

YKSILÖLLINEN HRTF

Tomi Huttunen¹, Antti Vanne¹

¹ OwnSurround Oy
Haapaniemenkatu 40 E 1, 70110 Kuopio
tomi.huttunen@ownsurround.com

Tiivistelmä

Pään siirtofunktio (*engl. head-related transfer function, HRTF*) määrittelee kuinka pää, hartiat ja korvat suodattavat eri suunnista korvakäytävän suulle saapuvaa ääntä. HRTF:n avulla voidaan kuulokekuunteluun palauttaa äänen realistinen suunta- ja tilavaikutelma. Anatomisista eroista johtuen, on HRTF jokaisella ihmisellä yksilöllinen. Yksilöllinen HRTF voidaan tuottaa laboratoriomittauksin tai simuloimalla. Tässä työssä esitellään simulointiin perustuva menetelmä yksilöllisten HRTF:ien tuottamiseen. Menetelmä perustuu pää ja korvien tarkkaan 3D malliin. Mallin avulla simuloidaan HRTF, joka voidaan viedä eri sovelluksiin standardin (AES69-2015) mukaisena tiedostona. Simuloinnin etuja ovat muun muassa HRTF:n hankinnan helppous (vaatii vain henkilön 3D skannauksen), erinomainen suuntaresoluutio ja hyvä virhelähteiden hallinta. Tällä hetkellä tietokantamme käsittää yli 40:n henkilön 3D mallin ja niiden avulla simuloidut HRTF:t. Alustavien kuuntelukokeiden perusteella yksilölliset HRTF:t toimivat hyvin.

1 JOHDANTO

Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että yksilöllinen päänsiirtofunktio (*engl. head-related transfer function, HRTF*) parantaa suuntaäänien tarkkuutta kuulokekuuntelussa [1]. Äskeittäin on julkaistu alustavaa näyttöä, että yksilöllinen HRTF vaikuttaa myös lähellä olevien äänien laatuun [2]. Lähikenttä-äänien kuulokekuuntelu onkin suuren mielenkiinnon kohteena johtuen mm. virtuaalilasien nopeasta kehityksessä. Yksilöllisen HRTF:n vaikutuksen tutkiminen lähikentässä edellyttää uusia menetelmiä HRTF:ien tuottamiseen.

HRTF:n tarkka mittaaminen on haastavaa, erityisesti lähikentässä. Mittauksien rinnalle onkin kehitetty simulointipohjaisia menetelmiä, joista suurimman suosion on saanut nopeilla reunaelementtimalleilla laskettava HRTF. Simuloinnissa pään ympärillä ratkaistaan taajuustason akustinen aaltoyhtälö.

Simulointimenetelmillä on ollut kaksi rajoitetta: 1) Yksilöllisen HRTF:n simulointia varten tarvitaan tarkka geometria päästä ja korvista. Tämä onnistuu parhaiten 3d skannauksen avulla, mutta tarvittavat skannauslaitteet ovat olleet joko hyvin kalliita tai liian epätarkkoja. 2) Simuloinnin vaatima laskenta-aika on ollut liian pitkä. Viime vuosien aikana molempiin rajoitteisiin on löydetty ratkaisuja, ja simulointipohjainen HRTF voidaan nyt toteuttaa yksilöllisesti. Tässä tutkimuksessa esitellään menetelmä ja tuloksia yksilöllisen HRTF:n simuloinnista.

Yksilöllisillä HRTF:illä on käytetty kuuntelukokeissa. Lisäksi esitellään ensimmäisiä tuloksia lähikenttä-HRTF:ien simulaatiosta.

