kolmiulotteisten kohteiden kanssa vaatii käyttäjän fyysistä liikkumista ja elehtimistä. Se voi olla esimerkiksi kohteen valitsemista tarttumalla siihen tai osoittamalla sitä yhdellä tai kahdella kädellä. Virtuaalitodellisuussovellusten yksi suurimmista ongelmista onkin käyttäjän fyysisen ulottuvuuden rajallisuus, varsinkin jos vuorovaikutus tapahtuu kädessä pidettävillä ohjaimilla. Itse virtuaalitodellisuudessa kohteet voivat sijaita kaukanakin, mutta todellisuudessa käyttäjän ulottuvuus on hyvin rajallinen. Toinen heidän mainitsema ongelmakohta on käyttäjän mahdollinen nopeampi uupuminen. Perinteiseen työpöytäkonetyöskentelyyn verrattuna seisominen, erilaisten sensorien pitäminen, tuen puute käsissä sekä painavat laitteet lisäävät uupumusta. Kun vuorovaikutus tapahtuu käyttäjän omalla vartalolla, uupumus voi kasvaa ja aiheuttaa lihasrasitusta. Vielä lopuksi he mainitsevat, että käytettävyyden näkökulmasta vuorovaikutusmenetelmän tulee tukea nopeaa kohteiden valintaa, uuvuttaa käyttäjää mahdollisimman vähän, olla täsmällinen, virhe vapaa, helposti ymmärrettävä ja ohjailtava. Nämä toimivat edelleen perusedellytyksinä hyvälle vuorovaikutukselle.

Multimodaaliseksi kutsutaan järjestelmää, jossa käytetään samanaikaisesti kahta tai useampaa ihmisen aisteista. Toisin sanoen multimodaalinen virtuaalitodellisuus käyttää jotakin yhdistelmää ihmisen viidestä aistista [Fritschi *et al.* 2008]. Esimerkkinä toimii tapaus, jossa visuaalisesti nähdään erilaisia tekstuureja virtuaalitodellisuudessa. Samaan aikaan käytetään haptista palautetta, eli tuntopalautetta, antavaa laitetta tekstuurien tunnisteluun. Näin käytetään sekä näkö- että tuntoaistia. Tämän määritelmän lisäksi, Nigay ja Coutaz [1993] määrittelevät multimodaalisuuden ohjelmiston kyvyksi kommunikoida

käyttäjän kanssa usean eri kanavan kautta. Eri kanavat, eli ohjaustavat, voivat olla joko rinnakkaisia, eli käytössä samanaikaisesti, tai vaihtoehtoisia. Esimerkkinä tästä toimii artikkelissa esitelty NoteBook. Siinä käyttäjä voi hiirellä osoittaa uuden muistiinpanon sijaintia samanaikaisesti, kun ääneen antaa komennon uuden muistiinpanon luomisesta. Muistiinpanon voi poistaa joko äänikomennolla tai hiiren klikkauksella.

Multimodaalisuutta voidaan virtuaalitodellisuudessa käyttää hyväksi esimerkiksi kaukaisten kohteiden valinnassa. Sen sijaan, että käytetään esimerkiksi monipainikkeisia ohjaimia, voidaan äänen ja eleiden avulla osoittaa ja valita haluttu kaukainenkin kohde [Kaiser *et al.* 2003]. Myös virtuaalitodellisuudessa vuorovaikutusmenetelmänä käytettävä katse on multimodaalista. Silmien lisäksi katse sisältää pään ja vartalon liikkeen, jotka kaikki ovat yhteydessä toisiinsa [Sidenmark ja Gellersen 2019].

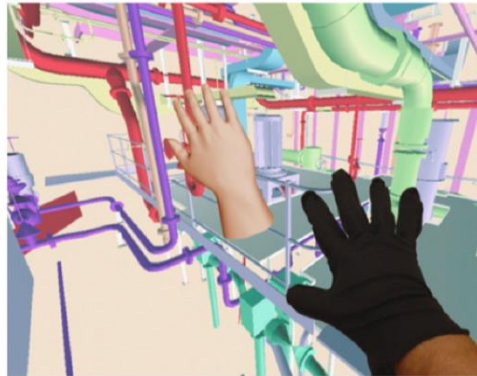
Virtuaalitodellisuutta kehitetään jatkuvasti, jotta siitä saadaan yhä luonnollisempi kokemus käyttäjälle. Virtuaalitodellisuussovellukseen valittu vuorovaikutusmenetelmä vaikuttaa suuresti käyttäjän tunteeseen sen luonnollisuudesta ja myös multimodaalisuus tekee virtuaalitodellisuussovelluksesta todentuntuisemman. Immersioksi kutsutaan tilannetta, jossa käyttäjä uppoutuu virtuaalitodellisuuteen ja kokee sen kuin siellä tapahtuva olisi todellista. Kolmiulotteisten asioiden näkeminen, virtuaalisten esineiden käsillä poimiminen ja näkymän liikkuminen pään liikkeiden mukana vahvistavat immersiota. Korkea immersiiivisyys tekee virtuaalitodellisuudesta realistisemman ja luo virtuaalitodellisuuteen läsnäolon tunnetta, mikä puolestaan tekee näistä sovelluksista käyttäjille vaikuttavamman. Bowmanin ja McMahanin [2007] tutkimuksessa käyttäjät kommentoivat immersiiivisen virtuaalitodellisuuden tarjoavan erilaisen kokemuksen kuin vuorovaikutus pöytätietokoneella olevan 3D-sovelluksen kanssa. Ayoub ja Pulijala [2019] käyttivät tutkimuksessaan virtuaalitodellisuuslasien lisäksi kuulokkeita ja teknisiä hanskojen ottaakseen näkö-, kuulo- ja tuntoaistin mukaan kokemukseen.

2.1 Kädet vuorovaikutusmenetelmänä

Nykyisissä virtuaalitodellisuuden teknologioissa ohjaus tapahtuu yleisimmin käsillä, luonnollisia kädenliikkeitä käyttäen. Käsien tai käsissä pidettävien ohjainten liike muunnetaan virtuaalitodellisuuteen erilaisten ulkoisten anturien ja sensorien välityksellä ja näin käyttäjä voi olla vuorovaikutuksessa virtuaalikohteiden kanssa. Kun käyttäjä voi käyttää luonnollisia käden liikkeitä, syntyy todenmukainen kokemus vuorovaikutuksesta [Esmaeili *et al.* 2020]. Kahden käden käyttö lisää immersiota verrattuna vain yhdellä kädellä vuorovaikuttamiseen [Yang *et al.* 2019]. Lisäksi Hanneman [2001] mukaan, käsillä vuorovaikuttamiseen vaikuttaa negatiivisesti ihmisen motoriikan epätarkkuus. Ulkoisten sensorien rinnalla käsien liikkeitä voidaan tunnistaa myös virtuaalilaseissa olevan kameran avulla. Kamera tunnistaa sen edessä olevia asioita, kuten käyttäjän kädet. Onkin tärkeää,

että tilassa, jossa kameralliset virtuaalilasit ovat käytössä, on tarpeeksi valoa, jotta kamera tunnistaa kohteet.

Virtuaalitodellisuudessa käyttäjän käsiä yleensä kuvaa virtuaalikädet. Kuvassa 2 on esitetty eräänlainen animoitu virtuaalikäsi, joka kopioi käyttäjän käden liikkeitä. Erilaiset eleet kuten koskettaminen, tarttuminen, nipistäminen ja osoittaminen ovat mahdollisia virtuaalimaailmassa. Virtuaalikäsillä voi saavuttaa, liikuttaa, pyörittää, venyttää, supistaa, vääntää tai muuten hallita kolmiulotteisia kohteita [Pietroszek 2019].



Kuva 2. Käyttäjän todellinen käsi muunnetaan virtuaalikädeksi, joka reaaliajassa vastaa käden liikkeitä [Argelaguet ja Andujar 2012].

Koska virtuaalikäsistä on pyritty luomaan mahdollisimman todenmukaiset, myös todellisen elämän haasteet ovat läsnä. Kuten jo mainittiin, käyttäjän rajallinen ulottuvuus on yksi virtuaalitodellisuuden haasteista. Ulottuvuuden lisäämiseksi Pfeuffer *et al.* [2017] ovat kehittäneet multimodaalisen virtuaalitodellisuuden sovelluksen, jossa virtuaalikäden lisäksi käyttäjä käyttää katsettaan vuorovaikutuksessa. Käyttäjä navigoi kohteen luo käden liikkeillä ja kohteen valinta tapahtuu katseen avulla. Toiseen mainittuun ongelmaan, eli uupumuksen vähentämiseen, virtuaalikättä käytettäessä sen sijaan ei ole tehty paljoakaan tutkimusta. Pitkäaikainen virtuaalikäden käyttö ei uupumuksen takia ole suositeltavaa [Pietroszek 2019].

Sen sijaan, että erilaiset ulkoiset sensorit tunnistaisivat käden liikkeitä, puettavaa teknologiaa (engl. wearable technology) on tuotu markkinoille. Yang *et al.* [2019] esittelevät puettavat hanskat, jotka keräävät tietoa käsien asennoista ja liikkeistä reaaliajassa. Hanskoissa olevat sensorit tunnistavat ja siirtävät käden tiedot kolmiulotteiseen maailmaan. Hanskojen avulla myös sormien asennot ja liikkeet pystytään keräämään tarkasti ja muutenkin koko käden tunnistustarkkuus on suuri. Heikkoudeksi artikkelissa mainitaan laitteen monimutkaisuus, kallis hinta ja heikko joustavuus.

Yksi tarkkana pidetty käsienjäljentämislaite on Leap Motion Controller [Weichert *et al.* 2013]. Se on laite, joka tunnistaa käsien eleet ja sijainnin [Ultraleap 2021]. Laitetta pidetään työtasolla käsien alapuolella ja sen erityiset kamerat kuvaavat käsien liikettä. Tämä on havainnollistettu kuvassa 3. Vaikka laitetta voidaankin pitää ohjaimena, sitä ei

pidetä vuorovaikutuksen aikana kädessä. Tämän vuoksi Leap Motion esitellään tässä alaluvussa eikä seuraavassa, ohjaimia käsittelevässä alaluvussa. Tutkimuksessaan Potter *et al.* [2013] tutkivat Leap Motion Controllerin käyttöä Australian viittomakielen jäljentämiseen. Tutkimuksessa todetaan laitteen jäljentävän tarkasti käsien liikkeet. Ongelmakohtiksi muodostui eleet, joissa käyttäjän kädet olivat kosketuksissa toisiinsa tai kädet olivat kohtisuorassa kameraa kohti. Silloin Leap Motion -laite ei onnistunut jäljentämään käsien eleitä selkeästi. Kehittäjän nettisivulla vuorovaikutusta Leap Motion Controllerin kanssa kuvataankin luonnolliseksi ja vaivattomaksi [Ultraleap 2021].



Kuva 3. Leap Motion Controller, joka kuvaa ja jäljentää käsien eleet [Ultraleap 2021].

2.2 Ohjaimet vuorovaikutusmenetelmänä

Käsien eleiden lisäksi toinen yleinen virtuaalitodellisuuden vuorovaikutustapa on erilaiset ohjaimet. Käyttäjä pitää yhtä tai kahta fyysistä ohjainta kädessään ja osoittaa sillä virtuaalista kohdetta kohti. Valinta vahvistetaan esimerkiksi ohjaimen painikkeella tai ohjainta pitävän käden eleellä. Tutkimukset, joissa vertaillaan ohjaimilla ja käsillä tehtävää vuorovaikutusta keskenään osoittavat, että vaikka ihmiset voivat käyttää ohjaimia laajentaakseen fyysistä ulottuvuuttaan ja tutkaillakseen virtuaalista ympäristöä, ohjaimilla vuorovaikuttaminen on hyvin erilaista kuin käsillä [Lee *et al.* 2019].

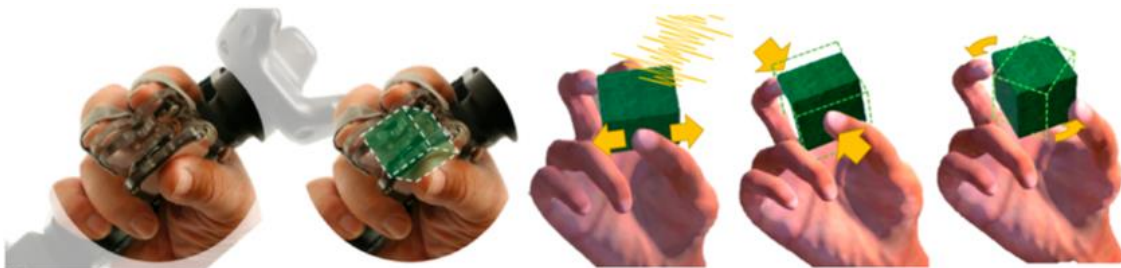
Taulukko 1 on käännetty Huangin ja muiden [Huang *et al.* 2021] artikkelista. Taulukossa on lyhyesti verrattu käsieleillä vuorovaikutusta ohjaimella vuorovaikuttamiseen viidellä osa-alueella kuluttaja-arvioiden perusteella. Kuluttaja-arvioit virtuaalitodellisuuden syöttötavoista kertovat, että ohjaimia pidetään vakaina ja tarkkoina. Kuitenkin epä-mukavuutta saattaa tuottaa näiden ylimääräisten laitteiden pitäminen käsissä. Puolestaan käsieleillä vuorovaikuttaminen on ihmisille luonnollista eikä se vaadi mistään kiinnipitämistä. Arvioiden mukaa käsieleitä pidetään epätarkempina kuin ohjaimia. Tämä johtuu osiltaan käsieleiden seurannan ja tunnistuksen rajallisuudesta.

Ominaisuus	Käsillä vuorovaikutus	Ohjaimella vuorovaikutus
Käyttöliittymä	Ilman laitteita	Kädessä pidettävä laite
Palaute	Vain visuaalinen	Visuaalinen ja haptinen
Tarkkuus	Ongelmia tarkkuudessa	Korkea
Vapausasteet	Joustava	Rajattu
Tila	Suosio kasvaa vähitellen	Suosittu

Taulukko 1. Käsillä ja ohjaimella vuorovaikuttamisen eroja
[muokattu Huang *et al.* 2021].

Yksi monista ohjaimilla toimivista osoitusteknologioista on säteensuuntaus (engl. raycasting). Säteensuuntausta käyttävistä todellisen maailman laitteista yksi tunnetuimmista lienee laserosoitin: käyttäjä osoittaa ohjaimella kohdetta ja painiketta painamalla ohjaimesta lähtee laservalo kohteeseen. Nukarinen *et al.* [2018] toteavat tutkimuksessaan, että säteensuuntaus on huomattavasti nopeampi valintatapa kuin katseohjaus.

Lee *et al.* [2019] esittelevät artikkelissaan TORC-ohjaimen, joka näkyy kuvassa 4. Sen avulla käyttäjä voi liikuttaa virtuaalista kohdetta ja tarttua siihen liikuttamalla sormiaan ohjaimella. TORC antaa käyttäjälle haptista, eli värinäpalautetta. Haptisen palautteen ja oikeanlaisen visuaalisen animaation avulla käyttäjä saa hyvin todentuntuisen vaihtelun virtuaalisesta kohteesta.



Kuva 4. Todellinen TORC-ohjain ja sen animoitu vastine virtuaalitodellisuudessa
[Lee *et al.* 2019].

