

**Oscar Calderón**

# **Visuo-haptinen virtuaalitodellisuus kirurgin koulutuksessa**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

16. joulukuuta 2020

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

**Tekijä:** Oscar Calderón

**Yhteystiedot:** oscar.e.calderon@student.jyu.fi

**Ohjaaja:** Tytti Saksa

**Työn nimi:** Visuo-haptinen virtuaalitodellisuus kirurgin koulutuksessa

**Title in English:** Visuo-haptic virtual reality in surgeon training

**Työ:** Kandidaatintutkielma

**Opintosuunta:** Tietotekniikka

**Sivumäärä:** 21+0

**Tiivistelmä:** Kirurgiopiskelijoille on tehty erilaisia simulaattoreita, joilla he voivat harjoitella vaarantamatta potilaita. Tässä tutkielmassa katsastetaan kirjallisuutta, jossa on tutkittu visuo-haptisia virtuaalitodellisuussimulaattoreita kirurgin koulutuksessa. Näissä pyritään luomaan oppimisen tueksi mahdollisimman paljon oikeaa leikkaustilannetta vastaava koulutusympäristö. Tutkielmassa käydään läpi, mistä osista tällaiset simulaattorit rakentuvat. Tutkielmassa käsitellään myös visuo-haptisten virtuaalisimulaattoreiden hyötyjä.

**Avainsanat:** haptiikka, virtuaalitodellisuus, kirurgikoulutus

**Abstract:** There are many simulators that have been made for surgeons that can be used for training without endangering patients. Literature concerning visuo-haptic virtual reality simulators for surgeon training is reviewed in this work. These simulators aim to provide highly realistic educational environment for learning to perform surgeries. The general architecture of such simulators is presented. Benefits of visuo-haptic virtual reality simulators are reviewed.

**Keywords:** haptics, virtual reality, surgical training

## Termiluettelo

Endodontia	Endodontisessa kirurgiassa operoidaan hammasta, esimerkiksi poraamalla.
Laparoskopia	Laparoskopisissa leikkauksissa tehdään vatsaonteloon muutama pieni reikä, joista yhdestä laitetaan kamera sisään. Leikkauksella voi esimerkiksi poistaa sappirakon tai kasvaimen maksasta.
Marching cubes -algoritmi	Marching cubes -algoritmi on menetelmä, jolla voidaan muodostaa näytölle renderöitävä polygoniverkko sisäisesti kolmiulotteisesta oliosta. (Lorenzen ja Cline 1987)
Ortopedia	Ortopedinen kirurgia liittyy luiden ja muiden "tuki- ja liikuntaelinten"(Terveyskirjasto 2020) leikkauksiin.

# Sisällys

1	JOHDANTO .....	1
2	SIMULAATTOREIDEN VISUAALISUUS .....	3
	2.1 Näyttölaitteisto ja potilaskohtainen data .....	3
	2.2 Volumetriset mallit .....	4
	2.3 Näytönohjaimen hyödyntäminen .....	5
3	HAPTIikka .....	6
	3.1 Haptiikkalaitteisto .....	6
	3.2 Haptinen renderöinti .....	7
4	VISUO-HAPTISTEN SIMULAATTOREIDEN HYÖDYT .....	9
5	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	11
	LÄHTEET .....	13

# 1 Johdanto

Tässä tutkielmassa tutkitaan sitä, miten visuo-haptinen virtuaalitodellisuus on kirurgin apuna tämän uralla. Selkein sovelluskohde on kirurgien koulutus, mutta virtuaalitodellisuus tarjoaa mahdollisuuksia jo kouluttautuneille kirurgeille. Tutkielma toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Virtuaalitodellisuus on nykyään monille tuttu viihde-elektroniikasta. Virtuaalitodellisuutta on jo pitkään hyödynnetty erilaisissa simulaatioissa. Haptiikkaa on liitetty virtuaaliympäristöihin jo vuosikymmeniä. Massie ja Salisbury (1994) esittelevät kehittämänsä haptista rajapintaa, joiden välityksellä ihminen voi tunnustella virtuaalisten olioiden pintoja. Haptiikalla tarkoitetaan tässä tutkielmassa mitä tahansa kosketukseen tai tuntoaistiin liittyvää. Tässä työssä katsastetaan järjestelmiä, jotka tarjoavat käyttäjälleen haptista vastetta (haptic feedback), eli jonkinlaista tuntoaistiin liittyvää palautetta. Kirjallisuudessa käytetään monesti myös termiä visuo-haptinen vaste, koska haptinen vaste yhdistetään virtuaaliseen kuvaan. Englanninkielisiä termejä force feedback ja tactile feedback käytetään kirjallisuudessa, eikä tässä työssä niitä erotella termistä haptinen vaste.

Kirurgiassa todentuntuinen virtuaalimaailma on tavoiteltava monesta syystä. Perinteisesti kirurgit ovat oppineet taitonsa ensin seuraamalla leikkausta sivusta (Alaraj ym. 2013). Kuitenkin Stone ja Bernstein (2007) huomasivat tutkimuksessaan kirurgin tekemien teknisten virheiden olevan suurin yksittäinen virhelähde. Monet näistä virheistä voivat olla vältettävissä (Alaraj ym. 2013). Vickers ym. (2009) havaitsivat, että laparoskopisissa leikkauksissa 750 suoritettua todellisen toimenpiteen jälkeen kirurgin tekivät huomattavasti vähemmän virheitä kuin aloittaessaan.