2 METODI

Simulointimenetelmä perustuu nopeaan reunaelementtimenetelmään ja pilvilaskentakapasiteetin hyödyntämiseen. Koko prosessi 3d skannauksesta HRTF:n hyödyntämiseen sovelluksissa käsittää seuraavat vaiheet [3]:

1. Hartioiden, pään ja korvien geometria skannataan jollakin 3d skannausmenetelmällä. Skannauksen tuloksena saadaan "vesitiivis"3d malli, tyypillisesti PLY, OBJ tai STL-geometriaformaattissa.
2. Geometriaan luodaan laskentaverkko, missä pintakolmioiden koko on optimoitu laskennan tarpeisiin.
3. Lähdepisteet sijoitetaan (suljettujen) korvakäytävien suuaukkojen eteen. Resiprokkiperiaatteen mukaisesti yhdellä lähdepisteellä voidaan simuloida ääni mielivaltaiseen määrään tulosuuntia. Kaukokenttäpisteitä on tyypillisesti 838 kpl 2m etäisyydellä. Lähikentässä käytetään tiheää pisteistöä 0.1 - 1.0m etäisyyksillä.
4. Simulointi lasketaan pilvessä. Taajuusalue kattaa 64-24000Hz 64Hz:n askelin.
5. Taajuustason simulaatiot muutetaan impulssivasteiksi (HRIR), jotka tallennetaan SOFA-formaatissa [4].
6. SOFA-tiedostot viedään sovelluksiin. Yksilöllistä HRTF:ää tukevat jo jotkin pelien audiomootorit (OpenAL, X3dAudio) ja digitaalisten audiotyöasemien plug-in laajennukset (Blue Ripple Sound, NoiseMakers).

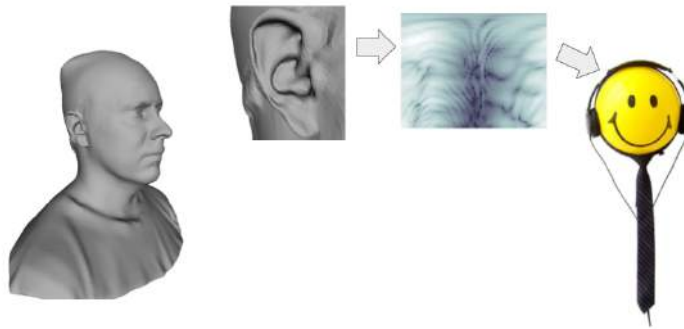
Skannaukseen olemme käyttäneet strukturoidun valon 3d skanneria (David SLS-2, HP Inc., Palo Alto, USA).

2.1 Kuuntelukokeet

Olemme skannanneet tietokantaamme yli 70:n henkilön 3d mallit. Kuuntelukoe on tehty 21:lle koehenkilölle. Ääninäyteinä käytettiin Auro3D:n 11.1 materiaalia. Kokeissa vertailtiin yksilöllisellä HRTF:llä suodatettua ääninäytteitä geneeriseen HRTF:ään (Neumann KU-100). Kuuntelijoita pyydettiin vastaamaan kysymykseen *How would you compare the sound A to sound B?* kuusiportaisella asteikolla (*much worse - much better*).

2.2 Lähikenttä HRTF

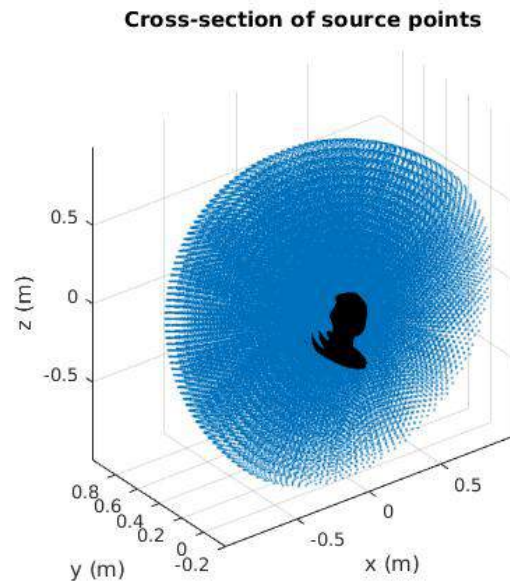
Lähikenttäsimulaatioissa luotiin tiheä pisteistö suuntia 0.1 - 1.0 m etäisyyksille (pääkeskisessä koordinaatistona *head-related system of coordinates* [5]). Etäisyydet valittiin 5cm:n välein. Kullekin etäisyydelle generoitiin 10001 Fibonacci-pistettä [6], jolloin koko pisteistö käsitti 190019 pistettä. Tästä pisteistöä poistettiin pään sisälle jäävät pisteet. Kuvan 2 geometrian tapauksessa jäljelle jäi 181 524 äänilähdettä. Poikkileikkaus ko. pisteistöstä on esitetty Kuvassa 3.



