

HUONEEN AKUSTIIKAN TUNNISTAMINEN ERI SIGNAALEILLA

Tapio Lokki¹ ja Antti Kuusinen¹

¹ Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
Otakaari 5, 02150 Espoo
tapio.lokki@aalto.fi

Tiivistelmä

Perinteisissä huoneakustiikan tai audiokoodekkien kuuntelukokeissa kuunnellaan tutkittuja menetelmiä useammalla eri signaalilla, mutta tyypillisesti eroja huoneakustiikassa tai menetelmien välillä vertaillaan kuuntelemalla samaa signaalia eri tapauksissa. Aiemmissä tutkimuksissamme olemme huomanneet, että ihmiset pystyvät kuulemaan todella pieniä eroja huoneen akustiikassa, esim. konserttisaleissa, kun he saavat kuunnella lyhyttä musiikkinäytettä ja vertailla huoneita vapaasti. Mutta entä jos huoneen akustiikkaa pitäisi vertailla siten, että herätesignaali ei olekaan täsmälleen sama? Tässä artikkelissa raportoimme useamman kuuntelukokeen tuloksia, joissa konserttisaleja ja huoneita on pitänyt tunnistaa joko samalla tai eri signaalilla. Olemme tehneet tutkimuksia sekä musiikilla että puheella. Tulokset osoittavat, että konserttisalien akustiikan tunnistaminen on huomattavasti vaikeampaa, kun herätesignaali ei pysy samana. Siitä huolimatta eri salityypit tunnistetaan, mm. suorakulmaiset salit erottuvat muista salityypeistä. Tulosten mukaan pienempien tilojen tunnistaminen vaikuttaa olevan helpompaa, erityisesti puheäänillä. Lopuksi artikkelissa pohditaan ihmisen kykyä tunnistaa ja vertailla huoneakustisia eroja eri tilanteissa.

1 JOHDANTO

Kuuntelutilan akustiikka muokkaa havaitsemaamme ääntä ja joskus pystymme jopa tunnistamaan tilan pelkän äänen perustella. Kylpyhuone kuulostaa hyvin erilaiselta kuin konserttisali, vaikka jälkikaiunta-aika saattaa olla yhtä pitkä. Vastaavasti meillä on jonkinlainen käsitys miltä kuulostavat avokonttori, elokuvateatteri, teollisuushalli, olohuone tai vaikka auton sisätilat.

Huoneakustikkaan liittyvissä kuuntelukokeissa eri huoneita, esim. konserttisaleja vertaillaan tyypillisesti käyttäen samaa herätesignaalia kaikissa kuunneltavissa tiloissa. Tällöin koehenkilöt havaitsevat hyvinkin pieniä eroja huoneiden välillä muun muassa äänekkydessä, kaiuntaisuudessa, äänen selkeydessä tai äänen värissä [1, 2]. Tällaiset kuuntelukokeet tuottavat erittäin rikasta sanastoa ihmisten havainnoista ja pystymme arvioimaan erittäin pieniä eroja huoneiden akustiikassa [3, 4].

Copyright ©2021 Tapio Lokki ja Antti Kuusinen. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons BY 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

Mutta kuinka hyvin kuulemme eroja huoneakustiikassa kun herätesignaali onkin erilainen eri huoneissa? Pystyykö ihminen erottamaan huoneet toisistaan, jos toisessa huoneessa kuunnellaan eri kohtia musiikista tai eri puhujien ääntä? Meidän tutkimuksemme pyrkivät selvittämään kuinka hyvin koehenkilöt pystyvät tunnistamaan kuunteluhuoneen akustiikan, kun herätesignaali on esimerkiksi täsmälleen samat nuotit soitettuna viululla tai eri nuotit saman soittajan soittamana samalla viululla. Tämä artikkeli vetää yhteen tulokset Aalto-yliopistossa tehdyistä tutkimuksista aiheen parissa [5, 6] sekä esittelee uutuutena tuloksia verkossa toteutetusta kuuntelukokeesta.