Valve Index -ohjaimessa on 87 anturia, jotka tunnistavat puristuksen voimakkuuden, käden ja sormien liikkeet ja sijainnin. Ohjain siis mahdollistaa esimerkiksi yksittäisellä sormella osoittamisen virtuaalimaailmassa. Ohjain kiinnitetään käteen hihnalla, joten sitä ei tarvitse puristaa koko ajan. [Valve Software 2021]

2.3 Katse vuorovaikutusmenetelmänä

Vaikka virtuaalitodellisuus pyrkii olemaan mahdollisimman todentuntuinen, mahdollistaa se asioita, jotka eivät onnistuisi todellisessa maailmassa. Virtuaalilaseissa olevat tunnistimet mahdollistavat katseenseurannan, mikä taas antaa käyttäjälle yhden vuorovaikutustavan lisää. Katseenseurannan on todettu olevan potentiaalinen vaihtoehto joko kor-

vaamaan käsillä tehtävä vuorovaikuttaminen tai sen tueksi. Kun käytetään pelkkää katsetta vuorovaikutustapana, vapauttaa se käyttäjän kädet toisiin tehtäviin [Nukarinen *et al.* 2018]. Jo aiemmin mainitut virtuaalikäsien ongelmakohdat, rajattu ulottuvuus sekä mahdollinen käsien uupumus, eivät koske katseenseurausta samalla tavalla.

Katseohjauksessa virtuaalilaseissa olevat tunnistimet tunnistavat katseen suunnan. Katseenseurannassa valinta voi tapahtua multimodaalisesti eleen, äänikomennon tai painikkeen painalluksen avulla, tai unimodaalisesti käyttäen katsetta myös valintakomentona [Argelaguet ja Andujar 2012]. Nukarisen *et al.* [2018] mukaan, katseella valinta tapahtuu yleensä katsomalla tietty aika haluttua kohdetta ja tietyn ajan kuluttua kohde tulee valituksi. Katse niin sanotusti “oleskelee” kohteen päällä. Katseenseurannassa yleisesti, mutta erityisesti tässä oleskelevassa valintamenetelmässä on kuitenkin vaarana niin kutsuttu “Midaksen kosketuksen” kaltainen tila. Kun valintapäätös aktivoituu liian herkästi, voivat kohteet joihin käyttäjä vain vilkaisee tulla tahattomasti valituksi [Argelaguet ja Andujar 2012].

2.4 Puhe vuorovaikutusmenetelmänä

Ihmisten ensisijainen tapa kommunikoida on puhuminen [Samudravijaya 2004]. Tästä huolimatta vallitseva tapa kommunikoida tietokoneiden avulla on hiiri ja näppäimistö. Hiiren ja näppäimistön käyttö ei kuitenkaan ole yhtä sujuvaa pidettäessä virtuaalilaseja päässä, sillä ne estävät laitteiden näkemisen, mikä osaltaan hankaloittaa esimerkiksi näppäimistöllä kirjoittamista.

Automaattinen puheentunnistus (engl. automatic speech recognition, ASR) muuntaa kuultavan puheen kirjoitetuksi tekstiksi [Hannema 2001]. Tästä seuraava askel on puheen ymmärtäminen, jossa kerätään yhteen ilmaisujen merkitykset, jotta puhujan komento voidaan suorittaa [Samudravijaya 2004]. Samudravijayan mukaan, puheentunnistus voidaan jaotella puhujien määrän, lausumisen luonnollisuuden ja sanaston koon perusteella.

Puheentunnistusohjelmisto voidaan opettaa tunnistamaan vain yhden henkilön ääni, jolloin voidaan saavuttaa hyvin tarkka sanojen tunnistus. Jopa suurella, kymmenien tuhansien sanojen sanastolla, tunnistuksessa tapahtuvien virheiden määrä on pieni [Hannema 2001]. Toinen vaihtoehto on opettaa ohjelmistolle suuri määrä eri puhujien tunnusmerkkejä, jolloin ohjelmisto pystyy tunnistamaan kenen tahansa puhujan puhetta [Samudravijaya 2004]. Cook ja Polgar [2014] toteavat, tunnistuksen tarkkuuden kasvavan tasaisesti, aina kun päivityksiä tehdään tietokoneen tunnistusalgoritmiin. Tunnistustarkkuus voi olla 90 % tavallisesta puheesta ja jopa 100 % erotellusta sanantunnistuksesta (engl. isolated word recognition). Erotellussa sanantunnistuksessa käyttäjän tulee lausua sanat selkeästi toisistaan erotellen eli pitämällä hyvin lyhyt tauko sanojen välissä [Samudravijaya 2004, Hannema 2001].

Eroteltu sanantunnistus on tunnistusohjelmista luonnottomin käyttää [Samudravijaya 2004]. Kehittyneempiä ja käyttäjälle luonnollisempia vaihtoehtoja ovat ohjelmat, jotka tunnistavat yhtenäistä, jatkuvaa puhetta, joka sisältää kielioppivirheitä tai täytesanoja, kuten ”hm”. Avainsanojen tunnistus (engl. keyword spotting system) pitää lukua ennalta määritellyistä sanoista, joita puhuja käyttää. Tämän avulla virtaavan puheen seasta erotellaan ohjelmistolle merkitykselliset sanat, kuten käskyt. Jos etukäteen ei ole määritelty erillistä sanastoa, puheohjaus antaa teoriassa lähes rajattomat mahdollisuudet syöttövaihtoehtoiksi [Hepperle *et al.* 2019]. Samudravijaya [2004] luokitteleekin puheentunnistusohjelmistot sanaston koon mukaan. Ohjelmisto voi olla pieni, keskikokoinen tai suuri, sen perusteella, kuinka monta sanaa se tunnistaa. Pieni ohjelma tunnistaa noin 10 sanaa, kun suuri voi tunnistaa jopa kymmeniä tuhansia. Esimerkkejä erikokoisista ohjelmistoista on puhelinnumeron tunnistaminen tai sanelujärjestelmät.

Hanneman [2001] mukaan, puheohjaus on tarpeellinen tilanteessa, jossa kädet ja silmät ovat jatkuvasti vuorovaikutuksessa virtuaalitodellisuudessa, sillä puheohjaus ei ole riippuvainen kummastakaan edellä mainituista vuorovaikutustavasta. Puheohjaus on hyödyllinen myös tilanteissa, joissa käyttäjällä on rajoitteita motorisissa taidoissa. Hepperle *et al.* [2019] mainitsevat puheohjauksen heikkoudeksi, ettei se tarjoa *peruuta* -toimintaa, toisin kuin kaksiulotteisissa käyttöliittymissä *takaisin* -painike tai luonnollinen liike kolmiulotteisissa käyttöliittymissä.

Ferracani *et al.* [2017] tutkivat museokontekstissa puheohjauksen käyttöä virtuaalitodellisuudessa. Puheella esitettiin kysymyksiä ja työpyyntöjä, ja avainsanoja tunnistamalla ohjelma vastasi saamiinsa komentoihin. Toinen esimerkki viime vuosilta on Sureshin *et al.* [2017] puheohjauksella toimiva robottikäsi. Virtuaalitodellisuuden avulla käyttäjä kokee robottikäden olevan hänen oma kätensä, vaikka robottikäsi sijaitsisi kaukanakin. Avainsanoiksi määriteltyjen komentojen avulla käyttäjä voi hallita käden asentoa.

2.5 Muut virtuaalitodellisuuden vuorovaikutusmenetelmät

Edellä on esitelty tutuimpia virtuaalitodellisuuden vuorovaikutusmenetelmiä. Nämä vuorovaikutusmenetelmät nousivat esille alan kirjallisuudessa. Kuitenkin virtuaalitodellisuudessa käytetään paljon muitakin vuorovaikutusmenetelmiä kuin edellä esiteltyt. Khan *et al.* [2020] vertailevat vuorovaikutusmenetelmiä virtuaalitodellisuudessa ja jakavat eri menetelmät viiteen eri kategoriaan:

1. Kädessä pidettävät haptiset laitteet
2. Puettavat haptiset laitteet
3. Aivokäyttöliittymät
4. Eleiden tunnistus käyttöliittymät

5. Katseenseuranta käyttöliittymät

Eleiden tunnistamista ja katseenseurantaa käsiteltiin jo aiemmissa alaluvuissa. Kuvassa 5 on 3D Systemsin kehittämä Touch X -voimapalautelaite on hyvä esimerkki ensimmäisestä kategoriasta. Sen avulla käyttäjä voi tunnistella ja ohjata kolmiulotteisia objekteja. Käyttäjä pitää laitteen päästä kiinni kuin kynästä. Käyttäjän koskettaessa objektia, laitteen moottorit kytkeytyvät päälle. Käyttäjä tuntee koskettavansa objektia, sillä laite pistää vastaan eikä kynällä pääse objektin läpi.



Kuva 5. Touch X -voimapalautelaite [3D Systems Inc. 2021].

Lindeman *et al.* [2004] esittelevät toiseen kategoriaan kuuluvan puettavan liivin, joka tuottaa haptista palautetta käyttäjälle. Liivi on esitetty kuvassa 6. Tuntopalaute tulee hyvin laajalle alueelle kehoa, joten kokemus on hyvin aito. Ongelmana on liivin tuottama kuormitus keholle ja mahdollinen epämukavuuden tunne.



Kuva 6. Haptista palautetta antava päälle puettava liivi [Lindeman *et al.* 2004].

Aivokäyttöliittymällä (engl. brain-computer interface, BCI) tarkoitetaan käyttöliittymää, jota voidaan ohjata ajatuksen voimalla [Wolpaw *et al.* 2000]. Aivokäyttöliittymä ei vaadi fyysisiä liikkeitä syöttötavaksi, joten sitä on sovellettu esimerkiksi liikuntarajoitteisten käytössä. Aivokäyttöliittymä on esitetty kuvassa 7. Yleisin tapa ohjata aivokäyttöliittymää on mitata aivosähkökäyrän (engl. electroencephalogram, EEG) aktiivisuutta [Coogan ja He 2018].



Kuva 7. Käyttäjä ohjaa aivokäyttöliittymällä virtuaalitodellisuussovellusta [Coogan ja He 2018].

2.6 Yhteenveto

Virtuaalitodellisuudessa on tällä hetkellä käytössä monenlaisia vuorovaikutusmenetelmiä ja -laitteita, ja lisää kehitellään jatkuvasti. Kaikissa vaihtoehdoissa on hyvät ja huonot puolensa, ja kehittäjän tulee tarkkaan miettiä mikä vuorovaikutusmenetelmä olisi juuri kyseiseen tehtävään sopivin. Vuorovaikutusmenetelmistä halutaan yhä immersiiivisempia, luonnollisempia ja tarkempia. Vuorovaikutusmenetelmät pyrkivät käyttämään ihmisen aisteja yhä monipuolisemmin. Teknologiaa sovelletaan hyödyntämään eri kehonosia ja esimerkiksi käsien hienomotoriikkaa. Lisäksi eri liikuntarajoitteet huomioidaan jo suunnitteluvaiheessa tehokkaammin. Käsillä ja ohjaimilla vuorovaikuttaminen on tutuinta, mutta esimerkiksi puheohjaus arkipäiväistyy koko ajan.

3 Hammaslääketieteen kuvantamismenetelmät

Tässä luvussa kuvataan ensin mistä kaikki alkoi radiologian alalla ja mikä tilanne on nyt. Sen jälkeen esitellään neljä kuvantamismenetelmää, jotka ovat käytössä hammaslääketieteessä. Luvun lopussa on katsaus, miten virtuaalitodellisuutta käytetään hammaslääketieteessä.

Vuonna 1895 Wilhelm Röntgen esitteli uuden säteilylajin eli röntgensäteilyn, ja myöhemmin sen mahdollisuudet lääketieteen käytössä [Pauwels 2020]. Hammaslääketieteessä käytettävä kuvantaminen perustuukin juuri röntgensäteilyyn, joka kohdistetaan potilaan suun ja leuan alueelle. Röntgensäteily syntyy röntgenputkessa, joka kohdistetaan kuvattavaa aluetta kohti. Röntgensäteillä on kyky läpäistä kehon kudoksia, jolloin tulostuu mustavalkoinen negatiivikuva. Säteily läpäisee kuvassa tummempana näkyvät kehon osat paremmin kuin vaaleana näkyvät osat [Stuk 2004]. Näin eri osat erottuvat toisistaan röntgenkuvissa ja tämän takia kovaa kudosta olevat hampaat näkyvät röntgenkuvissa valkoisempina verrattuna esimerkiksi pehmeämpää kudosta oleviin ikeniin.

Yhä tänäkin päivänä hammaslääketieteen kuvantamismenetelmien ja -laitteiden tekninen kehitys jatkuu. Työkaluilta vaaditaan enemmän ja tavoiteltavaa on esimerkiksi kuvien korkeampi resoluutio, ihmisten matalampi altistuminen säteilylle ja uudet tekniikat [Bartella 2019]. Samaan aikaan kun kuvantamislaitteet ja niiden kyky ottaa kuvia kehittyvät, perässä laahaa visualisointiin ja kuvien tulkintaan erikoistuvien ohjelmistojen kehitys. Tavallisesti radiologit ja hammaslääketieteen asiantuntijat tarkastelevat kolmiulotteista dataa kaksikulotteiselta näytöltä kolmen eri tason avulla. Markkinoilla olevat vapaaajan teknologiat, kuten 3D-elokuvat, lisätyn todellisuuden pelit ja virtuaalitodellisuus, ovat visualisointikyvyiltään paljon kehittyneemmät kuin hammaslääketieteen alalla olevat laitteet. Tarvittava teknologia on jo siis olemassa, mutta sen hyödyntäminen hammaslääketieteeseen on vielä puutteellista.

3.1 Hampaiston ja leukojen alueen kuvantamismenetelmät

Hammaslääketieteen kuvantamismenetelmät voidaan jakaa kaksikulotteiseen ja kolmiulotteiseen kuvantamiseen. Molemmat menetelmät ovat tällä hetkellä käytössä hammaslääketieteen lisäksi myös yleisen lääketieteen puolella. Kolmiulotteinen kuvantaminen on menetelmistä uudempi ja se tuottaa kuvatusta alueesta kolmiulotteisia kuvia. Kuvia voi tarkastella eri ohjelmistojen avulla tietokoneen näytöltä tai vaikka tulostaa 3D-tulostimella.

3.1.1 Intraoraalikuvantaminen

Intraoraaliröntgen (engl. intraoral X-rays) on yksi tavanomaisimmista hammasröntgenkuvantamismenetelmistä [Stuk 2015]. Sillä voidaan kuvata joko yksittäisiä hampaita tai

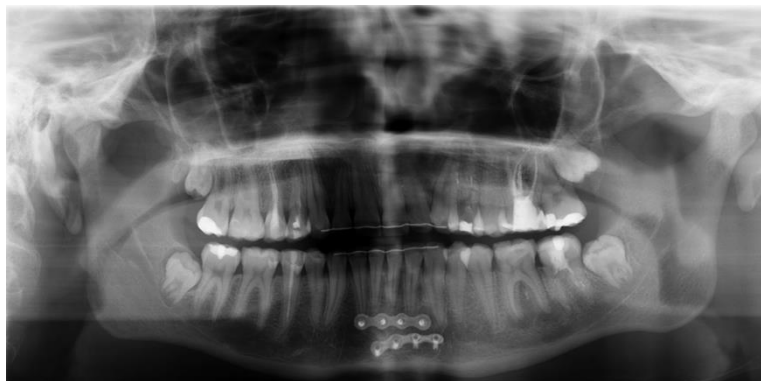
muutamia vierekkäisiä hampaita. Suun sisälle asetetaan filmi tai digitaalinen kuvanilmaisin, jolle röntgenkuva tallentuu. Kuvassa 8 vasemmalla näkyy intraoraalikuvantamislaitte. Kuvaustilanteessa laitteen röntgenputki siirretään potilaan pään viereen niin, että kuvattava alue jää laitteen ja suussa olevan kappaleen väliin. Kuvan ottamisen jälkeen kuvadatasta muodostuu kaksiulotteinen kuva, kuten kuvassa 8 oikealla.



Kuva 8. Vasemmalla on intraoraalikuvantamislaitte Planmeca ProX ja oikealla kaksiulotteinen intraoraalikuva muutamasta vierekkäisestä hampaasta [Planmeca 2021b].