Akhtar ym. 2014 tarjoavat erilaisia simulaatioita ratkaisuksi taitojen tekniseen oppimiseen niin sanotun mestari–oppipoika -mallin tilalle. Simulaatiot, joista vain osa on virtuaalisia, mahdollistavat virheiden tekemisen turvallisessa ympäristössä. Akhtar ym. 2014 nostavat virtuaalitodellisuuteen pohjautuvat simulaatiot erityisen hyviksi kirurgien koulutuksessa, koska ne vievät suhteellisen vähän tilaa, niitä voi käyttää pidempään kuin synteettisiä kehoja ja niiden toistuva käyttö on helpompaa kuin esimerkiksi eläinten. Bernardo (2017) pitää hap-

tista rajapintaa elintärkeänä virtuaalisimulaattoreissa, koska tuntoaisti antaa ihmiselle niin monipuolista tietoa kosketettavasta esineestä. Ruikar, Hegadi ja Santosh (2018) puhuvat uudemmassa tutkimuksessaan paradigman muutoksesta viitaten virtuaalisiin simulaattoreihin ortopedisessä koulutuksessa.

Luvuissa kaksi ja kolme käydään läpi simulaattoreiden tekniikkaa. Luvussa kaksi käsitellään näyttölaitteiden ja grafiikan toteutusta, luvussa kolme puolestaan haptiikkaan liittyvää teknologiaa. Luvussa neljä käydään läpi visuo-haptisten simulaattoreiden hyötyjä. Luvussa viisi esitetään johtopäätökset kaikesta tutkitusta.

## 2 Simulaattoreiden visuaalisuus

Tässä luvussa käsitellään visuo-haptisten simulaattoreiden visuaalista puolta eli sitä, mitä ja miten käyttäjä näkee simulaation aikana. Ensimmäisessä osiossa tarkastellaan näyttölaitteistoja. Toisessa osiossa käydään läpi eri toteutuksia kudoksen kolmiulotteiseen toteutukseen. Viimeisessä osiossa keskustellaan näytönohjaimen hyödyntämisestä simulaattoreissa.

### 2.1 Näyttölaitteisto ja potilaskohtainen data

Kirurgisia toimenpiteitä suoritetaan eri näkökulmista. Joissain leikkauksissa katsotaan suoraan sitä, mitä tehdään. Tällaisia leikkauksia simuloitaessa voidaan hyödyntää stereoskooppista näyttölaitetta, kuten virtuaalilaseja. Lin ym. (2014) käyttivät luunporaussimulaattorissaan 120 hertsin näytön ja 3D-lasien yhdistelmää. Toisissa toimenpiteissä, kuten laparoskopisissa leikkauksissa, tavanomainen tietokoneen näyttö on riittävä, koska samanlaista käytetään oikeassakin leikkaussalissa (Gaudina ym. 2013). Näitä on esimerkiksi leikkaukset, joissa potilaan sisään laitetaan kamera, jonka avulla kirurgi leikkaa. Kaupallisessa aivokirurgiasimulaattorissa Neurotouchissa visuaalisena rajapintana käytettiin kiikarin näköisiä laitteita (Winkler-Schwartz ym. 2016). Tämä vastaa todellista aivoleikkaustilannetta ja tarjoaa stereoskooppisen näkymän.

Ruikar, Hegadi ja Santosh (2018) ja Mastmeyer, Fortmeier ja Handels (2016) pitävät potilaskohtaisen datan käyttöä ensiarvoisen tärkeänä virtuaalisimulaattoreissa. Potilaskohtaisen datan muuttaminen simulaattorikäyttöön on kuitenkin aikaa vievää työtä (Mastmeyer, Fortmeier ja Handels 2016). Mastmeyer, Fortmeier ja Handels (2016) loivat menetelmän, jossa simulaattorin tarvitsema osa potilaan yksilöllisestä torsosta mallinnetaan neljän tunnin työn tuloksena aikaisemman 40–70 tunnin työn sijaan. Heillä oli tietokanta geneerisistä potilaista, joista he valitsivat yksilön, joka vastasi eniten mallinnettavaa uutta potilasta. Valmisteluvaiheessa tietokannasta valitun potilaan ja uuden mallinnettavan potilaan kuvadatojen vastaavuus määritetään. Tämä nopeuttaa mallinnusvaihetta, koska mahdollisimman suuri osa mallista kopioidaan tietokannasta valitulla potilaalla.

## 2.2 Volumetriset mallit

Kirurgien haptisissa sovelluksissa pitää mallintaa tuhoutuvaa kudosta. Siihen ei riitä, että mallinnetaan vain olioiden pinnat vaan tarvitaan volumetrisia malleja (engl. volumetric model) (Bro-Nielsen 1998). Ruudun oliot tulee mallintaa fysiikka-algoritmeilla, jotta oliot voivat vaikuttaa toisiinsa reaali maailman mukaisesti. Tämä on laskennallisesti raskasta. (Escobar-Castillejos ym. 2016) Grafiikan mallintamiseen on sovellettu erilaisia sisäisiä toteutuksia. Ruikar, Hegadi ja Santosh (2018) raportoivat kirjallisuuskatsauksessaan simulaattoreista ortopediassa, että vokseleiden ja marching cube -algoritmin yhdistelmä oli yleisin tapa mallintaa tuhoutuvaa kudosta. Esimerkiksi Lin ym. (2014) mallinsivat näin sahattavaa luuta. Grafiikan sisäiseen toteutukseen liittyy läheisesti simulaattoreiden tasapainottaminen aitouden ja sujuvuuden välillä, mitä käsitellään enemmän osiossa 3.2.

