

Konserttisaliakustiikan ja musiikin vaikuttavuuden tutkimus lämpökameralla

Otto Puomio

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 3.8.2016.

Työn valvoja:

Prof. Tapio Lokki

Työn ohjaaja:

TkT Jukka Pätynen

Tekijä: Otto Puomio		
Työn nimi: Konserttisaliakustiikan ja musiikin vaikuttavuuden tutkimus lämpökameralla		
Päivämäärä: 3.8.2016	Kieli: Suomi	Sivumäärä: 8+55
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos		
Professori: S901.D Akustiikka ja äänenkäsittely		
Työn valvoja: Prof. Tapio Lokki		
Työn ohjaaja: TkT Jukka Pätynen		
<p>Aiemmissä tutkimuksissa on saatu viitteitä siitä, että konserttisalin akustiikka voimistaa musiikin aiheuttamia tunnereaktioita. Kokeissa käytetty sähkönjohtavuuden mittaussormenpäistä ei kuitenkaan kerro, minkälaisen tunteen ihminen on kokenut. Tässä työssä selvitettiin, kuinka lämpökamera soveltuu konserttisaliakustiikan ja musiikin vaikuttavuuden tutkimiseen. Mittaukset tehtiin kuunteluhuoneessa neljällä eri saliakustiikalla yhdellä ja kahdella koehenkilöllä kerrallaan ja heitä kuvattiin kuuntelun ajan. Videoista mitattiin lämpötilamuutokset sieraimen yläpuoliselta alueelta käsin, minkä lisäksi kokeiltiin mahdollisuutta automaattiseen liikeseurantaan. Koejärjestelyn aiheuttamaa lämpötilan nousua korjattiin myös polynomisovituksella. Tulosten perusteella näytejärjestyksellä oli enemmän vaikutusta nenän lämpötilaan kuin saliakustiikalla. Lukuiset virhelähteet oletettavasti vaikuttivat tuloksiin, minkä takia musiikin vaikuttavuuden tutkimuksen ei nähty olevan poissuljettua. Akustiikan aikaansaamien erojen todettiin olevan liian pieniä lämpökameralle.</p>		
Avainsanat: lämpökamera, akustiikka, musiikki, autonominen hermosto, liikeseuranta, tunteet, psykofysiologia, konserttisali		

Author: Otto Puomio

Title: Thermal Imaging Study on Impressiveness of Concert Hall Acoustics and Music

Date: 3.8.2016

Language: Finnish

Number of pages: 8+55

Department of Signal processing and Acoustics

Professorship: Acoustics and Audio Signal Processing

Supervisor: Prof. Tapio Lokki

Advisor: D.Sc. (Tech.) Jukka Pätynen

The former experiments indicate that some concert hall acoustics may amplify the emotional impact of music. However, the method reported in the study is based on skin conductivity and only shows the magnitude of the reaction, not what kind of reaction is in question. This work investigated how suitable thermal camera imaging would be for psychophysiological research of concert halls and music. The measurements were done with four different concert hall acoustics and all subjects were recorded with a thermal camera either alone or in pairs. The temperature was extracted manually from a rectangular area over one nostril. Also the possibility of using object tracking to speed up the measurement process was examined. Finally, the temperature increase found in the measurement data was compensated by polynomial fitting. The results indicated that the sample order affected the nose area temperature more than the acoustics. This was assumed to be caused by the numerous sources of error identified in the process. Therefore measuring the emotional impact of music with a thermal camera could not be excluded. On the contrary, the differences in reactions caused by acoustics were concluded to be too small to be detected with the given approach.

Keywords: thermal camera, acoustics, music, autonomic nervous system, object tracking, emotion, psychophysiology, concert hall

Esipuhe

Aluksi kiitän Tapio Lokia ja Jukka Pätystä hyvästä ohjauksesta ja arvokkaasta palautteesta, jota he antoivat koko projektin ajan. Kiitoksen ansaitsevat myös muut tutkimusryhmän jäsenet, jotka opastivat minua tutkimuksen saloihin.

Kiitän myös Pekka Puomiota, Visa Linkiötä, Minna Santaholmaa ja Susanna Peltosta työn läpiluvusta sekä arvokkaiden vinkkien ja näkökulmien jakamisesta.

Otaniemi, 3.8.2016

Otto Puomio

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Konserttisalista kuunteluhuoneeseen	3
2.1 Huone- ja saliakustiikan peruskäsitteitä	3
2.2 Konserttisalalin muodon vaikutus akustiikkaan	7
2.3 Konserttisalalien akustiikan arviointi	9
2.4 Konserttisalalin äänitys	11
2.5 Tilaimpulssivasteiden muodostaminen	13
2.6 Musiikkisisältö	14
2.7 Yhteenveto	15
3 Musiikki, tunteet ja lämpökamera	17
3.1 Autonominen hermosto ja psykofysiologiset mittaukset	17
3.2 Lämpökameran toiminta	18
3.3 Musiikin vaikutus tunteisiin	21
3.4 Lämpötilan mittaus lämpökamerakuvasta	24
3.5 Yhteenveto	26
4 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	27
4.1 Seurantaohjelman toteutus	27
4.2 Koejärjestely	28
4.3 Ääninäytteet	29
4.4 Mittaustilanne	30
4.5 Lämpötilojen analysointi	31
4.6 Yhteenveto	34
5 Tulokset	36
6 Analyysi	41
7 Yhteenveto	45
Viitteet	46
A Ohjeistus koehenkilölle	54

B Taulukko mitatuista lämpötiloista

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

Symboli	Merkitys	Lukuarvo (jos vakio)
p	Paine	
g	Kaiuttimien vahvistukset	
L	Kaiuttimien sijainti karteesisessa koordinaatistossa	
<i>I</i>	Radianssi	
λ	Aallonpituus	
<i>T</i>	Lämpötila Kelvineissä	
<i>h</i>	Planckin vakio	$6,62607004 \cdot 10^{-34} \text{m}^2\text{kg/s}$
<i>c</i>	Valon nopeus tyhjiössä	299 792 458 m/s
<i>k</i>	Bolzmännin vakio	$1,38064852 \cdot 10^{-23} \frac{\text{m}^2\text{kg}}{\text{s}^2\text{K}}$
<i>S</i>	Lämpökamerakennon vaste	
ϵ	Emissiviteetti	
$t_{(df)}$	t-testin tulos <i>df</i> vapausasteella	
<i>p</i>	tulosten merkitsevyysarvo	

Lyhenteet

ANS	Autonomic Nervous System	Autonominen hermosto
ASW	Apparent Source Width	Aistittu äänen leveys
BQI	Binaural Quality Index	Binauraalinen laatuindeksi
EDT	Early Decay Time	Varhainen vaimenemisaika
EKG	Electrocardiography	Elektrokardiografia
FLIR	Forward Looking Infrared	Lämpökamerateknikka, tässä työssä yrityksen nimi (FLIR Systems)
GEMS	Geneva Emotional Music Scale	Genevan tunnekartta musiikille
ITDG	Initial Time Delay Gap	Ensimmäisen heijastuksen viive
LEV	Listener Envelopment	Kuulijan ympäröivyyys
LTI	Linear Time-Invariant (system)	Lineaarinen aikariippumaton (systemi)
SCR	Skin Conductance Response	Ihon sähkönjohtavuus
SDM	Spatial Decomposition Method	Tilahajoitelmamenetelmä
ROI	Region of Interest	Tarkasteltava alue
VBAP	Vector Based Amplitude Panning	Vektoripohjainen amplitudipano- rointi

Konserttitalit

AC	Amsterdam Concertgebouw
CP	Cologne Philharmonie
HM	Helsingin Musiikkitalo
VM	Vienna Musikverein

1 Johdanto

Musiikki pyrkii usein välittämään kuulijalleen tunnetiloja. Niitä syntyy esimerkiksi soiton voimakkuuden, nopeuden ja esitystavan sekä musiikkikulttuurista opittujen ominaisuuksien — kuten sävellajin — kautta. Joskus musiikki voi aiheuttaa vahvan fysiologisen reaktion, kuten esimerkiksi kylmiä väreitä, palan kurkussa tai sydämen tykytyksestä. Varsinkin näitä reaktioita on havaittu syntyvän helposti musiikin äänekäimpien kohtien aikana [20]. Kaikkia musiikin välittämiä tunnetiloja ei kuitenkaan koeta, vaan usein tunne ainoastaan kuullaan eikä varsinaista reaktiota synny. Koetut tunteet taas syntyvät kuulijassa tahdosta riippumattomasti, sillä ne vaikuttavat autonomiseen hermostoon.

Autonominen hermosto on tahdosta riippumaton kehon osa, joka vastaa ihmisen tiedostamattomista ruumiintoiminnoista, kuten ruoansulatuksesta, sydämen sykkeestä ja hikoilusta. Tunteet näkyvät autonomisen hermoston toiminnassa esimerkiksi sykkeen nousuna ja tunneperäisenä hikoiluna. Tämä antaa mahdollisuuden tutkia musiikkia tavalla, joka ei riipu kuulijan kyvystä havaita ja tulkita tunteitaan.

Pätynen ja Lokki [51] hyödynsivät autonomisen hermoston aktivoitumista vertaillen konserttisaliakustiikan vaikutuksia tunteisiin. Ihon sähkönjohtavuutta mittaamalla he havaitsivat, että muutos oli suurempi saleissa, joissa musiikin äänenvoimakkuusvaihtelut olivat suurempia. He päättelivät konserttisalin vaikuttavan myös osaltaan musiikin vaikuttavuuteen. Tunteiden laatuun ei kuitenkaan otettu kantaa, koska ihon sähkönjohtavuus pystyy näyttämään ainoastaan, että jokin reaktio on tapahtunut. Syntynyt tunnetila saattaa olla yhtä hyvin vaikuttuneisuus kuin pelästymisen. Varsinaiseen erotteluun tarvitaan muita mittausmenetelmiä, joista tässä työssä keskitytään lämpökameraan

Lämpökameraa on käytetty aiemmin perustunteiden tutkimuksessa [26]. Menetelmä perustuu havaintoon, jonka mukaan autonominen hermosto vaikuttaa ihon eri alueiden lämpötilaan. Erityisesti nenän on havaittu usein jäähtyvän tunteiden vaikutuksesta [26]. Lämpökameratutkimusta on tehty muun muassa ilon [44], pelästymisen [46] ja syyllisyyden [25] tunteilla, mutta musiikin vaikutuksista ei ole tehty vastaavaa tutkimusta.

Tämän työn lähtökohtana on ollut selvittää, soveltuuko lämpökamera konserttisaliakustiikan ja musiikin vaikuttavuuden tutkimiseen. Menetelmällä olisi etuja muihin mittaustapoihin verrattuna. Ensinnäkään kyseinen kuvausväline ei tarvitse ihon sähkönjohtavuusmittauksen tapaan fyysistä kontaktia koehenkilöön, joten kameraa voisi käyttää esimerkiksi oikeassa konserttitilassa. Useamman henkilön kuvaaminen yhtä aikaa ei olisi poissuljettua, mikä voisi kasvattaa kokeiden osallistujamäärää. Aiemmat

lämpökameralla tehdyt tutkimukset viittaavat myös siihen, että ainakin jotkin tunteet olisivat eroteltavissa lämpökamerakuvasta. Tällöin myös musiikin tunnetutkimus voisi hyötyä menetelmän käytöstä.

