



SAVONIA

3D-ÄÄNEN HAVAINNOINNIN TESTAUS VIRTUAALITODELLI- SUUDESSA

TEKIJÄ/T: Aapo Karjalainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Tietotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Aapo Karjalainen			
Työn nimi 3D-Äänen havainnoinnin testaus virtuaalitodellisuudessa			
Päiväys	23.5.2019	Sivumäärä/Liitteet	25/0
Ohjaaja(t) Lehtori Mikko Pääkkönen, Lehtori Mikko Laasanen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Kuava Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tavoitteena oli luoda sovellus kolmiulotteisen (3D) -äänien havainnoinnin testaukseen virtuaalitodellisuudessa Oculus Rift-virtuaalitodellisuus lasilla ja Oculus Touch-ohjaimilla käytettäväksi. Sovelluksen piti toteuttaa testattavalle henkilölle A/B tyylinen valintatesti, jossa testattiin testihenkilön omaa pään siirtofunktiota ja mallinukelle luotua pään siirtofunktiota kuuntelemalla valittuja ääniä satunnaisista suunnista pään ympärillä.</p> <p>Sovelluksen piti kerätä aineistoa testihenkilön pään liikkeistä sekä äänen tulosuunnan havaitsemisen tarkkuudesta ja nopeudesta kahden pään siirtofunktion välillä. Sovellus tuotti testistä syötettyjen äänien ja havainnointiajan avulla kategorisoidun aineiston, josta voitiin jälkikäteen analysoida pään siirtofunktioiden toimivuuden eroja yksilöiden välillä.</p> <p>Sovellus luotiin Unity-pelimoottorilla, joka todettiin soveltuvaksi alustaksi pään siirtofunktion testaamiseen sopivien äänimoottorin liitännäisten sekä virtuaalitodellisuussovelluksien tuen perusteella. Unity-pelimoottori on myös yksinkertainen ja nopea tapa kehittää käyttöliittymä testisovellukselle.</p> <p>Käyttöliittymän ulkoasuun ei käytetty paljon aikaa, koska ylimääräisten ärsykkeiden määrä kuuntelutestissä haluttiin mahdollisimman pieneksi. Sen sijaan keskityttiin siihen, että saatiin tarkkaa tietoa testattavan henkilön pään liikkeistä äänen alkaessa kuulua, sekä kulmatarkkuudesta soitetun äänen ja havaitun äänen välillä.</p> <p>Projektin lopputuloksena saatiin virtuaalitodellisuussovellus, jolla pystyi suorittamaan testihenkilöille A/B testauksen kahden päänsiirtofunktion välillä ja luomaan siitä numeerisesti tulkittavan aineiston. Työssä ei otettu kantaa testeistä saatuihin tuloksiin, tai niistä tehtyihin johtopäätöksiin.</p>			
Avainsanat Pään siirtofunktio, 3D-ääni, Unity, Oculus Rift, A/B testaus			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Information Technology			
Author(s) Aapo Karjalainen			
Title of Thesis 3D Audio Perception Testing in Virtual Reality			
Date	23 May 2019	Pages/Appendices	25/0
Supervisor(s) Mr. Mikko Pääkkönen, Senior Lecturer; Mr. Mikko Laasanen, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Kuava Oy			
<p>Abstract</p> <p>The objective of this thesis was to create a virtual reality application for testing 3D audio perception accuracy with Oculus Rift virtual reality glasses and Oculus Touch controllers using the Unity game engine. The application was designed to run a choice (A/B) test for the test subject, where the subject's own head-related transfer function (HRTF) was compared to an HRTF created for a dummy head. The actual test was performed using selected audio tracks played from random directions for different HRTFs.</p> <p>The application collects information on the test subject's head movements during the test. The accuracy and speed of pointing the sound source is compared to the actual sound source location given by the game engine. The accuracy and speed data are collected during the test between different HRTFs. After the test, the collected data can be used for the comparison of different HRTF accuracy.</p> <p>The virtual reality application was created with the Unity game engine, which was selected for its audio extensions supporting HRTFs and support for virtual reality applications. Unity also has a simple and effective interface for creating the user interface in the application.</p> <p>The appearance of the user interface was not on the focus, since the aim was to test audio perception. In such case the amount of visual stimuli was kept as low as possible. Instead of making a detailed user interface, most of the project work was spent on creating ways to accurately measure and collect data on the test subject's head movements and further, collect data for the accuracy and speed of the audio perception.</p> <p>The result of the thesis was an application which could accomplish an A/B test comparing the effects of two different HRTFs. The application created a result file from the test, which then could be used for further speed and accuracy analysis. The thesis did not take a stand on the analysis and conclusions from the actual listening test results.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Head-related transfer function (HRTF), 3D Audio, Unity, Oculus Rift, A/B testing</p>			

ESIPUHE

Kiitos ohjauksesta, tuesta ja kärsivällisyydestä Mikko Pääkköselle ja Matti Maliselle.

Kuopiossa 23.05.2019

Aapo Karjalainen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	TEORIA	9
2.1	Päänsiirtofunktio	9
2.2	3D-äänentoisto.....	10
2.3	A/B testaus	11
3	TYÖKALUT JA TEKNIIKAT.....	12
3.1	Unity.....	12
3.2	Oculus Rift	13
3.3	SofaSpatializer.....	15
4	TOTEUTUS	16
4.1	Suunnittelu.....	16
4.2	Unity projektin luonti	17
4.3	Käyttöliittymä.....	17
4.4	Testin ääniraidat	18
4.5	Testisilmukka.....	19
4.6	Kerättävä aineisto	20
4.7	Testaus	21
5	YHTEENVETO	22
5.1	Ongelmat	22
6	POHDINTA.....	23
	LÄHTEET.....	24

TERMIT JA LYHENTEET

HRTF

Head-related transfer function, eli pään siirtofunktio on funktio, joka määrittelee kuinka pää, hartiat ja korva suodattavat eri suunnista korvakäytävän suulle tulevaa ääntä. HRTF on kullakin ihmisellä erilainen johtuen edellä mainituista kehon dimensioista ja ominaisuuksista.

Unity

Unity Technologies yrityksen julkaisema pelimoottori, joka julkaistiin vuonna 2005. Unity mahdollistaa audiovisuaalisen kehityksen erilaisissa 2D ja 3D sovelluksissa.

3D-ääni

3D-ääni on tapa toistaa ääntä kaiutinjärjestelmillä tai kuulokkeilla, jossa äänilähde saadaan sijoitettua mielivaltaiseen paikkaan kolmiulotteisessa avaruudessa. Esimerkiksi ääni saadaan kuulumaan kuunteelijan takaa tai yläpuolelta.

A/B testaus

A/B testaus tarkoittaa testausta, jossa verrataan samaa tilannetta muuttaen testattavaa muuttujaa ilman, että testattava tietää kumpaa hän testaa. Tämä testaus tapa poistaa ennakoasetelmaa testauksessa.

JSON

JavaScript Object Notation eli JSON on avoimen standardin tiedostomuoto, jota käytetään paljon esimerkiksi verkkoliikenteessä yksinkertaisuutensa ja levittyneisyytensä takia.

C#

Microsoftin kehittämä ja julkaisema oliopohjainen ohjelmointikieli

Oculus Rift

Oculus VR -nimisen yhtiön kehittämät virtuaalidellisuuslasit, jotka julkaistiin vuonna 2016

Oculus Touch

Oculus Rift virtuaalidellisuus lasien kanssa käytettäväksi luotu liikeohjain

SofaSpatializer

Liitännäinen 3D-äänen kuunteluun kuulokkeilla.