Marshall, Payandeh ja Dill 2006 mallinsivat neulalla pistettäessä ihoa jousilla yhteydessä olevilla massapisteillä. Ihon tunnustelussa sitä mallinnettiin tetraedreillä. Massajousimallit ovat erittäin helppoja implementoida ja laskennallisesti melko keveitä, mutta ne eivät ole kovin tarkkoja kuvaamaan kudosta (Bro-Nielsen 1998).

Elementtimentelmä (eng. finite element method) on yksi tapa mallintaa elastista tuhoutuvaa kudosta. Elementtimallissa verkko ja sen solmut kuvaavat olion geometriaa ja interpolointifunktiolla arvioidaan todellista deformaatiokenttää (Bro-Nielsen 1998). Elementtietelmä on monipuolinen, koska verkon topologia ja geometriset parametrit määritellään sovelluskohteen mukaan. Esimerkiksi sen elastisuus voi olla nopeuden vuoksi lineaarista tai tarkkuuden vuoksi halutulla tavalla epälineaarista. (Bro-Nielsen 1998).

Lin ym. (2014) mallinsivat sahattavaa luuta vokseleilla hyödyntäen marching cube algoritmia. He joutuivat kuitenkin tekemään kompromissin laskennan vaatavuuden ja realistisuuden välillä. Vokselit tuhoutuivat, kun niihin kohdistuva voima ylitti kynnsarvon. Vokselit ovat tavallinen tapa myös hampaiden mallintamiseen (Yin ym. 2018; Wang ym. 2015).



## 2.3 Näytönohjaimen hyödyntäminen

Nykyaikaiset näytönohjaimet ovat nopeita laskijoita, mutta vain harvassa simulaattorissa niiden hyödyntäminen kävi ilmi. Tässä alaluvussa keskitytään tutkimuksiin, joissa hyödynnettiin GPU-laskentaa.

Courtecuisse ym. (2010) keskittyivät tutkimuksessaan kehittämään rinnakkaistuvan algoritmin, jolla verkon solmuihin kohdistuvat voimat voidaan laskea näytönohjaimessa. Algoritmissa lasketaan ensin vaikuttavat voimat kullekin solmulle. Solmut klusteroidaan sitten ali-verkoiksi, joihin vaikuttavat voimat lasketaan vastaavasti. 41 000 solmun verkolla testattuna GeForce GTX 280 -näytönohjain ylläpiti 46Hz virkistystaajuutta näytössä, kun taas neliytimisellä 3Ghz prosessorilla laskettuna näytön virkistystaajuus oli yhden ja kahden hertsin välillä. Suora vertailu ei tietenkään ole kovin järkevä, koska simulaation algoritmi oli suunniteltu hyvin rinnastuvaksi. Courtecuisse ym. (2010) pystyivät näytönohjaimen laskukapasiteettia hyödyntäen myös tarkempaan interaktioon kudoksen ja kirurgin välineiden välillä. Heidän simulaattorissaan kirurgin työkalulla saattoi olla monta kosketuskohtaa kudokseen, kun taas henkilöiden Mastmeyer, Fortmeier ja Handels (2016) uudemmassa simulaattorissa jouduttiin laskemaan työkalun kosketus vain yhdessä pisteessä (ks. osio 3.2). Courtecuisse ym. (2010) pystyivät aidomman kudoksen tuhoutumisen lisäksi myös ottamaan huomion liikekitkan kirurgisen työkalun ja ympäröivän kudoksen välillä.

Altomonte ym. (2008) tekivät simulaattorin, jossa painettiin ja venytettiin pehmytkudosta kirurgisilla pihdeillä. Pehmeä kudokseksi oli mallinnettu massajousilla ja luut vokseleilla. 7750 massapisteeillä ja 48254 jousella voimia pystyttiin laskemaan tuhat kertaa sekunnissa, mikä riittää realistisen haptisen vasteen ylläpitämiseen. Pan ym. (2020) huomauttavat, että laajan rinnakkaislaskennan hyödyntäminen vaatii keinoja välttää moniajoristiriitoja (engl. multithreading conflicts), jotta esimerkiksi verkon vierekkäiset solmut eivät mene päällekkäin ja aiheuta virheitä.

### 3 Haptiikka

Tässä luvussa käsitellään visuo-haptisten simulaattoreiden haptista puolta. Ensin tarkastellaan jälleen laitteistoa, jolla haptinen rajapinta luodaan. Tämän jälkeen käydään läpi miten haptista vastetta renderöidään ohjaimen. Kartoitetussa kirjallisuudessa haptista vastetta on tarjottu vain käsiin, yhteen tai molempiin.

Salisbury, Conti ja Barbagli (2004) määrittelevät haptisen renderöinnin prosessiksi, jossa käyttäjälle kohdistetaan halutut ärsykkeet välittämään tietoa virtuaalisesta haptisesta oliosta. Sen virkistystaajuus tarkoittaa kuinka monta kertaa sekunnissa vastetta päivitetään, eli välillisesti kuinka usein käyttäjään kohdistetut voimat voivat muuttua.