Työn mittauksissa selvitettiin, jäähtyykö ihmisen nenän alue musiikin vaikutuksesta ja vaikuttaako konserttisalin akustiikka tämän reaktion voimakkuuteen. Mittausta ei voitu kuitenkaan tehdä suoraan yksittäisten kuvapisteidien arvoista lämpökameravideolla koehenkilöiden liikkeen takia. Tätä varten tehtiin ohjelmisto, jonka avulla lämpötila mitattiin kuvatusta lämpövideosta. Lisäksi ohjelmaan toteutettiin kaksi liike-seurantamenetelmää automatisoimaan mittausalueen asettelua. Kuuntelukokeita tehtiin sekä yksittäisillä koehenkilöillä että pareittain, jotta mahdollisuutta ryhmäkuvaamiseen voitiin kokeilla.

Työn rakenne on seuraavanlainen. Luvussa 2 tutustutaan työn akustiseen puoleen. Luvussa käsitellään yleisiä konserttisaliakustiikan termejä, konserttisalien tyyppejä ja salien subjektiivista arviointia. Tämän lisäksi esitellään äänentoistojärjestelmä, jota on hyödynnetty kokeisiin käytetyssä kuunteluhuoneessa. Luvussa 3 on puolestaan käsitelty kokeen mittauksiin liittyviä seikkoja. Luku sisältää muun muassa autonomisen hermoston esittelyn, kirjallisuuskatsauksen musiikin tunnetutkimukseen sekä tietoa lämpökameran toimintaperiaatteista. Luku 4 on omistettu koejärjestelyille; seurantaohjelman toteutus, koejärjestely sekä mittausdatan jälkikäsitely ovat tässä osassa. Luku 5 esittelee työn tulokset, joita analysoidaan luvussa 6. Työ päättyy yhteenvetoon luvussa 7.

2 Konserttisalista kuunteluhuoneeseen

— eli kuinka toistaa konserttisalin akustiikka kuunteluhuoneessa?

Musisoidessa soittimen ääni ja tilan akustiikka sulautuvat erottamattomasti toisiinsa. Tila korostaa joitain äänen piirteitä ja sitoo soitettuja nuotteja yhteen. Huone voi esimerkiksi saada instrumentin kuulostamaan siltä, että ääni syntyisi suuremmasta esineestä kuin mitä soittimen fyysiset mitat ovat. Vastaavasti esiintyjä kuuntelee soittoaan esitystilassa ja mukautuu tiedostamattaankin sen akustiikkaan. Tavallisessa esiintymistilanteessa muusikon sopeutuminen akustiikkaan on toivottavaa, mutta itse akustiikan tutkimiselle ilmiö on ongelmallinen — kuinka eri salien akustiikkoja voidaan verrata, jos soittaja ei kykene toistamaan ääntä täsmälleen samalla tavalla?

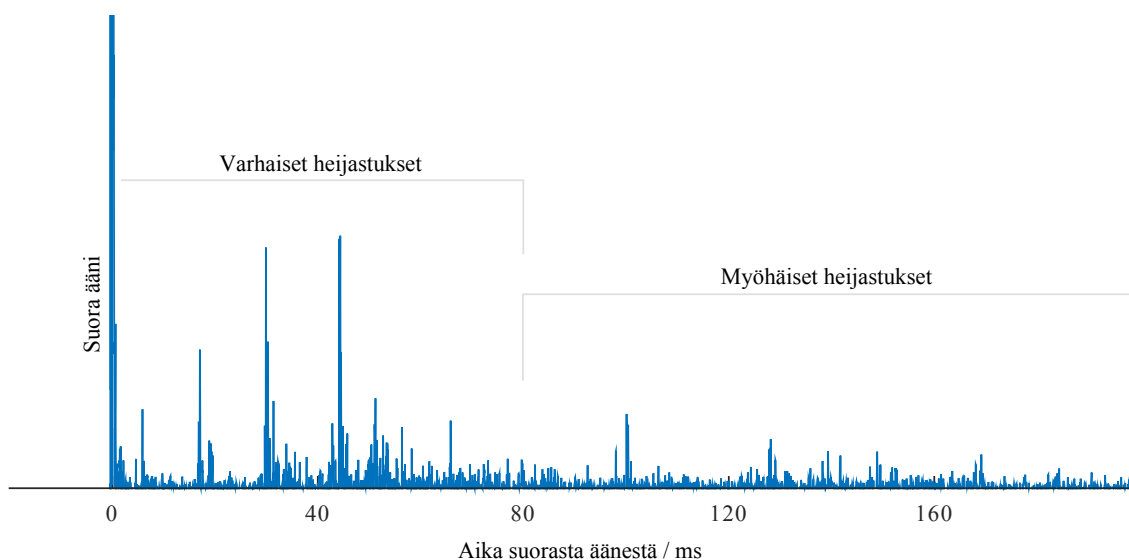
Tämä luku selvittää lukijalle tutkittavien ääniärsykkeiden syntyä. Luvussa esitellään saliakustiikan peruskäsitteitä sekä tarkastellaan saliakustiikan toistamista kuunteluhuoneessa. Lisäksi kuvataan menetelmä, jolla akustiikka on saatu äänitettyä ja edelleen toistettua siten, että esiintyjän sopeutuminen soittotilan akustiikkaan on vältetty. Prosessi esitellään lukijalle, jotta tämä voi luottaa konserttisalin tilaäänien toistuvan uskottavasti; menetelmä on pohjana tämän työn kuuntelukokeille. Käytetyt menetelmät eivät kuitenkaan ole työn keskiössä, minkä takia ne esitellään vain pintapuolisesti.

2.1 Huone- ja saliakustiikan peruskäsitteitä

Jotta konserttisalien arviointia ja ominaisuuksia voisi ymmärtää paremmin, on tärkeää tuntea huone- ja saliakustiikan peruskäsitteitä. Tässä alaluvussa esitellään tärkeimpiä alan termejä sekä parametreja, joita käytetään vertailtaessa konserttisalien akustiikkaa. Kaikkia mahdollisia tunnuslukuja ei kuitenkaan käsitellä, vaan ainoastaan termit, jotka ovat nykyisen tutkimustiedon perusteella [41] osoittautuneet tärkeiksi.

Impulssivaste

Lähes kaikkien akustisten parametrien pohjana on tilan impulssivaste, joka kuvaa salin vaikutusta siellä soitettuun ääneen. Mittaus tehdään soittamalla huoneessa lyhyt ääniheräte, joka heijastelee tilan eri pinnoista ja vaimentuu matkalla kuulijalle. Näin syntynyt impulssivaste muodostuu sekä suoraan äänilähteeltä tulleesta että eri pinnoilta heijastelleesta äänestä. Yleensä kuulija ei kuitenkaan erota yksittäisiä heijastuksia, vaan ääni kuulostaa jäävän "soimaan" saliin. Tapahtuma on kuin lineaarinen aikariippumaton systeemi (engl. Linear Time-Invariant system, LTI), johon syöttämällä impulssi saadaan ulos systeemin vaste.



Kuva 1: Ensimmäiset 180 ms neliöityä impulssivastetta jaoteltuna suoraan ääneen sekä varhaisiin ja myöhäisiin heijastuksiin.

Helpoiten tilan impulssivasteesta kuulee kaiuntaisuuden. Kaikuisassa huoneessa ääni jää soimaan pidemmäksi aikaa kuin kaiuttomammassa huoneissa, joissa sointi voi olla hyvinkin lyhyt. Jotta kaiuntaisuus olisi helpompi verrata, erilaisia parametreja on kehitetty kuvaamaan tätä ominaisuutta.

Yksinkertaisin kaiuntaisuutta kuvaava parametri on jälkikaiunta-aika. Se kuvaa, kuinka nopeasti huoneessa soitettu ääni vaimenee kuulumattomiin. Tarkempaan määritelmänä jälkikaiunta-ajan pituus on aika, joka äänellä kestää vaimentua 60 dB alkuperäisestä voimakkuudestaan, kun äänen synnyttävä lähde sammutetaan. Toinen kaiuntaisuutta kuvaava arvo on varhainen vaimenemisaika (engl. Early Decay Time, EDT). Varhainen vaimenemisaika on määritelty lähes samalla tavalla kuin jälkikaiunta-aika, mutta ilmoitettava aika on äänilähteen sammumisesta 10 dB vaimennukseen asti kerrottuna kuudella. Kertolasku tehdään, jotta jälkikaiunta-aikaa ja EDT:tä voidaan vertailla helposti. EDT:n on havaittu kuvaavan paremmin huoneen aistittua kaiuntaisuutta kuin jälkikaiunta-ajan. [4]

Impulssivasteen jakaminen

Kaiuntaisuudesta poiketen valtaosa muista akustisista parametreista perustuu sille, kuinka impulssivasteen energia jakautuu ajassa. Vaste jaetaan usein osiin suoran äänen saapumisajan perusteella. Tilasta saadun vasteen voi esimerkiksi jakaa kuvassa 1 esitetyllä tavalla suoraan ääneen sekä varhaisiin ja myöhäisiin heijastuksiin. Suora

ääni kulkee lyhintä mahdollista reittiä lähteeltä mittauspisteelle ilman heijastuksia. Varhaiset heijastukset taas tavoittavat mittauspisteen pian suoran äänen jälkeen, ja myöhäiset heijastukset saapuvat vastaavasti myöhemmin. Varhaisten ja myöhäisten heijastusten raja on häilyvä, mutta niiden väliseksi aikarajaksi on sovittu 80 millisekuntia suoran äänen saapumishetkestä [4].

Varhaiset heijastukset vaikuttavat aistitun äänen väriin sekä tilan ja tulosuunnan tuntuun. Hyvin nopeasti (alle 30 ms) saapuvat varhaiset heijastukset värittävät ääntä. Tällaisia heijastuksia syntyy esimerkiksi lattiasta, jonka kautta ääni kulkee lähes yhtä nopeasti mikrofoniin, kuin mikä lyhin mahdollinen reitti olisi. Myöhemmin saapuvat varhaiset heijastukset muuttavat äänenväriä lisäksi tilavaikutelmaa; tällaisia heijastuksia syntyy muun muassa salin sivuseinistä. Yleensä varhaiset heijastukset ovat vaihteita suhteessa suoraan ääneen. Tällöin ne eivät vaikuta aistittuun tulosuuntaan, vaan suora ääni määrittää sen kokonaan. Kuitenkin jos varhaiset heijastukset ovat kyllin vahvoja, suunta-aistimus voi voimakkaimmillaan kääntyä yksittäisen heijastuksen suuntaan. Esimerkiksi koverat pinnat voivat keskittää ääntä tiettyyn pisteeseen, jolloin kyseisessä pisteessä varhainen heijastus voi voimakkuudellaan dominoida äänen suunta-aistimusta. [2]

Myöhäiset heijastukset eivät vaikuta tilaääneen yhtä voimakkaasti kuin varhaiset verrokkinsa [2], mutta ne vaikuttavat musiikin ympäröivyyteen [7]. On toivottavaa, että nämä heijastukset ovat varhaisia heijastuksia vaihteampia, koska vahvat myöhäiset heijastukset aistitaan häiritsevänä kaiuntana [2]. Vahvistuessaan riittävästi ne voidaan aistia jopa erillisinä äänitapahtumina — toisin sanoen kaikuina [18].

