SINFONIAORKESTERI HERÄTTEENÄ AURALISAATIOSSA

Jukka Pätynen ja Tapio Lokki

Teknillinen korkeakoulu, Mediatekniikan laitos
PL 5400, 02015 TKK
jukka.patynen@tml.hut.fi

1 JOHDANTO

TKK:n virtuaaliakustiikan tutkimusryhmä on viime aikoina paneutunut äänilähteen mallintamiseen auralisaatiota varten. Olemme tehneet kokonaisen sinfoniaorkesterin käsittäviä äänityksiä kaiuttomassa huoneessa sekä tutkineet kaikkien sinfoniaorkestereissa yleisesti esiintyvien soittimien suuntakuvioita. Tässä paperissa esittelemme lyhyesti miten orkesterimusiikkia pystytään äänittämään kaiuttomasti, millaisia äänityksiä olemme tehneet sekä miten äänitysten perusteella voidaan analysoida soittimien suuntakuvioita. Myös itse soittimien suuntaavuuteen liittyviä tuloksia esitellään tiiviisti. Lisäksi keskustellaan sinfonisen musiikin käytöstä auralisaatioissa, miten herätesignaaleja tulisi soveltaa sekä miten suuntakuvioita voidaan ottaa mukaan mallinnukseen.

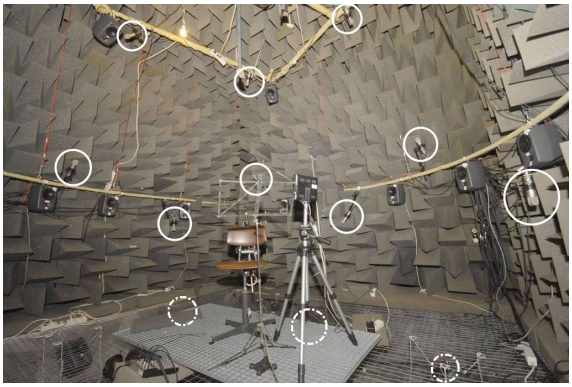
2 KAIUTON ORKESTERIÄÄNITYS

Auralisaatioissa herätesignaalina on käytetty useimmiten puhetta tai yksittäisiä soittimia. Useamman äänilähteen käyttäminen on harvinaisempaa, sillä erillisten herätesignaalien tulisi olla kaiuttomuuden lisäksi mahdollisimman puhtaasti omilla raidoillaan. Perinteisessä orkesteriäänityksessä ylikuulumista ei voida tehokkaasti välttää soitinkohtaisia mikrofoneja käyttämällä. Toisaalta soitinten äänittäminen erikseen on mahdollista, mutta soittajien keskinäinen synkronointi nousee väistämättä ongelmaksi.

TKK:lla vuonna 2008 tehdyissä kaiuttomissa orkesteriäänityksissä synkronointiongelma ratkaistiin näyttämällä soittajille videota, jossa kapellimestari johtaa korrepetiittoria. Korrepetiittori puolestaan soittaa pianolla teoksen partituurin oleellisin osin. Äänitystilanteessa soittajat seurasivat pieneltä lcd-näytöltä kapellimestaria ja kuuntelivat pianoraitaa avoimilla kuulokkeilla. Äänitystilanne on esitetty kuvassa 1(a).

Varsinaiset äänitykset tehtiin TKK:n Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitoksen pienessä kaiuttomassa huoneessa, johon asennettiin äänityksiä ja soitinten suuntakuvioiden analysointia varten 22 suurikalvoista kondensaattorimikrofonia (Røde NT1-A). Kyseisten kardioidikuvioisten mikrofonien sisäisen kohinan on mainittu olevan erityisen matala (5 dB(A)). 20 mikrofonia aseteltiin dodekaedrin muotoon (Kuva 1(b)). Kyseisen geometrian etuna on symmetrisyys sekä pallopinnan approksimointi soittajan ympärillä. Dodekaedrin muodossa olevien mikrofonien lisäksi yhdet mikrofonit sijoitettiin suoraan soittajan eteen sekä yläpuolelle. Mikrofonien sijainnin referenssipisteenä käytettiin huoneen keskipistettä, joka oli myös istuvan soittajan pään arvioitu sijainti. Mikrofonien keskimääräinen etäisyys huoneen keskustasta oli 2.13 m.

(a)



(b)

Kuva 1: Soitinäänitys kaiuttomassa huoneessa. Vasemmalla muusikko seuraa äänitystilanteessa kapellimestarivideota ja pianoraitaa kuulokkeilla. Oikealla näkymä kaiuttomasta huoneesta ja asennetuista mikrofoneista.