SOFA

Spatially Oriented Format for Acoustics eli SOFA on Audio Engineering Society standardisoima tiedostoformaatti, jota käytetään esimerkiksi pään siirtofunktioiden ja huoneimpulssien käyttämiseen. (Sofaconventions 2018)

Assetti

Pelikehityksessä käytetty termi sisällölle kuten äänitiedostot ja 3D-mallit

Skripti

Peliin liitettävä komentosarja

Geneerinen HRTF

Mallinukelle kaiuttomassa huoneessa mitattu pään siirtofunktio

Personoitu HRTF

Joko kaiuttomassa huoneessa mitattu tai laskennalla tuotettu pään siirtofunktio, jossa yksilön pään ja olkapäiden geometria otetaan huomioon.

Collider (Unity)

Unity pelimoottorin ominaisuus oliolle, jonka pintaan osuneita muita olioita tai säteitä voidaan käyttää jonkun toiminnan tekemiseen.

VR

Virtuaalitodellisuus, eli tietokonesimuloitu maailma (Virtual Reality)

1 JOHDANTO

Työssä luotavan työkalun tarkoitus on saada luotua yhteismitallisia ja vertailukelpoisia tuloksia siitä, miten testattava henkilö pystyy havaitsemaan tuntemattomia äänen tulosuuntia virtuaalitodellisuudessa käyttäen erilaisia pään siirtofunktioita kuulokekuuntelussa.

Työkalu on Unity-pelimootorilla luotu sovellus, jossa kuuntelija tuodaan virtuaalitodellisuuteen Oculus Rift-virtuaalitodellisuuslasien sekä Oculus Touch-ohjaimen avulla. Testi itsessään on A/B testausta, eli kuuntelijalle soitetaan kahta näytettä, toinen koehenkilön omalla pään siirtofunktiolla ja toinen mallinukelle mitatulla pään siirtofunktiolla. Näytteitä soitetaan haluttu määrä satunnaisessa järjestyksessä satunnaisista suunnista. Testihenkilön pitää osoittaa ohjaimella suuntaan, josta hän äänen havaitsee.

Työkalun tarkoitus on tuottaa nopeasti ja yhteismitallisesti tarkkaa tietoa siitä, miten testattava henkilö havaitsee hänelle soitettavan äänen suunnan. Kerättävästä tiedosta voidaan tulkita esimerkiksi havaitsemisen nopeutta, havaitun ja soitetun äänen suunnan kulmaeroa, sekä tapaa, jolla testihenkilö varmentaa itselleen havaitsevansa äänen tulevan tietystä suunnasta. Tuloksien perusteella voidaan sitten esittää eroavaisuuksia testihenkilön oman ja mallinukelta mitatun pään siirtofunktioiden välillä.

Eri henkilöiden suorittamat testit ovat yhteismitallisia, sillä testissä kerättävä tieto on ainoastaan nopeus- ja paikkatietoa äänilähteestä eri siirtofunktioiden välillä. Kuuntelijan muut henkilökohtaiset ominaisuudet eivät vaikuta testin tulokseen. Paikkatiedon tarkkuus saadaan vertaamalla havaitun äänilähteen paikkaa Unityn antamaan oikeaan äänilähteen paikkaan.

2 TEORIA

3D-äänen tuottamiseen kuulokkeilla kuunneltavaksi on nykyään monenlaisia työkaluja klassisesta stereo panoroinnista, eli äänen jakamisesta tietyllä tavalla oikean ja vasemman kuulokkeen välillä virtuaalikaiuttimilla monikanavaäänitteen (ambisonisen äänitteen) toistamiseen. Vaihtoehtoinen ja huomattavasti tarkempi tapa tuottaa 3D-ääntä on pistelähtöinen ääni, joka toistetaan kuulokkeisiin pään siirtofunktioista luodun suodattimen kautta. Tämä tapa vaatii paljon laskentatehoa, että ääni saadaan tuotettua ilman viivettä esimerkiksi pelatessa videopelejä.

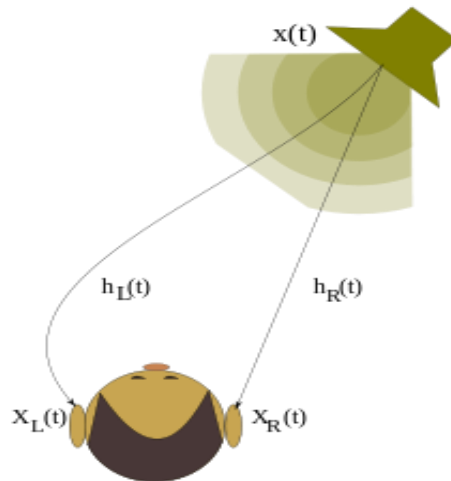
Ihminen on oppinut kuulemaan äänen suuntaa ja etäisyyttä tiettyjen kehon muotojen ja niistä aiheutuvien tasoerojen ja viiveitten avulla. Näitä ovat esimerkiksi korvien välinen etäisyys, josta syntyy pieni viive saapuvalle äänelle, sekä äänen heijastumat olkapäistä ja kehon yläosasta, jotka auttavat paljastamaan tuleeko ääni ylhäältä vai alhaalta päin. Korkeammilla taajuuksilla kuin 4kHz myös korvan lehden muodot vaikuttavat suuntahavaintoon. (Burgess 1992.)

Testin kannalta olennaisena tutkimuskohtana personoidun pään siirtofunktion toimivuuden osoittaminen ja sen vertaaminen mallinukelle mitatusta pään siirtofunktioon. Lisäksi testin tarkoituksena on tuottaa tietoa siitä, miten pään liike ja miten äänen suodattaminen pään liikkeen suhteen vaikuttaa 3D-äänen havaitsemiseen.

2.1 Päänsiirtofunktio

3D-ääntä ja sen toistamista on tutkittu paljon ja sen ongelmiin (äänen eksternalisaatio, etu- ja takasuunnan sekoittaminen ja äänen elevaatio) on yritetty löytää vastausta (Potisk 2015). 3D-ääntä on luotu esimerkiksi nauhoittamalla kaksikanavaista ääntä asettamalla mikit nauhoittajan korviin ja siitä tuotettuun nauhoitukseen tallentuu silloin nauhoittajan kehon, pään ja korvien heijastumiset. Tämä ei kuitenkaan tuo kaikille oikeanlaista tilan ja eksternalisaation kokemusta, koska ihmisten päät ja kehot ovat erimuotoisia ja kaikki ovat oppineet kuulemaan omilla korvillaan.

Head-related transfer function (HRTF) eli pään siirtofunktio on funktio, joka ottaa huomioon pään, hartioiden sekä korvan vaikutuksen, kun ääni tulee eri suunnista. Pään siirtofunktio kuvaa tapaa, jolla ihminen havaitsee äänen tulosuuntaa oikeassa maailmassa. Esimerkiksi ääni, joka kuuluu ohi kulkevasta bussista, kulkee eri reittiä ja eri aikaan kumpaankin korvaan kuten alla olevassa kuvassa (Kuva 1) on esitetty. Näitten viive ja tasoerojen avulla ihminen pystyy tarkasti havaitsemaan sekä etäisyyttä, että äänen suuntaa. (Potisk 2015.)



