

TUTKIMUS ORKESTERIN ETÄISYYDEN KUULEMISESTA AURALISOIDUISSA KONSERTTISALEISSA

Antti Kuusinen¹

¹ Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu
Tietotekniikan laitos
Otaniementie 17, 02150 Espoo
antti.kuusinen@aalto.fi

Tiivistelmä

Konserttisalien akustiikan havaitsemiseen vaikuttaa viisi-kuusi päätekijää: äänikentän voimakkuus, kaiuntaisuus, ympäröivyyden kirkkaus ja basson määrä sekä läheisyys. Näistä tekijöistä läheisyys on monelle yksi tärkeimmistä, ellei tärkein tekijä, ja tämän viimeisimmät tutkimukset virtuaaliakustiikan menetelmiä käyttäen ovat myös vahvistaneet. Voidaan olettaa, että läheisyys liittyy äänilähteiden kuultavaan etäisyyteen ja olemmekin viime aikoina tutkineet tarkemmin orkesterin etäisyyden kuulemista auralisoiduissa konserttisaleissa. Tutkimuksessa käytettiin mitattujen salivasteiden avulla tuotettuja auralisaatioita neljästä eurooppalaisesta konserttisalista: Palais de Beaux Arts, Brysseli; Konzerthaus, Berliini; Musiikkitalo, Helsinki; Beethovensal, Stuttgart; viidellä (10 m, 14 m, 18 m, 22 m, 26 m) eri etäisyydellä orkesterin/lavan keskipisteestä. Tulokset tuovat esiin salien akustiikan vaikutuksen kuultuun etäisyyteen ja osoittavat, että salien välillä on eroja: Musiikkitalossa ja Beethovensalissa etäisimmät paikat kuullaan olevan keskimäärin olevan muutamia metrejä kauempana kuin kahdessa muussa salissa. Toisaalta Musiikkitalossa etumaiset paikat (10 m, 14 m) arvioitiin olevan kaikkein lähimpänä orkesteria näistä neljästä salista. Tulokset voidaan yhdistää äänikentän voimakkuuden sekä suoran äänen ja heijastuvien äänien välisen suhteen vaihteluihin liikuttaessa kauemmas orkesterista.

1 JOHDANTO

Konserttisaliakustiikkaa on viime vuosina tutkittu kuuntelukokeilla, joissa kuuntelijat ovat arvioineet auralisoidujen salien akustiikkaa käyttäen itse muodostamia termejä ja määritelmiä [1, 2, 3]. Moni kuuntelija on osoittanut tykkävänsä akustiikasta, joka tuo musiikin lähelle kuuntelijaa. Akustinen 'läheisyys' terminä viittaa etäisyyden havaitsemiseen, mutta äänilähteiden kuultavaa etäisyyttä suurissa tiloissa on tutkittu vain vähän [4]. Etäisyyden kuulemista on tutkittu pääsääntöisesti pienissä huoneissa ja lyhyillä, alle kymmenen metrin etäisyyksillä äänilähteistä [5]. Nämä tutkimukset ovat osoittaneet, että erot äänen voimakkuudessa etäisyyden vaihdellessa, sekä suoran äänen ja jälkikaiunnan suhde (DRR, eng. "direct to reverberant ratio") ovat tärkeimmät äänilähteen etäisyyden kuulemiseen käytettävät akustiset vihjeet. Voimakkuuserot eri etäisyyksillä vihjaavat suhteellisista etäisyyden muutoksista, kun DRR:n on tulkittu auttavan äänilähteiden etäisyyden kuulemisessa silloin kun kuuntelijan ja äänilähteen välinen etäisyys pysyy samana tai kun ääni kuullaan ensimmäisen kerran.

On myös huomattu, että kuultu etäisyys yli noin kahden metrin etäisyyksillä aliarvioidaan progressiivisesti fyysisen etäisyyden kasvaessa. Havaitun etäisyyden ja fyysisen etäisyyden yhteyttä voidaan kuvata psykofyysisellä funktiolla $p = kr^a$, jossa p viittaa havaittuun etäisyyteen, r fyysiseen etäisyyteen, parametri a (< 1) kuvaa progressiivisen aliarvionnin määrää, ja parametri k on vakio, jonka arvo saattaa olla yhteydessä huoneen kaiuntaisuuteen [6]. Aikaisempien tutkimusten keskiarvo parametrille k on 1.32 ja parametrille a 0.54 [5].