Äänityksissä tallennettiin otteita neljästä eri teoksesta; Mozartin kokonainen oopperaaaria sekä katkelmat Beethovenin 7. sinfoniasta, Brucknerin 8. sinfoniasta sekä Mahlerin 1. sinfoniasta. Muutamien minuuttien mittaiset näytteet edustavat eri tasoista musiikillista kompleksisuutta sekä eri kokoisia orkestereita. Äänityksiin osallistui 14 ammattimuusikkoa pääkaupunkiseudun neljästä orkesterista. Kukin soittaja äänitti kaikki oman instrumenttinsa stemmat 1.5 – 6 tunnin äänityssessioiden aikana. Lopputuloksena kaiutonta orkesterimusiikkia tallennettiin yhteensä n. 10 minuuttia. [1]

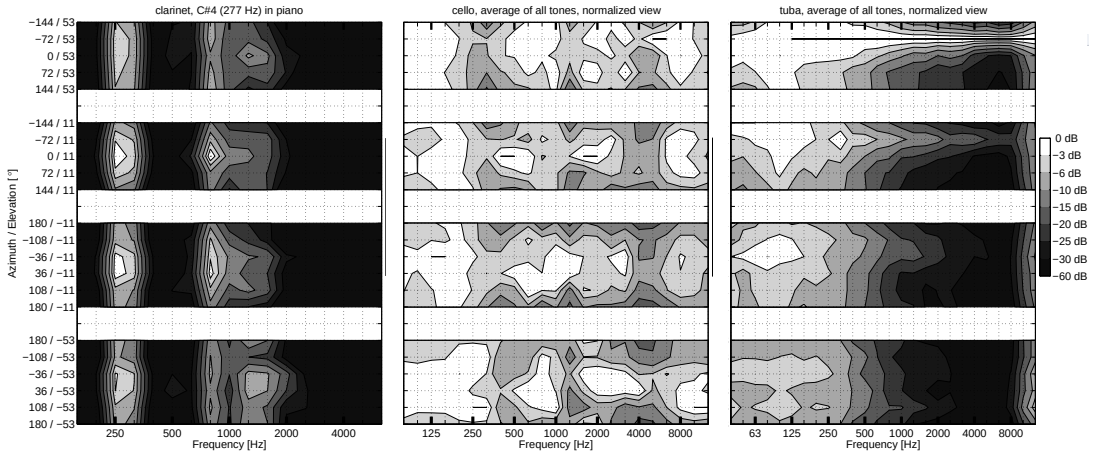
2.1 Mikrofonien ekvalisointi

Mikrofonikanavien tasot säädettiin ennen äänitysten aloittamista tasolle, jolla voitiin äänittää kaikki soittimet. Käytännössä tämä tarkoittaa madaltunutta signaali-kohinasuhdetta, mutta näin vältyttiin erilliseltä soitinkohtaiselta kalibroinnilta.

Lopullisissa paikoissaan olevien mikrofonien impulssivasteet mitattiin huoneen keskelle kääntyvään jalustaan kiinnitetyllä Genelec 1032A -kaiuttimella. Lisäksi kaiuttimen impulssivaste mitattiin isossa kaiuttomassa huoneessa B&K -mittamikrofonilla. Näiden vasteiden avulla äänityksessä käytettyjen mikrofonien taajuusvasteet voitiin kompensoida keskenään vastaaviksi. Kalibroinnin jälkeen kaikkien mikrofonien taajuusvasteet olivat 2 dB:n sisällä välillä 60 – 20 000 Hz. [1]

2.2 Jälkikäsittely

Instrumenttiäänitykset vaativat jonkin verran jälkikäsittelyä, jossa mahdolliset väärät äänet korjattiin muuten kelvollisista otoista. Osa mm. Brucknerin viulustemmoista koostettiin tarkoituksella useasta lyhyemmästä otosta poikkeuksellisen raskaasta soittotekniikasta johtuen. Vaikka soittimien keskinäinen synkronointi oli jo yllättävän hyvä, soitinryhmien välistä ajoitusta hienosäädettiin erityisesti Beethovenin sinfonian katkelman osalta. Mahlerin sinfoniassa esiintyvien monimutkaisempien rytmien vähäinen käsittelytarve osoitti käytetyn äänitysmenetelmän toimivuuden.



(a) (b) (c)

Kuva 2: Esimerkkejä suuntaavusanalyysistä. (a) Klarinetti, suuntaavuus äänellä C♯4 *piano*ssa. (b) Sellon normalisoitu keskiarvoinen suuntaavuus. (c) Tuuban normalisoitu keskiarvoinen suuntaavuus.