2 HUONEAKUSTIIKAN AURALISAATIOT

Jotta eri huoneiden akustiikkoja voidaan verrata keskenään ne täytyy ensin tallentaa tilaimpulssivasteiden muodossa. Sen jälkeen tilaimpulssivasteet käsitellään siten, että ne voidaan konvoluoida minkä tahansa herätesignaalin kanssa kuuntelujärjestelmään, joka tyypillisesti sisältää ison määrän kaiuttimia kuuntelijan ympärillä. Vaihtoehtoisesti kuuntelu tapahtuu kuulokkeilla, jolloin toistokaiuttimet virtualisoidaan HRTF-funktioden avulla ja lopputuloksena ovat binauraaliset signaalit. Koko tätä prosessia kutsutaan auralisoinniksi. Näissä tutkimuksissa auralisointi tehtiin kuvalähdehajotelma-menetelmällä (Spatial Decomposition Method, SDM) [7, 8], jonka perusajatus on jakaa yhden pallo-mikrofonin äänittämä impulssivaste monikanavajärjestelmän kaiuttimiin äänen tulosuuntien analyysin jälkeen. Äänen tulosuunta-analyysi perustuu mikrofonihilan mikrofoniin välisiin aikaeroihin, jotka pystytään laskemaan tarkasti ristikorrelaatiolla.

Kuuntelukokeita tehtiin sekä Aalto-yliopiston monikanavahuoneessa että binauraalisilla signaaleilla verkossa. Monikanavahuoneessa on 45 kaiutinta kuuntelijan ympärillä kaiuttomassa huoneessa, minkä vuoksi auralisaatio on teknisesti erittäin korkealaatuinen. Binauraaliset signaalit tehtiin näistä 45 kaiuttimen signaaleista suodattamalla kutakin kaiutinsignaalia HRTF-suotimilla, jotka vastasivat kaiuttimen suuntaa. Binauraalinen toisto oli ainoa mahdollisuus toteuttaa kuuntelukoe myös verkossa siten, että kuuntelijat voivat tehdä kokeen kotonaan omilla kuulokkeillaan. Luonnollisesti emme pystyneet vaikuttamaan käytettyihin kuulokkeisiin, mutta emme usko, että kuulokkeiden laatueroilla oli suurta vaikutusta tuloksiin.