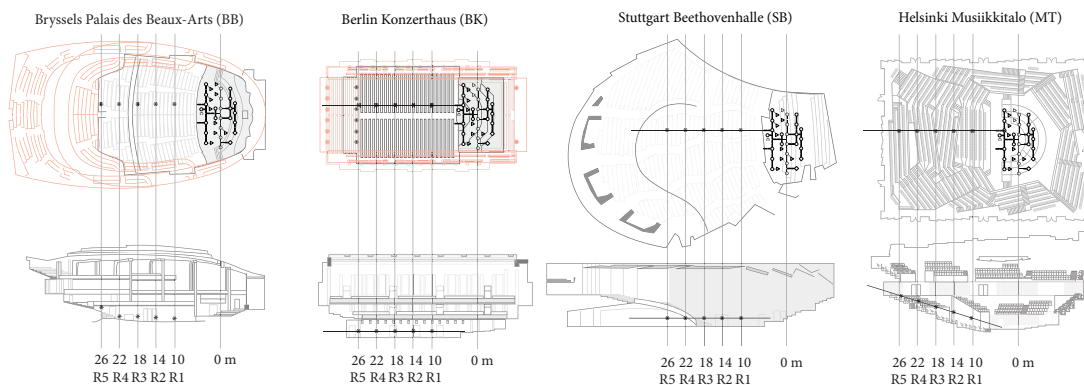
Tässä artikkelissa esitetään tärkeimmät tulokset tutkimuksesta, jossa orkesterin etäisyyden kuulemista konserttisaleissa tutkittiin auralisaatioilla neljästä salista viidellä eri etäisyydellä. Tässä artikkelissa kuvataan vain tärkeimmät osat tutkimuksesta ja tuloksista, mutta lisätietoja ja yksityiskohtia saa muista Virtuaaliakustiikan tutkimusryhmän julkaisuista. Auralisaatioiden tuottamiseen käytettyä kaiutinorkesteria [7], salivasteiden mittauksia ja Spatial Decomposition Method (SDM)- tekniikkaa [8] ei tässä artikkelissa käsitellä.

2 MATERIAALIT JA KOEASETELMA

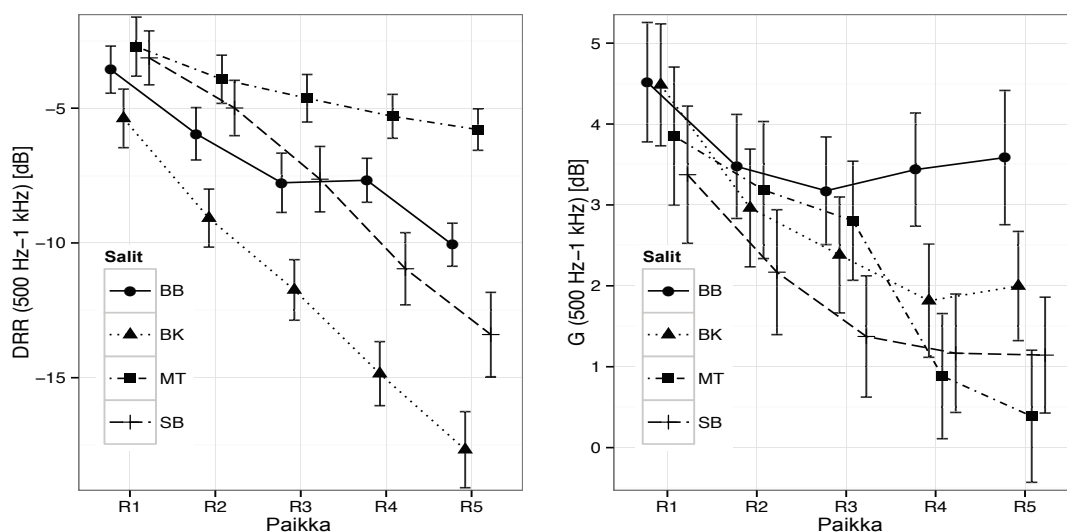
2.1 Konserttisalit

Tutkittavat salit olivat neljä eri muotoista konserttisalia: Palais de Beaux Arts, Brysseli (BB); Konzerthaus, Berliini (BK); Musiikkitalo, Helsinki (MT); Beethovensal, Stuttgart (SB), joiden pohjapiirrustukset ja sivuprofilit ovat esitettyinä kuvassa 1, johon on myös merkattu tutkimuksessa käytetyt etäisyydet.

Äänikentän voimakkuuden mittana konserttisaleja tarkasteltaessa käytetään yleisesti voimakkuus parametria G [9]. Olettaen, että G :n vaihtelut ovat verrannollisia äänen voimakkuuden vaihtelujen antamiinn suhteellisiin etäisyysvihjeiseen, kuvassa 2 on esitetty G :n arvot paikan funktiona eri saleissa, sekä toisen tärkeimmän etäisyysvihjeeseen eli DRR:n arvot. Kummankin parametrin arvot on keskiarvoistettu 500 Hz ja 1 kHz oktaavikaistojen ja kaikkien lähdepisteiden ylitse.