Kuva 1. Pään siirtofunktio

Perinteinen tapa saada pään siirtofunktio on mennä kaiuttomaan kammioon, laittaa mikrofonit korvakäytävän suulle, soittaa halutun taajuusalueen kattavia pyyhkäyksiä ja mitata niistä syntyvät signaalit. Nämä pyyhkäykset toistetaan halutulle määrälle suuntia ja vasteet kerätään kokoelmaksi, jossa on jokaista vaaka ja korkeus suuntaa vastaava suodatin kummallekin korvalle. Tällä tavalla luodaan myös geneerisiä HRTF:iä, jotka ovat mallinuden päälle mitattuja suodattimia. (Bomhardt 2017.)

Toinen tapa pään siirtofunktion luomiseen on laskea se numeerisesti reunaelementti-menetelmällä. Tähän tarvitaan tarkka 3D-malli yksilön päästä ja korvista sekä suuri määrä laskentatehoa (Otani 2006). Tässä tavassa etuna olisi se, että kuluttajat ja äänialan ammattilaiset pystyisivät saamaan oman personoidun pään siirtofunktion etsimättä kaiuttomia huoneita ja kalliita kaiutin mittaus järjestelmiä. Yksi seuraavista haasteista virtuaaliodellisuuden realistisuudessa on äänen toistaminen uskottavasti ja tarkasti. OculusVR:n tutkimusjohtaja Michael Abrash:in (2016) mukaan "*Viiden vuoden päästä pystyt helposti ja nopeasti saamaan personoidun pään siirtofunktion omassa kodissasi*".

2.2 3D-äänentoisto

3D-ääntä voidaan luoda monella eri tavalla. Niistä yleisin toistaiseksi on monikanavaiset kaiutinjärjestelmät koti- ja leffateattereissa, joissa ääni ohjataan tietyllä tavalla miksattuna tulemaan eri suunnista. Tässä tavassa ongelmia ovat tilan tarve ja kalliit laitteet sekä asentamisen vaikeus. Eräs uusi ja mielenkiintoinen tapa tuottaa 3D-ääntä on äänipalkki teknologia, jossa toistamiseen käytetään yksittäistä kaiutin palkkia, joka simuloi monikanavaista kaiutinjärjestelmää ottamalla huoneen huomioon (Dolby Blog 2018).

Kuulokkeilla on jo pitkään toistettu 3D-ääntä, mutta yleisimmän muodon eli stereo pannauksen avulla vaikutelma saadaan liikkumaan vain horisontaalitasossa ja tuotettu ääni kuulostaa tulevan pään sisältä. Tästä seuraava askel on ollut nauhoittaa ääni suoraan korviin asetetuilla mikeillä, jolloin

pään siirtofunktio esiintyy nauhoituksessa itsessään, kun se toistetaan kuulokkeilla miksattuna stereo nauhoitukseksi (Zhang 2017).

Virtuaalitodellisuuden tuomien haasteitten myötä 1970-luvulla keksitty ambisoniikka on tullut mukaan 3D-äänien toistoon. Siinä ääni on miksattu virtuaalikaiutinjärjestelmälle, josta se voidaan toistaa joko kaiutinjärjestelmällä tai kuulokkeilla luomalla virtuaalikaiuttimia (Waves 2017).

Tietokoneiden laskentatehon kasvaessa vaihtoehdoksi reaaliaikaiseen 3D-äänentoistoon on tullut äänen suodattaminen pään siirtofunktiolla. Esimerkiksi videopelissä käyttäjä voi nähdä ylilentävän helikopterin ja kuulla sen tuottaman äänen kuulokkeilla pään siirtofunktiolla suodatettuna, jolloin vaikutelman pitäisi olla kuin se lentäisi oikeasti pään yläpuolella. Tässä haasteena on tarpeeksi tar- kan ja personoidun pään siirtofunktion luominen ja sen siirtäminen pelin äänentoistoon.

Iso askel kohti pään siirtofunktion käytön yleistymistä on tuki sille erilaisissa ohjelmistoissa niin kulut- taja- kuin ammattilaiskäytössä. Kolmannen osapuolen digitaalisten työasemaohjelmistojen (DAW) lii- tännäisiä (Esimerkiksi NoiseMakers Binauralizer, Harpex-X) löytyy jo nyt moneen äänialan ammattilais- työkaluun kuten Pro-tools ja Reaper. Kuluttajakäytössä personoitua pään siirtofunktiota ei vielä ole yleisesti. Kokeiluja esimerkiksi OpenAL Soft kirjastolla on kokeiltu, jolla pystyy suodattamaan esimer- kiksi Amnesia: The Dark Descent pelin ääniä pään siirtofunktiolla. (WildCat 2016.)

2.3 A/B testaus

A/B testaus on testauksen muoto, jossa testihenkilölle esitetään satunnaisesti valittua näytettä. Tätä testausmuotoa käytetään esimerkiksi verkkosivujen käytettävyyden testauksessa (Kohavi, Longbot- ham 2015). A/B testaus poistaa ennakoasetelmia ja testattava pystyy todenmukaisesti valitsemaan luontaisen tai toimivan vaihtoehdon.

Opinnäytetyön testauksessa muuttujana oli pään siirtofunktio. Testissä testattavalle soitettiin satun- naisesta suunnasta ääninäytettä, joka soitettiin satunnaisesti joko geneerisellä tai personoidulla pään siirtofunktiolla. Näin saatiin mitattua testattavan henkilön kykyä paikallistaa äänilähde eri suodattimilla. Mittaamalla montaa eri muuttujaa, kuten nopeutta, tarkkuutta ja ensimmäisiä pään liikkeen suuntia voitaisiin tuloksia tutkimalla tutkia eroja geneerisen ja personoidun suodattimen välillä.

3 TYÖKALUT JA TEKNIIKAT

Työ toteutettiin Unity-pelimoottorilla luoden virtuaalitodellisuussovellus käytettäväksi Oculus Rift-virtuaalitodellisuuslaseilla ja Oculus Touch-ohjaimella. Käyttöliittymä luotiin Unityn omilla työkaluilla, lisäksi testissä käytettävät ääninäytteet luotiin Unityn oman äänimoottorin kautta. Ohjelmointikielenä sovelluksessa käytettiin C#-kieltä ja kehityksessä käytettiin Visual Studio 2017 Community ohjelmistoa.

Eryisesti projektin mahdollisti pään siirtofunktioita tukeva äänimoottorin liitännäinen. Kerätty tieto kasattiin JSON-muotoiseen kokoelmaan, joka pystyttiin siirtämään jatkotutkimuksiin. Valmis sovellus pystyttiin pakkaamaan itsenäiseksi ohjelmistoksi, jota pystyy käyttämään millä vain työasemalla, jolla on tehoa suorittaa virtuaalitodellisuutta.