Kuva 1: Yksilöllisen HRTF:n simulointi perustuu tarkkaan pään ja korvien 3d malliin. HRTF voidaan viedä sovelluksiin AES:n standardoimassa SOFA-tiedostoformaattissa.



Kuva 2: Lähikenttä HRTF:ien simuloinneissa käytetty pään 3d malli Korvan 3d mallin tulee olla geometrisesti riittävän tarkka.



Kuva 3: Lähikenttäsimulaatioissa Kuvan 2 geometrialle käytettiin 181 524 lähdepistettä.

3 TULOKSET

3.1 Kuuntelukokeen tulokset

Kuuntelukokeissa havaittiin, että yksilöllistä HRTF:ää pidettiin parempana ääninäytteissä, joissa oli voimakas yksittäinen suuntaäänilähde. Kuvassa 4 vertaillaan yksilöllisen ja geneerisen HRTF:n eroa kahden eri ääninäytteen tapauksessa. Näyte 1 sisälsi äänikuvan kaupungin hälinästä. Ääninäytteessä ei ollut selvästi dominoivaa äänilähdettä, kuulijan ympäröivät useat päällekkäin erisuunnista kuuluvat äänet. Kuuntelukokeessa yksilöllisen ja geneerisen HRTF:n ero ei ollut merkittävä.

Alemmassa kuvassa on esitetty kuuntelukokeen tulos kun ääninäytteenä on helikopterin ylilento. 21:stä kuuntelukokeeseen osallistuneesta 11 piti yksilöllistä HRTF:ää paljon geneeristä parempana. (Asteikossa 0 tarkoittaa, että yksilöllinen HRTF kuulostaa paljon paremmalta. Asteikon arvolla 6 geneerinen HRTF on paljon parempi.)

3.2 Lähikenttäsimulaatiot

Lähikenttä-HRTF simulaatioista on esitetty tulokset horisontaalitasossa neljällä eri etäisyydellä (Kuva 5). Suoraan edestä tulevan äänen painetaso vasemmassa korvassa on esitetty Kuvassa 6.

Molemmista kuvaajista nähdään pään varjostavan vaikutuksen voimistuminen lähellä oleville äänilähteille.

4 YHTEENVETO

Tutkimuksessa esiteltiin simulointipohjainen menetelmä yksilöllisten HRTF:ien tuottamiseen. Menetelmä perustuu pään ja korvien 3d skannaukseen. Näin saadun 3d mallin avulla simuloidaan HRTF pilvilaskentakapasiteettia käyttäen. Kuuntelukokeissa simuloituja yksilöllisiä HRTF:iä pidettiin geneeristä parempina, jos ääninäytteessä oli voimakkaita suuntaääniä.

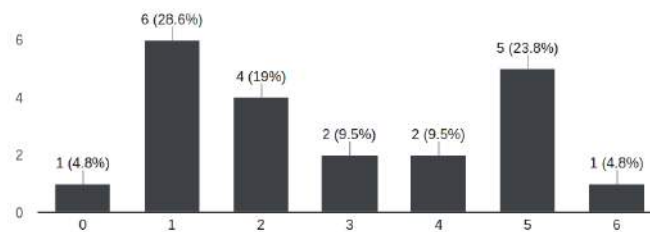
Lähikentän HRTF on tutkimusaiheena kiinnostava. Ongelmana on ollut lähikenttä HRTF:ien vaikea mittaaminen. Simulointi tarjoaa uuden työkalun HRTF:ien tuottamiseen. Simuloinnin tuloksena saadaan tarkka pisteestä pisteeseen kuvaus lähdepisteestä korvakäytävän suulle.