Kuva 1: Tutkittavien salien pohjapiirrustukset ja sivuprofilit sekä arvioidut etäisyydet. Piirrustukset ovat toisiinsa nähden samalla skaalalla.



Kuva 2: DRR ja G arvot per kuuntelupaikka keskiarvoistettuina 500 Hz ja 1 kHz oktaavikaistojen sekä kaikkien lähdepisteiden ylitse.

2.2 Kaiuttomat äänisignaalit

Tutkimuksessa käytetyt kaiuttomat äänimateriaalit olivat minuutin mittainen näyte Brucknerin sinfoniasta ja jatkuva äänikollaasi torvikvartetin (kaksi trumpettia ja kaksi pasuunaa) äänistä. Auralisaatioissa Bruckner ääninäytteelle käytettiin koko kautinorkesteria. Torvet sen sijaan yhdistettiin neljän lavan keskellä olevien lähteiden salivasteiden kanssa. Torvikvartetinäyte tuotettiin erityisesti tätä kuuntelukoetta varten seuraavalla tavalla:

Neljästä sinfoniasta aiemmin äänitettyjen musiikinäytteiden [7] trumpetti- ja pasuunaraidat päätettiin lyhyiksi näytteiksi RMS arvoihin perustuen. Näistä näytejoukoista valittiin satunnaisesti näytteitä neljälle eri mittaiselle (15, 16, 19 ja 23 sek.) ääniraidalla eli kahdelle trumpetti ja kahdelle pasuuna raidalla varaten noin 30 % kustakin ääniraidasta hiljaisuudelle. Näytteiden eri mittaisuuden takia sekä vaihtelemalla satunnaisesti kunkin raidan aloituskohtaa suhteessa toisiin raitoihin saatiin kokonaisuudessaan vaihtelevan kuulosta äänimateriaalia kun raitoja soitetaan luopissa. Kokonaisuudessaan torvinäytteen tarkoitus oli suunnata kuuntelijoiden tarkkaavaisuutta äänilähteiden etäisyyteen ja paikkaan pikemminkin kuin siihen mitä ääniä äänilähteet tuottavat.

2.3 Koeasetelma

Kuuntelukokeeseen osallistui kahdeksan koehenkilöä. Koeasetelmassa henkilöt arvioivat orkesterin/lähteiden etäisyyttä itseensä nähden "free modulus magnitude estimation" menetelmällä, jossa etäisyysarvio annettiin ensin ns. modulus-näytteelle, jonka jälkeen muut näytteet arvioitiin tätä modulusta ja sille annettua etäisyyttä vasten. Koehenkilön tehtävä oli siis keskittyä moduluksen ja vertailtavan näytteen suhteelliseen etäisyyseroon kuuntelulla vuorotellen omaan tahtiin modulusta ja vertailtavaa näytettä.

Etäisyysarviot annettiin viidelle eri etäisyydelle kunkin salin sisällä. Moduluksina käytettiin R2 ja R4 paikkoja, jolloin kukin koehenkilö arvioi jokaisen etäisyyden kaksi kertaa. Koetta suunniteltaessa oli selvää, että kokeesta olisi tullut ajallisesti liian pitkä ellei joi-tain kompromisseja olisi tehty. Yksi kompromissi oli tasapainotetun lohkoasetelman käyttäminen, jonka avulla kokeeseen voitiin sisällyttää yhteensä neljä salia. Tässä koeasetelmassa jokainen kahdeksasta koehenkilöstä arvioi vain kolmea neljästä salista, mutta jokainen sali, sekä saleista muodostetut parit arvioitiin yhteensä yhtä monta kertaa.

Etäisyysarviot analysoitiin R [10] tilasto-ohjelmalla käyttäen hyväksi lme4 [11] ja lmer-Test [12] -kirjastoja lineaarisille sekamalleille. Data-analyysin yksityiskohdat esitetään muissa julkaisuissa.