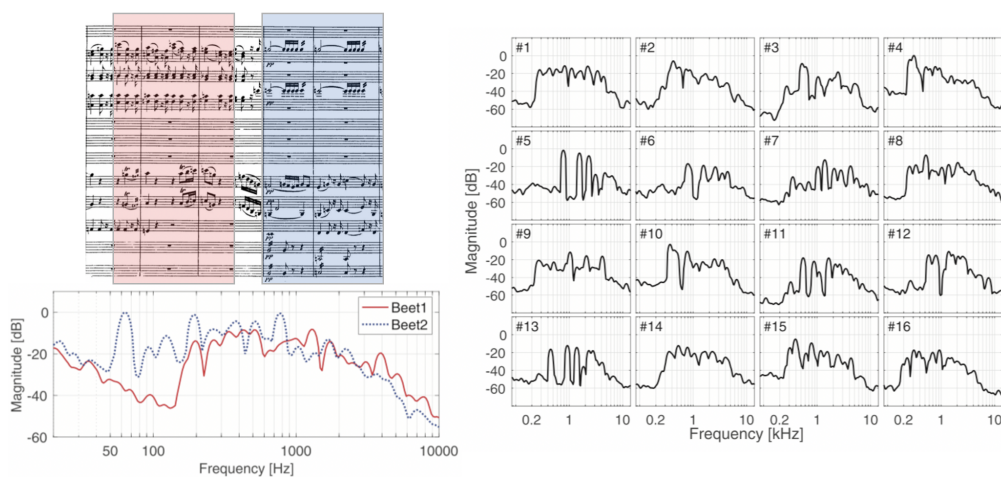
3 ENSIMMÄINEN TUTKIMUS: KONSERTTISALIN AKUSTIIKKA

Ensimmäiseen kokeeseen [5] valitsimme neljä konserttisalia ja niistä yhden mittauspaikan, joka oli joka salissa samalla etäisyydellä (19m) kaiutinorkesterista. Salit on listattu taulukossa 1 ja ne on tarkoituksella valittu siten, että yleisimmät ISO3382-1:2009 määrittelemät huoneakustiset parametrit ovat kohtuullisen lähellä toisiaan, mutta kuitenkin niissä on selkeää eroa. Perustuen aiempiin tutkimuksiimme tiesimme, että kahdessa salissa on ympäröivämpi äänikenttä, kun taas kahdessa salissa suora ääni dominoi äänikenttää ja varhaisia poikittaisia heijastuksia ja ympäröivää jälkikaiuntaa on vähemmän.

Kuuntelukokeissa käytettyjä signaaleja oli kahdenlaisia. Koko orkesterin soittoa tutkittiin kahdella kahden tahdin näytteellä, jotka on kuvattu kuvassa 1. Kuten kuvasta nähdään niin orkesterin soitinnus muuttuu hieman, mutta ei radikaalisti. Koko orkesterin spektreissä on myös eroa, mutta lähinnä pienillä taajuuksilla. Toinen herätesignaali oli yksittäinen

Taulukko 1: Kuuntelukokeen konserttitalit. Tilavuus (V) [m³], Paikkamäärä (N), Strength G [dB], jälkikaiunta-aika T_{20} [s], sekä myöhäinen poikittainen energia L_j [dB]. Arvot ovat yksilukuarvoja, standardin ISO3382-1:2009 määritelmien mukaan.

Sali	Muoto	V	N	G	T_{20}	L_j
Amsterdam Concertgebouw (AC)	kenkälaatikko	18780	2040	3.5	2.5	-2.2
Berlin Philharmonie (BP)	viinitarha	21000	2220	2.2	2.1	-5.1
Cologne Philharmonie (CP)	amphiteatteri	19000	2000	1.4	1.8	-6.5
Munchen Herkulesaal (MH)	kenkälaatikko	13590	1300	3.1	2.1	-2.6



Kuva 1: Kuuntelukokeissa käytetyt herätesignaalit. Vasemmalla Beethovenin 7. sinfonian I osasta poimitut tahdit sekä niiden spektrit, oikealla yhden viulistin soittamat 16 erilaisen muutaman nuotin teemojen spektrit.

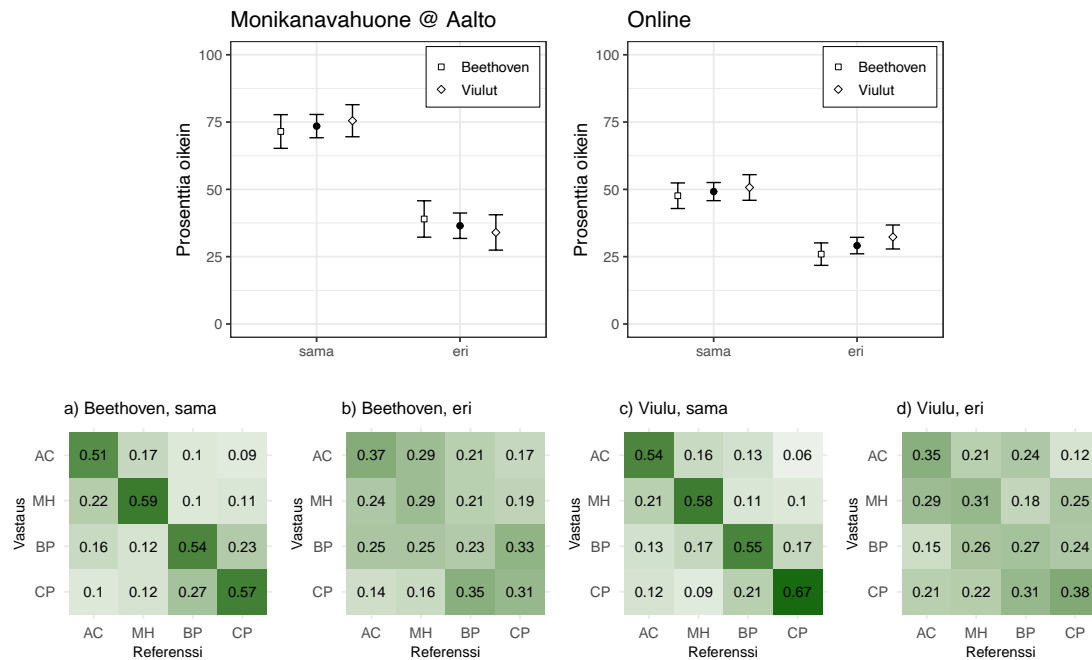
viulu, joka soitti muutaman nuotin teemoja, yhteensä 16 erilaista. Näiden näytteiden spektrit ovat myös kuvassa 1.