Huoneakustiset parametrit

Useat huoneakustiset parametrit vertailevat aikaisten ja myöhäisten heijastuksien välisiä energiasuhteita. Tällaisia parametreja ovat äänen voimakkuus, selkeys, läheisyys, lämpö sekä tilavaikutelma, joka voidaan jakaa vielä aistittuun äänen leveyteen (engl. Apparent Source Width, ASW) ja kuulijan ympäröivyyteen (engl. Listener Envelopment, LEV). Seuraavaksi nämä parametrit esitellään sekä kerrotaan, kuinka ne voi havaita ja mitkä salin ominaisuudet vaikuttavat kyseisten ilmiöiden syntyyn.

Äänen voimakkuus mittaa nimensä mukaisesti, kuinka voimakkaalta ääni subjektiivisesti kuulostaa. Voimakkuutta arvioidaan vertaamalla aikaisten heijastusten äänenpainetasoa kaiuttoman huoneen vastaavaan tasoon. Aistittuun voimakkuuteen vaikuttaa siis se, kuinka suuret painevaihtelut saadaan synnytettyä 80 ms sisällä suoran äänen saapumisesta. [4]

Selkeys kuvaa, kuinka hyvin kuulija pystyy erottamaan peräkkäin soitetut sävelet

toisistaan. Siihen vaikuttaa varhaisten ja myöhäisten energioiden suhde. Salissa pystyy erottamaan erilliset nuotit paremmin, kun varhaiset heijastukset ovat myöhäisiä voimakkaampia — tila on tällöin selkeä. Varhaisen ja myöhäisen energian ollessa lähempänä toisiaan sali sitoo soitetut nuotit paremmin toisiinsa. [4]

Toisinaan konserttisalissa oleva äänilähde vaikuttaa olevan lähempänä kuulijaa, kuin mitä se fyysisesti on. Tätä salin akustista piirrettä kutsutaan läheisyydeksi. Beranek [4] oli havainnut yhteyden läheisyyden ja ensimmäisen heijastuksen viiveen välillä. Hyvissä saleissa hän totesi aikavälin suoran äänen ja ensimmäisen heijastuksen välillä olevan alle 25 ms, kun taas huonoissa saleissa viive on ollut jopa 60 millisekuntia. Tätä yhteyttä ensimmäisen heijastuksen viiveen (engl. Initial Time Delay Gap, ITDG) ja läheisyyden välillä ei ole kuitenkaan yleisesti hyväksytty, koska ITDG on riippuvainen huonegeometrian lisäksi etäisyydestä äänilähteeseen [3, s. 42]. Sen sijaan varhaisilla heijastuksilla yleisesti vaikuttaa olevan osuutta läheisyysvaikutelmaan. Läheisyyden tunnun on havaittu vahvistuvan sivuttaisheijastusten energiasta yli 1,4 kHz taajuusalueella [38].

Ääni voi myös vaikuttaa säteilevän äänilähdettä suuremmalta alueelta. Tämä niin kutsuttu tilan tuntu syntyy pääosin salin sivuttaisheijastuksista [4]. Kuten edellä jo mainittiin, tilan tuntu koostuu aistitusta äänen leveydestä (ASW) ja kuulijan ympäröivyydestä (LEV). ASW kuvaa nimensä mukaisesti aistittua lähteen leveyttä, kun taas LEV vastaa aistimusta, jonka mukaan musiikki ympäröi kuulijan. ASW syntyy aikaisten sivuttaisheijastusten suhteellisesta voimakkuudesta verrattuna kuulijalle saapuvaan kokonaisenergiaan [4, 7]. LEV puolestaan riippuu myöhäisten heijastusten suunnasta ja voimakkuudesta. Toisin kuin ASW, joka riippuu eniten sivuttaisista heijastuksista, LEV:iin vaikuttaa merkittävästi myös ylhäältä ja takaa tulevat heijastukset [13].

Sivuttaisheijastukset saavat äänen kuulostamaan erilaiselta vasemmassa ja oikeassa korvassa. Tämän ilmiön on havaittu korreloivan vahvasti hyvien saliarvostelujen kanssa. Mitä erilaisempi kuultu ääni on korvien välillä, sitä paremmin sali on usein arvosteltu. Tätä ominaisuutta kuvataan binauraalisella laatuindeksillä (engl. Binaural Quality Index, BQI). BQI kertoo, kuinka paljon äänisignaalit eroavat toisistaan vasemmassa ja oikeassa korvassa. Hyvissä saleissa BQI on yleisesti enemmän kuin 0,5. Poikkeuksen tähän tekevät viinitarhasalit (ks. luku 2.2), joissa BQI on usein pienempi kuin muun muotoisilla saleilla. [4]

Konserttisalin lämmöllä kuvataan sitä, kuinka hyvin bassoäänet kuuluvat tilassa muun orkesterin alta. Musiikin havaittua lämpimyyttä voidaan arvioida mittaamalla kohinan synnyttämä äänenpainetaso 125 Hz oktaavikaistalla eri puolilla yleisöä

[4]. Tällä parametrilla löytyy kaksi ääripäätä. Jos bassotaajuudet korostuvat liikaa, salia kuvataan tummaksi; toisaalta vaihteat bassot taas kärsivät akustisen lämmön puutteesta [4]. Parametrille kuvaavampi nimitys voisikin olla bassoisuus [41], joka ei itsessään ota nimellään kantaa akustiseen lämpötilaan.

2.2 Konserttisalin muodon vaikutus akustiikkaan

Konserttisalin muoto vaikuttaa osaltaan salissa vallitsevaan akustiikkaan. Ilmiö johtuu pitkälti edellisessä alaluvussa esitellyistä heijastuksista. Kun salin muoto muuttuu, varhaisten ja myöhäisten heijastusten tulosuunta, voimakkuus ja tilajakautuma muuttuvat. Tästä syystä konserttisalien kategorisointia muodon mukaan voidaan pitää perusteltuna.

Vaikka saliakustiikassa on joitain vakiintuneita termejä yleisimmille salityypeille, yleistä muototypologiaa ei ole vakiintunut alalle. Haan ja Fricke [17] jakoivat salit viiteen eri ryhmään, joita Kwon ja Siebein [39] uudelleennimesivät vastaamaan alalle vakiintuneempaa termistöä. Uudelleennimetyt ryhmät ovat kenkälaatikko, viuhka, hevosenkenkä, areena ja epäsäännöllinen. Tässä työssä muotoryhmittelyyn on vielä lisätty "viinitarha" [50], joka tunnetaan myös englanninkielisillä nimillä "surround shape" [6] ja "vineyard" [50]. Taulukossa 1 on lueteltu työssä käytetty muototypologia yleispiirteineen ja esimerkkisaleineen. Kuvassa 2 taas on esitelty edellä mainituista luokista kenkälaatikko, puoliareena ja viinitarha, joihin tutustutaan seuraavaksi tarkemmin. Muita geometrioita ei käsitellä tässä työssä lähemmin.

Kenkälaatikon mallisessa konserttisalissa tilan sivuseinät ovat yhdensuuntaiset ja takaseinä on suora [39]. Orkesteri on sijoitettu yhteen päähän huonetta, ja sivuseinien yläosat ovat vapaana äänen heijastuksille [22]. Edustava esimerkki kenkälaatikkosalista on Vienna Musikvereinsaal, jota nykyään pidetään yhtenä maailman parhaista konserttisaleista [4]. Tämän malliset salit kuulostavat usein läheisemmiltä kuin viinitarhan malliset tilat, ja musiikki tuntuu soivan joka puolella kuulijaa [50]. Beranekin [4] mukaan kaksi kolmasosaa erinomaisista saleista onkin kenkälaatikkojen mallisia.

Areenan mallisessa salissa yleisö kiertää keskelle tilaa sijoitetun lavan ympäri. Puoliareena rikkoo tätä kaavaa asettamalla lavan pois salin keskiöstä. Yleisön ei myöskään tarvitse kiertää koko lavaa [39]. Areenoilla ja puoliareenoilla on harvoin vahvoja sivuttaisheijastuksia, koska sivuseiniä ei ole heijastamassa ääntä takaisin yleisöön. Puoliareenan kategoriaan voidaan sijoittaa esimerkiksi Royal Albert Hall [4]. Myös työn mittauksissa käytetty Cologne Philharmonie on sijoitettu tähän luokkaan, vaikka salissa on myös viuhkamaisia piirteitä.

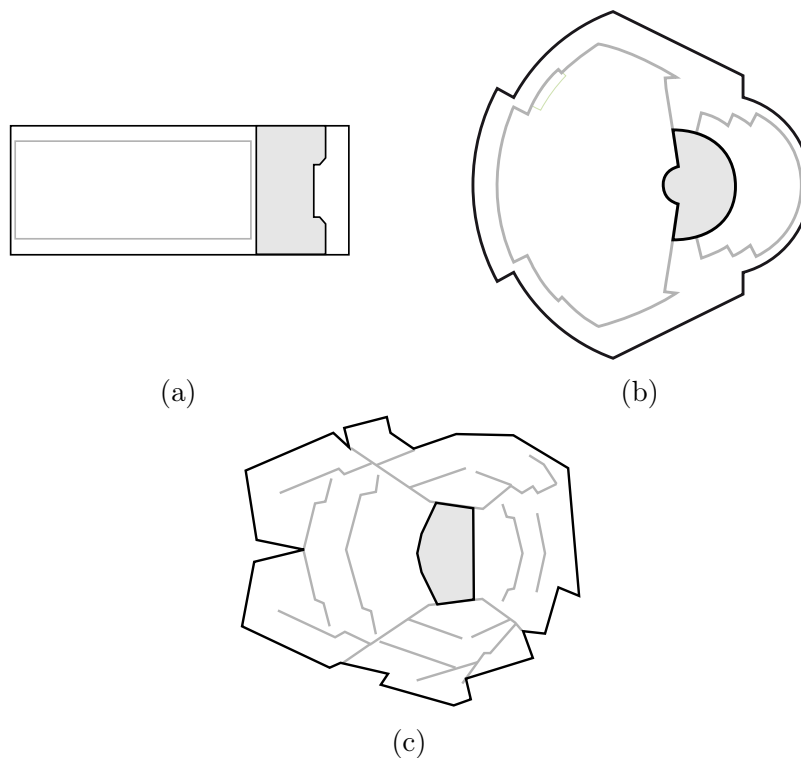
Viinitarhan mallinen sali muistuttaa areenaa siinä, että yleisö ympäröi lavan

joka puolelta [4]. Areenasta viinitarha kuitenkin eroaa yleisön jaottelussa. Siinä missä edellä mainitussa yleisö on jakautuneena tasaisena kenttänä salin laidoilta, jälkimmäisessä istumapaikat on jaettu pienempiin osastoihin. Nämä osastot on sijoitettu eri korkeuksille siten, että syntyneistä etu- ja sivuseinistä saadaan varhaisia sivuttaisheijastuksia kuulijalle. Usein lavan päälle on myös rakennettu heijastava pinta, joka synnyttää varhaisen heijastuksen yleisölle [4, 5]. Edustavana esimerkkinä viinitarhan malliselle konserttisalille on Berlin Philharmonie [4], ja myös Helsingin Musiikkitalo kuuluu tähän kategoriaan.