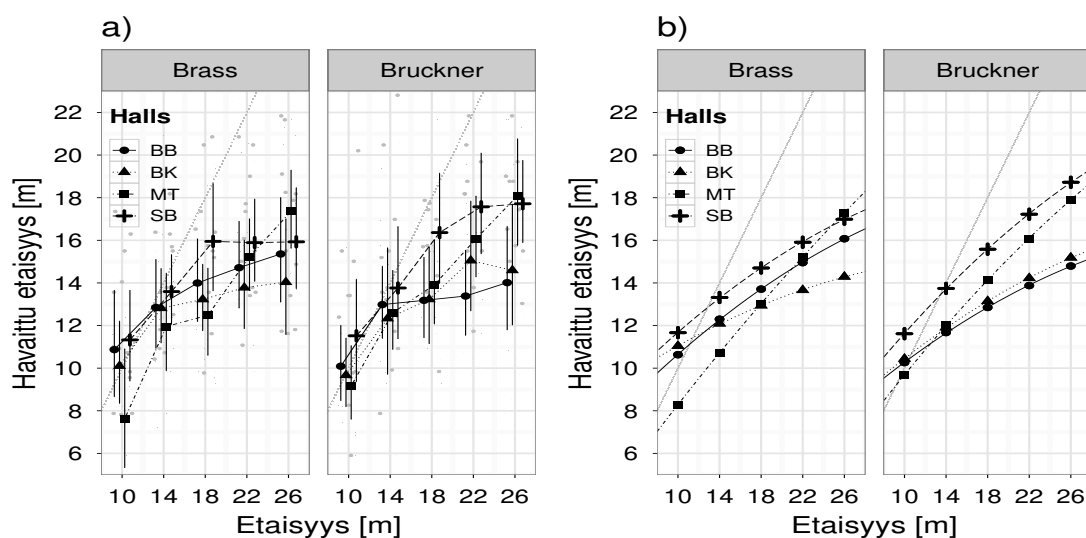
3 TULOKSET

Etäisyysarvioiden keskiarvot ja 95 prosentin luottamus välit ovat esitettyinä kuvassa 3 a), josta voidaan jo huomata muutamia eroja salien välillä. Etäisyysarviot ovat samankal-taisia salien BB ja BK välillä, kun toisaalta MT on arviuta läheisimmäksi lyhyimmällä etäisyydellä ja kauimmaksi etäisimmässä paikassa. SB:ssä etäisyydet on kuultu olevan hieman kauempana kuin muissa saleissa.

Kuvassa 3 b) on esitettyinä havaintoihin sovitettujen psykofyysisten etäisyysfunktioden $p = kr^a$ antavat ennusteet havaitusta etäisyydestä. Kuvaa vastaavat parametrien k ja a estimoidut arvot ovat esitetty taulukossa 1. Etäisyysfunktioden välillä on merkittä-viä eroja erityisesti parametrin a suhteen ($F_{8,26.4} = 5.87, P < 0.001$). Parametrin k suhteen funktioden välillä on lähes merkittäviä eroja ($F_{8,47.6} = 2.10, P = 0.06$) silloin kun funktiot estimoidaan kummallekin musiikille erikseen. Jos saleille estimoidaan kullekin vain yksi etäisyysfunktio käyttäen kummankin musiikin havaintoja yhdessä, funktioden väliset erot ovat merkittäviä myös parametrille k ($F_{4,56.3} = 4.46, P = 0.007$) ($a: F_{4,17.9} = 11.3, P < 0.001$). Kuvan 3, taulukon 1, sekä tilastollisen analyysin perus-teella voidaan todeta, että siirryttäessä etupaikolta takapaikoille samassa linjassa kuultu etäisyys MT:ssä muuttuu selvästi lineaarisemmin kuin muissa tarkastelluissa saleissa. Etupaikoilla äänilähteet ovat havaittu olevan lähempänä ja takapaikoilla kauempana ver-rattuna erityisesti BB ja BK saleihin. Kuultu etäisyys SB:ssä näyttää olleen yleisesti ottaen kauempana kuin muissa saleissa ja Brucknerin tapauksessa takapaikoilla myös kauempana kuin MT:ssä.

| $p = kr^a$ Sali | Torvet | | Bruckner | | Molemmat | |
|--------------------|--------|------|----------|------|----------|------|
| | k | a | k | a | k | a |
| BB | 3.93 | 0.43 | 4.25 | 0.38 | 4.1 | 0.41 |
| BK | 5.93 | 0.27 | 4.23 | 0.39 | 5.0 | 0.33 |
| SB | 4.71 | 0.39 | 3.68 | 0.50 | 4.2 | 0.45 |
| MT | 1.40 | 0.77 | 2.19 | 0.64 | 1.8 | 0.70 |
| ka. | 4.0 | 0.47 | 3.6 | 0.48 | 3.8 | 0.47 |

Taulukko 1: Estimoidut psykofyysisen etäisyysfunktion parametrien k ja a arvot per sali ja musiikki.