Ääniraitojen suuren määrän takia taustakohina nousee auralisaatiossa helposti havaittavalle tasolle. Useissa kohdissa kaikki raidat eivät sisällä yhtäaikaisesti signaalia, jolloin voidaan hyödyntää kohinaporttia (noise gate) taustakohinan vaimentamiseksi. Menetelmässä määritellään kynnysarvo, jonka alittava signaalitaso tulkitaan kohinaksi ja mykistetään. Oleellista on säätää aikavakiot sellaisiksi, ettei portti turhaan sulkeudu. Kohinatason vaihtelua ei ole havaittu häiritseväksi alustavissa auralisaatiokokeissa. [1]

3 SOITTIMIEN SUUNTAAVUUSANALYYSI

Soitinten suuntaavuutta ei ole tutkittu yhtä paljon kuin instrumenttien muita akustisia ominaisuuksia. Tunnetuin kaikkien soittimien suuntaavuutta käsittelevä lähde on 30 vuoden takaa, mutta tietoja mittaustavasta ei ole juurikaan saatavilla [2].

Orkesterisoittimien äänitysten yhteydessä tallennettiin orkesteriteosten lisäksi jokaisella soittimella joukko yksittäisiä ääniä soittimen suuntaavuuden analysointia varten. Soittimen ominaisimmalla äänialalla äänitettiin kaksi oktaavia A-duurikolmisoinnun ääniä kolmella eri dynamiikalla. Samaa mittaustapaa käyttämällä eri soittimien suuntaavuuksien vertailu on helpompaa kuin toisistaan poikkeavilla äänityksillä.

Jokaisen soittimen yksittäiset äänet käsiteltiin erikseen terssikaistaisella suodinpankilla. Tuloksena saatiin suuntaavuusdataa, joka riippuu soittimesta, soitetun äänen korkeudesta ja voimakkuudesta, taajuusalueesta sekä kahdesta kulmasta pallopinnalla. Kuusiulotteisen datan visualisoinnin helpottamista varten rakennettiin käyttöliittymä Matlab-ympäristössä.

Kuvassa 2 on esitetty muutamia esimerkkivisualisaatioita eri soittimien suuntaavuuksista. Menetelmässä taajuusakseli sijaitsee terssikaistoittain vaakasuunnassa, ja pystyakseli on jaettu neljään osaan mikrofonien geometriasta syntyviin tasoihin. Kiertokulma on valittu siten, että suoraan soittajan edessä oleva suunta on jokaisen osan keskellä. Alu-

een tummuus ilmaisee suunnan ja terssikaistan suhteellisen äänipaineen.

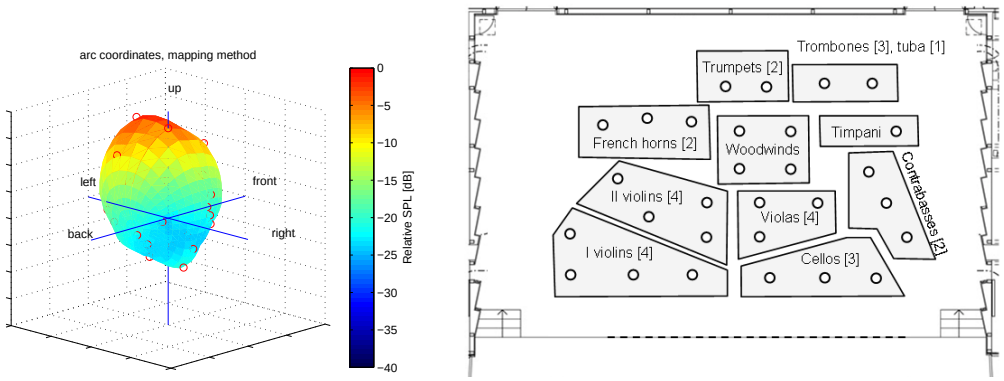
Kuvassa 2(a) on nähtävillä klarinetilla soitetun pienen C♯ -äänen (227 Hz) suuntaavuus. Klarinetille tyypillistä on toisen harmonisen puuttuminen spektristä. Huomattavaa on myös 1–2 kHz alueen voimistuminen soittimen kellon suunnassa. Käytetyllä menetelmällä havaittiin puupuhaltimien yksittäisten äänten säteilykuvion toistuvan eri rekistereissä vastaavilla sormituksilla. Myös yksittäisten harmonisten suuntaavuus on samanlainen äänillä, joilla harmoniset ovat samalla taajuudella. Keskimmäisessä kuvassa 2(b) on esitetty sellon keskimääräinen säteilykuvio normalisoituna terssikaistoittain. Tämä esitystapa jättää huomioimatta soittimen spektrin. Matalilla taajuuksilla sello on melko ympärisäteilevä. Alin mitattu ääni oli tässä tapauksessa suuri A (110 Hz). Vastaavasti viulun ja alttoviulun tapauksissa suuntaavuus havaittiin ympärisäteileväksi kielten viritystason suhteessa, joka puolestaan on lähellä soittimien rungon keskimääräisiä resonanssitaajuuksia [3].