Viinitarhasalit tyypillisesti erottelevat musiikkia paremmin kuin kenkälaatikot; kuulija pystyy erottamaan soitosta pienetkin vivahde-erot tavalla, joka ei ole suorakulmaisessa salissa mahdollista [50]. Kääntöpuolena erottelevuudelle on kuitenkin ympäröivyyden väheneminen. Toisin kuin kenkälaatikossa, viinitarhassa kuuntelija "katsoo" musiikkia [50]. Toisin sanoen soitto ei ympäröi kuulijaa, vaan ääni kuulostaa aina tulevan lavalta. Korkeiden taajuuksien on huomattu vaimenevan erityisesti lavan takaisissa katsomoissa, mikä johtuu instrumenttien suuntaavuuksista [5]. Salin havaitut dynamiikkaerot on myös todettu rajoittuneemmiksi kuin kenkälaatikoissa [50].

Taulukko 1: Tässä työssä käytetty typologia konserttisalien muodoille. Mukailtu viitteestä [39].

Muoto	Esimerkki	Beranek [4] sivunumero	Ominaispiirteet
Kenkälaatikko	Vienna Musikverein, Wien	173	Tilan muoto suorakulmainen.
Viuhka	Neues Festspielhaus, Salzburg	169	Lavalta katsottuna katsomo avautuu viuhkamaisesti.
Hevosenkenkä	Teatro Alla Scala, Milano	355	Katsomon takaosa kaareutuu tasaisesti sivuseiniin.
Areena	Boettcher Concert Hall, Denver	81	Katsomot kiertävät salin ympäri, lava keskellä salia.
Puoliareena	Royal Albert Hall, Lontoo	237	Kuin areena, mutta joko lava on sijoitettu pois salin keskiöstä ja/tai yleisö ei kierrä koko lavaa.
Viinitarha	Berlin Philharmonie, Berliini	297	Yleisö jaettu pienempiin osastoihin ja sijoitettu orkesterin ympärille.
Epäsäännöllinen	Liederhalle Beethovensaal, Stuttgart	325	Salit, jotka eivät sovi ylläoleviin kategorioihin.



Kuva 2: Esimerkit kenkälaatikon, puoliareenan ja viinitarhan muotoisille saleille. (a) Kenkälaatikkosali on suorakulmainen. Lava (harmaalla) sijaitsee yhdessä päässä salia. (b) Puoliareenassa yleisö on sijoittunut lavan ympärille. Toisin kuin areenassa, puoliareenan lava on sijoitettu pois tilan keskiöstä. (c) Viinitarhasalissa lava on sijoitettu keskelle salia. Puoliareenan tavoin yleisö on sijoitettu lavan ympärille. Edellisestä poiketen viinitarhassa katsomo on jaoteltu osastoihin (harmaat viivat). Kuvat mukailtu lähteestä [63].

2.3 Konserttisalien akustiikan arviointi

Alaluvuissa 2.1 ja 2.2 käsiteltiin tärkeimpiä huoneakustisia parametreja sekä konserttisalin muodon vaikutusta akustiikkaan. Nämä piirteet eivät kuitenkaan kerro suoraan, mikä konserttisali on hyvä ja mikä huono. Konserttisalien akustiikan arvioinnilla pyritäänkin selvittämään yhteys salin ominaisuuksien ja kuulijan mieltymysten välillä. Jos tällainen yhteys löytyisi, voitaisiin luoda paremmin salin hyvyttä kuvaavia parametreja. Myös kun akustisen preferenssin perusteet tunnetaan, on mahdollista rakentaa entistä paremmalta kuulostavia konserttisaleja.

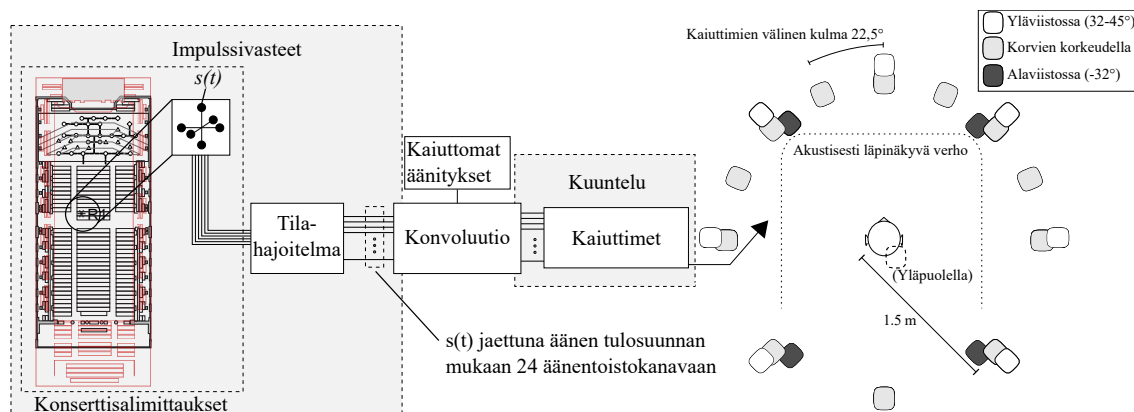
Yhteyttä huoneakustisten parametrien ja subjektiivisen preferenssin välillä on tutkittu lukuisissa tutkimuksissa, jotka ovat pääasiassa pohjautuneet joko laboratoriossa tehdyille kuuntelukokeille tai kyselytutkimuksille [35]. Schroeder et al. [56] äänitti keinopään ja stereokaiuttimien avulla kaiutonta orkesterimusiikkia eri konsert-

tisaleissa. Saatuja äänitteitä toistettiin koehenkilöille parivertailuna, jossa henkilö sai halutessaan valita kahdesta näytteestä mieluisemmalla kuulostavan. Soulodre ja Bradley [59] tekivät vastaavanlaisia tutkimuksia, mutta he pakottivat kuulijan valitsemaan toisen näytteistä. Tämän lisäksi kuulijoilla vertailutettiin myös aistittuja saliakustisia ominaisuuksia. Kyselytutkimuksista mainittakoon Beranek [4], joka on tehnyt haastatteluja ja kyselytutkimuksia musiikin ammattilaisille muodostaessaan maailman 58 parhaan konserttisalin listan.

Uudemmissa tutkimuksissa on käytetty myös muita arviointimenetelmiä. Kocher ja Vigeant [35] tutkivat preferenssiä suhteessa kaiuntaisuuteen, LEV:iin ja äänenlaatuun (engl. tonal quality). Parametreista viimeinen viittaa yleisesti äänen basso-, keski- ja korkeiden äänien voimakkuuteen ja niiden keskinäiseen tasapainoon. Keinopäällä taltioitu ääni toistettiin koehenkilöille kuulokkeilla, jotka arvioivat äänitteen akustisia ominaisuuksia jatkuvalla asteikolla.

Viimeisenä esimerkkinä mainitaan Lokki et al. [41] tutkimus, jonka käyttämiin tekniikoihin tämä työ pohjautuu. He äänittivät Euroopan konserttisaleja 34 kaiuttimen kokoonpanolla. Saaduista impulssivasteista ja kaiuttomista soitinäänityksistä muodostettiin ääninäytteet kuuntelukokeisiin. Koehenkilöt arvioivat näytteitä itse määrittämillään kriteereillä, jotka yhdisteltiin jälkikäteen isommiksi kokonaisuuksiksi. Näin muodostettiin yhteisiä akustisia mittareita, joita verrattiin lopulta koehenkilöiden mieltymyksiin.

Edellä esiteltujen kokeiden tulokset osoittavat hyvän akustiikan koostuvan useista ominaisuuksista. Schroeder et al. [56] havaitsivat koehenkilöiden preferoivan kahden sekunnin EDT:a. Soulodre ja Bradley [59] taas yhdistivät selkeyden ja diskantin hyvään akustiikkaan, ja Beranek [4, s. 506] totesi BQI:n olevan hyvä indikaattori laadukkaalle akustiikalle. Uudemmat tutkimukset ovat kuitenkin havainneet, että hyvän ja huonon konserttisalin käsite on monimutkaisempi, kuin mitä voisi olettaa. Lokki et al. [41] löysivät koehenkilöistä kaksi preferenssiryhmää, joista toinen piti kirkkaasta ja erottelevasta akustiikasta ja toinen arvosti enemmän bassoisuutta, ympäröivyyttä ja äänenvoimakkuutta. Kocher ja Vigeant [35] onnistuivat yhdistämään kaikki kolme tutkimaansa parametria (kaiuntaisuus, ympäröivyyden ja äänenväri) arvioijien preferenssiin. Eniten vaikuttava parametri kuitenkin riippui musiikista; äänenlaatu korreloi eniten sellon sooloesityksen, LEV Mozartin ja kaiuntaisuus Bizet'n kanssa. Tämä havainto vahvistaa edelleen käsitystä siitä, että eri tyylilajit sopivat tiettyjen konserttisalien akustiikkaan paremmin kuin toisten [4].



Kuva 3: Lokin [40] kehittämä menetelmä konserttisalin akustiikan toistolle. Kuva muokattu lähteestä [51].

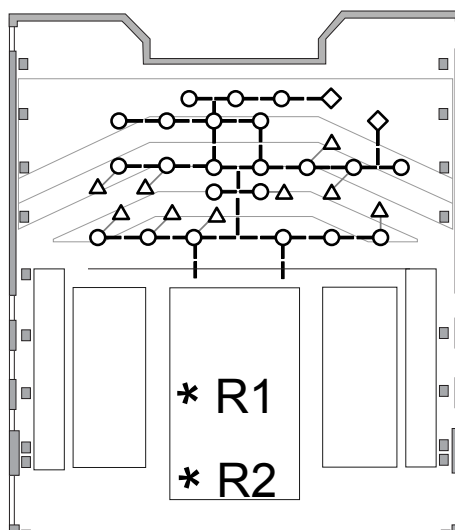
2.4 Konserttisalin äänitys

Edellisessä alaluvussa esiteltiin tutkimuksia, joilla on pyritty arvioimaan konserttisaliakustiikan laatua. Saleista onkin osattu sanoa jo pitkään, mikä tila on akustiikaltaan huono ja mikä hyvä. Kuitenkaan tarkkaa vertailua salien välillä ei ole voitu tehdä, koska ihmisen äänimuisti on liian lyhyt [40]. Koehenkilöt ehtivät unohtaa yksityiskohtaiset erot siirtyessään eri salien välillä. Monet edellisen alaluvun tutkimuksista [35, 41, 56, 59] ovatkin ratkaisseet logistisen ongelman äänittämällä salin akustiikkaa monikanavaisesti ja kuunteluttamalla saatua tallennetta kuunteluhuoneessa. Toisto ei kuitenkaan ole ongelmaton kaiuttimien ristiinkuulumisen (engl. cross-talk) takia. Kuulokset on myös todettu ongelmallisiksi äänen sijainnin havaitsemisessa [59].