Kuuntelukokeessa koehenkilöt saivat vapaasti kuunnella referenssiä (joku neljästä salista) ja heidän tehtävänä oli löytää neljän näytteen joukosta samassa salissa soitettu näyte (4-AFC testi). Herätesignaali oli siis joko sama tai eri kuin referenssissä. Koehenkilöt saivat kuunnella näytteitä vapaassa tahdissa niin monta kertaa kuin halusivat. Yhden koehenkilön tehtävä olisi siis tehdä lyhyen harjoittelun jälkeen yhteensä 32 vertailua (16 Beethovenia ja 16 viulua) ja näytteet koehenkilöiden välillä olivat täysin satunnaisessa järjestyksessä.

3.1 Tulokset

Kuuntelukokeeseen Aallon akustiikan laboratorion monikanavahuoneessa osallistui 25 koehenkilöä. Lisäksi sama koe toteutettiin verkkoympäristöön ja binauraalisesti kokeen teki verkossa 53 kuuntelijaa. Molempien kokeiden tulokset löytyvät kuvasta 2.

Aallon monikanavahuoneessa, jossa tiläänentoisto käytetyllä auralisaatiomenetelmällä on erittäin todentuntuinen, tulokset ovat hyvin selkeät. Kun koehenkilöt vertailivat saleja samalla herätesignaalilla niin neljän näytteen joukosta referenssi löytyi n. 75% tarkkuudella. Kun kyseessä oli eri signaalit niin tunnistustarkkuus oli n. 35%. Binauraalisilla