3.1.2 Panoraatomografia

Panoraatomografiaröntgenkuvauksessa (engl. panoramic tomography) saadaan kuvattua kaikki suun hampaat yhteen kuvaan [Stuk 2015]. Kuvantamislaitte on erilainen kuin intraoraalikuvantamisessa, sillä kuvaustilanteessa röntgenputki ja kuvailmaisin kiertävät potilaan pään ympäri puoliympyrärataa. Näin ollen kuva saadaan otettua suuremmalta pinta-alalta kuin intraoraalikuvantamisessa. Säteilyturvakeskuksen [2019] tilastojen mukaan panoraamakuvaus on yksi tavanomaisimmista hampaiden kuvantamismenetelmistä intraoraalikuvantamisen jälkeen. Vuonna 2018 Suomessa otettiin hieman yli 418 000 hampaiston ja leuan panoraatomografiakuva tai muuta yksinkertaista rakokuvaa. Kuvassa 9 nähdään panoraatomografiakuva.



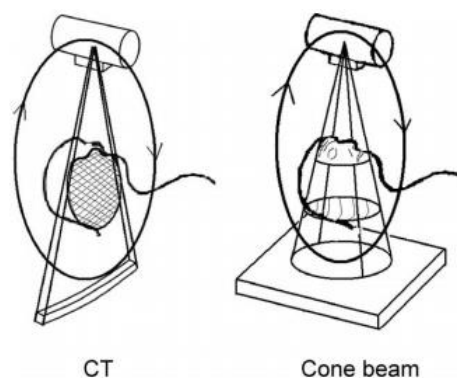
Kuva 9. Panoraatomografiaröntgenkuva koko suun alueelta [Verweij *et al.* 2017].

3.1.3 Tietokonetomografia

Tietokonetomografia (engl. computed tomography, CT) tuottaa leikekuvista sekä kaksiulotteisia että kolmiulotteisia kuvia. CT on tarkempi kuin perinteinen röntgenkuva ja monet röntgenkuvauksen ongelmat, kuten kuvien suurentuminen ja elimien päällekkäin näyttäminen, korjaantuvat CT-kuvantamisessa. Tietokonetomografiassa kohteesta otetaan satoja projektiokuvia, jotka yhdistämällä saadaan poikkileikkaus kohteesta, eli leikekuva. Riippuen siitä montako leikekuvaa laite tuottaa, voidaan CT-laitteet jaotella yksija monileikelaitteisiin. Kuvassa 10 on vasemmalla puolella havainnollistava kuva CT-leikekuvan otosta. Röntgenputki kiertää kuvattavan henkilön ympäri ja kuvaa litteällä röntgensäteellä. CT-kuvan muodostumisessa on kolme vaihetta:

1. Skannausvaihe: sadoista eri suunnista otetaan projektiokuvia.
2. Rekonstruktiovaihe: projektiokuvat yhdistetään digitaaliseksi kuvamatriisiksi.
3. Visualisointivaihe: valmis kuva esitetään tietokoneen näytöllä.

CT-kuvien heikkouksia ovat sumentumat, kontrastiherkkyys, kuvausvirheet ja kohina [Jauhiainen 2003]. Virheitä voi aiheuttaa esimerkiksi potilaan liikkuminen, kuvanlaskenta-algoritmin virheet tai metallikappaleet, kuten hammaspaikat. Vaikka näitä virheitä voidaan laskennallisesti pienentää, on CT-laitteen käyttäjän oltava tietoinen niiden mahdollisesta olemassaolosta. Röntgenkuvaukseen verrattuna CT-kuvauksessa potilas saa enemmän säteilyä. Koska säteily saattaa aiheuttaa kuvattavalle haittavaikutuksia, käytetään CT-kuvantamista vain tilanteissa, joissa pienemmän säätelymäärän tuottavan menetelmän kuvantamistarkkuus ei riitä.



Kuva 10. Kuvassa vasemmalla esitetään CT-kuvauksen leikkeenomainen röntgensäde ja oikealla CBCT-kuvauksen kartionmuotoinen röntgensädekeila [Hodez 2011].

3.1.4 Kartiokeilatietokonetomografia

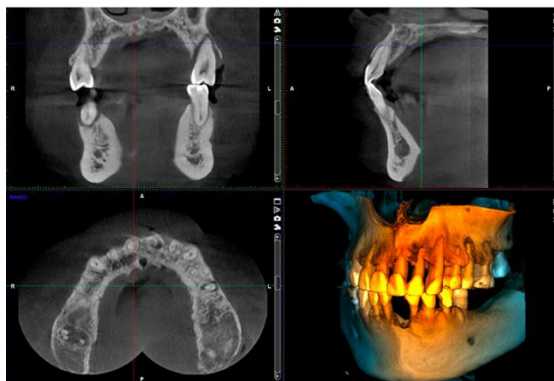
Kartiokeilatietokonetomografia (engl. cone beam computed tomography, CBCT) on kolmiulotteinen kovakudosrakenteiden kuvantamismenetelmä [Duodemic 2020]. Sen hyötyjä ovat tarkkuus ja nopeus. Sen säderasitus, eli potilaaseen kohdistuva säteilyn määrä,

on pienempi kuin tavanomaisen tietokonetomografian. CBCT-laitteet ovat myös pienempiä ja edullisempia kuin tavalliset CT-laitteet. CBCT-kuvausta käytetään, kun perinteisten röntgenkuvien avulla ei saada tarvittavia tietoja. Tällaisia tilanteita hammaslääketieteessä voivat olla esimerkiksi viisaudenhampaiden tilan selvittäminen, implanttihoidon suunnittelu, särkytilat tai juurihoidolliset ongelmat [Oral 2020]. Säteilyturvakeskuksen [2019] mukaan Suomessa otettiin vuonna 2018 yli 16 000 hampaiston ja leukojen kartiokeilakuvaa.

Laitteesta riippuen kuvattava alue voi vaihdella muutamasta senttimetristä koko pään kattavaan alueeseen [Duodemic 2020]. Kuvan 10 oikealla puolella on havainnollistettu, kuinka CBCT-laitteen röntgenputkesta ammutaan kartion muotoinen keila, joka pyörähtää potilaan ympäri 180–360 astetta. Kohteesta otetaan lukuisia röntgenkuvia pyörähdysen aikana ja näistä muodostetaan kolmiulotteiset kuva-alkiot. Kolmiulotteista dataa on mahdollista tarkastella eri suunnista, ja siitä voidaan luoda esimerkiksi 3D-kuvia tai panoraamanäkymä [Duodemic 2020]. Kaikki muodostetut CBCT-kuvat ovat tasaisen tarkkoja ja paljastavat todellisia yksityiskohtia kuvattavasta alueesta [Shokri *et al.* 2020].

CBCT-laitteet ovat nykyään laajalti käytössä hammaslääketieteellisessä radiologiassa. Kolmiulotteisen kuvantamisen lisäksi CBCT-laite soveltuu myös muihin lääketieteellisiin toimenpiteisiin kuten radiografiaan, läpivalaisuun sekä angiografiaan eli verisuonten varjoainekuvaukseen [Duodemic 2020]. Pään alueen lisäksi CBCT-laitteella voidaan siis kuvata muitakin kehon osia. Haittapuoliksi Shokri *et al.* [2020] ovat listanneet kuvien suuremman kohinan verrattuna CT-kuviin.

Joissain CBCT-laitteissa on CBCT-kuvan lisäksi mahdollisuus kasvojen osien 3D-valokuvaukseen [Duodemic 2020]. 3D-valokuvia voidaan hyödyntää vaativien hoitojen suunnittelussa. Eri aikaan otettuja kuvia voidaan laittaa päällekkäin, jotta alueen muutokset saadaan näkyviin. Kuvassa 11 on CBCT-kuvista muodostettu kolmiulotteinen malli.



Kuva 11. CBCT-kuvantamisella tuotettu kolmiulotteinen malli, ProMax® 3D s [Planmeca 2021a].

3.2 Virtuaalitodellisuus hammaslääketieteessä

Tutkimusta on tehty siitä, miten hammaslääketiedettä voitaisiin opettaa alan opiskelijoille tehokkaasti, vaarattomasti ja todentuntuisesti. Reymusin ja muiden [Reymus *et al.* 2020] tutkimuksessa opiskelijat kokivat kolmiulotteisten hammaskuvien ja virtuaalitodellisuuden yhdistelmän auttavan heitä hahmottamaan suun anatomiaa paremmin kuin tavallisesta röntgenkuvasta opiskeltuna. Hampaiden juurikanavien ymmärtämisessä virtuaalitodellisuus oli parempi vaihtoehto kuin kaksiulotteisten kuvien tarkastelu. Kuvassa 12 vasemmalla on hammaslääketieteen opiskelija tarkastelemassa 3D-hammasmallia virtuaalitodellisuudessa. Oikealla puolella näkyy kolmiulotteinen hammaskuva.



Kuva 12. Hammaslääketieteen opiskelija tarkastelemassa 3D-hammasmallia virtuaalitodellisuudessa [Reymus *et al.* 2020].

Tutkimusta on myös tehty virtuaalitodellisuuden käytöstä harhauttamaan potilasta hammashoidon aikana, jotta välttyttäisiin potilaan kipu- ja pelkotiloilta. Jälkimmäistä on tutkittu erityisesti lasten hoitojen suhteen. Shetty *et al.* [2019] tutkivat tätä 5–8-vuotiaiden lasten kanssa. Hammastoimenpiteen aikana lapset saivat katsoa valitsemaansa piirrettyä. Tutkimuksen perusteella voidaan suositella virtuaalitodellisuuden käyttöä harhauttamaan lapsia hammashoidon aikana.

Hanken *et al.* [2015] suunnittelivat tutkimuksessaan kasvojen alueen leikkauksen virtuaalisesti. 20 potilaalta otettiin CT kuvat ja 10 potilaalta otettiin CBCT kuvat operoitavasta alueesta. Vaikka luuston esittäminen on hieman erilainen näillä tekniikoilla, tutkimuksessa oleelliset 3D-mallien mittauspisteet pystyttiin määrittämään tarkasti. Tutkimuksessa todettiin virtuaalisten suunnitelmien vastaavan hyvin todellista leikkauksen jälkeistä tulosta.

Tulokset virtuaalisen leikkauksen suunnittelusta ovat positiiviset, joten suunnittelun siirtämistä virtuaalitodellisuuteen voidaan pitää kannattavana. Ayoub ja Pulijala [2019] kertovat kirjallisuuskatsauksessaan virtuaalitodellisuuden ja lisätyn todellisuuden käytöstä suun ja kasvojen alueiden leikkausten suunnittelussa. Artikkelissa todetaan CBCT:n olevan hyödyllinen kovien kudosten, kuten hampaiden, kuvantamiseen, mutta pehmeiden

kudosten kuvantamiseen tarvitaan muita kuvantamismenetelmiä. Yksi mainittu menetelmä on 3D-laserskannaus.

3.3 Yhteenveto

Kaksi- ja kolmiulotteisia kuvantamismenetelmiä käytetään rinnakkain hammashoitosten suunnittelussa. Kaksiulotteiset röntgenkuvat ovat yleisempiä, sillä niiden laitteistot ovat pienempiä ja edullisempia. Kaksiulotteiset kuvat antavat hyvän yleiskuvan hampaiston tilasta, mutta pienet yksityiskohdat voivat jäädä epäselviksi. Kolmiulotteisia kuvia voidaan hyödyntää monipuolisemmin esimerkiksi 3D-tulostuksessa ja virtuaalitodellisuudessa. Kolmiulotteiset kuvat antavat katsojalle mahdollisuuden nähdä kohde monesta eri näkökulmasta, mikä auttaa hahmottamaan epäsymmetrisiä ja monimuotoisia hampaistomalleja. Tutkimusta virtuaalitodellisuuden eri käyttötavoista hammaslääketieteessä on tehty, mutta hammaslääketieteen asiantuntijan arkipäivässä virtuaalitodellisuus ei vielä näy.

4 Vuorovaikutus kolmiulotteisen hammasmallin kanssa

Tästä luvusta eteenpäin kuvataan tämän pro gradu -tutkielman oman tutkimuksen osuutta. Tutkimus on osa Tampereen yliopistossa käynnissä olevaa Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery -projektia (DPI). Projektin päätarkoitus on esittää kuvantamisdata virtuaalitodellisuuden avulla kolmiulotteisena ja mahdollistaa sen vapaa käsittely diagnoosin ja leikkaussuunnittelun tukena. Esimerkkikohteena on pään ja kaulan alue. Projektissa kehitetyillä ratkaisuihin voitaisiin tulevaisuudessa tarkastella kolmiulotteisia kartiokeilakuvia virtuaalitodellisuudessa, mitä hyödyntäen hammaskirurgit voisivat suunnitella tulevat leikkauksensa.

Tällä hetkellä hampaiston alueen leikkaukset suunnitellaan monen erikoishammaslääkärin yhteistyönä [Tays 2021]. Suunnittelussa käytetään apuna esimerkiksi hampaista tehtyjä kipsimalleja, röntgenkuvia ja valokuvia. Kipsimallit ovat kolmiulotteisia, mutta niitä on vaikea muokata nopeasti leikkaussuunnittelun tarpeisiin. Röntgenkuvista ja valokuvista saattaa olla hankala tarkastella pieniä yksityiskohtia, kuten hermokanavia, sillä kuva antaa vain yhden kuvakulman kohteeseen. Haastavissa kirurgisissa leikkauksissa kolmiulotteisia CBCT-kuvia tarkastellaan ohjelmistolla, jota käytetään pöytätietokoneella. Kolmiulotteisia kuvia voidaan tarkastella eri kuvakulmista ja niitä voidaan muokata tietokoneella. Kuviin halutaan tehdä merkintöjä leikkauksen kannalta oleellisista alueilta tai yksityiskohdista, esimerkiksi merkitsemällä yksittäinen hammas tai hermo, tai valitsemalla haluttu leikattava alue. Kun kolmiulotteisia hammas- ja hampaistomalleja tarkastellaan kaksiulotteisesta näytöstä, voi syntyä ongelmia esimerkiksi mallin hahmottamisessa ja sen tarkkuudessa. Tässä kokeellisessa tutkimuksessa pyrittiin löytämään tehokkaampia, tarkempia ja miellyttävämpiä tapoja olla vuorovaikutuksessa näiden kolmiulotteisten hammasmallien kanssa. Tarkoitus oli löytää vuorovaikutusmenetelmä, joka on mahdollisimman tarkka, luonnollinen, helposti käytettävä eikä se saa uuvuttaa käyttäjää.

Tutkimus perustuu hypoteesiin, että kolmiulotteisia malleja on parempi tutkia kolmiulotteisessa ympäristössä kuin kaksiulotteiselta näytöltä. Tämän takia tutkimus tehdään virtuaalitodellisuudessa. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan päästä vertailemaan näitä kahta ympäristöä keskenään.

Vertailtavat vuorovaikutusmenetelmät valikoituivat pohjautuen tietoon DPI-projektissa jo tutkituista tai tällä hetkellä tutkittavaksi suunnitelluista vuorovaikutusmenetelmistä. Täysin samoja vuorovaikutus- ja merkintätapayhdistelmiä vältettiin. Tämän vuoksi esimerkiksi haptista palautetta ei huomioida tässä tutkimuksessa. Vuorovaikutustapojen valintaan vaikutti myös tässä tutkielmassa tehty kirjallisuuskatsaus. Luvun 2 kirjallisuuskatsauksessa todettiin ohjaimen olevan tarkka ja vakaa. Ohjain oli todettu toimivaksi myös aiemmissa DPI tutkimuksissa, joten se valikoitui yhdeksi vertailtavaksi vuorovaikutusmenetelmäksi. Merkintätavaksi ohjaimen kanssa valikoitui Logitech VR Ink -kynä, sillä tutkimukseen haluttiin fyysinen merkintätapa vapaan käden merkintätavan lisäksi.