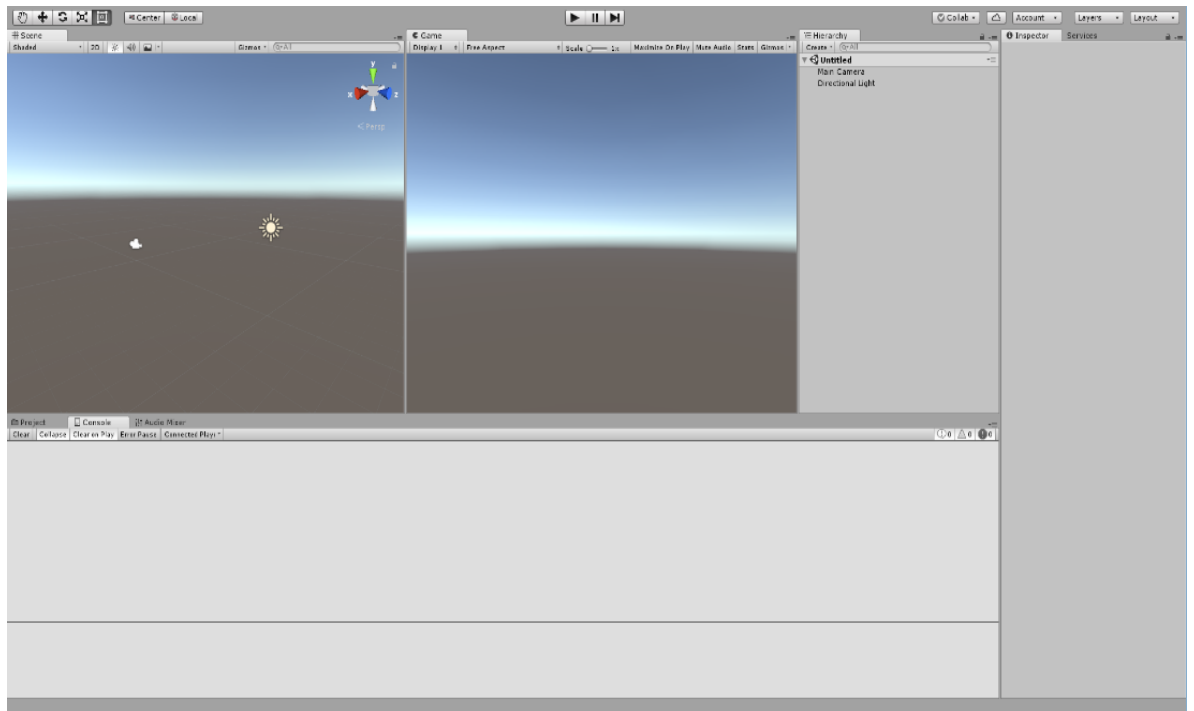
3.1 Unity

Unity on Unity Technologiesin kehittämä ja julkaisema pelimoottori. Sitä käytetään pääasiassa kaksi- ja kolmiulotteisten pelisovelluksien luomiseen. Unityä käyttävät sekä isot että pienet peliyhtiöt ja se tarjoaa lisenssejä sovelluskehittäjille.

Unity kehitysalustana on yksinkertainen ja käyttäjäystävällinen. Sen työkaluihin kuuluu muun muassa niin sanottu Editori, eli graafinen muokkaustila (Kuva 2), jossa voidaan käyttöliittymän kautta asettaa ja liikutella luotavan sovelluksen maailmaan erilaisia objekteja kuten 3D-malleja tai tekstuureja. Nämä asetukset ja muokkaukset muuttuvat pelimoottorin sisällä automaattisesti koodimuotoon.

Unityssä resursseja nimitetään asseteiksi, jotka ovat siis sovellukseen tai peliin lisättävää sisältöä kuten ääni tai tekstuuri. Resurssien tuominen pelimoottoriin on yksinkertaista ja Unity tukee isoa määrää yleisempiä tiedostomuotoja. Näistä olennaisia työn kannalta ovat äänitiedostot kuten WAVE(WAV), joka on Microsoftin ja IBM:n kehittämä audioformaatti. Assetteja voi liittää peliobjekteihin, joka mahdollistaa esimerkiksi tässä sovelluksessa äänilähteen luomisen satunnaiseen paikkaan ja siihen liitetävän testissä tarvittavan ääniraidan.

Unityn pääohjelmointikieliä ovat C# ja UnityScript, joista jälkimmäisen tuki on päättymässä (Unity Technologies Blog, 2017). Työ tehtiin Unityn vakaalla versiolla 2017.2.



Kuva 2. Unity-pelimoottorin näkymä. Unityn versio 2017.2. PC:llä

3.2 Oculus Rift

Oculus Rift virtuaalitodellisuuslasit saivat alkunsa Palmer Luckey:n kiinnostuksesta virtuaalitodellisuuteen. Hän keräili pitkään erilaisia laseja, mutta ei löytänyt etsimäänsä, joten päätti tehdä sellaiset itse. Prototyyppiä tehdessään hän törmäsi John Carmackiin, joka on peliteollisuuden legenda. He löysivät virtuaalitodellisuuslaseissa jotain yhteistä ja pian Carmack olikin jo E3 elektroniikkamessuilla esittelemässä erästä Luckeyn prototyyppiä. (Tech Crunch 2014.)

Vuonna 2012 perustettiin OculusVR ja se keräsi Kickstarter yleisörahoitus kampanjallaan yli 2,4 miljoonaa dollaria (Kickstarter 2012). OculusVR julkaisi ensimmäisen version kehittäjäntason virtuaalitodellisuuslaseja vuonna 2013 ja toisen version vuonna 2014. Vuonna 2014 Facebook osti Oculuksen 2 miljardilla dollarilla. (Arstechnica 2014).

Oculus Rift virtuaalitodellisuuslasit (Kuva 3) julkaistiin kuluttajille 2016. Työssä Oculus Rift on tärkeässä asemassa tuottamassa tietoa testattavan henkilön pään sijainnista, asennosta sekä liikkeestä. Oculus Rift pystyy kolmiulotteisessa tilassa tarjoamaan nämä kaikki tiedot USB-yhteydellä tietokoneeseen liitetyiden infrapuna sensoreiden avulla. Sensoreitten tuottama tieto saadaan Unityn ja Oculuksen tarjoaman työkalukirjaston avulla testisovellukseen.



Kuva 3. Oculus Rift-virtuaalitodellisuuslasit

Oculus Touch-ohjaimet (Kuva 4) ovat Oculus Riftin lisälaitteet, jotka mahdollistavat käsien liikkeen paikantamisen ja käyttäjän painallusinformaation lisäämisen virtuaalitodellisuuteen. Ne julkaistiin 2016 vuoden loppupuolella ja käyttävät Oculus Riftin kanssa samoja infrapunasensoreita. Ohjaimia käytettiin työssä käyttöliittymässä navigoimiseen ja varsinaisessa kuuntelutestissä äänen paikantamispäätöksen ilmoittamiseen.



Kuva 4. Oculus Touch-ohjaimet

3.3 SofaSpatializer

SofaSpatializer on työssä käytetyn äänimoottorin liitännäinen, joka otti vastaan pelimoottorilta äänilähteen ja kuuntelijan sijainnin koordinaatistossa ja suodatti äänen käyttäen hyväksi päänsiirtofunktiota. Liitännäinen pystyy käyttämään pään siirtofunktioita Audio Engineering Society standardisoidussa SOFA formaatissa. (Sofa Spatializer 2018.)

Liitännäinen vastaanottaa Unityssä ajettavasta virtuaaliodellisuudesta äänilähteiden ja kuuntelijan koordinaatit ja laskee suunnan, josta ääni tulee kuuntelijaa kohti. Tästä tiedosta voidaan ääntä suodattaa ottamalla suuntaa vastaava pään siirtofunktio, jolla toistettavan äänen stereotoistoon lisätään viivettä ja tasoeroja korvien välille.

Testissä äänentoistossa puuttuu äänen aikaiset ja myöhäiset heijastukset, jotka voisi luoda liittämällä Unityyn esimerkiksi Steam Audio tai WWise äänikirjasto toistamaan ääntä. Näillä kirjastoilla ei vielä testin luonnin aikaan ollut tukea pään siirtofunktiolle, joten niitä ei voinut käyttää.