Haptisen teknologian on tarkoitus antaa "hands on"-kokemusta. Ruikar, Hegadi ja Santosh (2018) mukaan haptisen vasteen tarjoaminen on pakollista, jotta simulaattorin avulla voidaan kehittää käsi-silmä -koordinaatiota ja kirurgisten välineiden käyttöä turvallisessa ympäristössä. He pitävät visuo-haptisia simulaattoreita parhaimpana tapana oppia psyko-moottorisia taitoja. Onnistunut leikkaaminen vaatii juuri oikeaa voimankäyttöä, minkä oppiminen vaatii käsituntumaa (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018).

#### 3.1 Haptiikkalaitteisto

Haptisena rajapintana simulaattoreissa on stylus, joka on yleensä kiinnitetty nivelillä moottoreihin. Styluksia voi olla myös yksi kummassakin kädessä (Winkler-Schwartz ym. 2016). Ullrich ja Kuhlen (2012) kehittivät kehon tunnustelua varten rajapinnaksi styluksen tilalle pienen kosketustason, johon käyttäjä kiinnitti etu- ja keskisormensa.

Haptisilla laitteilla on monia ominaisuuksia. Vapausasteita, eli moneenko suuntaan stylusta voi liikuttaa, on yleensä kolme tai kuusi (Escobar-Castillejos ym. 2016). Kolme ensimmäistä vastaavat liikettä karteesisessä koordinaatistossa. Kolme seuraavaa ovat kierto styluksen napojen suhteen vasemmalle ja oikealle, ylös ja alas ja sivuttainen rullaus. Esimerkiksi Force Dimensionin Omega 6 (Force Dimension 2020) -laitteen liikkumisen vapausaste on kuusi, mutta haptista vastetta tarjotaan annettaan vain kolmessa vapausasteessa. Toinen ominaisuus

on jäykkyys, jonka voimakkuudella koetaan erilaisiin pintoihin osuminen (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018). Halvemmissa laitteissa vasteen raja voi tulla vastaan, jos painetaan liian kovaa. Käyttäjä ei välttämättä ymmärrä tätä ja jatkaa suoritustaan luullen löytäneensä pehmeämmän kohdan. (Ullrich ja Kuhlen 2012; Wang ym. 2015). Resoluutio, eli kuinka tarkka haptinen vaste on liikuttua matkaa kohden, on nykyaikaisissa laitteissa alle millimetrin luokkaa (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018). Työtilaa, eli kuinka paljon haptista ohjainta voi liikuttaa eri suuntiin, tulee olla riittävästi. (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018).

Toteutuksesta riippuen haptisessa laitteistossa voi olla erilaisia rajoitteita. Laitteilla on yleensä oma inertiansa, mikä antaa virheellisiä viestejä käyttäjälle, jos laitetta liikutetaan liian nopeasti (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018). Niissä on vastaavasti myös omaa sisäistä kitkaa, mikä voi väsyttää käyttäjän pitkäaikaisessa käytössä (Escobar-Castillejos ym. 2016). Hammasporatessa kirurgi voi käyttää potilaan muita hampaita tukipisteinä kätensä vakauttamiseen ja lepuuttamiseen. Tätä ei voi toteuttaa, jos haptisena rajapintana on stylus. (Wang ym. 2015) Tong ym. (2018) kehittivät tutkimuksessaan simulaattorin, joka tarjoaa haptista vastetta ilman kitkaa tai inertiaa. Haptisena rajapintana heidän simulaattorissaan on sähkömagneettikentässä levitoiva ohjauskynä. Mekaaniset laitteet päivittävät itse sijaintiaan tietokoneelle. Tong ym. (2018) seurasivat ohjauskynän sijaintia kahdella kameralla, jotka seurasivat ohjauskynän punaisia merkkiviivoja.

## **3.2 Haptinen renderöinti**

Haptisen renderöinnin tarkoitus on antaa käyttäjälle mahdollisuus koskea, tuntea ja käsitellä virtuaalisia olioita haptisen rajapinnan kautta (Basdogan ja Srinivasan 2002). Kuten osiossa 2.2 sanottiin, olioiden mallintaminen on raskasta, koska esimerkiksi kudoksen ja kirurgisten työkalujen pitää voida vaikuttaa toisiinsa. Realistisen tuntuman tarjoaminen vaatii tarkkaa ja nopeaa törmäyksen havaitsemista (Lin ym. 2014). Tietokonegrafiikassa tavoitellaan 60–144Hz ruudunpäivitystaajuutta. Haptista vastetta päivitetään ideaalitulanteessa vähintään tuhat kertaa sekunnissa (McNeely, Puterbaugh ja Troy 2005; Li ym. 2020; Laehyun Kim ym. 2002; Marshall, Payandeh ja Dill 2006). Esimerkiksi Omega 6 -laitteen (Force Dimension 2020) päivitystaajuus on enimmillään 4 kilohertsiä.