VR-kynä oli tutkimuksen aikana pilottivaiheessa, eikä siitä ollut vielä paljoakaan tutkimusta saatavilla. Batmaz *et al.* [2020] tutkivat tämän Logitechin kynän käyttöä tilanteissa, joissa kohteet olivat eri etäisyyksillä. He tutkivat myös käden asennon eri vaihtoehtoja kynästä kiinni pidettäessä. Artikkelissaan he toteavat kynän olevan tarkimmillaan, kun siitä pidetään kiinni kynäotteella. Heidän mukaansa, kohteen etäisyyden muutoksella ei ole tilastollista merkittävyyttä, kun kynästä pidetään kynäotteella kiinni.

Kirjallisuuskatsauksesta kävi ilmi, että kädet ovat luonnollinen ja todenmukainen tapa vuorovaikuttaa virtuaalitodellisuudessa. Tässä tutkimuksessa haluttiin verrata miten luonnollisuus vaikuttaa käyttökokemukseen ohjaimen ja käsien välillä. Käsillä vuorovaikuttaminen olisi myös taloudellisempi ja yksinkertaisempi ratkaisu, kun erillisiä ohjaimia ja laitteita ei tarvitse hankkia tai kytkeä. Tämän vuoksi myös merkintätapa valikoitui niin, ettei siihen tarvita laitteita. Merkintätavan suunnittelussa ja kehityksessä käytettiin DPI-projektissa kerättyä tietoa.

Hiiri on monelle tuttu laite, mutta sen käytöstä virtuaalitodellisuudessa ei ole juuriakaan tehty tutkimusta. Tietokoneen ja hiiren avulla käsitellään paljon kolmiulotteista dataa. Hiiri on helppo ottaa käyttöön työpaikoilla eikä sen käytön opettelu vie aikaa. Tämän perusteella hiiri valikoituikin kolmanneksi vuorovaikutustavaksi tähän tutkimukseen. Vaikka luvun 2 kirjallisuuskatsauksessa käsiteltiin myös katsetta tai puhetta vuorovaikutustapana, ei niitä pidetty sopivina menetelminä hammaslääketieteelliseen ympäristöön, ja siksi ne jäivät pois tästä tutkimuksesta.

5 Kokeellisen tutkimuksen toteutus

Tässä luvussa esitellään toteutettu tutkimus. Luvussa kerrotaan tarkemmin tutkimuksen osallistujista, tutkimustehtävistä, käytetyistä tiedonhankintatavoista ja vertailtavista vuorovaikutusmenetelmistä.

Tämän pro gradu -tutkielman kokeellisessa tutkimuksessa vertailtiin keskenään kolme eri vuorovaikutusmenetelmää 3D-mallien käsittelyssä ja merkintöjen tekemisessä. Käytetyt 3D-mallit pyrkivät kuvaamaan yksinkertaistettuja kolmiulotteisia röntgenkuvia, joita voidaan saada oikeiden hammaspotilaiden CBCT-kuvista. Koska tutkimuksen osallistajat eivät olleet alan ammattilaisia, päädyttiin tutkimuksessa käyttämään yksinkertaistettuja malleja, jotta tutkimus voisi keskittyä vuorovaikutusmenetelmien vertailuun. Vertailtavat vuorovaikutusmenetelmät olivat tietokoneen hiiri, vapaat kädet sekä ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmä. Virtuaalitodellisuuslasit olivat käytössä jokaista vuorovaikutusmenetelmää käytettäessä.

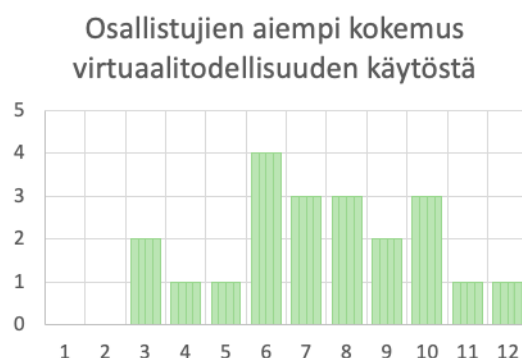
Tutkimuksessa osallistajat suorittivat jokaisella vuorovaikutusmenetelmällä saman tehtäväsarjan ja vastasivat jokaisen tehtäväsarjan jälkeen kyselylomakkeen kysymyksiin vuorovaikutusmenetelmän mielekkyydestä. Tutkimuksessa analysoitiin kerättyä dataa ja osallistujien subjektiivisia mielipiteitä vuorovaikutusmenetelmien vahvuuksien ja heikkouksien selvittämiseksi.

Tutkimuksessa käytettiin Unityllä kehitettyä tietokoneohjelmaa, joka mittasi testitehtäviin käytettyä aikaa, valintojen eli kohteiden merkkauksen määrää sekä osallistujan tekemän merkin etäisyyttä tavoitellusta kohdasta. Näiden arvojen avulla pystyttiin analysoimaan vuorovaikutusmenetelmien tehokkuutta ja tarkkuutta. Kehitimme Unity-ohjelman yhdessä Tampereen yliopiston tutkimusapulaisen Sriram Kumarin kanssa. Kumar auttoi valikoituneiden merkintätapojen ideoinnissa ja hänen vastuullansa oli vuorovaikutus- ja merkintätapojen tekninen toteuttaminen ideoideni pohjalta. Hän oli myös tutkimusten aikana paikalla teknisenä tukena. Minun vastuullani vuorovaikutusmenetelmien ideoinnin lisäksi oli kokeellisen tutkimuksen suunnittelu, järjestäminen ja havainnointi. Kokeellinen tutkimus suoritettiin marraskuussa 2020 Tampereen yliopiston tiloissa. Valitsevan COVID-19 tilanteen takia osallistujat valikoituivat omasta lähipiiristäni, sillä tuntemattomien henkilöiden käyttö tutkimuksessa ei olisi ollut suotavaa.

5.1 Osallistujat

Ennen tutkimuksen aloittamista, osallistujia pyydettiin täyttämään suostumuslomake ja taustatietolomake. Taustatietolomake on liitteenä 1. Tutkimukseen osallistui 12 henkilöä, joiden iät vaihtelivat 21–30 vuoden välillä. Ikäjoukon keskiarvo oli 25 vuotta ja tyypillisin ikä, eli moodi, oli 26 vuotta. Opiskelijoita oli 10 henkilöä ja kokopäiväisesti työskenteli kaksi henkilöä. Osallistujilla ei ollut merkittävää aiempaa kokemusta hammaslääke-

tieteellisen hoidon antamisesta. Kuten kaaviosta 1 nähdään, neljällä henkilöllä oli merkittävää aiempaa kokemusta virtuaalitodellisuuden käytöstä (kokemusarvio oli 3 tai enemmän), ja loppuilla kahdeksalla osallistujalla ei ollut aiempaa kokemusta virtuaalitodellisuudesta tai se oli vähäistä (kokemusarvio oli vähemmän kuin 3). Kahdeksalle henkilölle ohjainten käyttäminen oli aiemmasta tuttu vuorovaikutusmenetelmä virtuaalitodellisuudessa. Kahdeksalle osittain samalle henkilölle käsillä vuorovaikutus oli myös ennestään tuttu vuorovaikutusmenetelmä. Yksi osallistuja oli vasenkätinen, mutta tämä henkilö käytti hiirtä oikealla kädellä. Kaikki tutkimuksen tehtävät oli suunniteltu oikeakätiselle. Näin ollen vasenkätisyys ei vaikuttanut tutkimustuloksiin hiirtä käytettäessä, mutta saattoi vaikuttaa käsiä ja ohjainyhdistelmää käytettäessä.



Kaavio 1. Osallistujien aiempi kokemus virtuaalitodellisuuden käytöstä asteikolla 0–5 (0 = ei kokemusta, 5 = paljon kokemusta). Pystyakselilla kokemusasteikko ja vaakakselilla osallistujat yksilöivä ID.

5.2 Tutkimustehtävät ja pilottitesti

Osallistujan tehtävänä oli löytää piilotettu punainen piste 3D-mallin pinnalta ja laittaa oma keltainen merkki mahdollisimman lähelle tätä kohdetta. Oman merkinnän tarkkuutta oli mahdollista parantaa tekemällä uusi merkki. Vain viimeisin oma merkki jäi näkyviin, vaikka tietokoneohjelma tallensi kaikki tehdyt merkinnät. Osallistuja suoritti jokaisella vuorovaikutusmenetelmällä tehtäväsarjan, johon kuului viisi edellä kuvattua tehtävää. Jokainen tehtävä sisälsi oman 3D-mallin niin, että jokaisessa mallissa oli vain yksi kohdepiste merkattavana. Nämä 3D-mallit olivat alaleuka, sydän, pääkallo ja hammas, joista pääkallo toistui kahdesti. Tehtäväsarjoissa 3D-mallit olivat aina keskenään samassa järjestyksessä, mutta punaisen merkin sijainti ja vuorovaikutusmenetelmien suoritusjärjestys oli tasapainotettu. Tällä varmistettiin, että kaikilla vuorovaikutusmenetelmillä merkien löytämisen haastavuus oli tasainen.



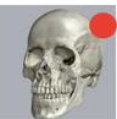












Kolmen vuorovaikutusmenetelmän suorittamisjärjestystä vaihdettiin osallistujilla siten että, sama järjestys toistui yhtä monta kertaa. Menetelmien suorittamisjärjestys on esitetty taulukossa 2, jossa A tarkoittaa hiirtä, B tarkoittaa käsiä ja C tarkoittaa ohjain ja

VR-kynä -yhdistelmää. Ensimmäisen ja seitsemännän osallistujan vuorovaikutusmenetelmien järjestys oli hiiri, kädet ja viimeisenä ohjainyhdistelmä.










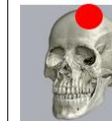





Osallistuja-ID	Suoritusjärjestys
P1 ja P7	ABC
P2 ja P8	BCA
P3 ja P9	CAB
P4 ja P10	ACB
P5 ja P11	BAC
P6 ja P12	CBA

Taulukko 2. Vuorovaikutusmenetelmien suoritusjärjestys. Vasemmassa sarakkeessa on osallistuja-ID ja oikeassa sarakkeessa vuorovaikutusjärjestys, niin että A = hiiri, B = kädet ja C = ohjain ja VR-kynä-yhdistelmä.

Taulukko 3a havainnollistaa ensimmäisen ja seitsemännän osallistujan tehtäväsarjojen 3D-mallit. Ensimmäinen testattava vuorovaikutusmenetelmänä on siis hiiri, toisena ovat kädet ja kolmas on ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmä. Jokaisen tehtäväsarjan ensimmäisessä tehtävässä 3D-malli on alaleuka, mutta punaisen merkin sijainti vaihtelee. Taulukko 3b puolestaan esittää seuraavien osallistujien, eli toisen ja kahdeksannen osallistujan suoritusta. Vuorovaikutustapojen suoritusjärjestys on eri kuin taulukossa 3a, mutta 3D-mallien keskinäinen järjestys ja punaisten merkkien sijainti ovat samat.

	tehtävä 1	tehtävä 2	tehtävä 3	tehtävä 4	tehtävä 5
hiiri					
kädet					
ohjain ja VR-kynä					

Taulukko 3a. Esimerkki ensimmäisen ja seitsemännän osallistujan vuorovaikutusmenetelmien järjestyksestä ja tehtäväsarjoista. 3D-mallien järjestys on sama jokaisessa tehtäväsarjassa, mutta merkkien sijainti vaihtelee.

	tehtävä 1	tehtävä 2	tehtävä 3	tehtävä 4	tehtävä 5
kädet					
ohjain ja VR-kynä					
hiiri					

Taulukko 3b. Esimerkki toisen ja kahdeksannen osallistujan vuorovaikutusmenetelmien järjestyksestä ja tehtäväsarjoista. 3D-mallien järjestys ja merkkien sijainti ovat samat kaikilla osallistujilla, vain vuorovaikutusmenetelmien järjestys on eri kuin taulukossa 3a.

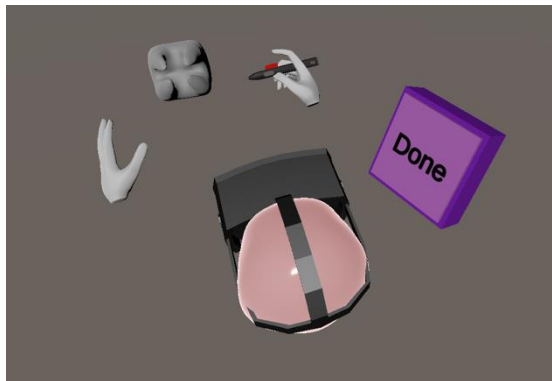
Tehtävät pyrkivät demonstroimaan tilannetta, jossa hammaslääketieteen asiantuntija tutkii operoitavan hampaiston 3D-mallia ja merkitsee siihen leikkauksen kannalta kriittiset alueet. Testitehtävien avulla saatiin mitattua 3D-mallin käsittelyn ja pyörittelyn vaikutusta sekä merkkien teon tarkkuutta. Myös 3D-mallin käsittelyn ja merkkaamisen yhdistelmän mielekkyyttä ja tehokkuutta mitattiin tutkimuksen tehtävien avulla.

Osallistuja sai harjoitella 3D-mallin käsittelyä ja siihen merkintöjen tekemistä jokaisella vuorovaikutusmenetelmällä ennen varsinaista tehtäväsarjaa. Harjoitustehtävänä oli etsiä kuution pinnalle sijoitellut kolme merkkiä ja merkitä ne. Tätä pystyi jatkamaan niin kauan, kunnes osallistuja mielestään hallitsi kyseisen vuorovaikutusmenetelmän ja oli valmis aloittamaan varsinaiset tehtävät.

Ennen ensimmäistä osallistujaa suoritettiin pilottitesti, jotta mahdolliset ongelmat saatiin korjattua. Pilottitestillä haluttiin löytää mahdollisia teknisiä ongelmia, ongelmia tutkimuksen ohjeistuksessa tai ongelmia kyselylomakkeissa. Pilottitestin perusteella selkeytettiin kaikkien vuorovaikutusmenetelmien käytön ohjeistusta ja lisättiin maininta tutkimuksessa mitattavista ominaisuuksista. Lisäksi kyselylomakkeelle lisättiin kysymys vuorovaikutusmenetelmän jokapäiväisen käytön mahdollisuudesta ja selkeytettiin kysymyksiä koskemaan vain vuorovaikutusmenetelmää tai merkintätapaa. 3D-mallin liikuttelun nopeutta hiirellä lisättiin ja sallittiin mallin pyörittely, vaikkei hiirestä lähtevä säde osoittanut kohteeseen liikkeen loputtua. Pilottitestin tuloksia ei oteta huomioon tämän tutkimuksen tuloksissa, sillä muutosten jälkeen tuloksia ei voida luotettavasti verrata muihin tuloksiin.

Kuvassa 13 on nähtävissä yleisnäkymä testitilanteesta. Kuva on kaapattu Unity-ohjelmalla, kun käytössä on ollut käsien vuorovaikutus. Kuvassa näkyy osallistuja, hänen

kätensä, joista oikeassa on merkintään tarvittava virtuaalikynä, 3D-malli suoraan osallistujan edessä sekä osallistujan oikealla puolella on Done-painike. Painike oli näkyvässä jokaisessa tehtävässä osallistujan oikealla puolella ja sitä koskettaessa pääsi siirtymään seuraavaan tehtävään.



Kuva 13. Yleisnäkymä testitilanteesta ja virtuaalikädet, joista toisessa on virtuaalikynä.

5.3 Kyselylomake

Jokaisen tehtäväsarjan jälkeen osallistuja täytti kyselylomakkeen kyseisestä vuorovaikutusmenetelmästä. Lomakkeessa arvioitiin vuorovaikutusmenetelmän ja merkintätavan luonnollisuutta, helppoutta ja tarkkuutta. Lisäksi osallistujat arvioivat mahdollisuutta käyttää kyseistä menetelmää päivittäin sekä käsien uupumusta tehtävien teon jälkeen. Kaikkia edellä mainittuja väitteitä osallistuja arvioi asteikolla yhdestä viiteen, jossa yksi tarkoitti erimielisyyttä väitteen kanssa ja viisi tarkoitti yhdenmielisyyttä.