4 TOTEUTUS

Idean synnyttyä testityökalusta ensin piti suunnitella minkälainen testi tuottaisi tieteellisesti hyväksyttävää ja tarkkaa aineistoa äänilähteen havaitsemisesta avaruudessa. A/B tyylinen testaus oli ennakoasenteiden poistamiseksi oleellinen valinta. Kuunneltavat äänet ja testausprotokollan suunnittelu olivat olennaisia projektin aikatavoitteen ja luotettavuuden kannalta. Piti myös määrittellä mitä tietoa testistä kerättäisiin.

Työn aloittaminen jo aiemmista projekteista tutuksi käyneellä Unityllä oli yksinkertaista ja prototyyppi testauksesta syntyi asetetussa aikataulussa. Yksinkertainen käyttöliittymä oli nopea tehdä Unityn omilla työkaluilla luomalla sovelluksen alunäkymään aloitusnappi ja yksinkertainen testisilmukka. Oculus Riftin ja Touchin käyttöönottoon piti Unityyn lisätä Oculuksen tarjoama ohjelmointirajapinta, jonka pystyi ilmaiseksi lataamaan Oculuksen sivuilta kehitystarkoituksiin.

Testiin sisältyi loppujen lopuksi kolme erilaista ääntä, joita kuunneltiin 50 kertaa. 25 kertaa testihenkilön omalla HRTF:llä ja loput geneerisellä HRTF:llä satunnaisessa järjestyksessä. HRTF:t oli normalisoitu signaalin magnitudin puolesta, ettei niitä voisi erottaa äänenvoimakkuuden perusteella. Testin lopuksi sovellus tallensi tulokset JSON-muodossa järjestettynä äänen ja aikaleiman perusteella. Nämä tulokset pystyttiin sitten lukemaan ja tulkitsemaan erikseen luodulla Python skriptillä ja piirtämään kaavioita esimerkiksi katseen liikkeestä äänen alettua soimaan.

4.1 Suunnittelu

Testisovelluksen suunnittelu lähti siitä, että päätettiin alusta, jolla sovellus kehitettäisiin. Kehitysalustaksi tuli Unity ja käyttöjärjestelmäksi Windows 10. Testaukseen tarvittiin myös pään sijainnin ja liikkeen seuranta. Tähän löytyi ratkaisu Oculus Rift virtuaalitodellisuusjärjestelmästä, jonka pystyi helposti liittämään kehitysalusta Unityyn.

Testaustyyppiksi valikoitui paljon kuuntelutesteissä käytetty A/B testaus, jossa saadaan vähennettyä testattavan henkilön ennakoasenteita oman ja geneerisen HRTF:n välillä. Haasteita suunnittelussa olivat testiprotokollan määrittely ja kuunneltavien äänien valinta. Piti luoda uusi tapa testata HRTF:iä ja luoda tieteellisesti hyväksyttävää aineistoa.

Käyttöliittymän suunnittelu toi esille tärkeän kysymyksen: Miten testihenkilö valitsee suunnan, josta hän havaitsee äänen? Vaihtoehdoista karsiutui kaksi kokeilemisen arvoista vaihtoehtoa: Osoittaminen Oculus Touch-ohjaimella ja katsomalla suuntaan, josta havaitsee äänen tulevan. Molemmat vaihtoehdot tuntuivat suunnittelun aikana testattavilta ja yksinkertaisesti toteutettavilta.

Suunnitteluvaiheessa sovittiin, että sovellus kerää testin aikana tietoa monesta eri muuttujasta. Näitä olivat esimerkiksi testattavan henkilön pään sijainti, katseen suunta ja pään asento kolmiulotteisessa avaruudessa. Lisäksi kerättävään aineistoon piti lisätä tieto soitetun äänen sijainnista sekä testattavan henkilön valitsema paikka tai suunta, josta hän havaitsi äänen tulevan. Jokaisesta äänen soittokerrasta tulisi syntyä yksi tietopaketti.

4.2 Unity projektin luonti

Unity projektia luodessa aloitettiin tyhjästä oletusarvoilla luodulla 3D sovellusprojektilla. Seuraavaksi piti muokata äänimootoria lisäämällä siihen SofaSpatializer liitännäinen. Tämä onnistui lisäämällä lähdekoodista käännetty Dynamic-link library(.DLL) tiedosto assetiksi projektin liitännäishakemistoon ja valitsemalla se Unityn työkalusta AudioManager kohdasta "Spatializer Plugin". (Edit->Project Settings->Audio) Samalla työkalusta piti muuttaa "System Sample Rate" eli äänen näytetaajuus vastamaan testissä käytettävien HRTF:ien näytetaajuutta, joka oli tässä tapauksessa 48000 Hz.

Oculus Rift laitteiden liittämiseksi sovelluksiin piti ensin ladata Oculusin tarjoama Unity ohjelmistorajapintakirjasto(Software Development Kit eli SDK) ja tuoda se sovellukseen käyttäen Unityn työkalua "Import Custom Package".(Assets->Import Package->Custom Package) Tämä mahdollistaa sovelluksen käyttäen Oculus Rift-virtuaalitodellisuuslaseja näyttönä ja Oculus Touch-ohjaimen käytön käyttöliittymässä.

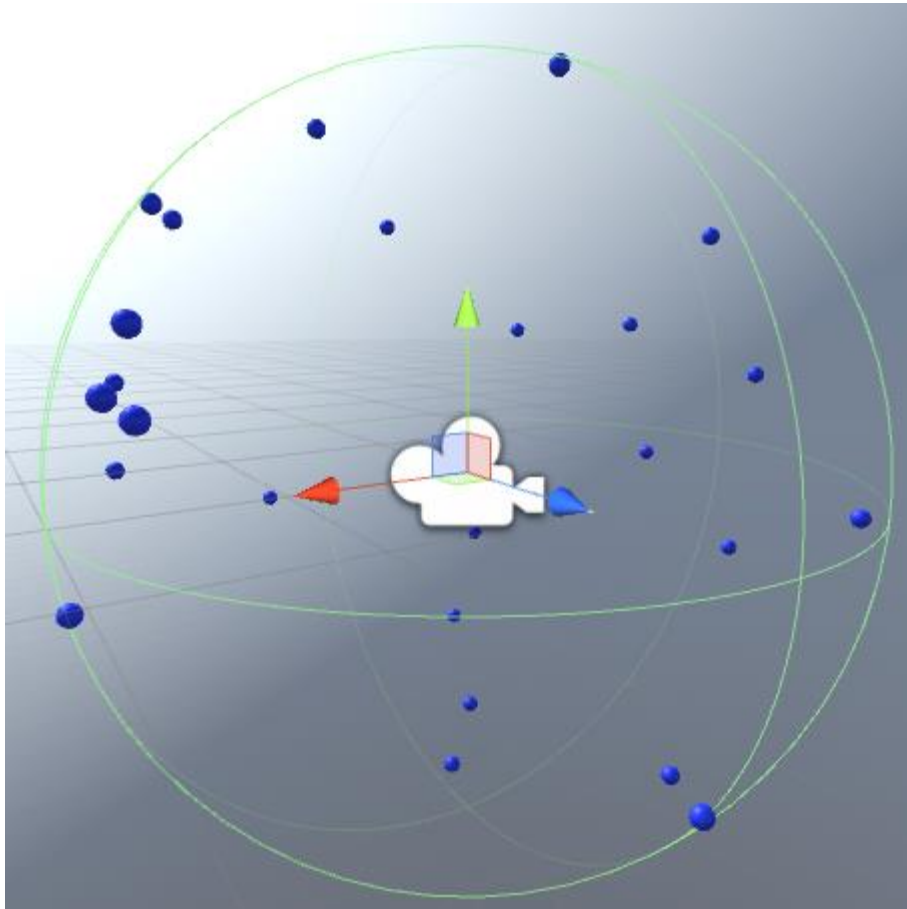
Projektiin tuotiin testissä käytettävät äänitiedostot .wav tiedostomuodossa. Niitten liittäminen äänilähteisiin hoitui Unityn oman "Audio Source" työkalun avulla. Testissä käytettävä geneerinen HRTF tuotiin myös projektin assetteihin, koska se ei vaihdu testihenkilöiden välillä. Testattavan henkilön oma HRTF voitiin valita sovelluksen alkuvalikkoon luodulla tiedostovalitsimella.