Cecil ym. (2013) sisällyttivät virtuaaliympäristöönsä etätyöskentely-yhteyden. Päivitystiheyden ja -tarpeen vuoksi pienikin viive (10ms+) on tuntuva haptisessa vasteessa. Cecil ym. (2013) ratkaisivat tämän siten, että ainoastaan operoivan henkilön pääte laskee paikallisesti haptisen vasteen. Käyttäjän syötteet lähetetään pilven yli myös muille laitteille, jotta simulaation seuraajat näkisivät, miten simulaatio etenee ja päätteet olisivat viiveen jälkeen samassa vaiheessa. Näin harjoittelevaa kirurgia voi vaihtaa kesken simulaation opettajan ja opiskelijoiden välillä.

Yleistettävän ja tarkan haptisen vasteen luominen on yhä ongelmallista (Bernardo 2017). Tämän vuoksi joudutaan tasapainoilemaan simulaattorin tarkkuuden ja nopeuden välillä (Wang ym. 2015). Wang ym. (2015) priorisoivat sitä, että pora voi osua hampaaseen monessa pisteessä kuten tosielämässä. Heidän piti kuitenkin valita suhteellisen yksinkertainen mallinnus hampaalle, jotta he pystyivät ylläpitämään yhden kilohertsin haptista renderöintitaajuutta.

Törmäyksen käsittely ja kudoksen tuhoutumislogiikka ovat avainasemassa haptisen tuntemuksen tarjoamisessa (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018). Monimutkaisen törmäyksenkäsitteilyn, reaaliaikaisen kudoksen tuhoutumisen ja realistisen haptisen vasteen tarjoaminen vaatii tehokasta rinnakkaislaskentaa näytönohjaimessa (Courtecuisse ym. 2010). Monesti haptinen laskenta kuitenkin suoritetaan prosessorissa. Tosin esimerkiksi Winkler-Schwartz ym. (2016) tutkivat vain kaupallisen simulaattorin hyödyllisyyttä, joten simulaattorin sisäisestä toteutuksesta ei puhuttu. Mastmeyer, Fortmeier ja Handels (2016) saavuttivat yhdessä suorittimen ytimessä laskettavalla siirtofunktiolla 2000 hertsin haptisen renderöintitaajuuden. Heidän simulaattorinsa fysiikan laskenta oli kuitenkin verrattain kevyttä. Simulaattorissa harjoiteltiin teräväkärkisen putken viemistä kudosterrosten läpi oikeaan kohtaan maksaa, josta sitten imettiin haluttua kohdetta. Putken ja kudoksen väliset vaikuttavat voimat laskettiin ainoastaan yhdessä pisteessä putken kärjessä, jotta simulaatio olisi sujuva (Mastmeyer, Fortmeier ja Handels 2016).

## 4 Visuo-haptisten simulaattoreiden hyödyt

Aiemmissä luvussa on käsitelty visuo-haptisten simulaattoreiden teknistä toteutusta. Tässä luvussa käydään läpi motivaatioita simulaattoreiden kehittämiseen. Simulaattoriharjoittelussa ei vaaranneta potilaita kokemattomina (Ullrich ja Kuhlen 2012). Se on eettisempää ja mahdollisesti anatomisesti tarkempaa kuin eläimillä harjoittelu (Ullrich ja Kuhlen 2012). Niissä voi tehdä virheitä ja virheistä voi oppia turvallisesti (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018; Lin ym. 2014). Yllä olevat hyödyt pätevät kaikkeen simulaattorioppimiseen, kuten fyysisiin mallinukkeihin. Tässä luvussa keskitytään nimenomaan visuo-haptisten simulaattoreiden tuomaan hyötyyn. Morris ym. (2007) havaitsivat haptisen vasteen lisäämisen visuaaliseen simulaatioon parantavan oppimistuloksia merkitsevästi.

Monet visuo-haptisten simulaattoreiden hyödyistä liittyy arviointiin. Virtuaalisissa simulaattoreissa voidaan kerätä paljon dataa, kuten poistetun terveen ja sairaan kudoksen määrää tai suoritukseen kulunutta aikaa (Wang ym. 2015; Winkler-Schwartz ym. 2016). Näin kirurgiopiskelijoiden harjoitussuorituksia voidaan arvioida objektiivisesti (Winkler-Schwartz ym. 2016). Suoritusta voidaan jopa arvioida operaation eri osien välillä (Yin ym. 2018). Simulaatiot voivat antaa automaattisen pisteytyksen, jolloin ei välttämättä edes tarvita ihmistä arvioimaan (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018; Bernardo 2017). Jos laitteisto on liitetty verkkoon, niin arvioijan ei tarvitse edes olla paikalla (Cecil ym. 2013). Operaatiot voidaan tallentaa, jolloin arvioija voi tarkastaa sen itselleen sopivana aikana (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018). Verkkolaitteisto auttaa toisaalta myös ryhmän etäopetuksessa, jolloin opettaja voi näyttää leikkauksen kulun. Virtuaalisen leikkauksen etäosallistujan on mahdollista myös osallistua joihinkin leikkauksen vaiheisiin (Cecil ym. 2013).

Esimerkkinä virtuaalisimulaattoreiden tarjoamasta objektiivista arvioinnista on henkilöiden Yin ym. (2018) tutkimus, jossa he tutkivat automaattista pisteytystä endodonttisessa kirurgiassa. Heidän mukaansa hammasporauksen arvioinnissa arvioijat arvostelevat suorituksen mukaan, miltä tulos ulkoapäin näyttää. Näin jotkin hampaan sisällä tehdyt virheet eivät tule arvioiduiksi. He kehittivät menetelmän hammausporauksen objektiiviseen arviointiin, joka perustuu pisteytettyihin vokseleihin. Vokseleiden pistemäärät painotettiin epälineaarisesti sen mukaan kuinka tärkeää kyseisen vokselin jättäminen tai poistaminen oli. Näin hie-

notarkkaa arviointia ei ole mahdollista antaa ihmissilmällä.