Väittämien lisäksi kyselylomakkeissa oli vapaata tilaa positiivisille ja negatiivisille kommentteille. Viimeisen vuorovaikutusmenetelmän jälkeen osallistujia pyydettiin asettamaan kaikki kolme vuorovaikutusmenetelmää järjestykseen sen perusteella, mistä piti eniten. Kyselylomake on liitteenä 2. Tutkimuksen observoija, eli tarkkailija, merkitsi lomakkeen yläreunaan mitä vuorovaikutusmenetelmää lomakkeella arvioitiin.

5.4 Vertailtavat vuorovaikutus- ja merkintätavat

Tutkimuksessa oli käytössä Varjo VR2 Pro -virtuaalitodellisuuslasit. Laseihin sisäänrakennettu kamera tunnistaa käsien eleet. Osallistujaa ympäröi neljä seinille kiinnitettyä tunnistinta, jotka lähettivät signaalia virtuaalitodellisuuslaseille, ohjaimille ja VR-kyntälle. Laitteiden poimittua signaalin, niiden paikka ja asento voitiin määritellä.

Kun oltiin vuorovaikutuksessa tietokoneen hiiren kanssa, 3D-mallin pyörittely tapahtui pitämällä hiiren oikeaa painiketta pohjassa ja liikuttamalla hiirtä. 3D-mallia pystyi myös zoomaamaan lähemmäs ja loitommas hiiren rullalla, sekä painamalla rullaa koko 3D-malli liikkui virtuaalimaailmassa. Merkintä tapahtui painamalla hiiren vasenta painiketta. Virtuaalimaailmassa hiirestä lähti säde sen osoitussuuntaan. Säteen piti osoittaa

kohdetta, jotta hiiren kaikki toiminnot toimivat. Hiiren liikuttelu pöydällä muuntui kolmiulotteiseksi säteen liikkeeksi. Kuva 14 havainnollistaa hiiren käyttötilannetta, ja oikeanpuoleisessa kuvassa on nähtävillä hiirestä lähtevä säde.



Kuva 14. Vuorovaikutusmenetelmänä tietokoneen hiiri. Oikealla on Unityn kuvankaappaus pääkallon pinnalla olevan punaisen kohdemerkin merkitsemisestä osallistujan omalla keltaisella merkillä.

Kun molemmat kädet olivat vuorovaikutusmenetelmänä, 3D-mallin siirtely, pyörittely, lähennys ja loitonnuks tapahtui vasemmalla kädellä nipistysotteella. Oikealla kädellä puolestaan tapahtui merkintä; oikeaan käteen ilmestyi virtuaalikynä, kun osoitti etusormella 3D-mallia, piti peukalon suorana ja loput sormet kiinni kämmenessä. Virtuaalikynä oli kiinni käyttäjän kämmenessä, joten se oli vakaampi kuin kohteen osoittaminen pelkällä sormella. Kuten kuvan 15 oikealla puolella näkyy, virtuaalikynän varressa oli painike, jota painaessa merkintä tapahtui. Painaminen tapahtui etusormea koukistamalla painiketta vasten. Virtuaalikynän kärkeen ilmestyvä vihreä alue kertoi kynän olevan 3D-mallin pinnalla ja valmis merkintään. Tällä estettiin virheellisten merkintöjen teko ilmaan tai 3D-mallin sisään.



Kuva 15. Kuvassa vuorovaikutusmenetelmänä ovat kädet ja virtuaalikynällä merkinnän teko pääkallon 3D-malliin.

Kolmas vuorovaikutusmenetelmä oli Valve Index -ohjaimen ja Logitech VR Ink -kynän yhdistelmä. Yhdistelmä on esitetty kuvassa 16, ja ohjaimen ominaisuuksista on kerrottu luvussa 2 (s. 8). Vuorovaikutuseleet olivat hyvin samankaltaiset kuin aiemmin

mainitussa pelkkien käsien vuorovaikutuksessa. Vasemmassa kädessä oli käytössä Valve Index -ohjain, jolla pyöriteltiin, liikuteltiin, lähennettiin ja loitonnettiin 3D-mallia. Oikeassa kädessä pidettiin Logitech VR Ink -virtuaalitodellisuuskynää. Kynästä pidettiin kynäotteella kiinni. Kun sillä ”kosketettiin” 3D-mallia ja sen varressa olevaa painiketta painettiin, merkki ilmestyi. Ohjaimet annettiin osallistujan käteen ja niitä pidettiin kädessä koko tehtäväsarjan ajan.



Kuva 16. Vuorovaikutusmenetelmänä ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmä. Vasemmassa kuvassa on todellinen vuorovaikutustilanne ja oikeassa kuvassa on virtuaalitodellisuuden näkymä.

5.5 Yhteenveto

Kokeellisella tutkimuksella saadaan tietoa vertailtavista asioista, kun vain yksi muuttuja muuttuu kerralla. Samat testitehtävät toteutettiin kolmella vuorovaikutusmenetelmällä, jolloin tutkimuksen tulokset kertovat vuorovaikutusmenetelmien ominaisuuksien eroista. Pilottitestistä hyödynnettiin parhaiden mahdollisten tutkimusolosuhteiden saavuttamiseksi ja harjoitustehtävällä pyrittiin minimoimaan turhien virheiden teko tehtäväsarjojen aikana. Tutkimustehtävät demonstroivat yksinkertaistettua todellisuuden tilannetta ja kyselylomake kattoi monipuolisesti vuorovaikutusmenetelmien eri ominaisuuksien arvioinnin.

6 Tulokset ja analysointi

Tässä luvussa kuvataan mitä dataa tutkimuksessa kerättiin ja miten se tehtiin. Data on havainnollistettu ruutu- ja janakaaviona. Tämä kaaviotyypin valikoitui sen runsaan informatiivisuuden ansiosta. Kaaviossa vertailtavat menetelmät on kuvattu eri värein. Lisäksi jakauman keskiarvoa kuvaa kaaviossa nähtävät X-merkit ja mediaani on merkitty palkeissa näkyvällä vaakaviivalla. Toisinaan mediaaniviiva ei ole nähtävillä, sillä se on päällekkäin hajonnan neljännessä kuvaavan ruudun ylä- tai alareunan kanssa. Luvussa on ensin esitelty tietokoneohjelman datasta saadut objektiiviset tulokset, ja myöhemmin kyse-lylomakkeiden perusteella saadut subjektiiviset tulokset.

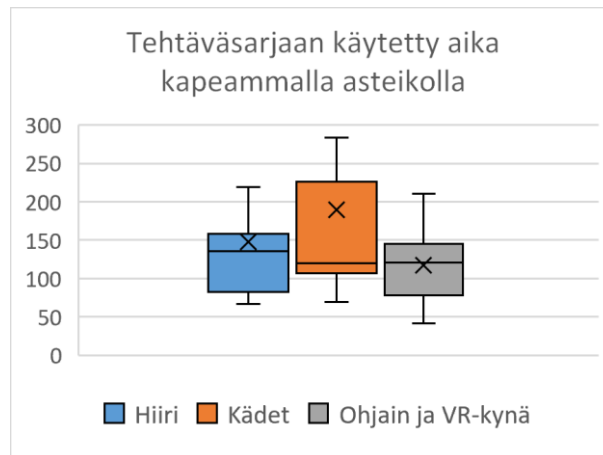
6.1 Datasta kerätyt objektiiviset tulokset

Tietokoneohjelma tallensi kaikilta käyttäjiltä objektiivista dataa. Objektiivisesta datasta laskettiin tilastollisia merkittävyksiä kahden riippuvan otoksen t-testillä. Tällä pyrittiin todistamaan, ettei tulos ole vain sattumaa [Tilastokeskus 2021b]. Tässä tutkimuksessa käytettiin 5 % riskitasoa. Koska verrattavia muuttujia on kolme, täytyy p-arvo 0,050 jakaa kolmella. Tulos on tilastollisesti merkittävä, kun testin p-arvo on alle 0,017.

6.1.1 Nopeus

Unity keräsi ja tallensi ajan, joka oli käytetty jokaiseen tehtävään ja tehtäväsarjaan. Aika on helppo mitattava määre ja se kertoo hyvin vuorovaikutusmenetelmän tehokkuudesta. Datasta nähtiin sekunnin tarkkuudella aika, jolloin uusi 3D-malli ilmestyi näkyviin. Tästä pystyttiin laskemaan yksittäiseen tehtävään kulunut aika, sekä aika, joka kului yhden vuorovaikutusmenetelmän tehtäväsarjaan. Kaavioon 2 on kerätty kaikkien osallistujien tehtäväsarjaan käyttämä aika jokaisella vuorovaikutusmenetelmällä. Keskiarvojen perusteella tehtäväsarjan teko ohjainyhdistelmällä oli hieman hiirtä nopeampaa ja kädet olivat hitain vuorovaikutusmenetelmä. Vuorovaikutusmenetelmien mediaanit, eli tyypillisimmät nopeudet ovat kuitenkin hyvin yhtenäiset. Voidaankin todeta, että pääsääntöisesti nämä vuorovaikutusmenetelmät ovat lähes yhtä nopeat keskenään, vaikka hajontaa on.

Hiirellä ja käsillä oli huomattavissa yhden ääriarvot, jotka ovat saman osallistujan tekemiä arvoja. Kaavion 2 tarkastelun helpottamiseksi nämä ääriarvot on rajattu pois. Tämä osallistuja suoriutui myös ohjainyhdistelmällä tehtäväsarjasta keskivertoa hitaammin. Osallistujalla ei ole aikaisempaa kokemusta virtuaalitetellisuuden käytöstä, mikä saattaa selittää tehtäväsarjoihin käytetyn ajan pituutta.

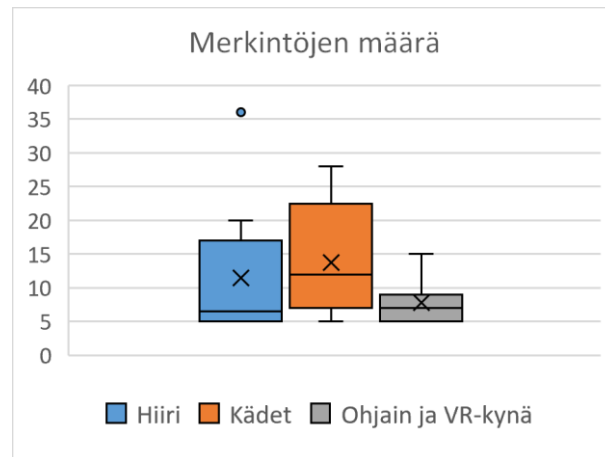


Kaavio 2. Tehtäväsarjaan käytetty aika sekunteina kapeammalla y-asteikolla. Kaaviosta on rajattu pois ääriarvot.

Aiempi kokemus virtuaalitodellisuudesta mitattiin järjestysasteikolla nollasta viiteen, jossa nolla kuvasi olematonta kokemusta ja viisi kuvasi runsasta kokemusta. Aiempi kokemus havainnollistettiin luvun 5 kaaviossa 1 (s. 22). Osallistujat, jotka arvioivat kokemuksensa olevan kaksi tai enemmän, suoriutuivat tehtäväsarjoista keskiarvoa nopeammin. Puolestaan vähäisen tai olemattoman (0 tai 1) kokemuksen omaavat henkilöt suoriutuivat yhdestä tai useammasta tehtäväsarjasta keskiarvoa hitaammin. Kun vuorovaikutusmenetelmänä olivat kädet, vähän kokemusta omaavat osallistujat suoriutuivat tehtäväsarjasta keskiarvoa nopeammin. Voidaankin päätellä, että vähäisellä kokemuksella kädet ovat sujuvin vuorovaikutusmenetelmä. On kuitenkin huomattava, että osallistujat arvioivat aiemman kokemuksensa mielipideasteikolla, joten aiemmat kokemukset voivat olla hyvinkin erilaiset. Tämä olisi yksi selittävä tekijä poikkeukselle, jossa eniten kokemusta omaava osallistuja suoriutui vain yhdestä tehtäväsarjasta keskiarvoa nopeammin.

6.1.2 Merkintöjen määrä

Vuorovaikutusmenetelmän lisäksi tutkimuksessa haluttiin tietoa eri merkintätavoista. Kaaviossa 3 näkyy tehtäväsarjaan käytetty merkintöjen määrä. Koska jokaisessa tehtäväsarjassa oli viisi tehtävää, oli minimi merkintämäärä viisi. Kun osallistuja tulkitse oman merkintänsä olevan riittävän lähellä kohdetta, hän siirtyi seuraavaan tehtävään. Jos merkintä oli osallistujan mielestä liian kaukana kohteesta, tarvittiin lisäksi korjausmerkintöjä.



Kaavio 3. Kaikkien merkintöjen määrä.

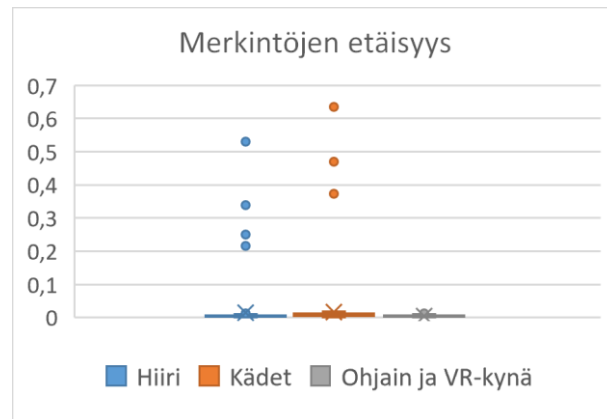
Kaikilla vuorovaikutusmenetelmillä päästiin viiden merkin minimiin. Matala mediaani osoittaa, että hiirellä ja ohjainyhdistelmällä useampi osallistuja on suoriutunut tehtäväsarjasta ilman korjausmerkintöjä, mutta käsillä vain yksi osallistuja onnistui siinä. Runsaas merkintöjen määrä kertoo siitä, että käsillä merkintätapaa oli hankalampi hallita ja se oli epätarkempi.

Huomiota kiinnittää yksittäinen poikkeama hiiren merkintämäärissä. Poikkeaman tehneellä osallistujalla oli myös käsillä korkea merkintämäärä, mutta ohjainyhdistelmällä vain hieman keskivertoa korkeampi. Taustatietolomakkeen perusteella tällä osallistujalla ei ollut juuri aiempaa kokemusta virtuaalitodellisuuden käytöstä, joten voidaan olettaa tutkittavien vuorovaikutustapojen olleen hänelle uusia.

Osallistujilla, joilla oli keskiarvoa enemmän merkintöjä, oli havaittavissa moniklikkailua. Tässä moniklikkailulla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa yli neljä merkintää oli tehty peräkkäin niin, että niistä kaksi tai kolme oli tehty saman sekunnin aikana. Tätä tapahtui viidellä osallistujalla erityisesti käsivuorovaikutuksessa, mutta myös hiiren kanssa. Tämä saattaa viitata tapaan tehdä useita merkintöjä ilman niiden tarkempaa tarkastelua, ajatuksena, että jokin merkinnöistä osuu kohdalleen. Tätä on kuitenkin vaikea erottaa tilanteesta, jossa osallistuja tarkoituksenmukaisesti halusi siirtää merkkiä lähemmäs kohdetta.