Analyysissä vaskipuhaltimien suuntaavuus todettiin oletetun suoraviivaiseksi. Korkeat taajuudet korostuvat soittimien spektrissä voimakkaammin soitettaessa, ja soittimille ominainen laskeva säteilyteho kellon läpimitasta johtuvan rajataajuuden yläpuolella vastaa kirjallisuudessa esiintyviä arvoja [4]. Matalilla taajuuksilla vasket ovat melko ympärisäteileviä. Kuvassa 2(c) on esitetty normalisoitu tuuban keskiarvoinen suuntaavuus. Korkeilla taajuuksilla suuntaavuus on hyvin voimakasta kellon suunnassa yläetuvasemmalla. [5]

3.1 Suuntaavuus auralisaatiokäyttöä varten

Common Loudspeaker Format (CLF) on de-facto-standardi lähteiden suuntaavuuksien tallentamiseksi yleisesti käytetyissä akustiikan mallinnusohjelmissa [6]. Alun perin formaatti on tarkoitettu kaiuttimien suuntakuvioiden sekä sähköisten suureiden jakeluun, mutta tiedostotyyppiä voidaan hyödyntää myös luonnollisten lähteiden, kuten soittimien suuntaavuuden tallentamiseen. CLF-versiosta riippuen lähteen suuntaavuus ilmoitetaan oktaavi- tai terssikaistoittain koordinaatistossa, jonka voidaan ajatella olevan kyljelleen käännetty pallokoordinaatisto. Internetissä on jakelussa yksi, osin puutteellinen CLF-yhteensopiva tietokanta soittimien suuntaavuuksista, mutta mittaustapa ei ole tarkasti tiedossa [7, 2].

Kaiuttomien soitinäänitysten pohjalta olemme koonneet suuntaavuudet CLF-formaattiin auralisaatiotutkimuksia varten. Lähdedatana on käytetty kolmisoinnuista keskiarvoistettua suuntaavuutta terssikaistoittain. Suurimmat haasteet muunnoksessa ovat äänityksissä käytetyn mikrofonigeometrian muuttaminen CLF-yhteensopivaksi. Toteutettu muunnos tapahtuu interpoloimalla mikrofonien suhteelliset äänipainetasot pallon pintaa kuvaavalle tiheälle ruudukolle, josta valitaan lähin vastaava piste CLF-koordinaatiston omaan ruudukkoon. Menetelmä tuottaa pieniä virheitä kulmien valinnassa yksittäisiin pisteisiin, mutta mikrofonien suunnissa suuntaavuus vastaa tarkasti mitattuja arvoja. Kuvassa 3(a) on esitetty esimerkki tekniikasta. [8]



(a) (b)

Kuva 3: (a) Esimerkki tuuban suuntaavuudesta CLF-formaatissa 1 kHz oktaavikaistalla. Renkaat kappaleen pinnalla osoittavat mikrofonien mittausarvot. (b) Esimerkki pistelähteiden sijoittelusta orkesterin mallintamiseksi auralisaatiossa. Suluissa merkityt numerot ilmaisevat kussakin pistelähteessä käytettävien herätesignaalien määrän.

4 ORKESTERIÄÄNITTEET AURALISAATIOSSA

Orkesterin korkeatasoisessa mallinnuksessa kaiuttomia äänitteitä käytettäessä tulee ottaa huomioon muutamia seikkoja. Oikean suuntaavuuden toteuttamiseksi voidaan käyttää suuntaavuussuotimia [9], tai käyttää monikanavaisia pistelähteitä. Ensin mainittu menetelmä on toteutettavissa esim. CLF-tiedostoilla impulssivastetta laskettaessa. Jälkimmäisessä menetelmässä pistelähde jaetaan useaan keilaan, joissa käytetään eri suunnista äänitettyä kaiutonta ääntä [10, 11]. TKK:lla tehdyt kaiuttomat orkesteriäänitykset mahdollistavat molempien menetelmien tarkemmat tutkimukset.