4.3 Käyttöliittymä

Käyttöliittymän luonti aloitettiin luomalla Unityn omilla työkaluilla aloitusvalikko. Tähän valikkoon kuului tiedoston valitsija testattavalle HRTF:lle, testin aloitusnappi sekä asetusnappi, josta avautui testiin liittyvät asetukset.

Ulkoasullisesti käyttäjä on vaalean pallon sisällä, jossa saa jonkinlaisen käsityksen ylä- ja alasuunnasta, mutta visuaalinen ärsyke on mahdollisimman pieni. Käyttäjälle näkyy myös leijuva ristikko, josta käyttäjä pystyy havaitsemaan etusuunnan. Oculus Touch-ohjaimen paikalla virtuaalitodellisuudessa näkyy myös hologrammainen käden kuva, joka liikkuu ja pyörii käden mukana. Kädestä lähtee myös osoitin, joka on Unityn "Line Renderer"-työkalulla luotu osoitinkeppi.

Äänilähteen paikan arpomiseen ja paikallistamisen valintaan käytettiin Unityn "Sphere Collider" työkalua (Kuva 5). Sen avulla luotiin pallo, jonka sisällä testihenkilö on ja pystyy osoittamaan pisteeseen sen pinnalla, josta havaitsee äänen tulevan.



Kuva 5, Vihreä pallo kuvaa pintaa, jota käytetään sekä äänilähteitten arpomiseen, että osoitetun suunnan tulkitsemiseen 3D pisteeksi.

Äänilähteen paikallistamiseen suunniteltiin ja toteutettiin kaksi tapaa: Touch ohjaimella osoiteltavalla osoitinkepillä tai katsomalla siihen suuntaan, josta havaitsee äänen tulevan ja painamalla Touch-ohjaimen liipaisinta. Näistä lopulliseen testityökaluun valikoitui osoitinkeppi siksi, että se on yksinkertainen, käyttäjäystävällinen ja tarkempi tapa ilmoittaa suuntaa. Tämä tapa myös mahdollistaa testitavan rajoittamista muilla tavoilla kuten ohjaamalla testihenkilö olemaan pyörittämättä päätänsä ollenkaan. Rajoittamalla testattavan pään liikettä voi testata eroja äänen havainnoinnin suuntatarkkuudessa, kun jätetään pois ihmiselle luonnollinen pään kääntely ääntä etsiessään.

4.4 Testin ääniraidat

Testiin valittiin kolme erilaista ääntä. Pelimaailmaan viittaava askellusääni, laajataajuuskaistainen vaa-leanpunainen kohina sekä rumpukomppi. Nämä äänet toistettiin Unityn pelimoottorin äänimoottorilla suodattamalla niitä äänilähteen ja kuuntelijan sijainnin suhteen pään siirtofunktiolla SofaSpatializer liitännäisellä.

Valitsemalla erilaisia ääniä saadaan tutkittua, pystyykö tietyn tyyppistä ääntä havaitsemaan helpommin pään siirtofunktiolla suodatettuna. Haasteena äänen toistamisessa oli se, että kuuntelu tapahtui teoriassa kaiuttomassa tilassa, jolloin ihmisen äänen paikallistamiseen käyttämät aikaiset ja myöhäiset heijastukset tilasta jäivät pois. Tämän vaikutus pitää ottaa huomioon tuloksien tarkastelussa.

4.5 Testisilmukka

Testi alkaa testihenkilön valittua testattava HRTF tiedostovalitsijalla ja aloitusnäkyvässä näkyvää aloitusnappia osoittamalla ja painamalla nappia Oculus Touch-ohjaimessa. Tämän jälkeen sovellus arpoo generisen ja testattavan HRTF:n väliltä jomman kumman ja alkaa soittamaan ensimmäistä ääntä.

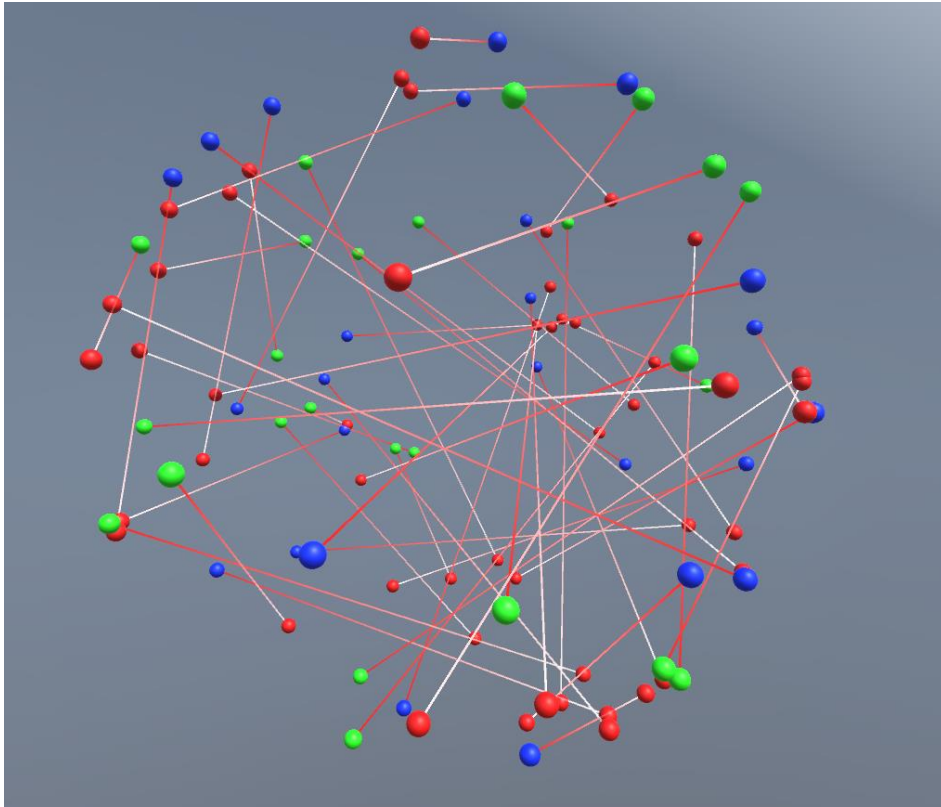
Äänilähteen sijainti arvotaan valitsemalla satunnainen piste testattavan henkilön pään ympäriltä joka kerta samalta etäisyydeltä. Äänilähteen ja pään suhteellinen sijainti piti ottaa huomioon ja pitää samana, ettei testihenkilö voi liikkua äänilähdettä kohti varmistaakseen suuntaa äänenvoimakkuuden kasvaessa. Tätä kompensoitiin liikuttamalla äänilähdettä samassa suhteessa pään kanssa, pitämällä samalla etäisyys ja suunta samana pään rotaatiosta huolimatta.