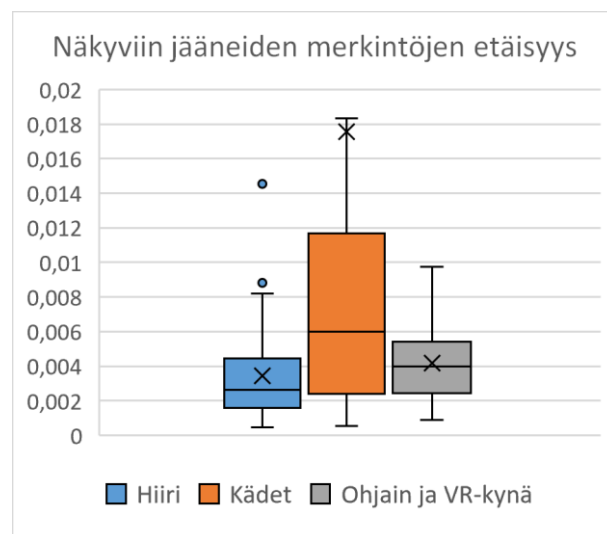
6.1.3 Merkintöjen tarkkuus

Ohjelmiston tallettamasta datasta voidaan tarkastella merkintätapojen tarkkuutta. Tarkkuus on mitattu etäisyytenä osallistujan tekemän merkinnän ja kohteen välillä. Kaaviossa 4 on kerätty osallistujien tekemien kaikkien merkintöjen etäisyydet. Hiirellä ja käsillä on tehty useampia poikkeamia, jotka ovat voineet johtua vahingosta. Kuitenkin ohjainta ja VR-kynää käytettäessä näitä suuria poikkeamia ei ole tullut, joten sen perusteella voidaan todeta tämän ohjainyhdistelmän olevan virheiden osalta luotettavampi kuin muut menetelmät.



Kaavio 4. Kaikkien merkintöjen etäisyydet kohteesta.

Tutkimusongelman kannalta oleellisempaa on tarkastella viimeiseksi tehtyä eli näkyviin jätettyä merkintää. Tämä on merkintä, jonka osallistuja on todennut olevan mielestään lähimpänä kohdetta ja on itse ollut merkinnän tarkkuuteen tyytyväinen. Kaaviossa 5 on esitetty näkyviin jääneiden merkintöjen etäisyydet. Kaaviosta on jätetty pois käsillä tehty yksi selkeästi poikkeava arvo (0,63).



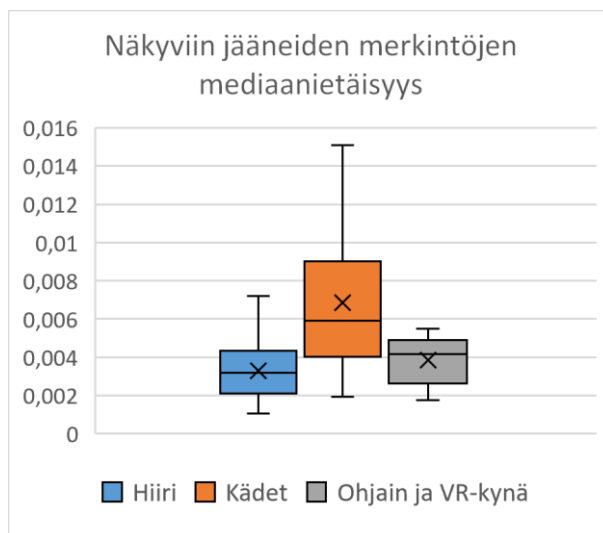
Kaavio 5. Viimeisten eli näkyviin jääneiden merkintöjen etäisyydet kohteesta.

Hiirellä ja VR-kynällä tehtyjen viimeisten merkintöjen keskiarvoissa on hyvin pieni ero, kun hiiren keskiarvo on 0,003 ja VR-kynän keskiarvo on 0,004. Mielenkiintoista on, että hiiren keskiarvo on selkeästi matalampia kuin kaikkia merkintöjä tarkasteltaessa, jossa hiiren keskiarvo on 0,014. Hiirellä tehtiin siis useampia epätarkkoja merkintöjä, mutta hiiri oli tarpeeksi mielekäs käyttää, jotta osallistujalla oli halu korjausmerkinnän tekoon.

Keskiarvoa parempi tunnusluku tämän datan tarkasteluun on mediaani. Kuten jo mainittiin, data sisältää poikkeamia ja mediaani ei häiriinny poikkeamista yhtä paljon kuin keskiarvo [Tilastokeskus 2021a]. Jokaiselle osallistujalle laskettiin mediaani käyttäen heidän tekemien merkintöjen etäisyyksistä. Toisin sanoen, jokaisen osallistujan tekemistä

merkinnöistä laskettiin mediaani, joita käytettiin vertailussa. Näin saatiin 12 mediaaniarvoa, joita voitiin vertailla keskenään.

Kaavio 6 on muodostettu käyttäen näitä mediaaneja. Tilastollisesti merkittäviä eroja löytyi hiiren ja käsien (p-arvo 0,004) välillä. Kädet olivat näkyviin jätettyjen merkintöjen osalta selkeästi epätarkin vaihtoehto. Hiiri ja ohjainyhdistelmä olivat lähes yhtä tarkat.



Kaavio 6. Näkyviin jätettyjen merkintöjen etäisyyksien mediaanit.

6.2 Kyselylomakkeiden subjektiiviset tulokset

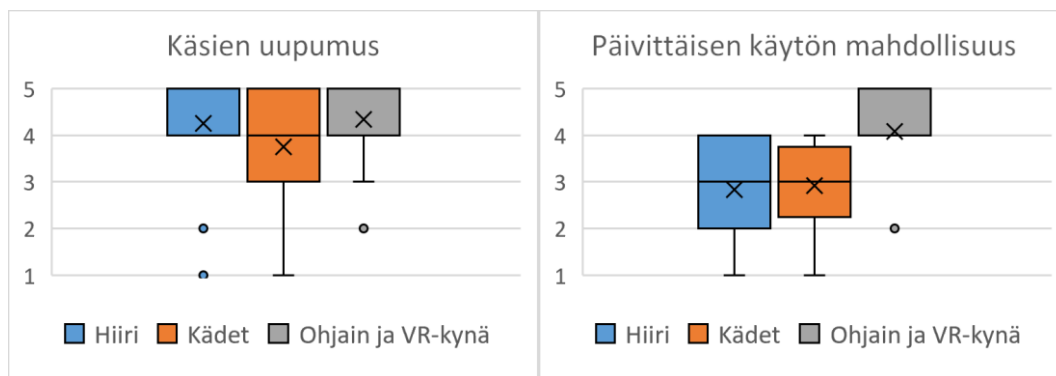
Kyselylomakkeilla haluttiin saada tietoa vuorovaikutusmenetelmien mielekkyydestä eikä tällaisen tiedon saaminen ohjelmiston keräämästä datasta ole mahdollista. Kyselylomake täytettiin jokaista vuorovaikutusmenetelmää kohden ja se sisälsi arviointikysymyksiä vuorovaikutusmenetelmästä, merkintätavasta ja yleisesti molemmista. Vastauskaala oli asteikolla yhdestä viiteen, jossa yksi tarkoitti ”vahvasti eri mieltä” ja viisi ”vahvasti samaa mieltä”. Vastaukset kerättiin heti arvioitavan vuorovaikutusmenetelmän käytön jälkeen, jotta kokemus oli vielä vahvasti muistissa.

Myös subjektiivisista tuloksista laskettiin tilastollisia merkitsevyyksiä. Koska data oli järjestysasteikollista, eli perustui ihmisten mielipideasteikkoihin eikä tasaväliseen suhdeasteikkoon, päädyttiin tilastollista merkittävyyttä laskemaan Wilcoxon merkittöjen sijalukujen testillä (engl. Wilcoxon signed rank test). Myös subjektiivisilla tuloksilla käytettiin 5 % riskitasoa ja tulos on tilastollisesti merkittävä, kun p-arvo on alle 0,017.

Osallistujat arvioivat vuorovaikutusmenetelmän ja merkintätavan yhteiskäytön mahdollisuuksia jokapäiväisessä käytössä sekä sen uuvuttavuutta käsille. Käsien uupumusta mitattiin käänteisellä väitteellä ”Kättesi eivät ole väsyneet”, jotta arviointi saatiin muiden väitteiden kanssa yhtenäiseksi. Arvosana 5 siis tarkoitti, ettei osallistujia tuntenut uupumusta käsissään. Kun näitä ominaisuuksia verrataan vierekkäin kaaviossa 7 huomataan,

että ohjainyhdistelmää pidettiin parhaimpana päivittäiseen käyttöön sekä vähiten uuvuttavana. Pääsääntöisesti mitään vuorovaikutusmenetelmää ei koettu uuvuttavaksi muutamia haja-arvoja lukuun ottamatta, vaan kaikki menetelmät olivat usean osallistujan mukaan olleet hyvin vähän uuvuttavia. Kuitenkin keskiarvon ja hajonnan perusteella käsillä vuorovaikuttaminen oli uuvuttavinta. Osallistujat kokivat käden nipistysotteen teknisesti epätarkaksi, ja otteen irrotus oli monelle hankalaa. Käsieleiden tekoon täytyi kiinnittää paljon huomiota halutun tehtävän onnistumiseksi ja tämä saattoi lisätä käsien uupumusta. Tämä oli kuitenkin osittain tekninen ongelma, joka vaikutti testitulokseen.

Tilastollisesti merkittävä ero löytyi hiiren ja ohjainyhdistelmän (p-arvo 0,015) sekä käsien ja ohjainyhdistelmän (p-arvo 0,003) väliltä mitattaessa päivittäisen käytön mahdollisuutta. Hiiren ja käsien arvioinnin hajonta on melko suurta, mutta nämä vuorovaikutusmenetelmät on arvioitu keskenään lähes yhtä sopiviksi. Suurta hajontaa vahvistaa osallistujien kommentit arvion antamisen vaikeudesta lyhyen käyttöajan perusteella.

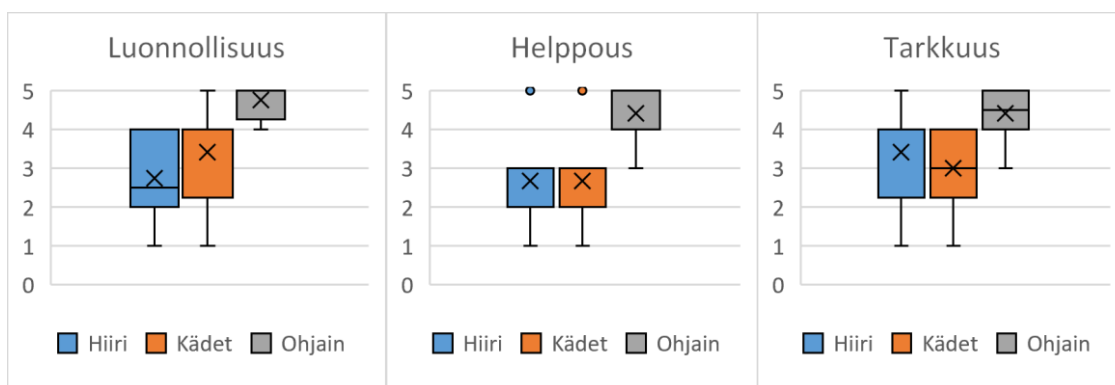


Kaavio 7. Subjektiiivinen arvio vuorovaikutusmenetelmien aiheuttamasta käsien uupuksesta ja niiden mahdollisesta päivittäisestä käytöstä.

Subjektiiivista dataa haluttiin myös erotellusti vuorovaikutusmenetelmästä ja merkintätavasta. Vuorovaikutusmenetelmästä ja merkintätavasta arvioitiin erikseen niiden luonnollisuutta, helppoutta ja tarkkuutta. Tutkimuksessa vuorovaikutusmenetelmällä tarkoitettiin 3D-mallin käsittelyyn vaadittavia eleitä ja toimintoja, ja merkintätavalla tarkoitettiin vastaavasti merkinnän tekoon vaadittavia.

Kaaviosta 8 nähdään, että vuorovaikutusmenetelmänä ohjain oli selkeästi pidetyin kaikilla mitattavilla asteikoilla. Sen keskiarvo kaikilla asteikoilla on yli 4. Tilastollista merkittävyyttä löytyi käden ja ohjaimen välillä kaikilla asteikoilla (p-arvot 0,009, 0,003 ja 0,003). Hiiren ja ohjaimen välillä tilastollista merkittävyyttä löytyi luonnollisuutta ja helppoutta mitattaessa (p-arvot 0,003). Osallistujat myös kommentoivat ohjaimen tuntuvan vakaalta ja 3D-mallin liikuttelu ja pyörittely oli sillä helppoa. Vaikka ohjain oli niin sanotusti ylimääräinen laite kädessä, Valve Index -ohjain kiinnitettiin käteen niin, ettei sitä tarvinnut itse puristaa. Kättä voi siis käyttää kuin vapaata kättä, ja tämä selittää positiivista arviota luonnollisen tuntuudesta vuorovaikutuksesta.

Hiiri ja kädet saivat pääsääntöisesti samoja arvoja. Keskiarvon ja mediaanin perusteella, kädet koettiin hieman hiirtä luonnollisemmaksi vuorovaikutusmenetelmäksi (hiiren mediaani 2,5 ja käsien mediaani 4), kun taas hiiri koettiin näistä kahdesta tarkemmaksi (hiiren mediaani 4 ja käsien mediaani 3). Kun käsissä ei ole ylimääräisiä laitteita, se tuntuu luonnolliselta ja myös objektiivista dataa tarkasteltaessa hiiri oli tarkempi kuin kädet. Löydöt objektiivisessa ja subjektiivisessa datassa tukevat toisiaan. Hajonta oli kuitenkin suurta hiirtä ja käsiä arvioitaessa. Tämä kertoo yksittäisten osallistujien mielipide-eroista. Ohjainta arvioitaessa hajonta oli puolestaan pientä eli osallistujat olivat pääsääntöisesti samaa mieltä ohjaimen mielekkyydestä.

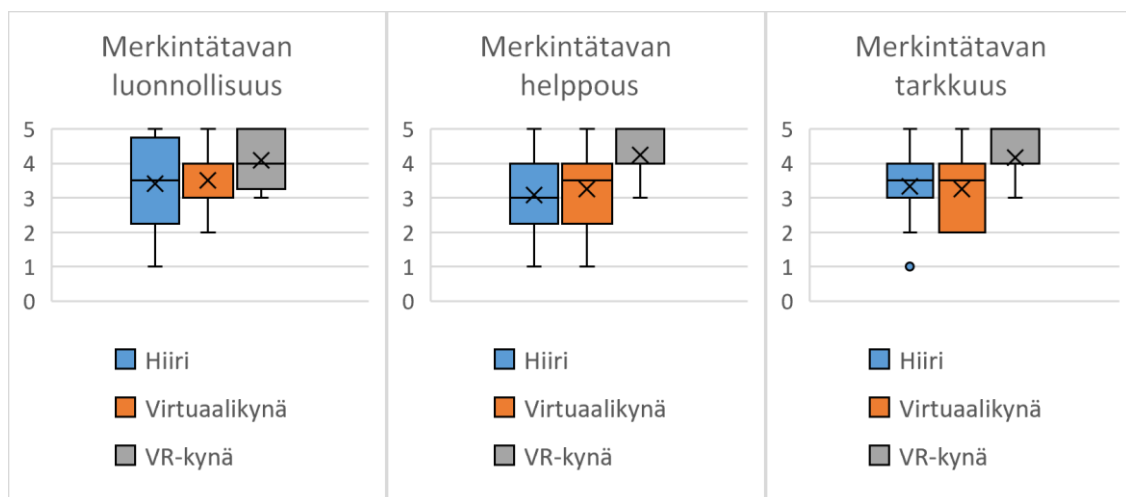


Kaavio 8. Subjektiiviset mielipiteet vuorovaikutusmenetelmien luonnollisuudesta, helpoudesta ja tarkkuudesta.