Lokki [40] on ratkaissut nämä ongelmat kuvassa 3 esitetyllä menetelmällä. Aluksi konserttisalista mitataan impulssivasteita 34 kaiuttimen kokoonpanolla ja kuuden mikrofoniin asetelmalla. Mitatuista impulssivasteista selvitetään signaalinkäsittelyllä äänen heijastusten tulosuunnat, joihin yhdistetään konvoluimalla eri soittimien äänet. Lopputuloksena saadaan kaiutinvasteet kullekin kuunteluhuoneen kaiuttimelle.

Kuvan 3 menetelmä esitellään seuraavissa alaluvuissa. Tässä alaluvussa esitellään konserttisalin äänitys, alaluvussa 2.5 tutustutaan suuntaestimaattien laskemiseen ja alaluvussa 2.6 käsitellään kokeessa käytettyjä soitinäänityksiä.

Konserttisaliakustiikan voidaan ajatella olevan osa akustista tiedonsiirtoketjua. Yksinkertaisimmillaan tällainen ketju koostuu kolmesta osasta: äänilähteestä, väliaineesta ja vastaanottimesta. Ketjuun voidaan myös lisätä informaatio, jota äänilähteellä halutaan välittää, sekä vastaanottimen päässä lähetetyn viestin ymmärtäminen. Konserttisalin voi asettaa tässä ketjussa välittäjän tilalle, kun taas orkesteri (tai



Kuva 4: Äänityksissä käytetty kaiutinorkesteri. Ympyrät ovat katsomoon ja kolmiot ylöspäin suunnattuja kaiuttimia. Kuvan alalaidassa näkyy kaksi lähintä äänityspistettä (R1 ja R2), joista impulssivasteet mitattiin kuuden mikrofoniin asetelmalla. Kuva mukailtu lähteestä [51].

soittaja) ottaa lähteen, musiikki informaation ja kuulija vastaanottimen paikan.

Jo tässä vaiheessa voidaan havaita, että ketjussa on hyvin monta muuttujaa. Kuten edellä todettiin, ihmisen äänimuisti on hyvin lyhyt ja vaikka näin ei olisi, itse soittajat eivät kykene soittamaan samaa kappaletta täsmälleen samaan tapaan. Lokin [40] mukaan tämä johtuu osittain siitä, että soittajat itse mukauttavat soittonsa tilan akustiikkaan. Tarkasteltava menetelmä perustuukin sopeutumisen poistamiseen — korvataan orkesteri kaiuttimilla, ja asetetaan kuulijan tilalle mikrofoni. Tämä "kaiutinorkesteri" ei mukaudu saliakustiikkaan, mikä vakioi soittajien esityksen tiedonsiirtoketjussa. Tällöin ainoa muuttuja ketjussa on enää konserttisalin akustiikka.

Koska akustinen tiedonsiirto riippuu ajan lisäksi tilasta, täytyy lähteen ja vastaanottimen paikat asetella samalla tavalla eri konserttisalien välillä. Kaiuttimien paikat käytetyssä "kaiutinorkesterissa" onkin vakioitu. Kuvassa 4 on esitelty kaiutinorkesterin asemointi konserttisalin lavalla. Tämän lisäksi äänitys tehtiin vakioiduilta paikoilta yleisössä siten, että mittausetäisyydet kaiutinorkesteriin pyrittiin pitämään vakioina (7, 11, 15, 19 ja 23 m) eri salien välillä. Äänitykseen käytettiin kuuden mikrofoniin ryhmää, jotta tilääni saataisiin tallennettua mahdollisimman hyvin. Jokaisesta kaiutinorkesterin kaiuttimesta mitattiin impulssivaste jokaiseen äänityspisteeseen, ja jokaisessa äänityspisteessä saatiin kuusi eri mikrofonisignaalia kaiutinta kohden. [52]

2.5 Tilaimpulssivasteiden muodostaminen

Kuudella mikrofoniilla äänitettyä impulssivastetta ei voida sellaisenaan siirtää kuunteluhuoneeseen. Nauhoitetut signaalit eivät itsessään vastaa mikrofoniin suunnasta toistettavaa tilavastetta, vaan ainoastaan äänenpainetta kyseisessä pisteessä huonetta. Tästä syystä impulssivasteet on muutettava muotoon, joka on mikrofoneista riippumaton ja joka on helppo muokata eri äänentoistojärjestelmille sopivaksi. Tässä työssä impulssivasteiden muokkaukseen on käytetty tilahajoitelmamenetelmää (engl. Spatial Decomposition Method, SDM).

SDM kuuluu tiläänen koodausmenetelmiin, jotka voidaan jakaa kolmeen ryhmään tavoitellun lopputuloksen perusteella. Ensimmäisen ryhmän menetelmissä pyritään muodostamaan mitattu äänikenttä halutulle kuuntelualueelle, toisessa koetetaan tuottaa oikeanlainen paineenvaihtelu tärykalvolla ja kolmannessa yritetään analysoida ja tuottaa huoneen tilapiirteitä oikein. SDM kuuluu näistä viimeisenä mainittuun ryhmään, sillä se pyrkii esittämään tilaimpulssivasteen tilassa syntyvien heijastusten avulla. [62]

SDM:n peruseriaate on esitelty kuvassa 5 (sivu 16). Menetelmän tarkoituksena on kuvata huoneessa eri aikoihin saapuvat heijastukset erillisinä äänilähteinä, joita kuvataan sijainnin ja äänenvoimakkuuden avulla. Menetelmä olettaa, että äänen etenemissuunta on mikrofoniin saapuvien ääniaaltojen keskimääräinen etenemissuunta hetkellä t . Kun saatuun suuntaan yhdistetään äänenpainetaso mikrofoniin keskellä, voidaan muodostaa niin kutsuttu kuvalähde (engl. image source). Tämän lähteen voidaan kuvitella olevan kaiutin, jonka etäisyys kuuntelupisteeseen riippuu äänen saapumissuunnasta ja alkamisajankohdasta. Tällä tekniikalla erityisesti suoraa ääniä ja varhaiset heijastukset saadaan mallinnettua ja toistettua tarkasti. Kun useampia ääniaaltoja saapuu mikrofoniin yhtä aikaa, SDM valitsee äänekkäimmän tulosuunnan käyttämällä ristikorrelaation painotettua keskiarvoa. [62]

Myös diffuusi äänikenttä impulssivasteen lopussa mallintuu luontevasti. Diffuusissa äänikentässä ääni tulee kaikista suunnista keskimäärin yhtä vahvana, jolloin äänen tulosuunta valitaan satunnaisesti. Kun suunnan valinta tehdään jokaisella aika-askeleella uudelleen, lopputulos on keskimäärin tasajakautunut kenttä. Kuuntelukokeissa on havaittu, että simuloitusta huonevasteista menetelmä tuottaa parhaimmillaan tiläänen, jota ei pysty erottamaan alkuperäisestä impulssivasteesta. [62]

SDM:n tuottama koodaus pitää vielä muuntaa kaiuttimille sopivaksi. Tässä esitellään kaksi mahdollista menetelmää: vektoripohjainen amplitudipanorointi (engl. Vector Based Amplitude Panning, VBAP) ja lähimmän kaiuttimen menetelmä. VBAP perustuu äänen tulosuuntavektorin kannan vaihtoon. Edellä kuvattu SDM esittää

virtuaalilähteen paikan ortogonaalisessa vektorikannassa, jossa kuulija on sijoitettu origoon. VBAP pitää kuulijan sijainnin samana, mutta muuttaa kaiuttimien sijainnit uuden kannan kantavektoreiksi. Tämä voidaan esittää muodossa [48]

$$\mathbf{p}^T = \mathbf{g}\mathbf{L}, \quad (1)$$

jossa \mathbf{p} on äänen tulosuuntaa kuvaava vektori, $\mathbf{L} = [\mathbf{l}_m, \mathbf{l}_n, \mathbf{l}_k]$ kaiuttimien m, n ja k sijainnit ja $\mathbf{g} = [g_m, g_n, g_k]$ kyseisten kaiuttimien vastaavat vahvistukset halutulle tulosuunnalle. Kun tulosuunta tiedetään ja halutaan esittää se kolmen kaiuttimen vahvistuksina, voidaan ylläoleva yhtälö johtaa muotoon

$$\mathbf{g} = \mathbf{p}^T \mathbf{L}^{-1}. \quad (2)$$

Voidaan suoraan todeta, että käänteismatriisi \mathbf{L}^{-1} on olemassa niin kauan, kun kannan kaiuttimet eivät ole samalla tasolla kuulijan kanssa. [48]

Lähimmän kaiuttimen menetelmässä äänilähde toistetaan kaiuttimesta, joka on lähde lähimpänä. VBAP:iin verrattuna äänen suuntaresoluutio on huonompi, mutta toisaalta VBAP:n on havaittu vaimentavan hieman äänen korkeita taajuuksia [53]. Kuunteluhuoneessa käytetäänkin lähimmän kaiuttimen menetelmää, koska äänen värin on todettu vaikuttavan äänen tulosuuntaa enemmän kuuntelukokemukseen [55].

2.6 Musiikkisisältö

Edellisissä alaluvuissa on esitelty keino, jolla konserttisalin akustiikka on saatu nauhoitettua ja edelleen muokattua kuunteluhuoneelle sopivaan muotoon. Akustisesta tiedonsiirtoketjusta on enää käsittelemättä informaatio eli toisin sanoen musiikki. Tavallinen soittimen studioäänitys ei riitä; äänityksessä soittimen ääni muokkautuu studiohuoneen vasteella, mikä ei saliakustiikkaa tutkittaessa ole toivottavaa. Äänityksessä ei myöskään ole huomioitu soittimien suuntaavuutta. Esimerkiksi viulu säteilee suurimman osan äänitehostaan ylöspäin, mikä on pitänyt huomioida jo kaiutinorkesteria rakennettaessa (ks. kuva 4). Orkesterissa suurta osaa jousisoittimista onkin esitetty kahdella kaiuttimella, joista toinen on suunnattu yleisöä ja toinen kattoa kohti [49].