Etenkin monikanava-auralisaatiossa tarvittavan laskennan määrä kasvaa helposti suureksi, mikäli suuri määrä lähdepisteitä on jaettu useaan säteilysuuntaan. Tällöin olisi järkevää pienentää mallissa käytettyjen lähdepisteiden määrää. Olemme päätelleet, että n. 30 pistettä olisi riittävä pisteiden lukumäärä suuren sinfoniaorkesterin mallintamiseen. Pisteiden vähentämistä voidaan perustella esim. vierekkäisten jousisoittajien hieman eri asennoilla. Tällöin täysin oikean suuntaavuuden merkitys vähenee, ja pienemmän lähteiden määrän lisäksi voitaisiin hyödyntää suuntaavuussuotimia. Kuvassa 3(b) on esitetty ehdotus lähdepisteistä, joiden riittävyyttä tutkimme parhaillaan.

4.1 Monistus

Kaiuttomissa äänityksissä useimmista jousisoittimien stemmoista äänitettiin yksi kokonainen otto. Oikeassa orkesterissa samaa stemmaa soittaa kuitenkin yli kymmenen viulistia. Vaikutelman luomiseksi suuremmasta sektiosta tarvitaan raitojen monistusta. Tätä aihetta on viime aikoina tutkittu muutamilla eri tavoilla. PSOLA-algoritmilla tehdyllä vaiheiden muutoksella ei ole havaittu suurta merkitystä jousisoittimien monistamisessa [12]. Toisaalta auralisaatiotutkimuksissa on käytetty monistettujen jousiraitojen vaihtelevaa viivästämistä, mutta tämän menetelmän vaikutusta ei ole erikseen tutkittu [11].

Omien kokemustemme perusteella olemme havainneet seuraavan menetelmän luovan melko hyvän vaikutelman suuremmasta soittajien määrästä. Alkuperäisestä raidasta tehdään kopioita käyttämällä vaihe-vokooderi-tekniikkaa pienten viritysmuutosten luomiseksi eri kopioihin. Puolisävelaskeleen ± 15 % suuruinen muutos on havaittu hyväksi maksimiksi. Tämän lisäksi jokaista kopiota siirretään ajassa luonnollisen epätarkkuuden tuottamiseksi. Viritys- ja aikaeron generoimiseksi käytetään eri funktioita, jotta kopioista saadaan keskenään vaihtelevampia. [13]

Kiitokset

Tämä työ on tehty Suomen Akatemian (projekti 119092) ja Euroopan tutkimusneuvoston (ERC, projekti 203636) rahoituksella.

VIITTEET

[1] PÄTYNEN J, PULKKI V, & LOKKI T, Anechoic recording system for symphony orchestra, *Acta Acustica united with Acustica*, **94**(2008) 6, 856–865.

[2] MEYER J, *Acoustics and the Performance of Music*, Verlag das Musikinstrument, Frankfurt/Main, 1978.

[3] HUTCHINS C M, A 30-year experiment in the acoustical and musical development of violin-family instruments, *J. Acoust. Soc. Am.*, **92**(1992) 2, 639–650.

[4] LUCE D & CLARK M, Physical correlates of brass-instrument tones, *J. Acoust. Soc. Am.*, **42**(1967) 6, 1232–1243.

[5] PÄTYNEN J & LOKKI T, Directivities of the symphony orchestra instruments, 2009, unpublished manuscript.

[6] CLF GROUP, Common loudspeaker format specification, accessed Jan. 16, 2009, http://www.clfgroup.org.

[7] PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT, Directivities of musical instruments, accessed Jan. 11, 2009, available at http://www.ptb.de/en/org/1/17/173/richtchar.htm.

[8] PÄTYNEN J, Directivities of orchestra instruments for auralization, 2009, conditionally accepted for EAA Symposium on Auralization.

[9] SAVIOJA L, HUOPANIEMI J, LOKKI T, & VÄÄNÄNEN R, Creating interactive virtual acoustic environments, *J. Audio Eng. Soc.*, **47**(1999) 9, 675–705.

[10] OTONDO F & RINDEL J H, A new method for the radiation representation of musical instruments in auralizations, *Acta Acustica united with Acustica*, **91**(2005) 5, 902–906.

[11] VIGEANT M C, WANG L M, & RINDEL J H, Investigations of orchestra auralizations using the multi-channel multi-source auralization technique, *Acta Acustica united with Acustica*, **94**(2008) 6, 866–882.

[12] LOKKI T, How many point sources is needed to represent strings in auralization?, in *the International Symposium on Room Acoustics (ISRA'2007)*, Seville, Spain, September 10-12 2007, paper P11.

[13] LOKKI T & PÄTYNEN J, Applying anechoic recordings in auralization, 2009, conditionally accepted for EAA Symposium on Auralization.