Merkintätavoilla tässä tutkimuksessa tarkoitettiin tapoja ja toimintoja, joita vaadittiin merkinnän tekemiseen. Kaaviossa 9 on vierekkäin nähtävillä merkintätapojen ominaisuuksien arviot. Ohjaimen kanssa käytetty VR-kynä oli pidetyin, eikä hajontaa ollut paljoa. Hajonta oli kuitenkin huomattavissa osallistujien antamissa kommentteissa, sillä eräs osallistuja kehui VR-kynän tarkkuutta, kun toinen kommentoi sen tuntuvan kömpelöltä. Useampi osallistuja kokikin, että fyysisen laitteen pitäminen kädessä ja sen tuoma paino lisäsivät luonnollisuuden tunnetta. Osallistujia observoitaessa tutkimuksen aikana kävi kuitenkin ilmi, että usealla osallistujalla oli hankaluuksia löytää VR-kynän painiketta. Koska virtuaalitodellisuuslasien läpi ei näe omaa kättä eikä siinä olevaa kynää, nappi piti tunnustella ennen virtuaalitodellisuuslasien päähän laittoa. Tämä johtui täysin laitteesta, ja olisi korjattavissa esimerkiksi helpommin tunnusteltavissa olevalla painikkeella. Logitechin VR-kynä ei ollut tutkimuksen aikana vielä markkinoilla, joten se oli kaikille osallistujille täysin uusi laite.

Toisin kuin VR-kynä, hiiri oli osallistujille tuttu laite ennestään. Silti merkintätapana hiiri arvioitiin keskimäärin vaikeammaksi käyttää kuin ennestään vieras VR-kynä. Merkinnän teon helpoudessa löytyi tilastollisesti merkittävä ero VR-kynän ja hiiren väliltä (p-arvo 0,009). Monelle osallistujalle hiirellä kohteen osoittaminen oli vaikeaa, kun 3D-malli oli monimutkainen. Hiirestä lähtevä säde ei läpäissyt 3D-mallin muotoja, ja usein

jokin kulma tai uloke tuli säteen ja kohteena olevan merkin väliin. Osallistuja joutui etsimään tietyn katselukulman, josta hiiren säde pääsi osoittamaan suoraan kohteeseen. Tätä samaa ongelmaa ei ollut kahdella muulla merkintätavalla, sillä niillä pystyi kiertämään erilaiset 3D-mallin muodot. Merkintätapojen luonnollisuutta ja subjektiivista tarkkuutta mitattaessa ei löytynyt tilastollisesti merkittäviä eroja, vaan merkintätavat ovat lähes yhtä pidetyt.



Kaavio 9. Subjektiiviset mielipiteet merkintätapojen luonnollisuudesta, helppoudesta ja tarkkuudesta.

Kun osallistuja oli tehnyt kaikki tehtäväsarjat, hänen tuli sijoittaa vuorovaikutusmenetelmät järjestykseen niiden mielekkyyden mukaan. Ohjain ja VR-kynä -yhdistelmä valittiin mielekkäimmäksi. Erot hiiren ja ohjainyhdistelmän (p-arvo 0,008) sekä käsien ja ohjainyhdistelmän (p-arvo 0,003) välillä olivat tilastollisesti merkittävät. 12:sta osallistujasta 11 sijoitti ohjainyhdistelmän mieluisimmaksi. Ohjainyhdistelmää ei kukaan arvioinut epämieluisimmaksi. Puolestaan käsillä vuorovaikutusta ei kukaan osallistuja arvioinut mieluisimmaksi vaan suurin osa osallistujista sijoitti sen viimeiseksi. Sijoittamisjärjestyksen perusteella toiseksi mieluisin vuorovaikutustapa oli hiiri. Mielekkyyssjärjestystä on havainnollistettu kaaviossa 10.



Kaavio 10. Vuorovaikutusmenetelmien mielekkyyden arviot. Vaaka-akselilla vasemmalta oikealle on sijat mielekkäimmstä (1) epämieluisimpaan (3), ja pystyakselilla arvioiden lukumäärä.

6.3 Yhteenveto

Tutkimuksessa objektiivinen ja subjektiivinen data tukivat toisiaan ja niiden avulla saatiin monipuolisesti tietoa vertailtavista vuorovaikutusmenetelmistä. Objektiivisesta datasta tutkittiin kolmea ominaisuutta, ja subjektiivisesta datasta puolestaan viittä ominaisuutta. Tilastollisesti merkittäviä eroja löytyi objektiivisesta datasta yhdestä mitatusta ominaisuudesta. Subjektiivisesta datasta löytyi tilastollista merkittävyyttä neljästä ominaisuudesta sekä mielekkyydsjärjestyksestä. Tulokset olivat selkeästi nähtävillä ruutu- ja janaakaavioista. Hiiri oli paras vaihtoehto yhdellä mitatulla asteikolla, kun taas ohjainyhdistelmä oli paras muilla asteikoilla.

7 Keskustelu

Tutkimuskysymyksellä haluttiin tutkia, mikä vuorovaikutusmenetelmä on sopivin virtuaalitodellisuudessa suoritettaviin tehtäviin, joissa ollaan vuorovaikutuksessa 3D-mallin kanssa. Vuorovaikutusmenetelmien sopivuutta pyrittiin mittaamaan monipuolisesti eri ominaisuuksien avulla. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmän olevan sopivin vuorovaikutusmenetelmä tilanteisiin, joissa tarkastellaan kolmiulotteisia malleja ja tehdään niihin merkintöjä. Tulos oli selkeä, sillä se oli yhtenäinen sekä objektiivisia että subjektiivisia arvoja tarkasteltaessa. Tulosta voidaan pitää myös luotettavana, sillä ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmä sijoittui parhaiten useampia ominaisuuksia mitattaessa.

Tutkimuksen tuloksista voidaan todeta ohjaimen olevan tarkka vuorovaikutusmenetelmä. Tulos vastaa aiempaa tietämystä, kun Huang *et al.* [2021] toteavat saman. He myös toteavat käsieleiden käytön olevan luonnollinen vuorovaikutustapa, mikä todetaan myös tässä tutkimuksessa. Tässä käsien todetaan olevan epätarkempi menetelmä kuin ohjaimen. Myös tämä tulos on yhtenäinen sekä Huangin ja muiden että Hanneman [2001] tutkimustulosten kanssa.

Tulosten ja aiemman tutkimuksen välille ei syntynyt juurikaan ristiriitoja. Ainoastaan Huangin ja muiden [Huang *et al.* 2021] tutkimukseen verrattuna ristiriitaa tuottaa ohjainten luonnollisuus. Huang ja muut toteavat artikkelissaan käsissä pidettävien ylimääräisten laitteiden luovan epämukavuutta. Tässä tutkimuksessa ohjaimia puolestaan pidettiin luonnollisina ja jopa pidettiin niiden tuottamasta fyysisestä paineesta. Tämä on subjektiivinen mielipide, mikä saattaa vaihdella paljonkin käyttötarkoituksesta ja ohjaimista riippuen. Lisäksi luonnollisuus terminä on laaja ja voi tarkoittaa eri ihmisille eri asioita.

Tarkasteltaessa tuloksia vuorovaikutusmenetelmien uuvuttavuudesta, on otettava huomioon, että osallistujat käyttivät vuorovaikutusmenetelmiä vain muutamien minuuttien ajan tehtäväsarjaa tehdessään. Tällä tutkimuksella ei siis päästy mittaamaan pitkäaikaisen käytön rasittavuutta. Johnson *et al.* [1996] toteavat tilastollisesti merkittävää lihasuupumusta ilmaantuvan vasta kolmen tunnin hiiren käytön jälkeen. Myös Huang *et al.* [2021] ottivat uupumuksen huomioon tutkimuksessaan. Huangin ja muiden kanssa saatiin samanlaisia tuloksia siitä, että käsillä vuorovaikutus oli uuvuttavampaa kuin ohjaimilla vuorovaikutus. Artikkelissa kerrotaan tähän olevan syynä käsien epävakaudesta aiheutuneet vaikeudet. Tämä käsien epävakaudesta saattoi olla yksi vaikuttava tekijä sille, että tässä tutkimuksessa käsillä korjausmerkintöjä tehtiin eniten. Toisin sanoen, useamman korjausmerkinnän teko rasitti käyttäjien lihaksia, mikä saattoi aiheuttaa käsien uupumusta. Käsien uupumusta eri vuorovaikutusmenetelmillä tulisi kuitenkin tutkia pidemmällä tehtäväsarjalla, jotta saataisiin luotettavampia tuloksia.

Kuten jo mainittu, hiiren käyttöä virtuaalitodellisuudessa ei ole juurikaan tutkittu. Tässä tutkimuksessa saatiin uusia tuloksia hiirestä vuorovaikutusmenetelmänä ja näitä

tuloksia voidaan hyödyntää tulevaisuudessa virtuaaliympäristöjä kehitettäessä. Argelaguet ja Andur [2012] mainitsevat kursorin ja kolmiulotteisen ympäristön yhteensopivuusongelmasta. Tutkimuksessa pyrittiin parantamaan yhteensopivuutta korvaamalla kursorin säteellä, mutta tästä huolimatta osallistujilla oli hankaluuksia onnistua kolmiulotteisen mallin käsittelyssä hiirellä. Kuitenkin yksinkertaisten mallien kanssa osallistujat onnistuivat hyvin. Voidaankin päätellä hiiren soveltuvan paremmin yksinkertaisten kuin monimuotoisten 3D-mallien käsittelyyn. Itse laitteen käytössä ei ollut ongelmaa, vaan tällä hetkellä ongelmakohta on käyttöliittymän suunnittelussa, jotta saadaan kaksiulotteinen hiiri toimivammaksi kolmiulotteisessa ympäristössä. Tutkimuksessa hiiri osoittautui tarkaksi ja luonnolliseksi huolimatta siitä, ettei käyttäjä näe sitä käytön aikana. Hiiri ei kuitenkaan soveltunut tutkimustehtäviin yhtä hyvin kuin ohjain. Hiiri on kuitenkin hyvä vaihtoehto ohjaimelle tai käsille tarkkuutta vaativissa tehtävissä.

Vapaalla kädellä merkitsemisessä päädyttiin käyttämään uudenlaista elettä, joka ei ole ihmiselle tuttu jokapäiväisestä elämästä. Tutumpia eleitä olisi olleet esimerkiksi painaminen tai nipistäminen. Ele toimi hyvin harjoittelun jälkeen, vaikka osallistujia observaatioissa osallistujat tekivät merkintäeleen hieman eri tyyleillä. Huomataan, että teknologian tulee antaa ihmisille vapauksia olla luova. Liian tarkasti määritellyt eleet ja komennot saattavat johtaa turhiin virhetilanteisiin. Uuden eleen valitsemiseen liittyy aina riski, ettei se toimi halutulla tavalla tehtävässään. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että valittua elettä pidettiin luonnollisena.

Tutkimuksessa huomattiin myös ilmiö, jota tässä kutsutaan moniklikkailuksi. Viidellä osallistujalla 12:sta huomattiin moniklikkailua, eli he tekivät lyhyessä ajassa useita merkintöjä hyvin lähekkäin. Moniklikkailua havaittiin erityisesti epätarkkana todetulla kädellä, mutta myös hiiren kanssa. Luultavasti moniklikkailulla pyrittiin saamaan merkintä mahdollisimman lähelle kohdetta ilman tarvetta tarkempaan tarkasteluun. Tutkimuksen osallistujat eivät kommentoineet ilmiötä eikä aiheesta löydy aiempaa tieteellistä tutkimusta.

Tutkimukseen osallistui 12 henkilöä, joilla oli eri taustatiedot virtuaalitodellisuudesta. Monipuolisuutta osallistujajoukkoon toi sukupuolen ja iän vaihtelu. Osallistujista huomattava osa oli korkeakouluopiskelijoita, mikä ei vastaa koko projektin kohderyhmää eli hammaslääketieteen ammattilaisia. Tämä onkin yksi tutkimuksen rajoitteista, mikä osaltaan johtui ammattilaisten tutkimukseen saamisen haastavuudesta. Se, että osallistujat olisivat olleet hammaslääketieteen asiantuntijoita, ei välttämättä olisi muuttanut tutkimustulosta merkittävästi, sillä tutkimustehtävät olivat hyvin yleistasoisia. Lisäksi hammaslääketieteen asiantutijat eivät ole käyttäneet työssään virtuaalitodellisuutta, joten heiltä, kuten tutkimuksen osallistujilta, puuttui kokemus juuri tämän tyyllisestä vuorovaikutuksesta. Se mitä alan asiantuntijat olisivat tuoneet tutkimukseen, on tarkempi tieto ja

ymmärrys hammasleikkausten suunnittelusta ja siinä tarvittavista menetelmistä. Huolimatta osallistujien kokemuksen puutteesta hammaslääketieteessä, tutkimus antaa vahvan näytön siitä, että ohjainta ja VR-kynää tulisi käyttää virtuaalitodellisuudessa hammasleikkausten suunnittelussa.

Toinen tutkimuksessa esiintynyt rajoite oli vuorovaikutusmenetelmien oikeakätisyys. Kuten jo mainittu, yksi osallistuja oli vasenkätinen, mutta hän on tottunut käyttämään tietokoneen hiirtä oikealla kädellä. Tämä ei siis vaikuttanut hiiren tuloksiin, mutta mahdollisesti vapaan käden ja ohjainyhdistelmän tuloksiin. Täysin vasenkätinen osallistuja olisi voinut vääristää kaikkia tuloksia tai tulokset olisivat voineet vääristyä vahvemmin. Jatkossa vasenkätisyys tulisi ottaa paremmin huomioon ja tarjota vuorovaikutusmenetelmät molemmille käsille.

Kolmas mahdollinen tutkimusta rajoittava tekijä olivat tekniset haasteet, jotka aiheutuivat vapaan käden vuorovaikutuksen aikana. Teknisiä haasteita ilmeni 3D-malliin tarttumisessa ja sen vapauttamisessa. Jostain syystä tarttuminen ja vapauttaminen eivät vastanneet käyttäjän eleitä tarpeeksi tarkasti. Tämä oli haitallista itse tutkimuksen tarkastelulle, kun vuorovaikutusmenetelmä ei toiminut parhaalla mahdollisella tavalla. Tuloksia analysoitaessa on mahdoton sanoa, johtuuko käsivuorovaikutuksen saamat heikot tulokset tästä teknisestä ongelmasta vai itse vuorovaikutusmenetelmästä.

Varsinaisten rajoitusten lisäksi tutkimuksen aikana havaittiin tekninen epäkohta. Osallistujan tehdessä oma merkintä täysin samaan kohtaan kohdemerkin kanssa, käyttäjän merkki meni kohteen sisälle. Tällöin osallistuja ei tiennyt katosiko merkintä jonnekin kauas, vai onko merkintä oikealla paikalla, eli valmiin merkin kohdalla. Tämä saattoi vaikuttaa sekä objektiivisen että subjektiivisen tarkkuuden mittaamiseen. Tämä olisi voitu välttää tekemällä käyttäjän omasta merkistä huomattavasti isompi kuin kohdemerkki. Toinen vaihtoehto olisi ollut estää oman merkin pääsy valmiin merkin sisään. Tämä olisi kuitenkin estänyt täydellisen merkinnän tarkkuuden. Merkinnän ominaisuuksia ei kuitenkaan voitu enää tutkimuksen aikana muuttaa, jotta pystyttiin pitämään osallistujien suoritukset vertailukelpoisina.

8 Lopuksi

Tutkimuksessa vertailtiin kolmea vuorovaikutusmenetelmää virtuaalitodellisuudessa. Selkeästi parhaaksi vaihtoehdoksi osoittautui Valve Index -ohjaimen ja Logitech VR Ink -kynän yhdistelmä. Se oli subjektiivisen datan perusteella mielekkäin, luonnollisin, tarkin, vähiten uuvuttava ja helpoin käyttää. Ohjainyhdistelmän ajateltiin myös soveltuvan parhaiten jokapäiväiseen käyttöön. Yhtä selkeä tulos ei ollut objektiivista dataa analysoitaessa. Vertailtavat vuorovaikutusmenetelmät olivat keskenään lähes yhtä nopeat, vaikka tämä ohjainyhdistelmä oli hieman muita nopeampi. Merkintöjen tarkkuudessa puolestaan hiiri oli ohjainyhdistelmääkin tarkempi, mutta ero hiiren ja ohjainyhdistelmän välillä ei ollut tilastollisesti merkittävä. Kädet olivat selkeästi vähiten soveltuva vuorovaikutusmenetelmä tämän tyyppiseen vuorovaikutukseen. Tutkittavista ominaisuuksista luonnollisuudessa, helppoudessa ja subjektiivisessa tarkkuudessa löytyi tilastollisesti merkittäviä eroja ohjaimen ja VR-kynän hyväksi. Se oli myös tilastollisesti merkittävästi sopivin päivittäiseen käyttöön.