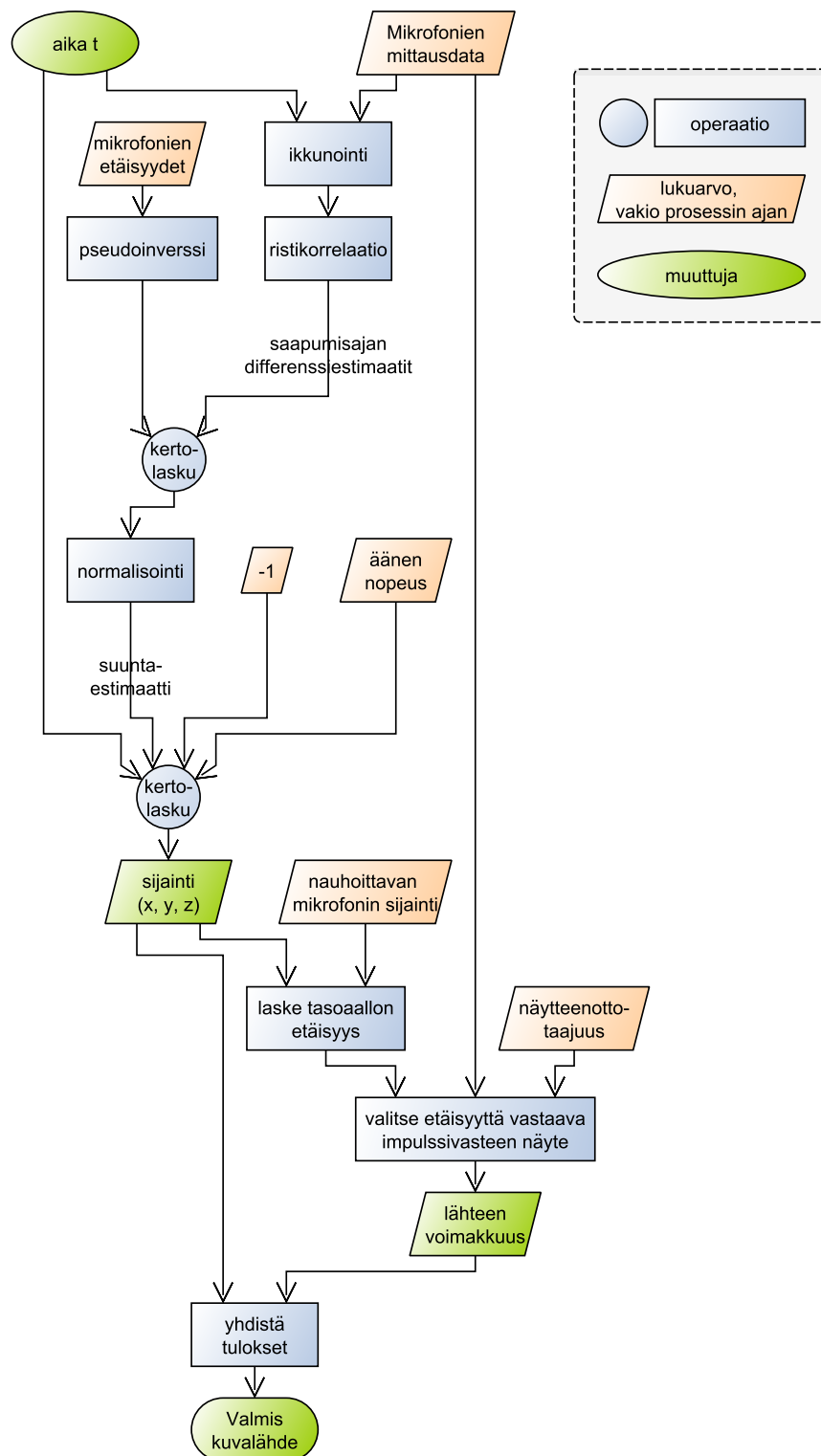
Kaikki orkesterin soittimet äänitettiin yksitellen kaiuttomassa huoneessa. Soittpaikka oli ympäröity mikrofoneilla, jotta soittimen suuntaavuus saatiin tallennettua. Lattiana käytettiin mahdollisuuksien mukaan akustisesti läpinäkyvää verkkoa, jotta lattiapinnan heijastusvaikutusta ei tallentuisi äänitteisiin.

Yksin soittamisessa on ilmeisiä haasteita vireen ja rytmin suhteen, kun soittajat eivät saa tukea toisistaan. Tästä syystä nauhoitettiin video, jossa nauhoitettavia kappaleita johti kapellimestari. Videon ääniraidalla soitti myös harjoituspianisti, jonka tehtävänä oli soittaa orkesteriteoksen tärkeimmät äänikulut. Soittaja siis kuuli soittaessaan pianoversion kappaleesta sekä näki kapellimestarin johdon, jotta hänen oli helpompi pysyä samassa vireessä ja oikeassa rytmissä.

Äänitettävien soittajien määrää vähennettiin nauhoittamalla jokaista soitinryhmää vain kerran. Jokaista soitinryhmää kohden oli yksi soittaja, joka soitti kaikki ryhmään kuuluvat stemmat yksitellen. Tämän lisäksi jousisoitinten tallenteita muokattiin jälkikäteen siten, että soiton vire ja rytmi vaihtelivat eri kaiutonsoittajien välillä. Näin vältettiin epäluonnollisen tarkka lopputulos sekä valtava työmäärä, jonka kokonaisen sinfoniaorkesterin äänittäminen yksittäin olisi aiheuttanut.

2.7 Yhteenveto

Tämä luku pohjusti tämän työn akustista taustaa. Luvussa esiteltiin konserttisaaliakustiikkaan vaikuttavia tekijöitä, saliakustiikan arviointia sekä akustiikan toistoa kuunteluhuoneessa. Aluksi esiteltiin alan keskeisiä termejä, joilla on havaittu olevan yhteys akustiikan hyvyyteen. Sen jälkeen tarkasteltiin konserttisalien muototypologiaa ja esiteltiin työn kannalta tärkeimmät salimuodot. Tätä seurasi katsaus tapoihin, joilla konserttisalini äänenlaatua on arvioitu. Lopuksi käytiin läpi menetelmät, joiden avulla konserttisalini akustiset näytteet on tässä työssä saatu toistettua kuunteluhuoneessa.



Kuva 5: SDM:n toiminta.

3 Musiikki, tunteet ja lämpökamera

Hodgesin [24, s. 184] mukaan tutkijat ovat päässeet yhteisymmärrykseen siitä, että musiikki kykenee aiheuttamaan kuulijassaan tunnereaktioita. Myös erilaisia tunteiden kehovasteita on pystytty yhdistämään musiikkiin. Tällaisia vasteita ovat olleet esimerkiksi ihon sähkönjohtavuus ja sydämen syke. Sen sijaan lämpökameraa ei ole vielä hyödynnetty musiikin tutkimuksessa, vaikka muissa yhteyksissä tunnevasteita on jo mitattu kyseisellä instrumentilla.

Siinä missä edellinen luku taustoitti työtä akustisesti, tämä luku esittelee tunnemittauksia lämpökameralla. Aluksi esitellään autonominen hermosto, joka on vastuussa kehon fyysisistä tunnevasteista, sekä psykofysiologisia mittausten menetelmiä. Näitä seuraa tutustuminen lämpökameran toimintatapaan, musiikin tunnetutkimukseen ja siihen, mitä fysiologisia vasteita musiikin on havaittu aiheuttavan. Lopuksi käydään vielä läpi menetelmiä, jolla liikkuvasta kohteesta saadaan mitattua lämpötila.

3.1 Autonominen hermosto ja psykofysiologiset mittaukset

Autonominen hermosto (engl. Autonomic Nervous System, ANS) ohjaa ihmiskehon tiedostamattomia toimintoja. Sen päätehtävänä on ylläpitää ruumiin sisäistä tasapainoa ja sopeuttaa keho esimerkiksi ilman lämpötilan muutoksiin [31]. ANS vaikuttaa muun muassa sydämen sykkeeseen, hengitykseen, hikoiluun ja ääreisverenkiertoon [26]. Myös tunteiden on havaittu aktivoivan autonomista hermostoa: esimerkiksi pelko nostaa sydämen sykettä nopeaa toimintaa varten ja supistaa hiusverisuonia, jotta mahdolliset haavat eivät vuodattaisi ihmistä kuiviin [66, 67]. Psykofysiologia tutkii juuri tätä mielen ja kehon yhteyttä ja pyrkii yhdistämään ihmisen tunteet kehon fysiologisiin vasteisiin [8].

Kehon reaktioita mitataan monenlaisilla menetelmillä. Esimerkiksi sydämen sykettä voidaan tarkkailla lukuisin menetelmin, kuten henkilön rinnasta elektrokardiografialla (lyh. EKG) tai pietsosähköisellä anturilla koehenkilön sormenpäätä [14]. Stressiä taas voi mitata seuraamalla ihon sähkönjohtavuutta (engl. Skin Conductance Response, SCR). SCR-mittaus tehdään koehenkilön kahdesta sormesta, joiden välillä pyritään havaitsemaan ihon sähkönjohtavuuden muutoksia. Tunnereaktio — kuten säikähdys — voi aiheuttaa tunneperäistä hikoilua, joka muuttaa ihon sähköisiä ominaisuuksia. [47] Edellä mainitut menetelmät vaativat kuitenkin fyysisen kontaktin koehenkilöön tai rajoittavat tämän toimintaa muilla tavoin [14, 47]. Jos psykologisessa kokeessa halutaan tutkia koehenkilön vapaata toimintaa, menetelmien liikkumisrajoitteet eivät ole toivottavia. [25, 47]. Tästä syystä lämpökamerakuvausta

pidetään tunnetutkimuksen lupaavana tulokkaana [26].

Lämpökameran käyttö ei vaadi kontaktia koehenkilöön ja on ekologinen vaihtoehto edellä kuvatuille menetelmille [26]. Kameran voi sijoittaa koetilan nurkkaan niin, ettei se rajoita koehenkilön toimintaa. Menetelmä ei myöskään vaadi johdeainetta henkilön ihon ja anturin välille, kuten esimerkiksi EKG ja SCR vaativat. Lämpökameran on todettu olevan yhtä tarkka kuin edellä mainitut menetelmät [14, 47] ja sillä voidaan tutkia myös eläimiä, jotka eivät pysty ilmaisemaan tunteitaan sanallisesti [36].

Menetelmän yhtenä käänköpuolena on kuitenkin viive. Verrattuna ihon konduktanssiin, jonka muutokset näkyvät jo kolmessa sekunnissa, ihon lämpötilamuutokset voidaan usein havaita vasta kymmenen sekuntia ärsyksen jälkeen. [36] Toisaalta pelästymisen on havaittu aiheuttavan silmänympärysten lämpötilan nousua jopa alle 300 ms ärsykkeestä [46]. Ärsyksen tulee myös olla tarpeeksi pitkäkestoinen, jotta sen vaikutukset näkyvät. Kistler et al. [34] havaitsivat sormenpäiden lämpötilaa mittaamalla, että verisuonten täytyy olla supistuneena vähintään viisi sekuntia, jotta lämpötila sormissa laskee.

Toinen merkittävä heikkous on kuvauskulmasta syntyvä lämpötilavirhe. Alle 45° katselukulmassa virhe ei vielä ole merkittävä [69]. Tätä suuremmilla kulmilla ympäristön säteily alkaa heijastua iholta, jolloin mitattu lämpötila vääristyy suhteessa ihon ja ympäristön väliseen lämpötilaeroon [28].

3.2 Lämpökameran toiminta

Edellisessä alaluvussa käsiteltiin autonomisen hermoston yhteyttä tunteisiin sekä fysiologiaa vasteita, joita on mitattu tunnetutkimuksissa. Eri mittausmenetelmien yhteydessä mainittiin myös lämpökamera, jolla voidaan tutkia koehenkilön tunnereaktioita ilman fyysistä kontaktia. Menetelmän todettiin omaavan omat heikkoutensa hitaan vasteen ja kuvauskulman aiheuttaman virheen muodossa. Koska lämpökuvantaminen on keskeisessä roolissa tässä työssä, tämä alaluku käsittelee itse kameran toimintaperiaatetta tarkemmin.