VIITTEET

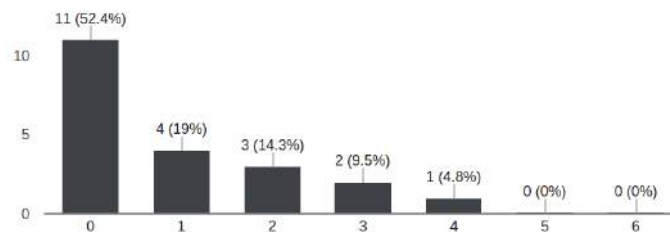
- [1] Song Xu, Zhizhong Li, and Gavriel Salvendy. Individualization of head-related transfer function for three-dimensional virtual auditory display: a review. In *International Conference on Virtual Reality*, pages 397–407. Springer, 2007.
- [2] Guangzheng Yu, Yuye Wu, and Bo-sun Xie. Perceptual evaluation on the influence of individualized near-field head-related transfer functions on auditory distance localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(5):3536–3536, 2017.
- [3] Tomi Huttunen and Antti Vanne. End-to-end process for hrtf personalization. In *Audio Engineering Society Convention 142*. Audio Engineering Society, 2017.
- [4] AES. *AES69-2015, AES standard for file exchange - Spatial acoustic data file format*, 2015.
- [5] Jens Blauert. *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*. MIT press, 1997.
- [6] Doug P Hardin, Timothy Michaels, and Edward B Saff. A comparison of popular point configurations on s^2 . *Dolomites Research Notes on Approximation*, 9(1), 2016.

Clip 1: Amsterdam city center

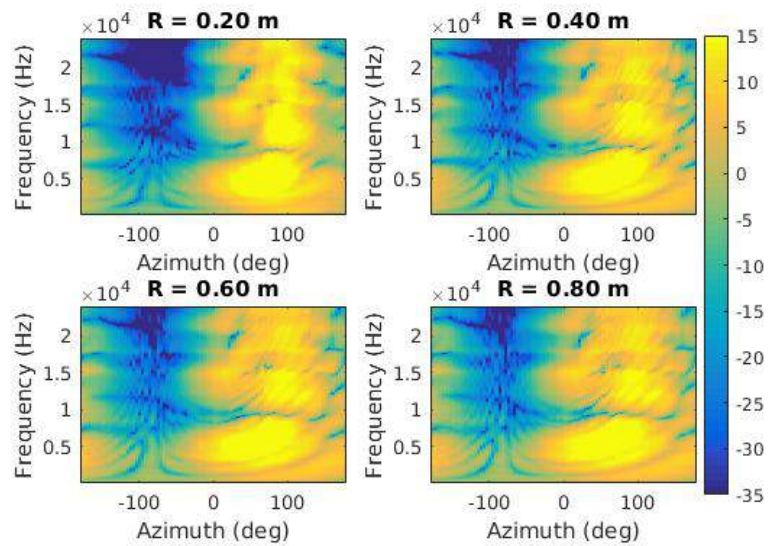
21 responses

**Clip 5: Helicopter flyover**

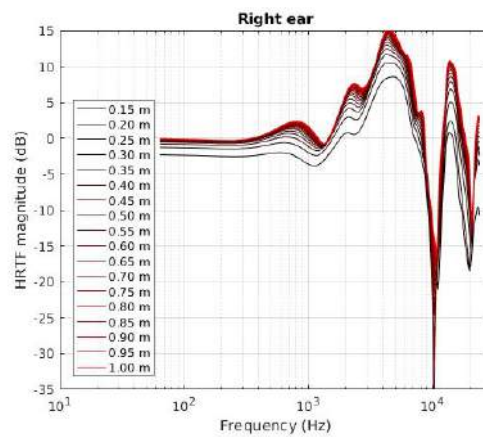
21 responses



Kuva 4: Kuuntelukokeissa yksilöllistä HRTF:ää pidettiin parempana, jos ääninäyte sisälsi yhden voimakkaan suuntaäänikomponentin. Näyte 1 (ylempi kuva) sisälsi äänikuvan kaupungista, näytteessä 5 (alempi kuva) kuunneltiin helikopterin ylilentoa. Asteikossa 0 tarkoittaa, että yksilöllinen HRTF kuullosta paljon paremmalta. Asteikon arvolla 6 geneerinen HRTF on paljon parempi.



Kuva 5: HRTF:n taso (dB) vasemmassa korvassa neljällä eri äänilähteen etäisyydellä. Äänilähteet ovat horisonttitasossa. Lähietäisyyksillä korostuu pään varjostava vaikutus ääneen.



Kuva 6: Etäisyyden vaikutus suoraan edestä tulevaan ääneen.