Objektiivisen arvioinnin lisäksi virtuaalisimulaattoreilla voidaan saavuttaa muitakin hyötyjä. Opiskelijoiden on mahdollista suorittaa useita toistoharjoituksia virtuaalimaailmassa (Escobar-Castillejos ym. 2016; Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018; Lin ym. 2014). Tämän vuoksi jotkin taidot voidaan oppia huomattavan nopeasti virtuaalisilla simulaattoreilla (Cecil ym. 2013). Virtuaaliympäristössä voidaan myös simuloida ja harjoitella oikeissa leikkauksissa harvinaisia tapahtumia ja virhetilanteita kuten verenvuotoja (Mazur ym. 2018). Ylipäättään skenaariot ovat joustavammin muokattavissa verrattuna fyysisiin harjoitusnukkeihin (Ullrich ja Kuhlen 2012). Virtuaaliset simulaattorit ovat ainoita simulaattoreita, joita voi muokata potilaskohtaisilla tiedoilla. (Bernardo 2017; Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018).

Laitteiden hankintahinnan jälkeen virtuaalisimulaattorit ovat halpoja (Ruikar, Hegadi ja Santosh 2018; Lin ym. 2014). Virtuaalisimulaattorin avulla voidaan kehittää visuospatiaalista hahmotusta neurokirurgiassa, jossa voidaan mallintaa kolmeulotteinen kuva aivoista sen sijaan, että katsottaissin kaksiulotteisia siivuja (Bernardo 2017). AlZhrani ym. 2015 huomasi, että ekspertit keskittyivät aivokasvaimen leikkauksessa potilaan turvallisuuteen, kun taas kirurgiopiskelijat keskittyivät kaiken kasvainkudoksen poistoon.

Tässä luvussa on esitetty useita hyötyjä, jotka on saavutettavissa visuo-haptisilla virtuaalisimulaattoreilla. Kaiken kaikkiaan tärkein hyöty olisi, että simulaattoreilla kehitetyt taidot siirtyvät oikeaan leikkaustilanteeseen. Tästä kuitenkin tarvitaan vielä paljon pitkän aikavälin tutkimusta (Winkler-Schwartz ym. 2016).

## 5 Johtopäätökset

Tässä työssä on esitelty visuo-haptisten virtuaalisimulaattoreiden toimintaa, sovellusaloja ja hyötyjä, joita niillä voidaan saavuttaa kirurgien koulutuksessa. Tämänlaiset simulaattorit tarjoavat kaksi- tai kolmiulotteisen näkymän käyttäjälleen, sekä haptisen rajapinnan, johon kohdistetaan voimia simuloimaan kosketusta. Tietokone piirtää grafiikan ja laskee haptisen vasteen, kun simuloitu kirurginen työkalu kohtaa mallinnetun kudoksen pinnan. Elin tai elimet ovat volymetrisesti mallinnettu, jotta fysiikka voidaan laskea heterogeenisessä kudoksessa ja jotta tuhoutuvan kudoksen pinta voidaan päivittää näkymään simulaation käyttäjälle.

Visuo-haptisissa simulaattoreissa nähdään paljon potentiaalia, ja niiden kehittäminen ja testaaminen nähdään kiinnostavana tutkimusalana lääketieteessä. Kuitenkin vielä tarvitaan paljon tutkimusta varsinkin siitä, miten simulaattoreissa kehitetyt taidot siirtyvät leikkaussaliin. Motivaattorina voidaan pitää pelastettuja ihmishenkiä, varsinkin nuorten kirurgien leikkauspöydillä, jos simulaattorioppiminen auttaa tositilanteessa.

Tuhoutuvan kudoksen laskennassa tietokoneiden laskentatehon kasvusta on ollut paljon hyötyä. Lisäksi monissa tutkimuksissa sovelletaan monia erilaisia matematiikan ja fysiikan menetelmiä laskemisen tehostamiseen. Kuitenkin simulaattoreissa pitää yhä tehdä kompromisseja fysiikan mallinnuksen ja haptisen renderöinnin realistisuuden sekä virtuaalisen sujuvuuden välillä. Haptinen vaste pitää laskea paikallisesti, koska viive rikkoo immersion jo kymmenissä millisekunneissa. Tehokas pilvilaskenta ei siis ratkaise laskemisnopeutta. Useimmissa tässä tutkielmassa tarkastelluista tutkimuksista, tyydyttiin laskemaan törmäykset suorittimen ytimissä. Mahdollinen jatkotutkimusaihe voisi olla laajentaa hakua GPU:n käyttöön laskennassa, sillä näytönohjaimen käytössä on paljon potentiaalia. Tehokas rinnakkaislaskenta vaatii erilaisen lähtökohdan algoritmien suunnitteluun.