Lämpökameran toiminta perustuu niin kutsuttuun mustan kappaleen säteilyyn. Musta kappale on ideaalinen esine, joka imee kaiken sen pintaan osuvan sähkömagneettisen säteilyn. Tällainen esine kuitenkin säteilee edelleen, mikä johtuu yksinomaan kappaleen itsensä lämmöstä. [43]

Lämpökamerat voidaan jakaa kahteen ryhmään niiden tunnistustavan mukaan: lämpö- ja fotonitunnistimiin. Lämpötunnistimissa lämpösäteily kulkee kameran linssistön läpi ja osuu kuvakennolle, joka absorboi saapuneen säteilyn. Tällöin kenno lämpenee, mikä muuttaa sen sähköisiä ominaisuuksia. Näistä muutoksista pystytään

lukemaan kohteen lämpötila. Menetelmä on suhteellisen hidas, koska kuvakennon lämpötilan täytyy ehtiä muuttumaan säteily määrän mukana. [9] Lämpötunnistimella toimivia lämpökameroita kutsutaan myös jäähdyttämättömiksi lämpökameroiksi.

Fotonitunnistimen toiminta perustuu joko valojohteisiin tai -diodeihin. Tunnistimen kennoon osuvat fotonit virittävät puolijohteen elektroneja, mikä saa aikaan sähkövirran mittausspiirissä. Lämpötila taas saadaan mitattua syntyneen virran suuruudesta. Fotonitunnistin on lämpötunnistinta huomattavasti nopeampi mittaustapa, jota yleensä hidastaa ainoastaan lukupiirin nopeus [9]. Luotettava toiminta kuitenkin vaatii tunnistinkennon jäähtymistä, jotta elektroneja ei virity fotonien sijaan laitteen lämmöstä [54, s. 27] — tästä syystä tunnistintyyppi tunnetaan myös nimellä jäähdytetty lämpökamera.

Seuraavaksi johdetaan yhtälö, jolla lämpökameran kennodatan saa muutettua lämpötilaksi lähes tunnistintyyppistä riippumatta. Mustaa kappaletta kuvaamaan on olemassa Planckin laki [43]

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1)}, \quad (3)$$

jossa I on lämpötilan T synnyttämä radianssi aallonpituudella λ , h on Planckin vakio, c valon nopeus tyhjiössä ja k Boltzmannin vakio. Laista voidaan johtaa lämpötilalle yhtälö

$$T = \frac{hc}{\lambda k \ln \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 I} + 1 \right)}, \quad (4)$$

joka saadaan siistimpään muotoon, kun määritellään vakiot B ja R_1 :

$$B = \frac{hc}{\lambda k}, \quad (5)$$

$$R_1 = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}. \quad (6)$$

Yllä olevien vakioiden lisäksi määritellään, miten radianssi I mitataan.

Kokeissa käytettiin FLIR-merkkistä lämpökameraa, jonka lämpötilasensorin vaste on suoraan verrannollinen sisään tulevaan radianssiin [11]. Tällöin I voidaan kuvata muodossa

$$I = R_2(S + b), \quad (7)$$

jossa R_2 sekä b ovat vakioita ja S on lämpökamerakennon vaste. Sijoittamalla yhtälöt

(5), (6) ja (7) yhtälöön (4) saadaan

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2(S+b)} + 1\right)}. \quad (8)$$

Vertaamalla saatua yhtälöä kameravalmistajan antamaan yhtälöön [12] havaitaan, että yhtälön nimittäjästä löytyvä 1 on korvattu vakiolla F , joka saa arvonsa väliltä 0,5 – 2. Tämän lisäksi on määritelty vakio $R = R_1/R_2$, jolloin saadaan seuraava yhteys kennovasteen ja lämpötilan välille:

$$T = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{S+b} + F\right)}. \quad (9)$$

Yhtälö (9) kuvaa tarkasti mitattavan kohteen lämpötilamuutosta, jos kappale säteilee mustan kappaleen tavoin. Tällaisia objekteja on kuitenkin hyvin vähän, ja usein esine säteileekin ympäristöön vähemmän lämpösäteilyä kuin ideaalinen musta kappale. Ominaisuutta kuvataan emissiviteetillä, joka on kappaleen säteilemän energian suhde vastaavan mustan kappaleen säteilyenergiaan. Esimerkiksi ihmisen ihon emissiviteetti on 0,98 [60].

Emissiviteetistä ϵ johtuva lämpötilavirhe voidaan huomioida, jos ympäristön säteilemä lämpötila tunnetaan ja oletetaan, että kennon kokonaisvaste S riippuu ainoastaan mitattavan kappaleen ja heijastuvan lämpötilan vasteista S_{obj} ja S_{refl} :

$$S = \epsilon S_{obj} + (1 - \epsilon) S_{refl}. \quad (10)$$

S_{refl} voidaan estimoida heijastuvalle lämpötilalle T_{refl} ratkaisemalla S yhtälöstä (9):

$$S_{refl} = \frac{R_1}{R_2\left(e^{B/T_{refl}} - F\right)} - b. \quad (11)$$

Tämän jälkeen ratkaistaan S_{obj} yhtälön (10) avulla:

$$S_{obj} = \frac{S - (1 - \epsilon) S_{refl}}{\epsilon}. \quad (12)$$

Sijoittamalla S_{obj} yhtälöön (9) S :n paikalle saadaan selville kohteen todellinen lämpötila.

Tarkastelemalla yhtälöä (12) havaitaan, että ihon tapauksessa ympäristön lämpötila vaikuttaa mitattuun lämpökennodataan vain vähän, jos $S_{obj} \approx S_{refl}$. Heijastuvan säteilyn määrä ei myöskään muutu, jos huoneen lämpötila pysyy mittauksen ajan

vakiona. Tämä olettaus on tehtävä, sillä pelkästä kameran kuvasta ei voida arvioida heijastuksen suuntaa. Koska mittauksissa tarkkaillaan ainoastaan lämpötilan muutosta eikä ihon tarkkaa lämpötilaa, emissiviteetin huomioiva korjaus voidaan jättää huomiotta.

3.3 Musiikin vaikutus tunteisiin

Edellisissä alaluvuissa käsiteltiin autonomista hermostoa, joka aiheuttaa lämpötilan muutokset kasvoissa, sekä lämpökameraa, jolla nämä muutokset voidaan kuvantaa. Tässä luvussa esitellään ääniärsyksen vaikutusta tunteisiin ja sitä kautta autonomiseen hermostoon.

Aluksi on hyvä määrittää, mitä sanalla tunne tarkoitetaan. Juslin [30] määrittelee tunteen ihmisen vahvaksi lyhytkestoiseksi reaktioksi, jolla on selkeä kohde ja joka kestää minuuteista muutamiin tunteihin. Tätä pidempiaikaisemmat ja lievemmät tunnereaktiot on nimetty mielialoiksi. Ne kestävät tunneista useisiin päiviin eikä niillä ole selkeää kohdetta. Sekä tunteisiin että mielialoihin liittyy termit valenssi ja vire (engl. vastikkeet valence ja arousal). Valenssilla kuvataan kokijan suhtautumista esineeseen, asiaan, henkilöön tai tapahtumaan joko myönteisesti tai kielteisesti. Vireellä taas esitetään autonomisen hermoston aktivoitumisvoimakkuutta. Vireen nousu ei välttämättä vaadi tunnetilaa, vaan esimerkiksi liikunta voi nostaa virettä. Yleistermi tunteille ja mielialoille on affekti, jota käytetään yleisanana kaikista tunnetiloista riippumatta niiden voimakkuudesta, kestosta tai valenssista.

Toisinaan musiikki voi aiheuttaa kuulijassaan vahvan fysiologisen reaktion, jonka kesto on lyhyt kuten tunteillakin [58]. Yleisimmät tällaisista reaktioista ovat niskassa ja selässä tuntuvat kylmät väreet, palan tunne kurkussa ja kyynelehtiminen sekä sydämen tykytys ja putoamisen tunne vatsanpohjassa [58]. Erityiseksi fysiologisten tuntemusten aiheuttajaksi on havaittu musiikin huippukohdat. Tällaisia kohtia ovat esimerkiksi dynamiikan äkilliset vaihtelut sekä äänenvoimakkuuden huippukohdat [20]. Edellä mainitut reaktiot voivat ilmetä sekä yhdessä että erillään toisistaan [30]. Kaikilla henkilöillä näitä reaktioita ei kuitenkaan esiinny, vaan arviot fysiologisten tuntemusten esiintymistiheydestä vaihtelevat otannasta riippuen 35:stä (sekaotanta) [68] 90 prosenttiin (musiikin opiskelijat) [16].

Tavallisesti tunteita on tutkittu perustunteiden — esimerkiksi ilon, surun, vihan ja pelon — kautta. Tämä tunnekokoelma tunnetaan myös nimellä diskreetti tunne-
skaala, koska tunteet on eroteltu toisistaan selkeästi eroteltaviksi ryhmiksi. Tutkijat eivät kuitenkaan ole päässeet yksimielisyyteen siitä, mitä tunteita musiikki herättää kuulijoissa. Jaottelu nimittäin saattaa vaikuttaa vastausten yhdenmukaisuuteen

erityisesti hienojakoisempien tunteiden kohdalla. Esimerkiksi nostalginen kappale saattaa eri koehenkilöiden mielestä olla sävyttynyt joko surullisesti tai iloisesti. Jos vastaajille annetaan vaihtoehtoisiksi ainoastaan ilo ja suru, vastaukset hajaantuvat ja itse yhdistävä tekijä (nostalgian tunne) jää huomaamatta. [70]

Diskreetin tunneskaalan rinnalle on kehitetty vaihtoehtoisia tunnekarttoja kuvaamaan musiikin aiheuttamia tunnetiloja. Näitä ovat esimerkiksi Hevnerin adjektiiviympyrä [21] ja Geneven tunnekartta musiikille (engl. Geneva Emotional Music Scale, GEMS) [70]. Eri tunneskaalat jätetään kuitenkin tarkemman tarkastelun ulkopuolelle, koska niitä ei ole käytetty tässä tutkimuksessa.

Musiikissa on myös erotettava havaittu ja koettu tunne toisistaan. Kun soittaja pyrkii välittämään tunnetilan musiikin avulla, kuulija havaitsee tunteen — henkilö voi tunnistaa välitetyn affektin, vaikka hän ei varsinaisesti ole itse kyseisessä tunnetilassa. Tunne taas koetaan silloin, kun musiikki indusoi sen kuulijan sisällä. Tällöin henkilö ei pelkästään kuule, vaan on aidosti kyseisen tunteen vallassa. [30]

Musiikin synnyttämien tunteiden lisäksi tutkijat ovat kiistelleet siitä, havaitseeko kuulija ainoastaan musiikin välittämän tunnetilan vai aiheuttaako musiikki ihmisissä aitoja tunnereaktioita. Ensimmäisenä mainittua näkemystä perustellaan sillä, että henkilö ei aina kykene erottamaan musiikissa havaitsemaansa tunnetilaa omista (musiikin herättämistä) tunteistaan [30]. Tällöin ei voida todistaa, etteikö musiikin aiheuttamat tunteet olisi vain kuultuja.

Todisteita musiikin aiheuttamista tunnetiloista kuitenkin on. Keskeisin argumentti tälle näkemykselle on, että kuullun ja koetun tunneskaalan välillä on selkeä ero. Zentner et al. [70] tekivät laajan kyselytutkimuksen musiikin aiheuttamista ja siitä kuulluista tuntemuksista. He havaitsivat merkittävän eron näiden kahden ryhmän välillä: musiikki herätti usein kuulijoissaan positiivisia tunteita, kun taas negatiiviset tunteet useammin havaittiin kuin koettiin. Tämä havainto tukee väitettä, että kuulija tarvittaessa pystyy erottamaan kuullun ja koetun tunteen toisistaan. Kyselytutkimuksella ei voida kuitenkaan varmuudella sanoa, etteivätkö koehenkilöt sekoittaisi koettuja ja havaittuja tunteita keskenään. Tästä syystä perustelun tueksi tarvitaan psykofysiologisia mittauksia, jotta yhteys musiikin ja tunteiden välillä voidaan varmistaa.