Kuva 3: Kuullut etäisyydet. a) Keskiarvot ja luottamusvälit. b) Esitimoitujen psykofyysisten etäisyysfunktion ennusteet havaitusta etäisyydestä.

4 LOPUKSI

Kuuntelukokeen tulokset antavat viitteitä siitä, että konserttisalien akustisilla ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus kuultuun orkesterin etäisyyteen. On myös huomattavaa, että tulosten mukaan kyseisissä tiloissa kuultu etäisyys saatetaan yliarvioida jopa yli kymmeneen metriin, kun kyse on arvioimisesta orkesterin keskipisteeseen. Kuten aikaisemmatkin tutkimukset ovat todenneet pienempien tilojen suhteen, erityisesti G:n eli äänikentän voimakkuuden vaihtelut etäisyyden suhteen (kuva 2) vaikuttavat olevan tärkein suhteellisten etäisyykseen arvioimiseen käytettävä vihje. DRR (ja mahdollisesti muutkin parametrit [9]) kuitenkin vaihtelee yhdessä etäisyyden ja G:n kanssa ja salin kaiuntaisen äänikentän energialla voidaankin nähdä olevan yhteys myös G:n arvojen kanssa.

Jälkikaiunta ilmeisesti kompensoi suoran äänen hiljentymisestä johtuvaa äänilähteiden havaittavaa etäänymistä, jolloin tiettyä etäisyyttä kauempana havaittava orkesterin etäisyys ei enää muutu, vaikka fyysinen etäisyys kasvaisikin. Jos salin akustiikka vaimentaa heijastuvien äänien ja jälkikaiunnan tasoa (eli DRR pysyy suurena), havaittavan etäisyyden muutos jatkuu kauemmaksi verrattuna saleihin, joissa vaimennusta ei tapahdu. Riittävä jälkikaiunta siis tasoittaa kuultavia etäisyyseroja etummaisten ja taaimmaisten paikkojen suhteen. On kuitenkin muistettava, että kaiuntaisen äänienergian suhteellinen kasvu suoraan ääneen verrattuna muuttaa muita havaintotekijöitä, kuten musiikin kirkkautta, jotka eivät välttämättä muutu silloin kun DRR pysyy samankaltaisena läpi salin.

Tässä tutkimuksessa tarkastellun havaitun etäisyyden lisäksi musiikkielämykseen vaikuttavat monet muut tekijät, jotka eivät rajoitu vain salin akustisiin ominaisuuksiin. Myös läheisyys, jonka on aiemmin todettu olevan yhteydessä miellyttävyyteen [3], taitaa sisältää paljon enemmän kuin pelkästään kuultava etäisyys esiintyjiin.

VIITTEET

- [1] T. Lokki, J. Pätynen, A. Kuusinen, H. Vertanen, and S. Tervo. Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(2):835–849, 2011.
- [2] Tapio Lokki, Jukka Pätynen, Antti Kuusinen, and Sakari Tervo. Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(5):3148–3161, 2012.
- [3] Antti Kuusinen, Jukka Pätynen, Sakari Tervo, and Tapio Lokki. Relationships between preference ratings, sensory profiles, and acoustical measurements in concert halls. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1):239–250, 2014.
- [4] Densil Cabrera, Andrea Azzali, Andrea Capra, Angelo Farina, and Paolo Martignon. Perceived room size and source distance in five simulated concert auditoria. In *Proc. 12th International Congress on Sound and Vibration*, 2005.
- [5] Pavel Zahorik, Douglas S Brungart, and Adelbert W Bronkhorst. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(3):409–420, 2005.
- [6] Paul Wallace Anderson and Pavel Zahorik. Auditory/visual distance estimation: accuracy and variability. *Auditory Cognitive Neuroscience*, 5:1097, 2014.
- [7] J. Pätynen. *A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics*. PhD thesis, Aalto University School of Science, November 2011.
- [8] Sakari Tervo, Jukka Pätynen, Antti Kuusinen, and Tapio Lokki. Spatial decomposition method for room impulse responses. *Journal of the Audio Engineering Society*, 61(1/2):17–28, 2013.
- [9] ISO3382-1. *Acoustics– Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009)*.
- [10] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014. URL <http://www.R-project.org/>.
- [11] Douglas Bates, Martin Maechler, Ben Bolker, and Steven Walker. *lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4*, 2014. URL <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>. R package version 1.1-7.
- [12] Alexandra Kuznetsova, Per Bruun Brockhoff, and Rune Haubo Bojesen Christensen. *lmerTest: Tests for random and fixed effects for linear mixed effect models (lmer objects of lme4 package)*, 2014. URL <http://CRAN.R-project.org/package=lmerTest>. R package version 2.0-11.