Joissain sovelluksissa käyttäjän laitteistorajapintaa tulee vielä kehittää monipuolisemmaksi ja sujuvammaksi, jotta työkaluissa olisi oikeaa leikkaustilannetta vastaava tunto. Visuaalisesti se voi tarkoittaa virtuaalilaseja, nopeampaa ruudunpäivitystä tai pään liikkeiden seuranta. Haptisesti se voi tarkoittaa vaihtoehtoja styluksen tilalle tai magneettilevitöinnin laajempaa hyödyntämistä sovelluksissa.

Visuo-haptisia -virtuaalitekniologioita kehitetään koko ajan. Niistä on saatavilla paljon tutkimusta ja tämä on kerätty yhteen tähän kirjallisuuskatsaukseen. Jos samoilla hakusanoilla tekisi kirjallisuushaun vain viidenkin vuoden päästä, niin tilanne voisi olla hyvinkin erilainen ja kenties kompromissejä täytyy tehdä nykyistä vähemmän.



## Lähteet

Akhtar, K. S. N., Alvin Chen, N. J. Standfield ja C. M. Gupte. 2014. “The role of simulation in developing surgical skills”. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 7, numero 2 (kesäkuu): 155–160. ISSN: 1935-9748. <https://doi.org/10.1007/s12178-014-9209-z>.

Alaraj, Ali, Fady T. Charbel, Daniel Birk, Mathew Tobin, Cristian Luciano, Pat P. Banerjee, Silvio Rizzi ym. 2013. “Role of Cranial and Spinal Virtual and Augmented Reality Simulation Using Immersive Touch Modules in Neurosurgical Training”. *Neurosurgery* 72 (tammi-kuu): A115–A123. <https://doi.org/10.1227/neu.0b013e3182753093>.

Altomonte, M., D. Zerbato, D. Botturi ja P. Fiorini. 2008. “Simulation of deformable environment with haptic feedback on GPU”. Teoksessa *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3959–3964. <https://doi.org/10.1109/IROS.2008.4650837>.

AlZhrani, Gmaan, Fahad Alotaibi, Hamed Azarnoush, Alexander Winkler-Schwartz, Abdulrahman Sabbagh, Khalid Bajunaid, Susanne P. Lajoie ja Rolando F. Del Maestro. 2015. “Proficiency Performance Benchmarks for Removal of Simulated Brain Tumors Using a Virtual Reality Simulator NeuroTouch”. *Journal of Surgical Education* 72 (4): 685–696. ISSN: 1931-7204. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2014.12.014>.

Basdogan, Cagatay, ja Mandayam A Srinivasan. 2002. “Haptic rendering in virtual environments”. *Handbook of virtual environments* 1:117–134.

Bernardo, Antonio. 2017. “Virtual Reality and Simulation in Neurosurgical Training”. *World Neurosurgery* 106:1015–1029. ISSN: 1878-8750. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.06.140>.

Bro-Nielsen, M. 1998. “Finite element modeling in surgery simulation”. *Proceedings of the IEEE* 86 (3): 490–503. <https://doi.org/10.1109/5.662874>.

Cecil, J., P. Ramanathan, V. Rahneshin, A. Prakash ja M. Pirela-Cruz. 2013. “Collaborative virtual environments for orthopedic surgery”. Teoksessa *2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 133–137. Elokuu. <https://doi.org/10.1109/CoASE.2013.6654045>.

Courtecuisse, Hadrien, Hoeryong Jung, Jérémie Allard, Christian Duriez, Doo Yong Lee ja Stéphane Cotin. 2010. “GPU-based real-time soft tissue deformation with cutting and haptic feedback”. *Progress in biophysics and molecular biology* 103 (2-3): 159–168.

Escobar-Castillejos, David, Julieta Noguez, Luis Neri, Alejandra Magana ja Bedrich Benes. 2016. “A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training”. *Journal of Medical Systems* 40, numero 4 (helmikuu): 104. ISSN: 1573-689X. <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0459-8>.

Force Dimension. 2020. “omega.6 specsheet”. Viitattu 13. marraskuuta 2020. [https://www.forcedimension.com/images/doc/specsheet\\_-\\_omega6.pdf](https://www.forcedimension.com/images/doc/specsheet_-_omega6.pdf).

Gaudina, M., V. Zappi, E. Bellanti ja G. Vercelli. 2013. “eLaparo4D: A Step Towards a Physical Training Space for Virtual Video Laparoscopic Surgery”. Teoksessa *2013 Seventh International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*, 611–616. <https://doi.org/10.1109/CISIS.2013.110>.

Laehyun Kim, A. Kyrikou, G. S. Sukhatme ja M. Desbrun. 2002. “An implicit-based haptic rendering technique”. Teoksessa *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, nide 3, 2943–2948 vol.3. <https://doi.org/10.1109/IRDS.2002.1041719>.

Li, X., Z. Yuan, J. Zhao ja X. Liao. 2020. “Dynamic and Accurate Force Feedback for Electromagnetic Haptic Display”. Teoksessa *2020 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*, 132–139. <https://doi.org/10.1109/SmartIoT49966.2020.00028>.

Lin, Yanping, Xudong Wang, Fule Wu, Xiaojun Chen, Chengtao Wang ja Guofang Shen. 2014. “Development and validation of a surgical training simulator with haptic feedback for learning bone-sawing skill”. *Journal of Biomedical Informatics* 48:122–129. ISSN: 1532-0464. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbi.2013.12.010>.