Testihenkilö ohjeistetaan ääntä kuullessaan osoittamaan Oculus Touch-ohjaimella käyttöliittymässä näkyvän osoittimen avulla suuntaan, josta hän havaitsee äänen tulevan ja painamaan Touch ohjaimen liipaisinta suunnasta varmistuttuaan. Valittuaan suunnan testi arpoo uudelleen käytettävän HRTF:n ja uuden sijainnin äänelle pitäen kuitenkin kirjaa siitä montako kummallakin HRTF:llä on soitettu, jotta molemmille HRTF:lle tulee saman verran aineistoa jokaisella ääninäytteellä.

Kun ääni on paikallistettu 50 kertaa, käyttäjälle näytetään välitilanne luomalla pallopilvi saaduista tuloksista alla olevan kuvan (Kuva 6) tavalla. Tässä pallopilvessä näytetään käyttäjälle erilaisilla palloilla mistä ääni on tullut, minne käyttäjä on paikallistanut äänen ja kummalla pään siirtofunktiolla ääntä on soitettu. Yhden tuloksen pallojen välille piirretään myös viiva, joka havainnollistaa yhteyden yhden soitettun äänen ja havaitun äänen välillä.

Seuraavaksi käyttäjän pitää painaa välituloksen näkymisen kanssa ilmestynyttä nappia jatkaakseen testiä, jolloin seuraavat 50 tulosta saadaan eri ääninäytteellä. Kaikkien kolmen ääninäytteen jälkeen testihenkilölle ilmoitetaan testin päättyneen ja tuloksista kerätään aineisto, joka tallennetaan JSON muotoon jälkikutkintaa varten.

Testissä helposti muokattavia muuttujia ovat testin pituus muuttamalla vaadittujen paikallistuksien määrää ja testattavien ääninäytteiden vaihdettavuus. Näitä kaikkia pystyi muuttamaan aloitusvalikon asetukset -kohdassa.



Kuva 6, testattavalle näytettävä pallopilvi testin päätteeksi

4.6 Kerättävä aineisto

Koko sovelluksen tarkoitus on tuottaa numeerisesti tulkittavaa aineistoa kahden pään siirtofunktion eroista pisteäänilähteen paikantamisessa. Tämä toteutettiin testisilmukkaa varten luodussa skriptissä. Testin alettua tiedot mahdollisista muuttujista, joita voisi jälkikäteen verrata, tallennetaan skriptissä listaan, joka testin loputtua muutetaan JSON muotoon ja tallennetaan tiedostoon.

Koska tarpeeksi samanlaista tutkimusta tai työkalua ei löytynyt, piti tutkittavat muuttujat keksiä kokeilemalla ja testaamalla. Kiinnostavia tutkinnan kohteita olivat pään liike, alkuperäisen äänilähteen ja havaitun äänen sijainnit sekä aika, jossa äänilähde paikannettiin. Näitä kaikkia arvoja kerättiin jokaisen soitetun äänen kohdalla ja niistä luotu aineisto oli testin tulos.

Jokaista arvoa voitiin jälkepäin verrata geneerisen ja personoidun HRTF:n välillä laskemalla keskiarvoja ja -hajontaa. Jatkokäsittelynä tulokset monen eri henkilön testeistä voidaan koostaa yhdeksi tietomassaksi, jolle voidaan tehdä tarkempaa analyysiä äänilähteen paikannuksesta isomman otoksen osalta.

4.7 Testaus

Sovellusta sai testattua kehityksen aikana nopeasti Unityn niin sanotussa pelitilassa, jossa projektin pystyi kehitysalustan sisällä kääntämään toimivaksi sovellukseksi. Tämä mahdollisti ketterän kehityksen ilman että muutokset ja uudet toiminnot tarvittiin kääntää erilliseksi sovellukseksi. Kehityksen aikana esimerkiksi testissä haluttavien tuloksien määrä oli pieni ja testattavia ääniä oli vain yksi. Testauksen aikana luodut tulokset autoivat määrittämään sovelluksen lopullisia kerättäviä muuttujia ja niistä voitiin tehdä alustavia tulkintoja testin luotettavuudesta ja toimivuudesta.

Sovelluksen kehityksen loppuvaiheessa ohjelmaa testattiin kehityksen ulkopuolisilla henkilöillä, joilla oli oma personoitu HRTF. Tällä testauksella kerättiin havaintoja testauksen käyttäjäystävällisyydestä sekä saatiin alustavia testituloksia. Nämä testit autoivat säätämään lopullista käyttöliittymää ja testi-protokollaa paremmaksi. Esimerkiksi osoittimen ja katseella osoittamisen välille tehtyyn päätökseen vaikuttivat kyseiset testit. Tässä vaiheessa sovellus käännettiin jo erilliseksi sovellukseksi, jota pystyi kokeilemaan muuallakin kuin kehitysympäristössä.

Testauksen perusteella sovellus todettiin toimivaksi, jonka jälkeen sillä pystyi suorittamaan testejä personoidun HRTF:n omaaville henkilöille ja analysoimaan testistä saadusta aineistosta eroja personoidun ja geneerisen HRTF:n välillä. Näiden analyysien tuloksia ei tässä työssä esitetä, sillä ne ovat tämän työn aiheen ulkopuolella.

5 YHTEENVETO

Projekti saatiin toteutettua onnistuneesti. Lopputuloksena syntyi sovellus, joka pystyi toteuttamaan A/B tyyllisen testin, josta saadusta aineistosta voidaan tulkita eroja personoidun ja geneerisen pään siirtofunktion toiminnasta 3D-äänien tulosuunnan havaitsemisessa. Sovelluksen luomasta aineistosta pystyi myös tulkitsemaan tapaa, jolla testihenkilö etsi äänilähdettä pyörittämällä päätään ja kääntämällä toisen korvan äänilähdettä kohti.

Tärkeä osa projektia oli hyvin laadittu suunnitelma sovelluksen ominaisuuksille ja vaatimuksille. Aikaisempi kokemus Oculus Rift-laseista ja Touch-ohjaimista helpottivat sovelluksen luomista merkittävästi. Työhön valittu kehitysympäristö mahdollisti sovelluksen nopean kehityksen ja sekä Unityn että Oculuksen työkalut takasivat hyvän toimivuuden. Itse sovellus taas mahdollisti tarkan ja tieteellisen aineiston keräämisen annettuun tehtävään.

5.1 Ongelmat

Haastavinta projektissa oli projektin suunnittelu. Kuuntelutestejä ja tutkielmia löytyi eri vuosikymmeniltä, mutta vastaavanlaista sovellusta ja testiä tai testijärjestelmää ei ollut tehty. Tämä loi haasteen kehittää sovellus, joka on tarkka ja luotettava ja joka testaa olennaisia asioita. Sovelluksen luonnissa ei otettu huomioon äänen laatua tai väriä, eikä äänen sijoittumista pään ulkopuolelle. Nämä kaikki ovat olennaisia oikeanlaisen 3D-äänien tuottamisessa. Pääpaino sovelluksessa oli äänilähteen lokalisointi, eli äänilähteen paikallistamiseen käytetty aika sekä paikantamisen tarkkuus.

Virtuaalitodellisuuslasien käyttö ei myöskään ole vielä kovin yleistä, joten oikeanlaisen ohjeistuksen luominen testihenkilölle oli haastavaa. Testihenkilö saattaa ensimmäistä kertaa astua virtuaalitodellisuuteen, jolloin testaukseen liittyy häiriötekijöitä kuten virtuaalitodellisuudesta johtuva outous ja joskus myös laitteiden ja kuulokkeiden epäsopivuus testattavan henkilön päähän.