Aiempaa tutkimusta kaksiulotteisen hiiren käytöstä virtuaalitodellisuudessa ei juuri-kaan ollut. Hiiren käyttöä rajoittaa tarve istua pöydän ääressä sen käytön aikana, sillä hiirtä ei voi käyttää seisoaltaan. Hiiren käyttö virtuaalitodellisuudessa on mielenkiintoinen mahdollisuus, jota tulisi tutkia enemmän. Lisäkehitystä tarvitaan ratkaisemaan cursorin sujuvampi ohjaus 3D-ympäristössä. Myös 3D-hiiren käyttöä voitaisiin tutkia tässä yhteydessä.

Tutkimuksessa haluttiin vertailla tehtävien suoritusta ilman laitteita ja niin, että molemmissa käsissä oli laite. Osallistujilta saatujen kommenttien perusteella voisi kuitenkin olla mielekästä tutkia myös erilaisia vuorovaikutus- ja merkintätapayhdistelmiä, kuten ohjaimen ja vapaan käden yhdistelmää. Tutkimuksen tulokset sekä kirjallisuuskatsaus virtuaalitodellisuuden vuorovaikutusmenetelmistä osoittavat laitteilla vuorovaikuttamisen olevan suositumpaa. On kuitenkin huomioitava, että ohjaimista ja muista laitteista tulee aina lisäkustannuksia, vaikka niistä saadaankin paljon hyötyä.

Ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmä menestyi useimmalla mitta-asteikolla parhaiten. Tämän perusteella voidaan sanoa, että ohjaimen ja VR-kynän yhdistelmä on sopivin käytettäväksi tehtävissä, jotka muistuttavat hammasleikkausten suunnittelua virtuaalitodellisuudessa. Tarvitaan kuitenkin vielä lisätutkimusta, jossa hammaslääketieteen asiantuntijat toimivat osallistujina ja tutkimustehtävät kuvaavat vielä todenmukaisemmin oikean hammasleikkauksen suunnittelua.

9 Viiteluettelo

- 3D Systems, Inc. (2021). Touch X. Saatavilla elektronisesti <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x>. Haettu 3.2.2021.
- Argelaguet, F., & Andujar, C. (2013). A survey of 3D object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*, 37(3), 121-136.
- Ayoub, A., & Pulijala, Y. (2019). The application of virtual reality and augmented reality in Oral & Maxillofacial Surgery. *BMC Oral Health*, 19(1), 1-8.
- Bartella, A. K., Kamal, M., Scholl, I., Schiffer, S., Steegmann, J., Ketelsen, D., ... & Lethaus, B. (2019). Virtual reality in preoperative imaging in maxillofacial surgery: implementation of “the next level”?. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 57(7), 644-648.
- Batmaz, A. U., Mutasim, A. K., & Stuerzlinger, W. (2020, March). Precision vs. power grip: A comparison of pen grip styles for selection in virtual reality. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 23-28). IEEE.
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: how much immersion is enough?. *Computer*, 40(7), 36-43.
- Bryson, S. (1996). Virtual reality in scientific visualization. *Communications of the ACM*, 39(5), 62-71.
- Coogan, C. G., & He, B. (2018). Brain-computer interface control in a virtual reality environment and applications for the internet of things. *IEEE Access*, 6, 10840-10849.
- Cook, A. M., & Polgar, J. M. (2014). Accessing Mainstream Information and Communication Technologies. Assistive technologies-e-book: principles and practice. *Elsevier Health Sciences*, 176.
- DPI. (2021). Digital and Physical Immersion in Radiology and Surgery. Saatavilla elektronisesti <https://www.tuni.fi/en/research/digital-and-physical-immersion-radiology-and-surgery-dpi#:~:text=nterpreting%20three%2Ddimensional%20body%20tissues,with%20AR%20and%20VR%20technologies>. Haettu 8.2.2021.
- Duodemic. (2020). Kartiokeilatietokonetomografia ja sen kliniset sovellukset. Saatavilla elektronisesti <https://www.duodecimlehti.fi/duo10979>. Haettu 15.6.2020.
- Esmaeili, S., Benda, B., & Ragan, E. D. (2020, March). Detection of scaled hand interactions in virtual reality: The effects of motion direction and task complexity. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 453-462). IEEE.

- Ferracani, A., Faustino, M., Giannini, G. X., Landucci, L., & Del Bimbo, A. (2017, October). Natural experiences in museums through virtual reality and voice commands. In *Proceedings of the 25th ACM international conference on Multimedia* (pp. 1233-1234).
- Fritschi, M., Esen, H., Buss, M., & Ernst, M. O. (2008). Multi-modal VR systems. In *The Sense of Touch and its Rendering* (pp. 179-206). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hanken, H., Schablowsky, C., Smeets, R., Heiland, M., Sehner, S., Riecke, B., ... & Al-Dam, A. (2015). Virtual planning of complex head and neck reconstruction results in satisfactory match between real outcomes and virtual models. *Clinical Oral Investigations*, 19(3), 647-656.
- Hannema, D. (2001). Interaction in virtual reality. *Interaction in Virtual Reality*.
- Hepperle, D., Weiß, Y., Siess, A., & Wölfel, M. (2019). 2D, 3D or speech? A case study on which user interface is preferable for what kind of object interaction in immersive virtual reality. *Computers & Graphics*, 82, 321-331.
- Hodez, C., Griffaton-Taillandier, C., & Bensimon, I. (2011). Cone-beam imaging: applications in ENT. *European annals of otorhinolaryngology, head and neck diseases*, 128(2), 65-78.
- Huang, Y. J., Liu, K. Y., Lee, S. S., & Yeh, I. C. (2021). Evaluation of a Hybrid of Hand Gesture and Controller Inputs in Virtual Reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(2), 169-180.
- Jauhainen, J. (2003). Röntgenkuvaus, digitaalinen kuvaus ja tietokonetomografia. *OAMK: Tekniikan yksikkö*. Saatavilla elektronisesti <http://www.oamk.fi/~jjauhiai/opetus/mittalaitteet/mittalaitteet-v11.pdf>. Haettu 9.3.2021.
- Johnson, P. W., Lehman, S. L., & Rempel, D. M. (1996, November). Measuring muscle fatigue during computer mouse use. In *Proceedings of 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (Vol. 4, pp. 1454-1455). IEEE.
- Kaiser, E., Olwal, A., McGee, D., Benko, H., Corradini, A., Li, X., ... & Feiner, S. (2003, November). Mutual disambiguation of 3D multimodal interaction in augmented and virtual reality. In *Proceedings of the 5th international conference on Multimodal interfaces* (pp. 12-19).
- Khamis, M., Oechsner, C., Alt, F., & Bulling, A. (2018, May). VRpursuits: interaction in virtual reality using smooth pursuit eye movements. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 1-8).
- Khan, R., Azam, F., Ahmed, S., Anwar, W., Chughtai, R., & Farid, A. (2020, November). Comparative Analysis of Interaction Techniques in Virtual Reality. In *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)*, 1-6. IEEE.

- Lee, J., Sinclair, M., Gonzalez-Franco, M., Ofek, E., & Holz, C. (2019, May). TORC: A virtual reality controller for in-hand high-dexterity finger interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-13).
- Lindeman, R. W., Page, R., Yanagida, Y., & Sibert, J. L. (2004, November). Towards full-body haptic feedback: the design and deployment of a spatialized vibrotactile feedback system. In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology* (pp. 146-149).
- Nigay, L., & Coutaz, J. (1993, May). A design space for multimodal systems: concurrent processing and data fusion. In *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 conference on Human factors in computing systems* (pp. 172-178).
- Nukarinen, T., Kangas, J., Rantala, J., Koskinen, O., & Raisamo, R. (2018, November). Evaluating ray casting and two gaze-based pointing techniques for object selection in virtual reality. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1-2).
- Oculus. (2021). Oculus Rift S. Saatavilla elektronisesti <https://www.oculus.com/rift-s/>. Haettu 12.1.2021.
- Oral. (2020). Kartiokeilatietokonetomografia kuvaus (KKTT). Saatavilla elektronisesti <https://www.oral.fi/palvelut/kartiokeilatietokonetomografia-kuvaus-kktt/#main>. Haettu 26.6.2020.
- Pauwels, R. (2020). History of dental radiography: Evolution of 2D and 3D imaging modalities. *Med. Phys. Int*, 8, 235-277.
- Pfeuffer, K., Mayer, B., Mardanbegi, D., & Gellersen, H. (2017, October). Gaze+ pinch interaction in virtual reality. In *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction* (pp. 99-108).
- Pietroszek, K., & Lee, N. (2019). Virtual Hand Metaphor in Virtual Reality.
- Planmeca. (2021a). Planmeca ProMax 3D s. Saatavilla elektronisesti <https://www.planmeca.com/fi/kuvantaminen/kktt-kuvaus/planmeca-promax-3d-s/>. Haettu 8.4.2021.
- Planmeca. (2021b). Planmeca ProX intraoraaliröntgenlaite. Saatavilla elektronisesti <https://www.planmeca.com/fi/kuvantaminen/intraoraalikuvantaminen/intraoraalirontgenlaite/>. Haettu 9.3.2021.
- Potter, L. E., Araullo, J., & Carter, L. (2013, November). The leap motion controller: a view on sign language. In *Proceedings of the 25th Australian computer-human interaction conference: augmentation, application, innovation, collaboration* (pp. 175-178).
- Pukkila, O. (2004). Säteily- ja ydinturvallisuus 3: Säteilyn käyttö. *Säteilyturvakeskus, Karisto Oy: n kirjapaino, Hämeenlinna*.

- Reymus, M., Liebermann, A., & Diegritz, C. (2020). Virtual reality: an effective tool for teaching root canal anatomy to undergraduate dental students—a preliminary study. *International Endodontic Journal*, 53(11), 1581-1587.
- Samudravijaya, K. (2004). Automatic Speech Recognition. *Tata Institute of Fundamental Research Archives*.
- Shetty, V., Suresh, L. R., & Hegde, A. M. (2019). Effect of virtual reality distraction on pain and anxiety during dental treatment in 5 to 8 year old children. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 43(2), 97-102.
- Shokri, A., Ramezani, K., Vahdatinia, F., Karkazis, E., & Tayebi, L. (2020). 3D Imaging in Dentistry and Oral Tissue Engineering. *Applications of Biomedical Engineering in Dentistry*, 43-87.
- Sidenmark, L., & Gellersen, H. (2019). Eye, head and torso coordination during gaze shifts in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 27(1), 1-40.
- Smith, J. W. (2015). Immersive virtual environment technology to supplement environmental perception, preference and behavior research: a review with applications. *International journal of environmental research and public health*, 12(9), 11486-11505.
- Stuk. (2015). Säteily terveydenhuollossa. Saatavilla elektronisesti <https://www.stuk.fi/aiheet/sateily-terveydenhuollossa/hammasrontgen>. Haettu 24.6.2020.
- Suresh, A., Gaba, D., Bhambri, S., & Laha, D. (2017, December). Intelligent multi-fingered dexterous hand using virtual reality (VR) and robot operating system (ROS). In *International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications* (pp. 459-474). Springer, Cham.
- Säteilyturvakeskus. (2019). Radiologisten tutkimusten määrät Suomessa 2018 -aineisto. Saatavilla elektronisesti https://www.stuk.fi/documents/12547/10396509/radiologiset_tutkimus_ja_toimenpidedem%C3%A4%C3%A4r%C3%A4t_2018.xlsx/f0973da3-0fb6-c816-c30b-8264dc5efadc?t=1585897971567. Haettu 12.1.2021.
- Tays. (2021). Purennan korjaus oikomishoidolla ja leuansiirtoleikkauksella. Saatavilla elektronisesti [https://www.tays.fi/fi-FI/Ohjeet/Potilasohjeet/Hammas_suu_ja_leukasairaudet/Purennan_korjaus_oikomishoidolla_ja_leua\(46399\)](https://www.tays.fi/fi-FI/Ohjeet/Potilasohjeet/Hammas_suu_ja_leukasairaudet/Purennan_korjaus_oikomishoidolla_ja_leua(46399)). Haettu 5.2.2021.
- Tilastokeskus. (2021a). Tilastojen ABC 4.4 Keskiluvut. Tilastokoulu. Saatavilla elektronisesti https://tilastokoulu.stat.fi/verkko-koulu_v2.xml?course_id=tkoulu_tlkt&lesson_id=4&subject_id=4&page_type=sialto. Haettu 15.3.2021.

- Tilastokeskus. (2021b). Tilastollinen merkitsevyys. Saatavilla elektronisesti https://www.stat.fi/meta/kas/til_merkitsevyy.html. Haettu 15.3.2021.
- Ultraleap. (2021). Leap Motion Controller. Saatavilla elektronisesti <https://www.ultraleap.com/product/leap-motion-controller/#whatsincluded>. Haettu 9.2.2021.
- Unity Technologies. (2020). What is XR glossary. Saatavilla elektronisesti <https://unity3d.com/what-is-xr-glossary>. Haettu 1.6.2020.
- Valve Software. (2021). Valve Index ohjaimet. Saatavilla elektronisesti <https://www.valvesoftware.com/fi/index/controllers>. Haettu 12.1.2021.
- Verweij, J. P., Moin, D. A., Wismeijer, D., & van Merkesteyn, J. R. (2017). Replacing heavily damaged teeth by third molar autotransplantation with the use of cone-beam computed tomography and rapid prototyping. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 75(9), 1809-1816.
- Weichert, F., Bachmann, D., Rudak, B., & Fisseler, D. (2013). Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller. *Sensors*, 13(5), 6380-6393.
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., Heetderks, W. J., McFarland, D. J., Peckham, P. H., Schalk, G., ... & Vaughan, T. M. (2000). Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. *IEEE transactions on rehabilitation engineering*, 8(2), 164-173.
- Yong-Tian, W. A. N. G. (2019). On the launch of Virtual Reality & Intelligent Hardware. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(1), 1.

LIITE 1

Taustatietolomake

Age: _____

Gender: Female Male Other

Occupation:

Student

Bachelor Master PhD

Teacher / lecturer / professor

Full time employee

Other: _____

What is your experience level with dentistry? (0=none, 5= high)

0 1 2 3 4 5

What is your experience level with virtual reality? (0=none, 5= high)

0 1 2 3 4 5

What different interaction methods have you used with virtual reality before?

Hands

Controllers

Pen

Eyes

Speech

None

Other: _____

LIITE 2

Kyselylomake vuorovaikutusmenetelmistä

Interaction method: mouse / hands / controller & pen

Evaluate the following statements	Strongly disagree				Strongly agree
Would you think to use this method daily?	1	2	3	4	5
It was natural to perform the given tasks with this interaction method.	1	2	3	4	5
It was easy to handle the 3D objects with this interaction method.	1	2	3	4	5
The interaction method was accurate.	1	2	3	4	5
The marking method was natural.	1	2	3	4	5
It was easy to make the marking with this marking method.	1	2	3	4	5
The marking method was accurate.	1	2	3	4	5
Your hands are NOT tired.	1	2	3	4	5

What was positive and negative on this interaction method? Other comments related to this interaction method:

Rank the interaction methods from the one you liked the most to the worst: (1 = the best, 3 = the worst)

_____ mouse _____ hands _____ controller & pen

Other comments: