

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Tietotekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

Ville Martas

Päälle puettavan teknologian integrointi virtuaalimaailmoihin

Työn tarkastaja: Ass. Prof. Ari Happonen

Työn ohjaaja: Ass. Prof. Ari Happonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Engineering Science

Tietotekniikan koulutusohjelma

Ville Martas

Päälle puettavan teknologian integrointi virtuaalimaailmoihin

Kandidaatintyö 2020

34 sivua, 7 kuvaa, 3 taulukkoa, 1 liite

Työn tarkastaja: Ass. Prof. Ari Happonen

Hakusanat: virtuaalitodellisuus, VR, älyvaatteet, haptinen teknologia, Unity

Keywords: virtual reality, VR, smart-clothes, haptic technology, Unity

Tässä työssä tutkitaan haptisen, eli tuntoaistiin vaikuttavan päälle puettavan Teslasuit-puvun ominaisuuksia ja haptiselle käyttöliittymälle sovelluskehitystä yhdessä VR-teknologian kanssa. Selvitetään, miten puvun eri ominaisuuksia voidaan aktivoida ja miten ominaisuuksia kannattaa hyödyntää Unity-pelimoottorilla kehitetyn sovelluksen yhteydessä. Tämä toteutettiin luomalla VR-testisovellus, jossa puvun haptisia ominaisuuksia aktivoitiin virtuaalimaailman tapahtumien pohjalta. Puvun tuntoaistiin vaikuttavat ominaisuudet koettiin testien perusteella tarkoin, ja käyttäjä pystyi helposti erottamaan eri kanavien palautteet toisistaan. Palaute koettiin testijakson pohjalta myös tehokkaaksi tavaksi ohjata käyttäjää virtuaalimaailmassa simuloitujen tehtävien suorittamisen yhteydessä palautteen tehokkuuden ansiosta. Tuntoaistiin vaikuttavalla liikkeillä seuraavalla puvulla koettiin olevan paljon mahdollisia käyttötarkoituksia esimerkiksi simulaatio- tai koulutustarkoituksissa.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Software Engineering
Ville Martas

Integrating wearable technology with virtual worlds

Bachelor's Thesis 2020

34 pages, 7 figures, 3 tables, 1 appendice

Examiners: Ass. Prof. Ari Happonen

Keywords: virtual reality, VR, smart-clothes, haptic technology, Unity

This thesis investigates the features of a wearable haptic suit Teslasuit and application development for a haptic interface together with VR technology. It was investigated how the different features of the suit can be activated and how the features could be utilized in the context of an application developed with the Unity game engine. This was accomplished by creating a VR test application where the haptic features of the suit were activated based on events in the application. The properties of the suit that stimulated the sense of touch were found to be accurate from the tests and they could be easily distinguished by the wearer. Based on the test period, feedback was also perceived as an effective way to guide the user in performing virtual tasks in a virtual world, thanks to the effectiveness of the feedback. A suit that tracks movements and affects the senses with feedback was felt to have many possible uses, for example with simulation or training purposes.

ALKUSANAT

Kiitoksia Markolle ja Virefin Oy:lle puvun järjestämisestä kandidaatintyötä varten!

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	3
1.1	TAVOITTEET JA RAJAUKSET	4
1.2	TYÖN RAKENNE	5
2	AIEMPI TUTKIMUS ÄLYVAATTEIDEN JA HAPTISEN LAITTEISTON PIIRISSÄ JA NÄIDEN HISTORIAA.....	6
2.1	ÄLYVAATTEIDEN JA HAPTISEN LAITTEISTON HISTORIAA.....	8
3	TESLASUIT-LAITTEISTON ESITTELY	10
4	TESTAUSMENETELMÄT JA TESTIEN IMPLEMENTOINTI.....	15
4.1	SUUNTATESTI.....	15
4.2	LIIKKEENTUNNISTUS.....	17
5	TULOKSET	20
6	POHDINTA JA YHTEENVETO	23
7	LÄHTEET.....	25

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

3DoF	Three Depths of Freedom
6DoF	Six Depths of Freedom
AR	Augmented Reality
EMS	Electrical Muscle Simulation
IT	Informaatioteknologia
LCD	Liquid Crystal Display
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
SDK	Software Development Kit
TENS	Transcutaneous electrical nerve simulation
Unity	Unity-pelimoottori
USB	Universal Serial Bus
VR	Virtual Reality (Virtuaalitodellisuus)
Wi-Fi	Wireless Fidelity

1 JOHDANTO

Digitalisaatio ja digitaalinen transformaatio ovat vauhdittaneet yksityis- ja yrityssektorin läpileikkaavan jokapaikan teknologian lisääntymistä [12, 16, 23, 27], jonka alle kuuluvaa elektronista päälle puettavaa teknologiaa on kehitetty jo vuosikymmenien ajan esimerkiksi urheilun, lääketieteen, asevoimien ja viihdealan tarpeisiin [18]. Päälle puettavan teknologian historian voidaan ajatella alkaneen jo 1500-luvun alkupuolella Peter Henleinin kehittäessä kaulaketjussa pidettävän kellon [11]. Tästä kello kehittyi vuosien saatossa taskukelloksi ja myöhemmin rannekelloksi suuren yleisön käyttöön. Rannekellojen pohjalta erilaisia digitaalisia versioita kehitettiin jo 70-luvulla, kuten American Hamilton Watch Companyn 1972 julkaisema Pulsar LED [24]. Älykellojen ja rannekkeiden suosio on kasvanut merkittävästi 2015-2020 aikavälillä [4], mutta älypuhelinien tapaiseen läpilyöntiin ei kuitenkaan ole vielä ylletty. Vielä ei ole myöskään selvää mielletäänkö älykello kuluttajien toimesta mieluummin muodikkaaksi lisävarusteeksi kuin uudeksi tarpeelliseksi lisäksi laitteistovarustukseemme [4].

Tässä työssä keskitytään moderniin päälle puettavaan elektroniseen teknologiaan. Päälle puettava teknologia alkoi kiinnostaa kehittäjiä erityisesti 90-luvun IT-kuplan [8] aikaan. World Wide Webin kehitys ja erityisesti mobiilipuhelimet veivät kuitenkin pääosin ihmisten huomion älyvaatteista [18], eikä vaateteknologian saralla nähty tarvittavaa läpimurtotuotetta markkinoilla. Päälle puettavan teknologian kehitystä ovat vuosien saatossa edistäneet erityisesti huippu-urheilun, lääketieteen ja viranomaisten tarpeet. Urheilumaailmassa suorituskykyä mittaavat puettavat laitteet kiinnostivat urheilijoita ja erityisesti heidän sponsoreitaan, koska vaatteilla kerättävällä pulssi-, lämpötila-, ja nopeustiedolla nähtiin suurta arvoa urheilijan harjoitusten tehokkuuden osalta [18]. Pelialalla nähtiin jo 90-luvulla ensimmäisiä tuntoaistia hyödyntäviä puettavia tuotteita [30]. ”Haptisten”, eli tuntoaistiin vaikuttavien ominaisuuksien hyödyntäminen puettavassa teknologiassa todettiin antavan entistä realistisemman [40] läsnäolon tunteen, kun pelien tai sovellusten tapahtumat voitiin syöttää audiovisuaalisen palautteen lisäksi myös fyysisen palautteen avulla käyttäjälle. Älyvaatteiden käyttötarkoitukset eivät rajoitu vain peli- ja viihdealalle. Erityisesti vaativiin ammatteihin koulutettaessa virtuaalinen simulointi on todettu erittäin hyödylliseksi [29] ja haptiset ominaisuudet, koulutettavan henkilön liikkeenkaappaus tai henkilön suorituskyvyn

seuraaminen älykkäiden vaatteiden avulla voi mahdollistaa entistä parempia koulutusmahdollisuuksia johtaen nopeampaan oppimiseen ja parempiin tuloksiin.

1.1 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän kandidaatintyön päätavoitteena on selvittää miten sovelluskehitys kuvassa 1 esiintyvälle haptiselle puvulle Teslasuitle (<https://teslasuit.io/>) tapahtuu sen tarjoamien työkalujen [35] avulla ja mitä Teslasuit voi tuotteena tarjota käyttäjälle ja sitä alustana käyttävälle kehittäjälle.



Kuva 1. Teslasuit-puku

Selvitetään, mitä sovelluskehittäjän tulee ottaa huomioon hyödyntäessään puvun eri toimintoja ja miten niitä voidaan hyödyntää immerstiivisen (autenttisen, aidon) virtuaalikokemuksen saavuttamiseksi. Tutkitaan, miten yhteys puvun ja sovelluksen välille saadaan muodostettua ja pyritään luomaan yksinkertainen testisovellus Unity-pelimoottorin [38] avulla, jonka liitännäisellä Teslasuitin haptisten ominaisuuksien tarkkuutta voidaan

testata. Selvitetään myös yleisellä tasolla mitä ominaisuuksia kehittäjän ylipäätään kannattaa hyödyntää sovelluskehityksessä tälle alustalle: nähdäänkö haptisen palautteen tuovan hyötyjä erityisesti jossain tietyssä käyttötarkoituksessa kuten simulaatioissa tai voidaanko haptinen palaute kokea viihdekäyttöön tarkoitettulle sovellukselle jopa häiritseväksi? Ensisijaisesti keskitytään puvun haptisiin ominaisuuksiin ja tutkitaan fyysisen palautteen merkitystä sovelluksen käytössä, mutta tutustutaan myös puvun mahdollisuuksiin toimia syötteenä itse sovellukselle liikkeenkaappauksen muodossa.

1.2 Työn rakenne

Työ alkaa tästä johdantoluvusta. Johdantolukua seuraa luku 2, jossa tutustutaan muihin haptisen teknologian tutkimuksiin. Tarkastellaan, mitä muut ovat testanneet ja mitä lopputuloksia ja huomioita heidän tutkimuksensa haptisten laitteiden kanssa työskentelyn yhteydessä ovat tuoneet esille. Luvussa 3 tutustutaan tarkemmin tutkittavaan laitteistoon ja sen historiaan. Tässä luvussa tarkastellaan myös Teslasuit-puvun ominaisuuksia ja selvitetään mitä puku tarjoaa kehittäjälle laitteiston ja sovelluskehityksen puolelta. Luvussa 4 määritellään miten puvun tutkimista ja testaamista lähestytään ja minkälaisia testejä puvun kanssa tehdään. Tutustutaan sovelluksen ja puvun integrointiin keskenään, Teslasuitin työkalujen avulla haptisten animaatioiden tekemiseen ja testeihin, joilla ominaisuuksia testattiin. Viidennessä kappaleessa käydään läpi tuloksia testien osalta. Tarkastellaan, mitä tutkimusten yhteydessä todettiin liittyen puvun sovelluskehitysmahdollisuuksiin ja miten puku toimii käyttöliittymänä virtuaalimaailmoissa. Luvussa 6 pohditaan tutkittuja tietoja, selvitetään mitä mahdollisuuksia puvulla ja vastaavalla teknologialla olisi tulevaisuudessa tarjota eri aloille ja eri käyttötarkoituksiin, sekä tiivistetään työn keskeiset asiat yhteenvetoon.

2 AIEMPI TUTKIMUS ÄLYVAATTEIDEN JA HAPTISEN LAITTEISTON PIIRISSÄ JA NÄIDEN HISTORIAA

Tässä luvussa käsitellään muita tutkimuksia älyvaatteista (smart clothes, intelligent clothing), sekä haptisista laitteista. Tutustutaan mihin haptisen laitteiston kanssa työskennelleet ovat päätyneet aiemmissä tutkimuksissaan. ”Smart Clothes and Wearable Technology”-kirjassa Malmivaara määrittelee älyvaatteen (intelligent clothing) seuraavasti: mikäli vaatteessa on lisänä jotakin normaalista poikkeavaa ei vaatteille tyypillistä poistamatta kuitenkaan mitään vaatteen perusominaisuuksia, kuten pestävyyttä tai puettavuutta, voidaan vaatetta pitää älyvaatteena [18].

Sormien ja kämmenen haptisia laitteita kartoittavassa tutkimuksessa [22] Pacchioretti et al. määrittelevät haptisten käyttöliittymien tavoiteltavat piirteet puettavuuden osalta seuraavilla mittareilla:

- Muoto (Form factor), puettavan laitteen ei tulisi vaikuttaa käyttäjän kehon kokoon merkittävästi.
- Paino (Weight), kevyempi laite rasittaa käyttäjää vähemmän. Puettavan laitteen tulisi olla mahdollisimman kevyt suhteutettuna sen peittävän vartalon alueen lihaksien ja luuston tarjoamaan tukeen.
- Estyvyys (Impairment), käyttäjän liikehännän estymistä tulee pyrkiä rajoittamaan mahdollisimman vähän puettavan laitteen osalta.
- Mukavuus (Comfort), haptisen puettavan laitteen tulee olla mahdollisimman mukava ja kiristystä ja epämukavaa painetta tulee pyrkiä välttämään käyttäjän pidentämiseksi.

Tutkitaan miten hyvin Teslasuit-puku täyttää edellä mainitut kriteerit puettavuuden osalta.

”A Comparative Study of Tactile Representation Techniques for Landmarks on a Wearable Device”-tutkimuksessa [32] Srikulwong ja O’Neill tutkivat haptisen vyön toimintaa suunnistuksen- ja maamerkkien tunnistettavuuden työkaluna. Testattaville puettiin päälle kahdeksan haptista elektrodiä sisältävä vyö, jonka avulla testihenkilöille syötettiin sekä suuntatietoa, että erilaisia sarjoja haptista palautetta, mitkä oli sidottu eri maamerkkeihin. Maamerkkien tunnistettavuuden kannalta selvisi, että parhaat tulokset saatiin käyttämällä yhden haptisen pisteen sijasta kahta eri pistettä, jolloin tunnistettavuus parani merkittävästi.

Tutkimuksessa otettiin huomioon, että jatkuvat tuntuman antaminen käyttäjälle haptisella laitteella saattaa vaikeuttaa käyttäjän kykyä erottaa haptisia impulsseja toisistaan, joten impulssien välinen tauottaminen koettiin tärkeäksi lihasten palautumisen ja haptisten palautteiden tunnistettavuuden kannalta [28, 32].

Salazar et al. totesivat tutkimuksessaan [26], että haptisen laitteen avulla voidaan vaikuttaa käyttäjän tuntemaan esineen jäykkyyteen, muotoon ja jopa kitkaan. Testihenkilöt saatiin tuntemaan sormen ympärille asetetun haptisen laitteen avulla virtuaalimaailman kuhmuja ja reikiä täysin tasaisella oikealla pinnalla. Haptisten puettavien laitteiden merkitys VR-ympäristössä virtuaaliesineiden kanssa työskennellessä on myös todettu tärkeäksi. Sormien ympärille asetettujen haptisten laitteiden avulla on onnistuttu simuloimaan 'kevyiden' virtuaalisten kappaleiden painoa pelkän kosketuksen lisäksi [20]. Kevyellä tarkoitetaan virtuaalimaailmassa mallinnettua esinettä, jonka paino ei olisi oikeana esineenä merkittävä. Painon simuloiminen pelkästään ihoa venyttävällä tai painelevalla laitteella on vaikeaa simuloida painavammiksi oletetuilla kappaleilla, koska koko käsivarsi ei tunne kannateltavan virtuaaliesineen painoa.

Murakami et al. tutkivat [21] haptisen palautteen merkitystä virtuaalisten osien kokoamisessa suurelle laitteelle simulaation avulla. Tehtävän onnistumistodennäköisyys parani haptisen palautteen ansiosta, mutta itse osien kokoamiseen käytetty aika pysyi suurin piirtein samana myös ilman palautetta. Myös Meli et al. totesivat tutkimuksessaan [19] haptisen palautteen tuottavan parempia tuloksia testatessaan haptisen palautteen merkitystä kolmessa eri testitilanteessa. Tutkimuksessa tutkittiin samoin sormen ympärille asetettavien haptisten laitteiden toimivuutta eri tilanteissa. Testihenkilöt suorittivat virtuaalisen ”Box and Block”-testin, ”ohjeistus” tehtävän päätteensä LCD-monitori, sekä kolmannen videopelitestin käyttäen lisäksi Microsoftin HoloLens AR-laitetta. Testit suoritettiin haptista palautetta hyödyntäen, sekä ilman haptista palautetta testihenkilöille. Haptisen palaute paransi merkittävästi testien lopputuloksia verrattuna testeihin ilman palautetta, sekä paransi yleisesti käyttäjien kokemusta testien suorittamisen yhteydessä. Wang et al. [40] uskovat haptisten ominaisuuksien olevan korvaamaton lisä VR-käyttöliittymien immersion, vuorovaikutuksen ja mielikuvituksen edistämiseksi.

Tarkastellaan myös, miten laite on lähestyttävissä kehittäjän näkökulmasta. ”A Survey of software learnability: metrics, methodologies and guidelines” [10] tutkimuksessa ohjelmiston opittavuus jaotellaan alkupään oppimiseen (Initial Learnability) ja pidennettyyn oppimiseen (Extended Learnability). Tässä työssä perehdytään erityisesti alkupään opittavuuteen, koska laitteiston kanssa työskentelyn aika on rajallinen. Ohjelmiston helppo opittavuus mahdollistaa työskentelyn nopean aloittamisen ohjelmiston kanssa, jolloin tuottavuus ohjelmistolla on alkupäässä korkeampi verrattuna esimerkiksi hitaammin opittavaan ohjelmistoon, jolla tuottavuus saattaa kasvaa vasta myöhemmässä vaiheessa kehitystä [15].

2.1 Älyvaatteiden ja haptisen laitteiston historiaa

Pelialalla ilmestyi 90-luvulla videopelien kanssa toimiva ensimmäinen kuluttajakäyttöinen haptinen liivi, Aura Interactor [30], jolla kyettiin antamaan käyttäjälle tuntuvaa fyysistä palautetta. 1994 julkaistulla liivillä oli yhteensopivuus tiettyjen Super Nintendo, Sega Genesis ja Sega CD konsolien pelien kanssa. Liivi osaa lukea yhteensopivien pelien ääniulostuloa ja muuntaa bassoääniä värinäksi, jolloin käyttäjälle voidaan antaa esimerkiksi pelissä tapahtuvasta bassoisesta potkusta tuntuva palaute ylävartaloon. Aura Interactorin jalanjäljissä ilmestyi myöhemmin esimerkiksi TNgamesin suunnittelema 3rd Space Vest (2007) [36], jolla käyttäjä tuntee eri pelien iskujen tai projektiilien tulosuunnan, sekä lukuisia prototyyppejä haptisista puvuista, kuten 2013 Kickstarter-kampanjan aloittanut ARAIG [1], joka ei kuitenkaan koskaan päässyt tavoitteeseensa.

Ensimmäinen kuluttajakäyttöinen vaateen muodossa esiintynyt haptinen älyvaate oli CuteCircuitin kehittämä HugShirt [5] vuonna 2002. Paita mahdollisti ”etähalauksien” lähettämisen Bluetoothia ja Javaa tukevien puhelimien avulla. Lähettäjän koskiessa tiettyjä osia paidan pinnasta paita lähettää kosketuksesta tietoa puhelimelle, joka puolestaan lähettää tiedon eteenpäin vastaanottajan puhelimeen ja tästä vastaanottajan omaan paitaansa. Myöhemmin julkaistun sovelluksen avulla halauksia pystyi lähettämään, vaikka paita löytyisi vain toiselta osapuolelta. Myontecin kehittämät Mbody 3 -shortsit [17] on puolestaan suunniteltu mittaamaan lihasten aktivoitumista työnteon tai urheilun yhteydessä, jotta tapaturmia voidaan välttää ja loukkaantumisia fyysisen työn yhteydessä, parantaa urheilusuoritusten seuranta ja mahdollisesti parantaa loukkaantuneen kuntoutusprosessia.

Sensorian kehittämät smart sock v2.0 sukat [31] keräävät urheilijalle tietoa askelmäärästä, nopeudesta, kalorien poltosta, korkeuseroista, matkasta, tahdistista ja jopa jalan askelluksen puhtaudesta. Sukasta löytyvä keskusyksikkö lähettää tietoa älypuhelimeen ladattuun sovellukseen, josta yksittäisen suorituksen tai koko kuukauden suoritusten tietoa voidaan tarkastella.

Edellä mainitut tuotteet kuuluvat kaikki ”päälle puettavaan teknologiaan”, mutta haptiset liivit ja puvut ovat käytännössä oma alalajinsa ”intelligen clothing” tai ”wearable technology” luokkien sisällä. Näiden tuotteiden päätarkoitus on antaa fyysistä palautetta takaisin käyttäjälle, älyvaatteiden usein keskittyessä pääsääntöisesti tiedon keräämiseen käyttäjältä. Virtuaalitodellisuuden noustessa uudestaan pinnalle 2010-luvulla Valven, Oculusin ja Sonyn kehittäessä uusia moderneja VR-laseja immersion tavoittelu alkoi kiinnostaa entistä enemmän. Modernit VR-lasit mahdollistavat kuluttajien pääsyn syvemmälle virtuaalimaailmaan, mikä todennäköisesti vaikutti merkittävästi myös haptisten pukujen ja liivien kehityksen uudelleen nousuun. Viimeisen viiden vuoden aikana kehitteillä on pukujen ja liivien saralla ollut esimerkiksi bHaptics Tact Suit liivi [2], ja Hardlight VR Suit [14], sekä useita muita vielä kehitteillä olevia tai jo epäonnistuneita tuotteita. Haptiset puvut hyödyntävät usein markkinoinnissaan modernia VR-teknologiaa ja tähtäävät erityisesti pelialalle. Tässä työssä keskitytään tutkimaan sovelluskehitystä 2018 julkaistulle Teslasuit-puvulle [9], joka mahdollistaa käyttäjälle haptisen palautteen antamisen, liikkeenkaappauksen sekä useiden muiden ominaisuuksien hyödyntämisen simulaation, pelin tai muun sovelluksen yhteydessä.

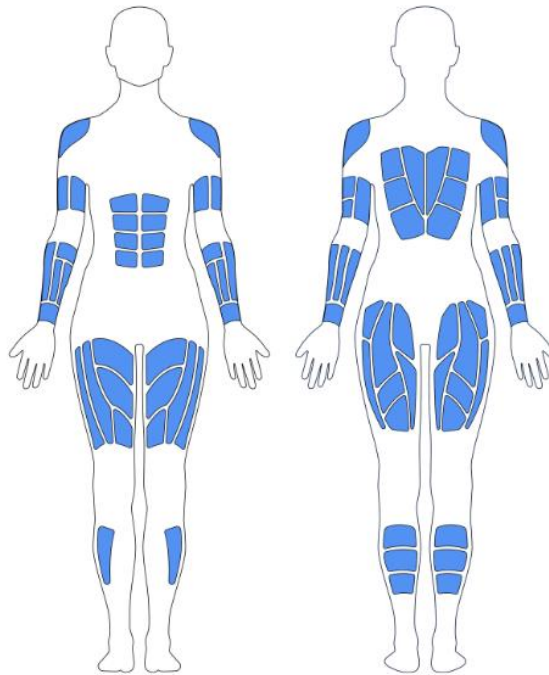
3 TESLASUIT-LAITTEISTON ESITTELY

Teslasuit-puku kehitettiin 2018 Teslasuit-yrityksen toimesta. Puku (kuva 2) on suunniteltu esimerkiksi yritysten käyttöön simulointia varten eri ammatteihin koulutettaessa, urheilijoille mittaamaan ja parantamaan harjoittelun laatua, sekä esimerkiksi loukkaantuneiden kuntoutuksen parantamiseksi. Myös puvun hyödyntäminen pelialalla on huomioitu, mutta ei kuitenkaan ole nähtävästi ensisijaisena fokuksena Teslasuitin verkkosivujen käyttötarkoitusten mukaan. Teslasuit mahdollistaa haptisen palautteen välittämisen käyttäjälle (Haptic feedback), liikkeiden lukemisen käyttöhetkellä (Motion capture), sekä kehon arvojen seurannan biometrisen järjestelmän (Biometric system) avulla. Tieto kulkee puvusta tietokoneelle WiFi-signaalin avulla puvun keskusyksiköstä. Keskusyksikkö prosessoi puvun eri osien tuottamaa tietoa ja määrittelee haptisten signaalien lähettämisen puvun eri puolille [13, 42]. Teslasuit saa virtaa varavirtalähteestä, jolle löytyy oma tasku takin selkäpuolelta. Taskun varavirtalähde kytketään puvun takkiin USB-C liitännällä, ja takista vielä erikseen housuihin toisella USB-C liitännällä.



Kuva 2. Teslasuit-puvun takki ja housut

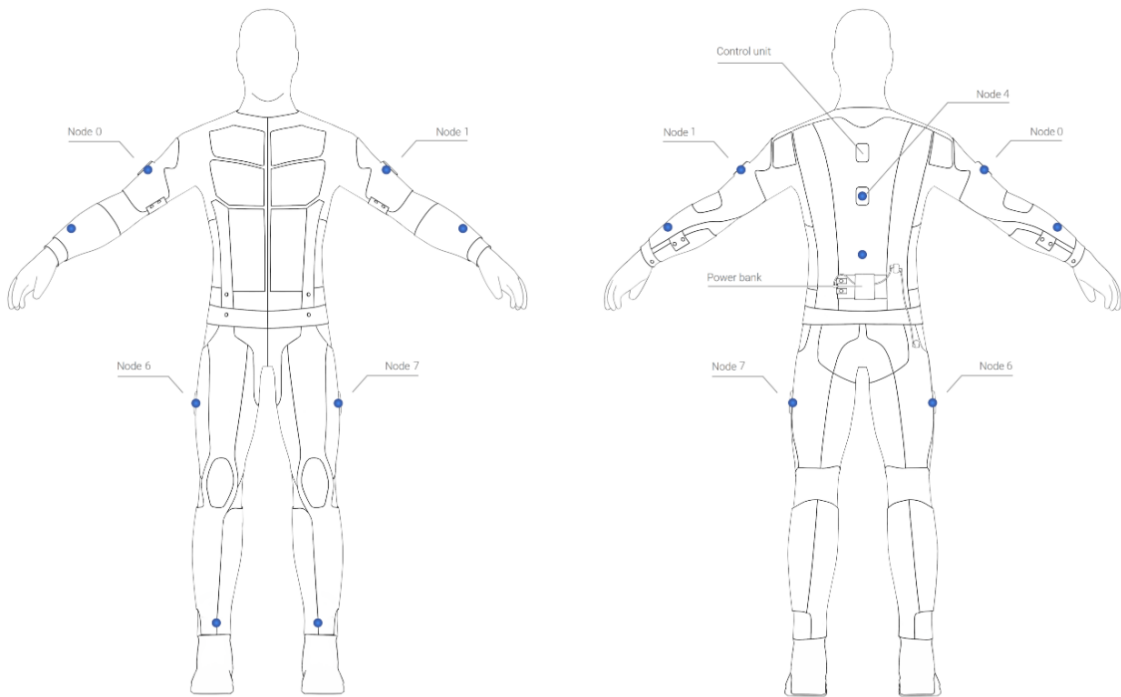
Haptisen palautteen välittäminen tapahtuu puvun 80 eri haptisen alueen avulla, jotka on sijoitettu eri puolille pukua kuvan 3 osoittamille alueille. Puvun tarjoama haptinen palaute perustuu TENS (Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation) ja EMS (Electrical Muscle Stimulation) ärsykkeisiin [13]. Molemmat näistä perustuvat erilaisten sähköimpulssien lähettämiseen puvun eri osiin, jolloin käyttäjä tuntee palautetta puvun tietyssä osassa tai käyttäjän lihas jännittyy. TENS perustuu kivun lievittämiseen sähköimpulssien avulla, jotka vaikuttavat suoraan hermostoon käyttäjän ihon läpi [34]. EMS:n avulla voidaan stimuloida suoraan tiettyä lihasta, jolloin lihasta voidaan supistaa sähkövirran avulla ohittaen hermosto kokonaan [37]. Selän, jalkojen ja käsien lämpötilaan voidaan myös vaikuttaa 20-60°C välillä pukuun sijoitettujen lämpöpisteiden (thermal points) avulla.



Kuva 3. Teslasuit-puvun haptiset osat, etupuolella (vasen) ja takapuolella (oikea) [42]

Biometrinen järjestelmä mahdollistaa esimerkiksi sydänsähkökäyrän ottamisen, pulssin mittaamisen ja muiden kehon ominaisuuksien seurannan [42]. Tämän tiedon avulla voidaan seurata esimerkiksi urheilijoiden harjoitusten tehokkuutta ja kehon reagoitua eri ärsykkeisiin ja suorituksiin.

Liikkeenkaappausta varten pukuun on sijoitettu eri puolille 10 sensoria lukemaan käyttäjän liikkeitä kuvan 4 osoittamiin paikkoihin. Sensorit lähettävät tiedon puvun yläselässä sijaitsevaan keskusyksikköön, mikä prosessoi tiedon ja lähettää sen tietokoneelle WiFi-signaalin avulla. Puvusta luettua liiketietoa voidaan käyttää hyväksi syötteenä itse sovellukselle tai tarkastella tarkemmin esimerkiksi jonkin liikkeen, liikesarjan tai operaation optimointia varten. Liikkeenkaappaukselle on kaksi eri moodia: 6-Axis moodi, jossa liikkeenkaappaus tapahtuu kiihtyvyyssanturien (accelerometer) ja gyroskooppien avulla, sekä 9-Axis moodi, jossa liikkeenkaappaukseen vaikuttavat myös magnetometrit. Puvun lähettämän liiketiedon kuvataajuutta voidaan myös säätää 50, 100 tai 200 kuvaan sekunnissa. [42]



Kuva 4. Teslasuit-puvun liikkeentunnistusosat, etupuolella (vasen) ja takapuolella (oikea) [42]

Teslasuitin tarjoaa kehittäjälle taulukossa 1 esitetyt omat työkalunsa [35, 42] puvun käyttöä ja sille kehitystä varten.

Sovellus	Käyttötarkoitus
Haptic editor	Haptisten animaatioiden luominen ja toistaminen
Haptic player	Haptisten animaatioiden toistaminen yksinkertaisemmassa käyttöliittymässä
Skeletool	Liikkeentunnistusominaisuuksien kalibrointi, testaaminen ja asetusten säätäminen Unity pohjaisella sovelluksella
ECG-viewer	Unity pohjainen sovellus biometrisen järjestelmän keräämän tiedon visualisointia varten.

Taulukko 1. Teslasuitin tarjoamat työkalut kehitystä ja testailua varten

Haptic editor sisältää musiikintuottajille tutun MIDI (Musical Instrument Digital Interface) [41] tyyppisen käyttöliittymän, mutta musiikin sijaan haptisille animaatioille. Puvun yksittäisiä haptisia sektoreita voidaan aktivoida eri voimakkuuksilla eri järjestyksessä. Myös puvun lämpöominaisuuksia voidaan aktivoida editoria käyttäen ja lisätä yksittäiseen animaatioon. Yksittäisen haptisen kanavan frekvenssiä, amplitudia ja pulssien tiheyttä voidaan säätää erikseen, jolloin käyttäjän kokemaa palautetta voidaan muokata sopivaksi sovelluksen mukaan. Haptisia animaatioita voidaan editorin avulla myös toistaa animaatioita luodessa. Yksittäiset Haptic editorilla luodut animaatiot tallentuvat ".haptic_asset"-tiedostoiksi tai useampia animaatioita sisältävät kirjastot ".haptic_library" kokoelmiksi, joita voidaan myöhemmin hyödyntää esimerkiksi Unity tai Unreal Engine projekteissa Teslasuitin liitännäisten avulla. Haptic playerillä editorilla luotuja haptisia animaatioita voidaan toistaa käyttäjälle yksinkertaisemmassa ympäristössä ilman haptisen editorin käyttöympäristöä. Skeletool työkalulla puvun liikkeenkaappausominaisuuksia voidaan kalibroida ja käyttäjältä luettujen liikkeiden toistotaajuutta voidaan muuttaa. Asetuksista voidaan myös valita edellä mainituista kahdesta eri liikkeenkaappaus asetuksista 6-Axis tai 9-Axis moodi. ECG-viewerillä voidaan tarkastella biometristä järjestelmää hyödyntämällä käyttäjän sydänsähkökäyrää ja pulssia käytön aikana. Puvun teknisiä ominaisuuksia esitellään tarkemmin taulukossa 2.

Tekninen ominaisuus	Mittatieto
Puvun haptiset elektrodit	62 (takki) + 52 (housut)

Kanavat, joilla elektrodeja kontrolloidaan	48 (takki) + 32 (housut)
Haptinen palaute	TENS + EMS [37]
Liikkeentunnistussensorit	10 kappaletta
Liikkeentunnistuksen maksimi kuvataajuus	200 hz
Yhteys	Wi-Fi 2.4Ghz, 802.11 b/g/n
Akun kesto (Teslasuitin tarjoama virtalähde, 10 000 milliampeerituntia)	5-8h riippuen käytön luonteesta
Käyttöympäristön lämpötila	5-40 °C
Paino (Takki)	1.30-1.45 kg
Paino (Housut)	1.00-1.20 kg

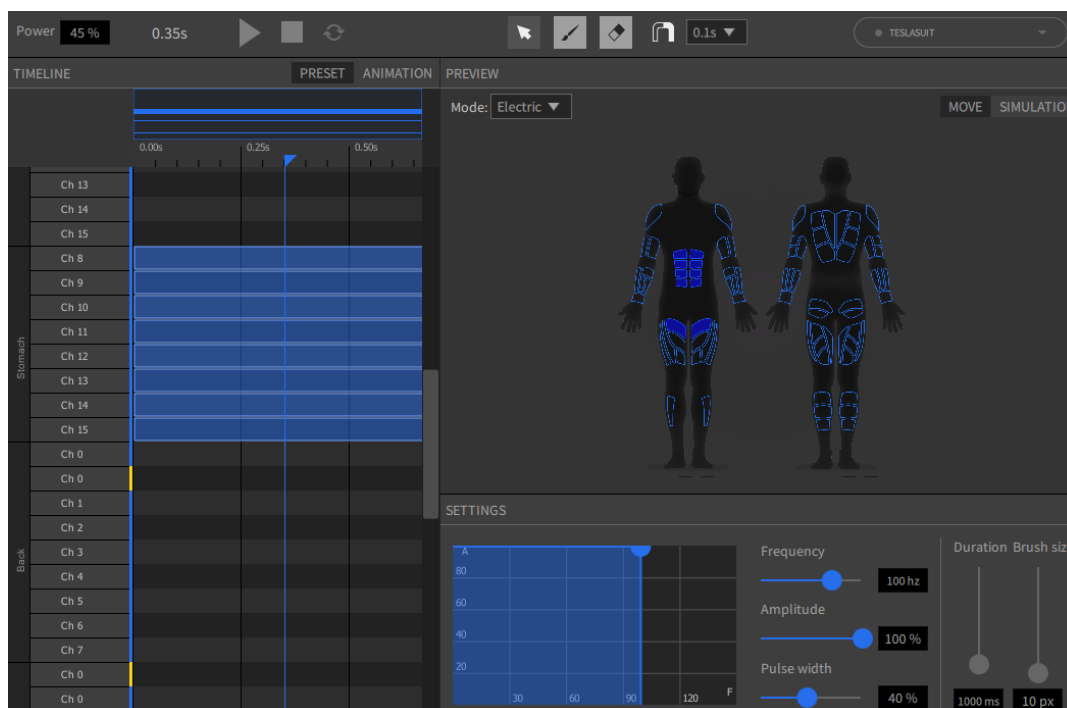
Taulukko 2. Teslasuit-puvun tarkempia ominaisuuksia puvun käyttöohjeista [42]

4 TESTAUSMENETELMÄT JA TESTIEN IMPLEMENTOINTI

Tässä luvussa esitellään tavat joilla pukua konkreettisesti testattiin ja miten testausmenetelmät implementoitiin.

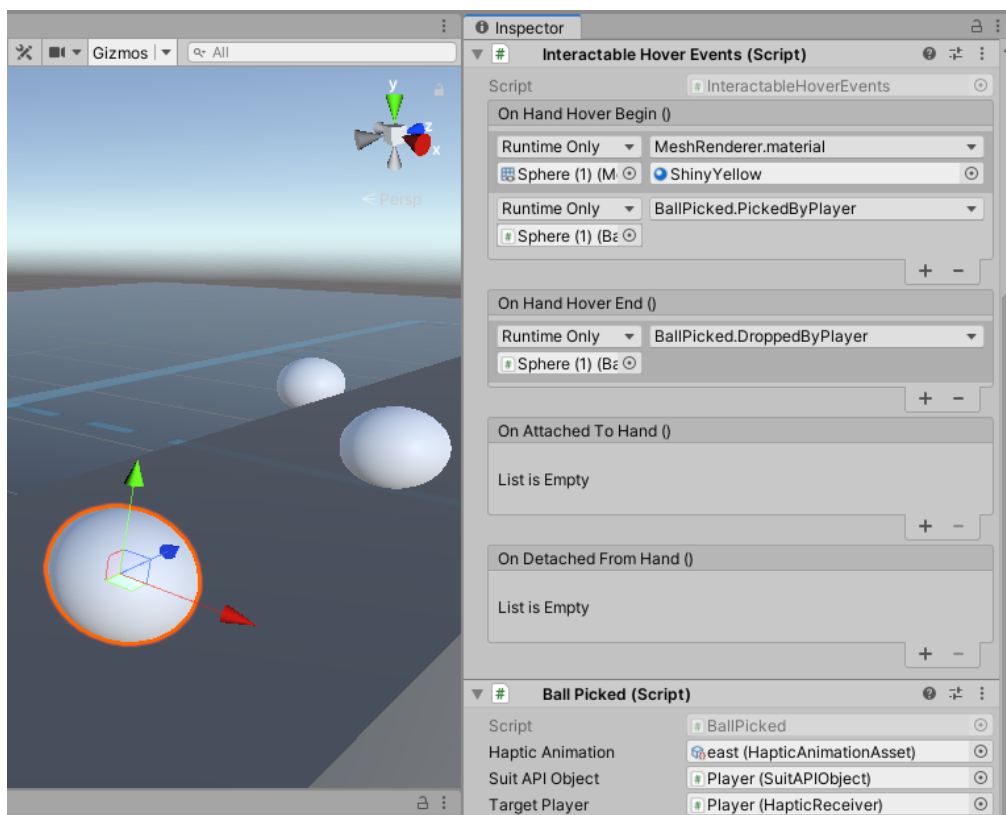
4.1 Suuntatesti

Testiperiodin aikana tehtiin Srikulwong ja O'Neill tutkimuksen [32] tyyppinen testi haptiselle puvulle, mutta keskitytään ainoastaan suuntatietoon. Haptic editorin avulla luotiin haptiset profiilit (kuva 5) puvun käyttöliittymälle jokaiselle ilmansuunnalle ja väli-ilmansuunnalle, eli yhteensä 8 eri profiilia kuten edellä mainitussa tutkimuksessa. Testin tarkoituksena on tutkia, miten hyvin käyttäjä pystyy erottamaan 8 eri suuntaa haptisen tuntuman perusteella eri puolilta kehoa. Testissä pohjoisella (north) tarkoitetaan käyttäjän näkökulmasta suuntaa suoraan eteenpäin, idällä käyttäjän näkökulmasta oikeaa kylkeä tai kättä. Väli-ilmansuunnat toteutettiin esimerkiksi lounaan tapauksessa puvun selkäpuolen vasempia ja vasemman käden haptisia kanavia. Jokaisen haptisen profiilin aktivoimat haptiset kanavat löytyvät liitteestä 1.



Kuva 5. ”North” profiili TeslaSuitin Haptic editor käyttöliittymässä

Jokainen haptinen animaatio kestää tasan yhden sekunnin ja jokainen yhden suunnan haptisista kanavista aktivoidaan samaan aikaan. Frekvenssi säädettiin 100 hertsiin ja amplitudi maksimiarvoon (100 %). Unityn puolella projektiin lisättiin Teslasuitin sivuilta ladattava Teslasuit-plugin Unitylle, jonka työkaluilla saatiin yhteys sovelluksen ja puvun välille. Haptisen palautteen aktivoimiseksi tulee ensin johonkin Unity-objektiin liittää ”SuitAPIObject” joka huolehtii puvun ja Unityn välille muodostettavasta yhteydestä: mitä yhteyden muodostumisen jälkeen tapahtuu ja mitä tapahtuu puvun yhteyden hävitessä. Sovellukseen lisättiin myös ”Haptic receiver” komponentti, jonka funktioiden avulla haptisia animaatioita voidaan toistaa yhdistettyyn pukuun. Kun yhteys pukuun on määritetty ja vastaanotin haptisten animaatioiden lukua varten löytyy, voidaan haptisia ominaisuuksia kutsuvia skriptejä lisätä muihin pelimaailman objekteihin. SuitApiObject ja HapticReceiver lisättiin Unityssä suoraan pelaajaan ja haptisia animaatioita toistettiin pelaajan vuorovaikutuksessa muiden objektien kanssa. Kuvassa 5 haptinen animaatio on liitetty Unityn ”Sphere” objektiin, ja haptinen animaatio toistetaan kytketyssä puvussa, mikäli pelaaja koskee virtuaalimaailmassa VR-ohjaimellaan tähän objektiin.



Kuva 6. Haptinen animaatio ”east” liitetty Unityn ”Sphere” 3d-objektiin.

VR-sovelluksen luomisessa käytettiin apuna Valve Softwarin luomaa SteamVR-pluginia [33], jonka avulla liikkuminen, VR-perspektiivi ja käyttäjän kädet voidaan luoda Unity-pohjaiseen VR-sovellukseen helposti.

Suuntatesti testautettiin kahdella koehenkilöllä, joille selitettiin ennen virtuaalimaailmaan siirtymistä testin tarkoitus ja ohjeet suuntien ilmaisemiseksi. Pääilmansuunnat esiintyvät testeissä ensin selkeyden vuoksi (suunnat 1–4) joiden jälkeen välittömästi väli-ilmansuunnat (suunnat 5–8). Suuntien järjestys oli: itä (East), etelä (South), pohjoinen (North), länsi (West), lounas (South-West), koillinen (North-East), kaakko (South-East) ja luode (North-West). Suuntien haptinen animaatio toistettiin pelaajan koskiessa suunnan haptiseen palautteeseen liitettyyn ”Sphere” objektiin, jotka oli sijoitettu vierekkäin korokkeelle virtuaalimaailmassa, jottei jokaista palautetta varten tarvitse kumartua tai olla hankalassa haptisen palautteen tuntuessa puvussa. Sovellus toteutettiin 6DoF-sovelluksena, jossa käyttäjä pystyy vapaasti liikkumaan fyysisellä pelialueella ja tarvittaessa siirtymään paikasta toiseen osoittamalla ohjaimella haluamaansa paikkaan virtuaalimaailmassa ja painamalla peukalon sauvaohjaimella eteenpäin. VR-laitteena käytettiin Valve Index virtuaalitodellisuus-järjestelmää [39], jonka kuvataajuus oli säädetty 120 kuvaan sekunnissa.

Edellä mainittu testi luotiin yksinkertaisella tavalla kytkemällä sovelluksen tapahtuma haptisen animaation toistoon, mutta Unity-liitännäinen tarjoaa myös mahdollisuuden lisätä pelin objekteihin ”Haptic Material Object” skriptin, jolloin puvun haptisia ominaisuuksia aktivoidaan suoraan käyttäjän kanssakäymisestä haptisen materiaalin sisältävän objektin kanssa. Tällöin puvun eri osia voidaan aktivoida esimerkiksi suoraan toisesta kädestä sen lähentyessä objektia tekemättä jokaiselle eri kosketustapahtumalle erikseen omaa animaatiota. Haptiset materiaalit koostuvat Haptic editorilla tehtävistä ”Haptic asetteista”, mutta omien haptic asettien liittäminen materiaaleihin ja näiden käyttäminen sovelluksessa ei puvun testauksen aikaikkunassa onnistunut. Unityn esimerkkimateriaalien haptisia resursseja ei myös pystynyt ladata editoriin tarkasteltaviksi, joten omien haptisten materiaalien tekeminen ja testaaminen jäi tämän testijakson yhteydessä tekemättä.

4.2 Liikkeentunnistus

Teslasuitin liikkeentunnistusominaisuuksia testattiin aluksi Teslasuitin Skeletool työkalulla, jonka avulla käyttäjän liikkeitä voidaan seurata reaaliajassa. 6-Axis ja 9-Axis tiloja molempia testattiin, mutta 6-Axis tilalla liikkeentunnistuksen todettiin toimivan paremmin. Puvun aluksi kalibroidaan seisomalla ”T-asennossa” kädet nostettuna sivuille, jonka jälkeen puvun liikkeenkaappausjärjestelmä projektoi kytketyn puvun liikkeet keskusyksikön kautta tietokoneruudulle. Työkalun avulla saatiin aluksi kuva liikkeenkaappausominaisuuksien tarkkuudesta, mutta testaamiseen Unityn puolella siirryttiin nopeasti. Kuvassa 7 liikkeenkaappausjärjestelmän seuranta tarkastellaan golf swingin yhteydessä.



Kuva 7. Liikkeentunnistusjärjestelmän seuranta Unityn kautta

Unityssä liikkeentunnistusta varten tulee lisätä ”Animator”-komponentti, jolle valitaan liikkeenkaappauksen esittävä hahmo (avatar). Tälle objektille lisätään ”Suit Mocap Skeleton”-skripti, jonka avulla muodostetaan yhteys puvun ja virtuaalihahmon välille. Puvun avulla voidaan ohjata virtuaalimaailman hahmoa vapaasti kolmen syvyyden vapausasteella (3DoF) [7]. Kolmen syvyyden vapausasteella tarkoitetaan käyttäjän kykenevän vaikuttamaan hahmon kiertoliikkeeseen paikallaan, muttei vaihtamaan

virtuaalimaailmassa paikkaa. Kuuden syvyyden vapaustasteella (6DoF) käyttäjä pystyisi vaikuttamaan myös hahmon paikkaan virtuaalimaailmassa kävelemällä esimerkiksi huoneessaan puku päällä paikasta toiseen. Tämä pystytään toteuttamaan myös Teslasuitilla esimerkiksi VR-järjestelmän avulla, jolla on mahdollisuus luoda pelitila laitteelle, jolloin käyttäjä voi vapaasti kävellä tilassaan liikutellen itseään samalla virtuaalimaailmassa.

5 TULOKSET

Puvun kanssa kehittäminen ja testaaminen koettiin hidastavan alussa työskentelyä merkittävästi, koska testauksen yhteydessä puvun pukeminen ja riisuminen veivät merkittävästi aikaa. Puku jatkuvasti päällä työskentelyä testattiin myös, mutta vaikka testaaminen nopeutui huomattavasti, ei pukua koettu niin hengittäväksi ja mukavaksi, että sen kanssa olisi pystytty yhtäjaksoisesti työskentelemään usean tunnin ajan. Haptista voimakkuutta pidettiin testauksen aikana normaalisti 40–60% välillä. Tämän välin koettiin tuottavan selkeää palautetta, mutta esimerkiksi lihaksen jäykistävä palaute ei tällöin tuntunut liian voimakkaalta.

Mitä puvun käyttökokemukseen tulee, puvun todettiin täyttävän Pacchioretti et al. määrittelemät [22] mittarit puettavuuden osalta:

- Puvun muoto ei häirinnyt käyttäjiä pukua käytettäessä.
- Puvun paino ei ainakaan tämän tutkimuksen laatijan tapauksessa aiheuta ongelmia käytön yhteydessä, puvun noin hieman alle kolmen kilon paino ei vaikuttanut merkittävästi puettavuuteen tai käyttöön sovelluksen yhteydessä.
- Puku ei estänyt merkittävästi käyttäjän liikehdintää pukua käytettäessä. Kokonainen golf swingi pystyttiin toteuttamaan ilman ongelmia pukua käytettäessä, eikä mikään puvun ominaisuus tai osa tullut liikehdinnän tielle.
- Noin puolen tunnin käyttöajan jälkeen puvun sisällä ei käyttäjä tuntenut suurempaa kiristystä tai epämukavuuden tunnetta. Iho hikoaa pukua käytettäessä luonnollisesti nopeasti käytön alettua, mutta tämä on tarpeellista haptisten ominaisuuksien toiminnan kannalta. Iho vastaanottaa sähköimpulssit puvun välityksellä paremmin hieman kosteana, ja tämä mainitaan myös Teslasuitin käyttöohjeissa [42].

Teslasuitin tarjoamat työkalut (Editor, Skeletool, ECG-viewer) koettiin nopeasti opittaviksi. Haptic editorin kanssa työskentely oli intuitiivista, mutta editorin käyttöä saattoi myös helpottaa aiempi tutustumisluontoinen kokemus FL-Studio [6] musiikintuottamis ohjelmaan, jonka pohjalta haptisten animaatioiden luominen ei tuntunut täysin uudelta rutiinilta. Haptisten kanavien ajattelu ”nuotteina” haptisen animaation aikana toimi hyvänä lähestymistapana animaatioiden suunnitteluun. Unity-liitännäisen kanssa

työskentely osoittautui haastavammaksi, koska raa'an dokumentaation lisäksi haastavampien komponenttien käyttöön ei ole saatavilla syvempää apua. Unity-liitännäisen tarjoamien edistyneempien moduulien todettiin edellyttävän hieman syvempää osaamista Unity-pohjaisten 3D-sovellusten työskentelyn kanssa.

Suuntatestin suorittivat kaksi henkilöä, joille puvun mitat olivat hieman reilut, mutta haptisia animaatioita kokeiltiin ympäri pukua ennen testiä, jotta varmistuttiin haptisten animaatioiden välittymisestä testihenkilölle puvun välityksellä. Puvun kanssa todettiin järkeväksi yleensä tehdä hieman kevyitä urheiluliikkeitä, koska puvun haptisten kanavien todettiin välittävän merkittävästi paremmin palautetta hieman kostuneelle iholle. Testitulokset on esitelty taulukossa 3. Molemmat testihenkilöt saivat jokaisen suunnan oikein, mutta toisella testihenkilöllä väli-ilmansuuntien erottaminen oli ensimmäisten kahden palautteen kohdalla epäselvää.

Testattava henkilö	E	S	N	W	SW	NE	SE	NW
Testihenkilö 1 vastaukset (vastausaika/sekuntia)	Itä (< 5 s)	Etelä (< 5 s)	Pohjoinen (< 5 s)	Länsi (< 5 s)	Lounas (< 5 s)	NE (< 5 s)	SE (< 5 s)	Luode (< 5 s)
Testihenkilö 2 vastaukset (vastausaika/sekuntia)	Itä (< 5 s)	Etelä (< 5 s)	Pohjoinen (< 5 s)	Länsi (< 5 s)	SW (< 10 s)	NE (< 10 s)	SE (< 5 s)	NW (< 5 s)

Taulukko 3. Tulokset suuntatestistä

Tuloksista voidaan päätellä Teslasuitin haptisen palautteen antavan tarkkaa palautetta eri puolille kehoa, josta käyttäjä pystyy selvästi erottamaan aktivoitujen kanavien sijainnin ihollaan ilman visuaalista palautetta ruudulta. Palaute tapahtuu välittömästi, kun Unity skripteihin asetetut haptiset animaatiot toistetaan sovelluksessa. Ongelmia Srikulwongin ja O'Neillin toteaman palautteen tunnistettavuuden [32] kanssa ei myöskään todettu, mikä saattaa johtua palautteen luonteesta. Vaikka palaute olisikin säädetty voimakkuuden osalta

alakanttiin, on sähköistä stimulaatiota iholla hankala olla erottamatta etenkin, jos puku on ollut päällä noin 15 minuutin ajan ja haptisten kanavien yhteys ihoon on parantunut. Tällöin todettiin, että käyttäjä todennäköisesti pystyisi erottelemaan suuntatestiäkin tarkemman, vielä kohdistetumman testin avulla esimerkiksi yksittäisten haptisten kanavien aktivoitumista. Liikkeentunnistuksen todettiin toistavan käyttäjän liikkeet todella nopeasti tietokoneruudulle, eikä viivettä havaittu käytön yhteydessä. Unityssä on mahdollista seurata jokaisen yksittäisen liikkeentunnistusnoodin tai noodien ohjaaman hahmon raajojen sijaintia erikseen virtuaalimaailmassa ja käyttäjän liikkeitä voidaan tämän perusteella esimerkiksi tallentaa myöhempää tarkastelua varten tai käyttää suoraan sovelluksessa osana käyttäjän muita keinoja antaa syötettä sovellukselle VR-laitteiston lisäksi.

6 POHDINTA JA YHTEENVETO

Päälle puettavien laitteiden merkittävä kehitys viime vuosina on tuonut markkinoille useita eri järjestelmiä immersion edistämiseksi virtuaalimaailmoissa. Nähtäväksi jää minkälaisen roolin vastaava laitteisto saa tulevaisuudessa. Testattavan tuotteen perusteella suurimmat mahdollisuudet saattavat löytyä yritysten toimesta koulutuskäytössä, urheilijoiden suoritusten valvontaan tai mahdollisesti loukkaantuneiden kuntoutuksessa. Viihdetarkoituksiin lihasta suoraan sähköllä aktivoiva puku saattaa monen mielestä olla liian aggressiivinen väline viestiä käyttäjälle virtuaalimaailman tapahtumista, mutta oikein käytettynä sopivassa yhteydessä mahdollisesti tehokas tapa parantaa immersiota. Puku itsessään mahdollistaa VR-sovellukselle käyttäjän koko vartalon tarkan liikkeenseurannan, jolloin esimerkiksi kyynärpäiden tai jalkojen sijaintia ei tarvitse arvioida tai veikata algoritmeilla BONEWORKS [3] VR-pelin tyyliin.

Käyttämällä Teslasuit-puvun haptisia ja liikkeenkaappausominaisuuksia yhdessä, voidaan puvun avulla pidemmällä kehitysajalla varmasti luoda erittäin mielenkiintoisia sovelluksia ja simulaatioita. Käyttäjän vartalon eri osien sijainnille virtuaalimaailmassa voidaan luoda rajat optimaalisen liikeradan säilyttämiseksi ja tämän pohjalta minkä tahansa liikettä sisältävän urheilulajin yhteydessä luoda liikkeenkaappauksen avulla ”puhdas” malli esimerkiksi golf swingille tai jalkapallon potkaisulle. Haptisia ominaisuuksia voidaan lisäksi asettaa ohjaamaan käyttäjän liikerataa suorituksen yhteydessä tai ilmaisemaan liikkeen ongelmakohdista. Liian taakse vedetyn golf swingin tai väärästä kulmasta lähtevän jalkapallon potkaisun tallentaminen ja korjaaminen puvun avulla esimerkksisuorituksiin verraten voi edesauttaa merkittävästi suoritusten parantamista.

Haptinen palaute tai puvun liikkeenkaappausominaisuudet ei kuitenkaan ratkaise VR-tekniikan yhtä suurimmista ongelmista: pidempien matkojen liikkumista virtuaalisessa 3D-maailmassa. Tämä ei koidu ongelmaksi vain pientä tilaa vaativissa 6-DoF sovelluksissa, jolloin käyttäjä voi liikkua vapaasti omassa fyysisessä tilassaan virtuaalimaailmassa. Pidempiä matkoja liikuttaessa joudutaan tekemään kehityksen puolella immersion vaikuttavia kompromisseja. Liikutaanko hyppäämällä paikasta toiseen ohjaimen avulla (teleporttaus), vai liikutaanko ”smooth-locomotion” tyyllillä työntämällä sauvaohjaimesta

eteenpäin, jolloin käyttäjän perspektiivi virtuaalimaailmassa liikkuu tasaisesti ohjattuun suuntaan. Erityisesti jälkimmäisen on todettu aiheuttavan simulaatiopahoinvointia [25] käytön yhteydessä etenkin, jos kokemusta virtuaalitodellisuudesta on rajatusti tai jos henkilöllä on ennestään taipumusta matkapahoinvoinnille. Ongelman ratkaiseminen ei ole kuitenkaan Teslasuitin tapaisen haptisen puvun tarkoitus. Sen tarkoitus on parantaa käyttäjän immersiota lisäämällä uusi tapa viestiä sovelluksen tapahtumia käyttäjälle tuntoaistiin vaikuttavalla palautteella, seurata käyttäjän liikkeitä rajatulla käyttöalueella ja kerätä tietoa käyttäjän kehon arvoista suorituksen yhteydessä. Käyttöympäristön kokoa voidaan tarvittaessa myös merkittävästi kasvattaa langattomalla VR-laitteistolla Teslasuitin ollessa täysin langaton laite itsessään.

Teslasuitin työkalujen pohjalta suunniteltiin ja luotiin yhdessä VR-järjestelmän kanssa toimiva testisovellus, jonka avulla käyttäjälle voitiin antaa uudenlaista palautetta virtuaalimaailmasta puvun välityksellä. Puvulla suoritettiin suuntaan perustuva testi, jonka avulla selvitettiin tuntoaistiin vaikuttavan palautteen tarkkuutta, sekä haptista palautetta sisältävän sovelluksen luomista kehittäjän näkökulmasta. Haptisten kanavien todettiin antavan tarkkaa palautetta kehon eri puolille ja lihaksia jännittävällä palauteella käyttäjän raajoja voitiin jopa liikuttaa rajatusti, vaikka haptinen voimakkuus olisi asetettu hillitysti 40-60% välille. Teslasuit-puvulla arvioitiin tutkimuksen perusteella olevan hyötyjä erityisesti simulaatioiden yhteydessä, koska palautteen nähdään toimivan erityisesti henkilön johdattelussa sovelluksessa tekemään simuloitu työtehtävä tai suoritus oikein. Viihdekäytössä sähköinen palaute koettiin jopa liian tunkeilevaksi käyttötarkoituksesta riippuen, mutta sopivassa sovelluksessa oikein säädettynä puvulla voidaan varmasti parantaa VR-kokemuksia entisestään.

Sovelluskehitys koettiin Teslasuitin työkalujen osalta intuitiiviseksi, mutta Unity-liitännäisen kanssa työskentely haastavaksi rajoitetun oppimateriaalin takia: Teslasuitin tapaiselle puvulle kehitykseen liittyvää kokemusta ei vielä suurilta massoilta löydy, joten apua verkosta löytyy rajatusti haptisten ominaisuuksien ohjelmointia varten. Liikkeentunnistusominaisuuksien ja haptisten ominaisuuksien hyödyntämisellä yhdessä todettiin paljon mahdollisuuksia eri käyttötarkoituksiin, joita Teslasuit yritys varmasti pyrkii kartoittamaan.

7 LÄHTEET

- [1] ARAIG As Real As It Gets: <https://araig.com/>. Accessed: 2020-08-19.
- [2] bHaptics: <https://www.bhaptics.com/>. Accessed: 2020-08-19.
- [3] BONEWORKS on Steam:
<https://store.steampowered.com/app/823500/BONEWORKS/>. Accessed: 2020-09-01.
- [4] Chuah, S.H.-W., Rauschnabel, P.A., Krey, N., Nguyen, B., Ramayah, T. and Lade, S. 2016. Wearable technologies: The role of usefulness and visibility in smartwatch adoption. *Computers in Human Behavior*. 65, (Dec. 2016), 276–284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.07.047>.
- [5] CUTE CIRCUIT | The HugShirt: <https://cutecircuit.com/the-hug-shirt/>. Accessed: 2020-06-15.
- [6] DAW Every Music Producer Loves: <https://www.image-line.com/>. Accessed: 2020-08-21.
- [7] Degrees of freedom | Google VR:
<https://developers.google.com/vr/discover/degrees-of-freedom>. Accessed: 2020-09-01.
- [8] Doms, M. and others 2004. The boom and the bust in information technology investment. *Economic Review-Federal Reserve Bank of San Francisco*. (2004), 19–34.
- [9] Full body haptic feedback & motion capture tracking VR suit:
<https://teslasuit.io/>. Accessed: 2020-06-02.
- [10] Grossman, T., Fitzmaurice, G. and Attar, R. 2009. A Survey of Software Learnability: Metrics, Methodologies and Guidelines. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2009), 649–658.
- [11] Guler, S.D., Gannon, M. and Sicchio, K. 2016. *Crafting Wearables: Blending Technology with Fashion*. Apress.
- [12] Happonen, A., Metso, L., Ojanen, V., Rissanen, M. and Kärri, T. 2019. Business model design elements for electric car service based on digital data enabled sharing platform. (2019).
- [13] Haptic system in TESLASUIT: 2017. <https://teslasuit.io/blog/teslasuit-haptic-feedback-system/>. Accessed: 2020-06-18.
- [14] Hardlight VR Suit - Don't Just Play the Game. Feel it.:
<https://www.kickstarter.com/projects/morgansinko/hardlight-vr-suit-dont-just-play-the-game-feel-it>. Accessed: 2020-08-19.
- [15] Holzinger, A. 2005. Usability engineering methods for software developers. *Communications of the ACM*. 48, 1 (Jan. 2005), 71–74. doi: <https://doi.org/10.1145/1039539.1039541>.

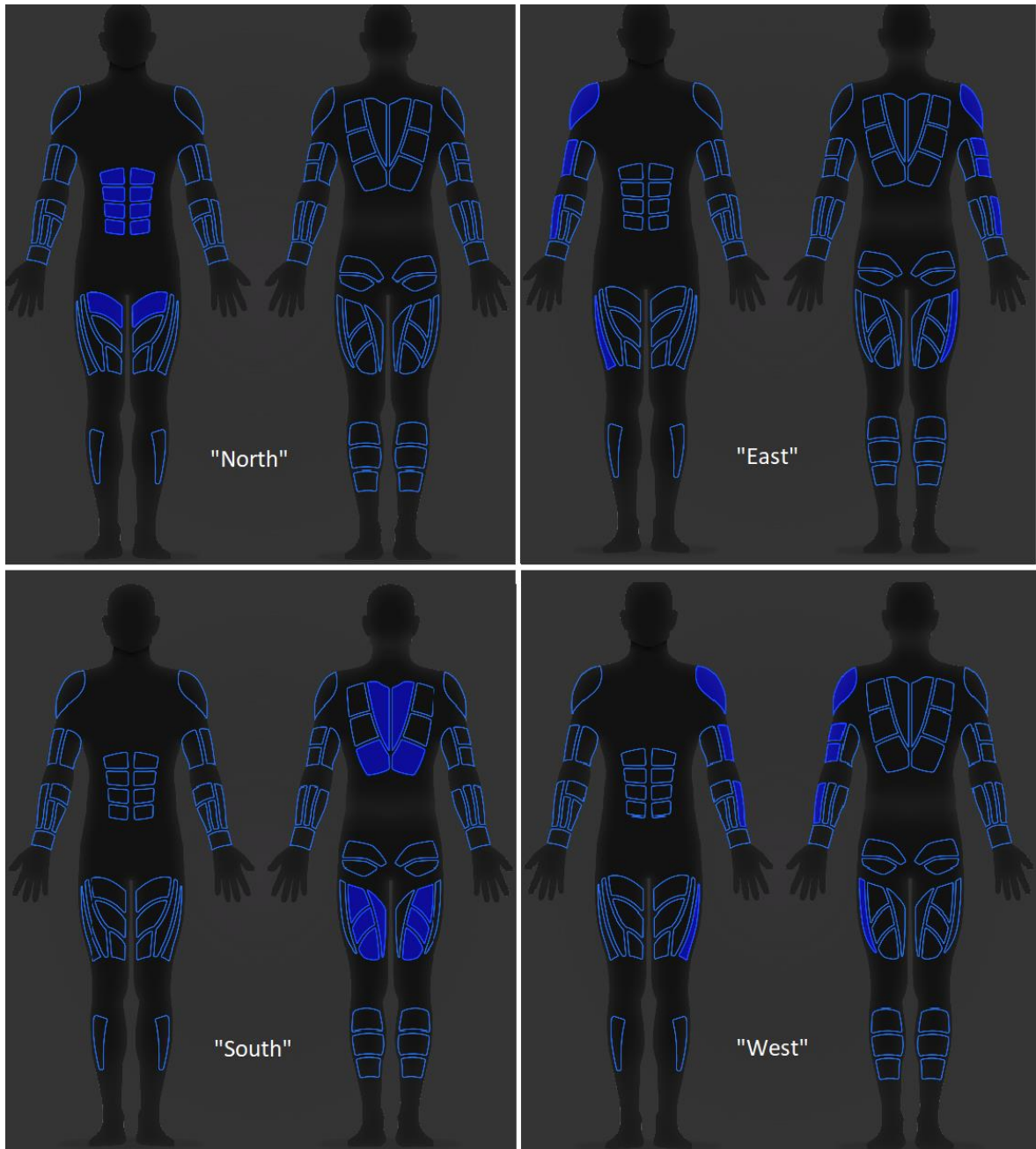
- [16] Kortelainen, H., Happonen, A. and Hanski, J. 2019. From Asset Provider to Knowledge Company—Transformation in the Digital Era. *Asset Intelligence through Integration and Interoperability and Contemporary Vibration Engineering Technologies* (Cham, 2019), 333–341.
- [17] Mbody 3 Kit: <https://www.myontec.com/product-page/mbody-3>. Accessed: 2020-06-02.
- [18] McCann, J. and Bryson, D. 2009. *Smart Clothes and Wearable Technology*. Elsevier.
- [19] Meli, L., Pacchierotti, C., Salviotti, G., Chinello, F., Maisto, M., Luca, A.D. and Prattichizzo, D. 2018. Combining Wearable Finger Haptics and Augmented Reality: User Evaluation Using an External Camera and the Microsoft HoloLens. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 3, 4 (Oct. 2018), 4297–4304. doi: <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2864354>.
- [20] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N. and Tachi, S. 2007. Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to Present Virtual Mass Sensation. *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies* (New York, NY, USA, 2007), 8–es.
- [21] Murakami, K., Kiyama, R., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M. 2013. Poster: A wearable augmented reality system with haptic feedback and its performance in virtual assembly tasks. *2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (Mar. 2013), 161–162.
- [22] Pacchierotti, C., Sinclair, S., Solazzi, M., Frisoli, A., Hayward, V. and Prattichizzo, D. 2017. Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives. *IEEE Transactions on Haptics*. 10, 4 (Oct. 2017), 580–600. doi: <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2689006>.
- [23] Piili, H., Widmaier, T., Happonen, A., Juhanko, J., Salminen, A., Kuosmanen, P. and Nyrhilä, O. 2012. Digital design process and additive manufacturing of a configurable product. *2012 International Conference on Advances in Material Science and Engineering (AMSE 2012)*, 27 - 28.09.2012, (2012).
- [24] Pulsar LED Watches - The Official Time Computer Digital Wrist Watch Website: <http://www.oldpulsars.com/>. Accessed: 2020-08-30.
- [25] Rangelova, S., Decker, D., Eckel, M. and Andre, E. 2018. Simulation Sickness Evaluation While Using a Fully Autonomous Car in a Head Mounted Display Virtual Environment. *Virtual, Augmented and Mixed Reality: Interaction, Navigation, Visualization, Embodiment, and Simulation* (Cham, 2018), 155–167.
- [26] Salazar, S.V., Pacchierotti, C., Tinguy, X. de, Maciel, A. and Marchal, M. 2020. Altering the Stiffness, Friction, and Shape Perception of Tangible Objects in Virtual Reality Using Wearable Haptics. *IEEE*

- Transactions on Haptics*. 13, 1 (Jan. 2020), 167–174. doi:
<https://doi.org/10.1109/TOH.2020.2967389>.
- [27] Salmela, E., Happonen, A., Hirvimäki, M. and Vimm, I. 2015. Is Time Pressure an Advantage or a Disadvantage for Front End Innovation – Case Digital Jewelry. 3, (2015), 42–69. doi:
https://doi.org/10.24840/2183-0606_003.004_0005.
- [28] Schiffman, H.R. 1976. *Sensation and perception: An integrated approach*. John Wiley & Sons.
- [29] Seymour, N.E., Gallagher, A.G., Roman, S.A., O’Brien, M.K., Bansal, V.K., Andersen, D.K. and Satava, R.M. 2002. Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance. *Annals of Surgery*. 236, 4 (Oct. 2002), 458–464.
- [30] Shultz, L. Larry Shultz Videogames’ Virtual Reality Wearables: Aura Interactor www.larryshultz.net].
- [31] Smart sock v2.0 & Sensoria Core: <http://store.sensoriafitness.com/smart-sock-v2-0-sensoria-core/>. Accessed: 2020-08-19.
- [32] Srikulwong, M. and O’Neill, E. 2011. A Comparative Study of Tactile Representation Techniques for Landmarks on a Wearable Device. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (New York, NY, USA, 2011), 2029–2038.
- [33] SteamVR Plugin | Integration | Unity Asset Store: <https://assetstore.unity.com/packages/tools/integration/steamvr-plugin-32647>. Accessed: 2020-08-05.
- [34] TENS (transcutaneous electrical nerve stimulation): 2017. <https://www.nhs.uk/conditions/transcutaneous-electrical-nerve-stimulation-tens/>. Accessed: 2020-06-22.
- [35] TESLASUIT - Advanced training software for VR and AR analytics: <https://teslasuit.io/software/>. Accessed: 2020-08-03.
- [36] TN Games | Touch For The Virtual World: <https://tngames.com/products>. Accessed: 2020-07-09.
- [37] Transcutaneous Electrical Nerve Stimulation (TENS) vs Electrical Muscle Stimulation (EMS): <https://www.omron-healthcare.fi/en/health-and-lifestyle/pain-management/managing-pain/transcutaneous-electrical-nerve-stimulation-tens-vs-electrical-muscle-stimulation-ems.html>. Accessed: 2020-07-09.
- [38] Unity Real-Time Development Platform | 3D, 2D VR & AR Engine: <https://unity.com/>. Accessed: 2020-08-31.
- [39] Valve Index: <https://store.steampowered.com/valveindex/>. Accessed: 2020-08-29.
- [40] Wang, D., Guo, Y., Liu, S., Zhang, Y., Xu, W. and Xiao, J. 2019. Haptic display for virtual reality: progress and challenges. *Virtual Reality &*

- Intelligent Hardware*. 1, 2 (Apr. 2019), 136–162. doi:
<https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2019.0008>.
- [41] What Is MIDI? How To Use the Most Powerful Tool in Music: 2020.
<https://blog.landr.com/what-is-midi/>. Accessed: 2020-08-20.
- [42] *Teslasuit User Guide Version 4.5.4*. VR Electronics Ltd 2019.

LIITE 1. Suuntatestin haptiset profiilit

Pääilmansuunnat



LIITE 1. (jatkoa)

Väli-ilmansuunnat