Käyttöliittymässä haastavinta oli keksiä tavat toteuttaa havaitun suunnan valinta virtuaalitodellisuudessa. Oculus Touch ohjainten käyttöön oli kuitenkin paljon esimerkkejä ja Oculuksen oma dokumentaatio ohjaimen rajapinnasta oli selkeä. Hyvä keksintö tähän oli luoda toteutuksessa mainittu sisään-päin käännetty pallo, jonka pintaan pystyi osoittamaan ja saman pallon pinnalle pystyi asettamaan äänilähteitä, jolloin osoitettu piste ja äänilähde olivat samalla pinnalla.

Haasteita syntyi myös valittaessa testiin sopivia ääninäytteitä. Tutkimukset samoista aiheista käyttivät hyvin erilaisia ääninäytteitä, mutta projektissa lähdettiin etsimään sekoitusta käytännönläheisistä, että tutkimuksissa hyväksi todetuista näytteistä.

6 POHDINTA

3D-ääni itsessään on jo vanha käsite, mutta vasta viime vuosina sen tuottamiseen vaadittava laskentateho on kasvanut riittävän suureksi aidon 3D-äänen tuottamiseen. Projektissa käytetyn koneen näyttöohjain ja keskusyksikkö olivat todella tehokkaat, joka mahdollisti samaan aikaan sekä virtuaalitoellisuuden simuloinnin, että tiläänen tuottamisen HRTF:iä käyttämällä. 3D-äänen ja varsinkin HRTF:n käyttötarkoitukset tulevaisuudessa piilevät etenkin peliteollisuudessa. Jo tällä hetkellä esimerkiksi Counter-Strike: Global Offensive videopelissä on käytössä HRTF suodatin ja ehkä tulevaisuudessa siihen pystyy lisäämään myös oman personoidun HRTF suodattimen. Tämä tosin vaatii sen, että personoituja HRTF:iä pystytään tuottamaan jokaiselle henkilölle.

Projekti itsessään oli kiinnostava ja erikoinen. Tehtyä ohjelmaa pystyisi jo käyttämään geneerisen ja personoidun HRTF:n väliseen testaukseen, mutta tarkasteltavien muuttujien ja testiympäristön yksinkertaistamiseen tulisi käyttää vielä aikaa. Tulisi esimerkiksi tutkia eri vaihtoehtoja rajoittaa testattavan henkilön liikettä sekä virtaviivaistaa testiprotokollaa. Testattavia ääninäytteitä pitäisi myös tutkia. Ääninäytteet tulisi olla monipuolisia, esimerkiksi puhetta, kävelyn ääniä, vaaleanpunaista kohinaa tai matalaa rummutusta. Myös suoraan tietyn taajuisten äänien paikantamista voisi testata. Tästä voisi tulkita mitkä taajuusalueet ovat helpommin tai vaikeammin havaittavissa ja löytyykö niissä eroja geneerisen ja personoidun HRTF:n kautta suodatettuna.

Sovelluksen luonti ja projekti kokonaisuutena antoi sopivan haasteen kehittää osaamista käyttöliittymän ja testaustyökalun luonnissa sekä mahdollisuuden tutustua syvemmin Oculus Rift-laseihin ja Oculus Touch ohjaimen. Hyvän suunnitelman luomisen tärkeys tuli myös selväksi projektin aikana. Se mahdollisti nopean kehityksen sekä tavoitteen säilymisen ja aikataulussa pysymisen.

Mielestäni testisovellus onnistui hyvin ensimmäiseksi kaltaisekseen ja keskittyisin tulevaisuudessa vielä enemmän testattavan henkilön ohjeistukseen ja häiritteijöiden poistamiseen. Käyttöliittymäratkaisu erityisesti oli mielestäni erittäin toimiva, koska se mahdollisti yksinkertaisen ja helpon tavan toteuttaa jokseenkin puuduttava ja yksitoikkoinen kuuntelutesti. Myös testikuuntelijat totesivat kehitetyn sovelluksen ja itse testin toimivaksi.

LÄHTEET

UNITY BLOG 2017. Unity-pelimoottorin UnityScript tuki. [Viitattu 24.04.2019.] Saatavissa:

<https://blogs.unity3d.com/2017/08/11/unityscripts-long-ride-off-into-the-sunset/>

TECH CRUNCH 2014. Oculusun lyhyt historia. [Viitattu 24.04.2019.] Saatavissa:

<https://techcrunch.com/2014/03/26/a-brief-history-of-oculus/>

KICKSTARTER 2012. Oculus Rift Kickstarter. [Viitattu 24.04.2019.] Saatavissa:

<https://www.kickstarter.com/projects/1523379957/oculus-rift-step-into-the-game>

ARSTECHNICA 2014. Facebook ostaa Oculusun. [Viitattu 24.04.2019.] Saatavissa:

<https://arstechnica.com/gaming/2014/03/facebook-purchases-vr-headset-maker-oculus-for-2-billion/>

SOFA SPATIALIZER 2018. Työssä käytetty äänimoottorin liitännäinen. [Viitattu 24.04.2019.] Saatavissa:

<https://version.aalto.fi/gitlab/puomio1/SofaSpatializer>

SOFACONVENTIONS 2018. SOFA tiedostoformaatti. [Viitattu 24.04.2019.] Saatavissa:

https://www.sofaconventions.org/mediawiki/index.php/SOFA_specifications

BURGUESS, David A. 1992. Techniques for low cost spatial audio. [Viitattu 21.5.2019.] Saatavissa:

<https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/3664/92-09.pdf>

OCULUS CONNECT 3 2016. Personoitu hrtf kotona. [Viitattu 21.5.2019.] Saatavissa:

<https://www.youtube.com/watch?v=AtyE5qOB4gw>

OPENAL SOFT HRTF 2016. Personoitu HRTF Amnesia: The Dark Descent pelisse. [Viitattu 21.5.2019.] Saatavissa:

<https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=219885915>

WAVES 2017. Ambisoninen ääni. [Viitattu 21.5.2019.] Saatavissa:

<https://www.waves.com/ambisonics-explained-guide-for-sound-engineers>

POTISK, Tilen 2015. Pään siirtofunktio. [Viitattu 22.5.2019.] Saatavissa:

http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2014_2015/Seminar_Ia_Head-Related__Transfer_Function_Tilen_Potisk.pdf

OTANI, Makoto 2006. Pään siirtofunktion numeerinen laskenta. [Viitattu 22.5.2019.] Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/267857959_A_fast_calculation_system_specialized_for_the_HRTF_based_on_the_BEM

DOLBY BLOG 2018. Äänipalkki kotiteatterin äänentoistona. [Viitattu 22.5.2019.] Saatavissa:

<https://blog.dolby.com/upgrade-home-theater-system-dolby-atmos/>

KOHAVI, Ron ja LONGBOTHAM, Roger 2015.) A/B testauksen tausta ja käyttö verkkosivujen testauksessa. [Viitattu 22.5.2019.] Saatavissa:

https://www.exp-platform.com/Documents/2015%20Online%20Controlled%20Experiments_EncyclopediaOfMLDM.pdf

BOMHARDT, Ramona 2017. Pään siirtofunktion mittaus. [Viitattu 22.5.2019.] Saatavissa:

<https://asa.scitation.org/doi/pdf/10.1121/2.0000467>

ZHANG, Wen 2017. 3D-äänien nauhoitus korviin asetetuilla mikeillä. [Viitattu 22.5.2019.] Saatavissa:

<https://www.mdpi.com/2076-3417/7/5/532/pdf>