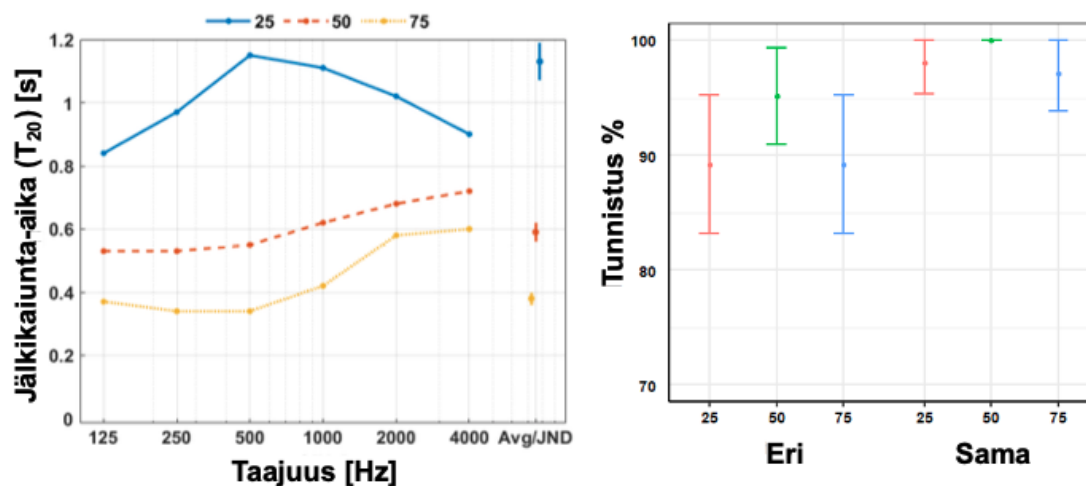


Kuva 2: Konserttisali kuuntelukokeen tulokset. Ylärivissä on Aallon monikanavahuoneessa tehtyjen kokeiden tulokset vasemmalla ja verkossa tehdyn kokeen tulokset oikealla. Alarivissä on salien väliset sekaannusmatriisit, jossa molempien kokeiden kaikki vastaukset on yhdistetty (25+53=78 koehenkilöä).

signaaleilla tiläänentoisto ei ole aivan niin hyvä ja online-kokeessa laitteistoa ei voinut mitenkään kontrolloida ja näin ollen tunnistustulokset olivat vastaavasti n. 50% ja n. 30%. Sekaannusmatriisit näyttävät tulokset vielä tarkemmin ja niistä nähdään, varsinkin orkesterimusiikilla, että koehenkilöt sekoittivat keskenään hieman useammin saman salityypin salit. Toisin sanoen AC ja MH, jotka ovat suorakulmaisen muotoisia konserttisaleja sekoitettiin keskenään useammin ja vastaavasti BP ja CP sekoituivat hieman useammin toistensa kanssa.

4 TOINEN TUTKIMUS: MUUNNELTAVAN AKUSTIIKAN HUONE

Toinen tutkimuksemme tehtiin puhesignaaleilla ja tällä kertaa huoneakustiikassa erot olivat erittäin selkeitä. Aallon akustiikan laboratorion muunneltavan akustiikan huoneessa mitattiin auralisaatioita varten tilaimpulssivasteet kolmella eri seinäpaneelin asetuksella ja eri versioiden jälkikaiunta-ajat on esitetty kuvassa 3. Herätesignaalina oli miehen ja naisen puhetta, molemmista kaksi eri lausetta. Kuuntelukoe oli vastaava kuin konserttisalien tapauksessa, mutta nyt referenssihuone piti löytää vain kolmen näytteen joukosta. Herätesignaalit olivat jälleen joko samat tai eri, tällä kertaa myös siten että eri-tilanteessa saattoi olla myös miehen ja naisen puhetta. Kokeessa oli jälleen lyhyt harjoittelu, jonka jälkeen koehenkilö suoritti 36 vertailua (18 samaa ja 18 eri) ja näytteet koehenkilöiden välillä olivat täysin satunnaisessa järjestyksessä.



Kuva 3: Vasemmallla Aallon muunneltavan akustiikan huoneen jälkikaiunta-ajat kun paneeleista on absorboivia 25% (25), 50% (50) tai 75% (75). Oikealla on kuuntelukokeiden tulokset eriteltynä, kun referenssinä oli joko 25, 50 tai 75.

4.1 Tulokset

Kuuntelukokeeseen Aallon monikanavahuoneessa osallistui 17 koehenkilöä. Kuvassa 3 on kokeen tulokset eriteltynä kullekin referenssitapaukselle erikseen. Tulokset näyttävät, että 50% absorptio tapauksessa lähes kaikki koehenkilöt löysivät aina referenssin, mutta muiden huoneversioiden tapauksessa tunnistus ei ollut täydellistä, varsinkaan eri signaaleilla. Vaikka tulos on huomattavasti parempi kuin konserttisalien tapauksessa niin eri ja sama -tilanteiden välillä on tilastollisesti merkitsevä ero. On myös hyvä huomioda, että 10 koehenkilöä tekivät joko nolla tai yhden virheen, eli yli puolet kuuntelijoista käytännössä löysivät aina referenssin kolmen huoneversion joukosta riippumatta herätesignaalista.