Lorensen, William E., ja Harvey E. Cline. 1987. “Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm”. *SIGGRAPH Comput. Graph.* (New York, NY, USA) 21, numero 4 (elokuu): 163–169. ISSN: 0097-8930. <https://doi.org/10.1145/37402.37422>.

- Marshall, P., S. Payandeh ja J. Dill. 2006. "A Study on Haptic Rendering in a Simulated Surgical Training Environment". Teoksessa *2006 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 241–247. <https://doi.org/10.1109/HAPTIC.2006.1627076>.
- Massie, Thomas H., ja J. K. Salisbury. 1994. "The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects". Teoksessa *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 295–301.
- Mastmeyer, Andre, Dirk Fortmeier ja Heinz Handels. 2016. "Efficient patient modeling for visuo-haptic VR simulation using a generic patient atlas". *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 132:161–175. ISSN: 0169-2607. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.04.017>.
- Mazur, Travis, Tarek R. Mansour, Luke Mugge ja Azedine Medhkour. 2018. "Virtual Reality–Based Simulators for Cranial Tumor Surgery: A Systematic Review". *World Neurosurgery* 110:414–422. ISSN: 1878-8750. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.11.132>.
- McNeely, William A., Kevin D. Puterbaugh ja James J. Troy. 2005. "Six Degree-of-Freedom Haptic Rendering Using Voxel Sampling". Teoksessa *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, 42–es. SIGGRAPH '05. Los Angeles, California: Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450378338. <https://doi.org/10.1145/1198555.1198605>.
- Morris, Dan, Hong Tan, Federico Barbagli, Timothy Chang ja Kenneth Salisbury. 2007. "Haptic Feedback Enhances Force Skill Learning", 21–26. Maaliskuu. <https://doi.org/10.1109/WHC.2007.65>.
- Pan, J., L. Zhang, P. Yu, Y. Shen, H. Wang, H. Hao ja H. Qin. 2020. "Real-time VR Simulation of Laparoscopic Cholecystectomy based on Parallel Position-based Dynamics in GPU". Teoksessa *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 548–556. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00076>.
- Ruikar, Darshan D., Ravindra S. Hegadi ja K. C. Santosh. 2018. "A Systematic Review on Orthopedic Simulators for Psycho-Motor Skill and Surgical Procedure Training". *Journal of Medical Systems* 42, numero 9 (elokuu): 168. ISSN: 1573-689X. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-1019-1>.

Salisbury, K., F. Conti ja F. Barbagli. 2004. “Haptic rendering: introductory concepts”. *IEEE Computer Graphics and Applications* 24 (2): 24–32. <https://doi.org/10.1109/MCG.2004.1274058>.

Stone, Scellig, ja Mark Bernstein. 2007. “PROSPECTIVE ERROR RECORDING IN SURGERY: AN ANALYSIS OF 1108 ELECTIVE NEUROSURGICAL CASES”. *Neurosurgery* 60, numero 6 (kesäkuu): 1075–1082. ISSN: 0148-396X. <https://doi.org/10.1227/01.NEU.0000255466.22387.15>.

Terveyskirjasto. 2020. *ortopedia*. [https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p\\_artikkeli=Itt02434](https://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=Itt02434).

Tong, Q., Z. Yuan, X. Liao, M. Zheng, T. Yuan ja J. Zhao. 2018. “Magnetic Levitation Haptic Augmentation for Virtual Tissue Stiffness Perception”. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24, numero 12 (joulukuu): 3123–3136. ISSN: 1077-2626. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2772236>.

Ullrich, S., ja T. Kuhlen. 2012. “Haptic Palpation for Medical Simulation in Virtual Environments”. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18, numero 4 (huhtikuu): 617–625. <https://doi.org/10.1109/tvcg.2012.46>.

Wang, Dangxiao, Siming Zhao, Teng Li, Yuru Zhang ja Xiaoyan Wang. 2015. “Preliminary evaluation of a virtual reality dental simulation system on drilling operation”. *Bio-Medical Materials and Engineering* 26, numero s1 (elokuu): S747–S756. ISSN: 1878-3619. <https://doi.org/10.3233/BME-151366>. <http://doi.org/10.3233/BME-151366>.

Vickers, Andrew J, Caroline J Savage, Angel M Cronin, Jens Rassweiler, Marcel Hruza, Ingolf A Tuerk, Alex J Vanni, Inderbir S Gill, Jihad H Kaouk, Luis Martinez-Piñeiro ym. 2009. “THE SURGICAL LEARNING CURVE FOR LAPAROSCOPIC COMPARED TO OPEN RADICAL PROSTATECTOMY”. *The Journal of Urology* 181 (4S): 318–319.

Winkler-Schwartz, Alexander, Khalid Bajunaid, Muhammad A.S. Mullah, Ibrahim Marwa, Fahad E. Alotaibi, Jawad Fares, Marta Baggiani ym. 2016. “Bimanual Psychomotor Performance in Neurosurgical Resident Applicants Assessed Using NeuroTouch, a Virtual Reality Simulator”. *Journal of Surgical Education* 73 (6): 942–953. ISSN: 1931-7204. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2016.04.013>.

Yin, Myat Su, Peter Haddawy, Siriwan Suebnukarn ja Phattanapon Rhienmora. 2018. “Automated outcome scoring in a virtual reality simulator for endodontic surgery”. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 153:53–59. ISSN: 0169-2607. <https://doi.org/https://0.1016/j.cmpb.2017.10.001>.