5 POHDINTOJA

Konserttisalikokeessa tulokset ovat selkeitä ja on yllättävää kuinka vaikeaa koehenkilöiden oli löytää referenssisali eri herätesignaaleilla. Sekaannusmatriisit näyttävät, että salityyppi tunnistettiin hieman paremmin ja tämä oli odotettu tulos myös taulukon 1 huoneakustisten parametrien perusteella. Parhaiten saleista tunnistettiin CP, joka myös on odotettu tulos, koska kyseisen salin huoneakustiset parametrit olivat kauimpana muista.

Toisessa kokeessa erot huoneakustiikassa olivat huomattavasti suurempia, mutta silti eri ja samoilla signaaleilla ero tuloksessa on tilastollisesti merkittävä. On hieman yllättävää, että jälkikaiunta-ajaltaan keskimääräinen huone oli helpoimmin eroteltavissa muista, mutta tämä saattaa johtua siitä, että tuossa mittauksessa oli huomattavan voimakas heijastus n. 50 ms suoran äänen jälkeen ja luultavasti koehenkilöt kuulivat tuon yksittäisen heijastuksen kaikuna, joka helpotti huoneen tunnistusta.

6 YHTEENVETO

Huoneakustisia eroja tyypillisesti vertaillaan auralisoimalla ja kuuntelemalla samaa heräteääntä eri tiloissa. Tällainen AB-vertailu on kuitenkin laboratorion ulkopuolella käytännössä mahdotonta. Erot heräteäänien välillä ovat usein paljon isompia kuin mitä tämän artikkelin tutkimuksissa on käytetty. Näiden tulosten perusteella tilojen akustisia eroja voi olla todella hankala havaita, jos ja kun emme pysty tekemään AB-vertailua kuuntelemalla huoneakustiikan tuottamaa muutosta yhteen ja samaan ääneen. Tutkimustulokset antavat kuitenkin myös viitteitä siitä, että on mahdollista tunnistaa tiloja myös eri herätesignaalien tapauksessa jos tilojen väliset akustiset erot ovat tarpeeksi suuret. On mahdollista, että tunnistamme hyvin stereotyyppisiä ja meille jokapäiväisiä tiloja ja puhe saattaa myös olla signaali, josta pystymme erottamaan huoneakustiikan vaikutuksen paremmin. Konserttitalit eivät välttämättä ole edes akustikoille niitä kaikkien arkipäiväisimpiä tiloja, joka osaltaan saattaa vaikeuttaa akustisten erojen havaitsemista eri heräteäänillä.

VIITTEET

- [1] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, and S. Tervo. Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5):3148–3161, November 2012.
- [2] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, and S. Tervo. Concert hall acoustics: Repertoire, listening position and individual taste of the listeners influence the qualitative attributes and preferences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 140(1):551–562, July 2016.
- [3] A. Kuusinen and T. Lokki. Wheel of concert hall acoustics. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(2):185–188, March/April 2017.
- [4] T. Lokki and A. Kuusinen. Konserttitaliakustiikan ympyrä. In *Akustiikkapäivät*, pages 227–232, Espoo, Finland, August 24–25 2017.
- [5] A. Kuusinen and T. Lokki. Recognizing individual concert halls is difficult when listening to the acoustics with different musical passages. *Journal of the Acoustical Society of America*, 148(3):1380–1390, September 2020.
- [6] Zuzanna Dlugosz. The recognition of room acoustics with different speech signals: An experiment with auralisations. Master’s thesis, Aalto University, School of Electrical Engineering, 2021.
- [7] S. Tervo, J. Pätynen, A. Kuusinen, and T. Lokki. Spatial decomposition method for room impulse responses. *Journal of the Audio Engineering Society*, (1/2):16–27, January/February 2013.
- [8] S. Tervo, J. Pätynen, and T. Lokki. Tilaimpulssivasteiden analyysi ja synteesi huoneakustiikassa. In *Akustiikkapäivät*, pages 207–212, Turku, Finland, May 22–23 .