Psykofysiologisia mittauksia on Hodgesin [24, s. 186] mukaan tehty paljon, mutta vasteiden yhdistäminen tunteisiin on yleistynyt vasta 2000-luvulla. Osa tehdyistä tutkimuksista on myös tuottanut ristiriitaisia tuloksia. Esimerkiksi iloinen musiikki on vaikuttanut sydämen sykkeeseen sekä nostavasti, laskevasti että indifferentisti tutkimuksesta riippuen. Hodgesin mukaan tämä osoittaa, kuinka monimutkainen

tutkimusaihe on ja että alalta puuttuu vielä muun muassa yhteiset toimintatavat. Musiikin on todettu indusoivan tunnereaktion arviolta 55 – 65 % kuuntelukerroista yksilöstä riippuen ja silloinkin syntyvä tunneskaala voi olla laaja [29]. Ärsykkeeseen myös totutaan herkästi, jolloin fysiologinen reaktio saattaa jäädä syntymättä [32, 33] — tottumista on havaittu jo seitsemän sekunnin mittaisilla näytteillä [32].

Musiikilla tutkittuja fysiologisia vasteita on lukuisia [23]. Niistä tämän tutkimuksen kannalta kiinnostavimmat ovat SCR ja ihon lämpötila. SCR:n on monissa tutkimuksissa havaittu reagoivan merkittävästi musiikkiin [23]. Myös nopeiden ja iloisten kappaleiden on todettu tuottavan suurempia SCR-vasteita kuin mitä hitaat ja surulliset kappaleet tuottavat [32]. Ihon lämpötila taas on kiinnostava lämpökameramittausten takia. Aiemmin saadut tulokset lämpötilan ja musiikin kuuntelun välillä ovat kuitenkin ristiriitaisia [23], joten suoraa yhteyttä musiikin aiheuttamiin tunteisiin ei voida vetää. Näitä tunteita ei ole myöskään vielä tutkittu lämpökameralla. Sen sijaan musiikkia on käytetty kuvauksissa palauttamaan henkilön tunnetila neutraaliksi [45].

Musiikin aiheuttamia tunnetiloja on tutkittu myös kappaleiden rakenteen kautta [30]. Taulukossa 2 on esitetty yleisimmin tutkittuja tunnetiloja ja musiikin piirteitä, joita on yhdistetty kyseisiin tunteisiin. Huomattavaa on, että esitetyt piirteet ovat hyvin matalan tason elementtejä eivätkä liity kappaleen suurempiin rakenteisiin.

Akustiikan vaikutusta musiikin vaikuttavuuteen on tutkittu aiemmin. Pätynen ja Lokki [51] havaitsivat, että SCR:n muutos crescendon aikana riippui esityssalin

Taulukko 2: Ote musiikin tunnetiloista ja muusiikkipiirteistä, jotka herättävät kyseisiä tunteita. (Taulukko kokonaisuudessaan: [30, s. 596])

Tunne	Musiikin piirre
Ilo	Nopea tempo, pienet temmon vaihtelut, duurissa, konsonanssi, keskikova – kova äänenvoimakkuus, pienet äänenvoimakkuuden vaihtelut
Suru	Hidas tempo, mollissa, dissonanssi, hiljainen äänenvoimakkuus, keskisuuret äänenvoimakkuuden vaihtelut
Viha	Nopea tempo, pienet temmon vaihtelut, mollissa, atonaalisuus, dissonanssi, kova äänenvoimakkuus, pienet äänenvoimakkuuden vaihtelut
Pelko	Nopea tempo, suuret temmon vaihtelut, mollissa, dissonanssi, hiljainen äänenvoimakkuus, suuret äänenvoimakkuuden vaihtelut
Lempeys	Hidas tempo, duurissa, konsonanssi, hiljainen – keskikova äänenvoimakkuus, pieni äänenvoimakkuuden vaihtelu

akustiikasta. Heidän päätelmänsä oli, että osa konserttisaleista tarjosi paremman dynamiikka-alueen muihin saleihin verrattuna, jolloin SCR muuttui myös voimakkaammin. Näiden salien tulkittiin tukevan esitystä paremmin kuin verrokkinsa.

3.4 Lämpötilan mittaus lämpökamerakuvasta

Edellä esiteltiin, miten lämpökamera toimii ja miksi sitä voidaan käyttää musiikin aiheuttamien tunnetilojen mittaamisessa. Tämä alaluku käsittelee kuvaamisen jälkeen tehtävää lämpötilamittausta — kuinka lämpökameravideosta saadaan mitattua haluamamme muutokset?

Lämpökameran videolla jokainen kuvapiste vastaa yhtä lämpötilaa. Lämpötila halutulta alueelta voitaisiin tästä syystä mitata pikseliarvoina [36]. Menetelmä kuitenkin antaisi oikean tuloksen vain, jos kuvattava kohde pysyy paikallaan [26]. Useimmat tutkimukset ovatkin mitanneet lämpötilaa isomman kuva-alueen keskiarvona [19, 25, 65]. Tällaista mittausaluetta kutsutaan tarkasteltavaksi alueeksi (engl. Region of Interest, ROI) [26]. Yleisimpiä tarkasteltavia alueita ovat muun muassa nenä, nenäntaive, otsa, silmänympäryys ja nenän alunen [26]. Toisin kuin yksittäinen pikseli, suurempi mittausalue ei ole yhtä herkkä pienille liikkeille. Tästä huolimatta koehenkilön liikkeet tuottavat lämpötilamittaukseen virheitä, joita voi kompensoida esimerkiksi käsin mittaamalla, liikeseurannalla tai kuvanmuokkauksella. Taulukossa 3 on yhteenveto näistä menetelmistä ja niiden vahvuuksista ja heikkouksista.

Käsin mittaaminen on yksinkertaisin menetelmä korjata liikkeen aiheuttama virhe lämpötilamittaukseen. Kuten nimi antaa olettaa, tarkoituksena on merkata ROI:t videon ruutuihin käsin. Tällöin voidaan hyödyntää ihmisen ylivoimaista

Taulukko 3: Vertailu tässä työssä käytetyistä liikkeen kompensointimenetelmistä.

Menetelmä	Periaate	Hyvää	Huonoa
Käsinseuranta	Merkataan ROI ruutuihin käsin	Ihmisen kasvojen-tunnistus	Työmäärä
Liikeseuranta	Siirretään ROI:ta ruutujen välillä automaattisesti	Pieni työmäärä, aikaresoluutio	Epätarkkuuden kertyminen
Kuvanmuokkaus	Pysäytetään koehenkilön liikkeet muokkaamalla kuvaa	ROI:n tarkempi muotoilu kasvojen mukaan, työmäärä (riippuen seurantamenetelmästä)	Muokkauksesta syntyvät aluevääristymät, työmäärä (riippuen seurantamenetelmästä)

kasvojentunnistuskykyä määrittämään, missä ROI sijaitsee kussakin ruudussa.

Menetelmä ei kuitenkaan ole ongelmaton. Inhimilliset virheet ovat mahdollisia alueita aseteltaessa, mikä tuottaa virhettä mittaukseen [26]. Mittaustapa on myös käyttäjälleen työläs. Kymmenen minuutin videosta saadaan jo 120 käsiteltävää kuvaa, vaikka kuvia käsiteltäisiinkin vain yksi viiden sekunnin välein. Yhdessä nämä kaksi edellä mainittua haastetta aiheuttavat sen, että ROI:n paikka saattaa muuttua asettelijalta huomaamatta. Tällöin mittaukseen syntyy systemaattinen virhe, joka saattaa piilottaa koehenkilön todellisen reaktion. Virhe voi myös näyttää mittauksissa todelliselta reaktiolta, mikä ei varsinkaan ole toivottavaa.

Liikeseuranta (engl. object tracking) arvioi seurattavan kappaleen liikettä videokuvassa. Seurattava kappale voi olla esimerkiksi käsi, selkeästi erottuva kasvopiirre (esimerkiksi silmäkulma) tai vaikka ROI. Menetelmiä seurantaan on useita, joista lämpökameramittauksissa on käytetty partikkelisuodatinta (engl. particle filter) [10, 65]. Lämpökameramittauksissa liikeseurannalla pyritään vähentämään käsityön ja lisäämään käsiteltyjen kuvien määrää sekä tekemään tulosten analysoinnista luotettavampaa. Tutkijan tarvitsee valita seurattavat kohteet ainoastaan ensimmäisestä ruudusta, jolloin käsityön määrä vähenee merkittävästi ja siten myös inhimilliset virheet ovat epätodennäköisempiä. Alkuasettelun jälkeen menetelmä seuraa annettua kohdetta koehenkilön liikkeiden mukana. Lämpötilamittaus voidaan tehdä joka ruudulle, jolloin kuvia saadaan käsiteltyä käsinseurantaa enemmän. Inhimilliset virheet ovat epätodennäköisiä, mikä parantaa menetelmän luotettavuutta.

Liikeseurannalla on kuitenkin omat heikkoutensa. Seurannan edetessä epätarkkuudet alkavat kertyä, minkä seurauksena kohdemerkki saattaa ajautua pois paikoiltaan. ROI:n tapauksessa tämä aiheuttaa systemaattisen virheen lämpötilamittaukseen ja lopulta seurantakohteen menettämiseen. Kohde voi myös kadota kuvasta esimerkiksi pään kääntämisen tai muun näköesteen eteentulon seurauksena.

Kolmas keino kompensoida liikkeen vaikutusta mittauksiin on kuvanmuokkaus. Kuvanmuokkauksessa on tarkoituksena pysäyttää koehenkilön liikkeet muokkaamalla alkuperäistä videokuvaa. Teoriassa tarkasteltava alue voidaan tällöin lukea suoraan pysäytetystä kuvasta pikseliarvoina, jolloin ROI:n voi muotoilla tarkemmin kasvopiirteiden mukaiseksi. Menetelmä käyttää kiintopisteitä, joiden etäisyyden algoritmi säilyttää kuvamuunnosten avulla. Kuvanmuokkaus ei ole suoraan rinnastettavissa liike- ja käsinseurantaan, koska se ei itsessään pysty seuraamaan koehenkilön liikkeitä. Menetelmä tarvitseekin näistä jompaa kumpaa: tarkasteltaviin ruutuihin täytyy merkata muunnoksen käyttämät kiintopisteet joko käsin tai liikeseurannan avulla.

Aiemmissa tutkimuksissa kuvanmuokkausta on käytetty yleistetyn lämpökartan

luomiseen ihmiskasvoista [19, 27]. Hahn et al. [19] tutki ihmiskosketuksen vaikutusta kasvojen lämpötilaan, kun taas Jarlier et al. [27] tarkasteli eri ilmeiden aiheuttamia lämpötilamuutoksia. Molemmissa tutkimuksissa lämpökamera oli sijoitettu suoraan koehenkilön eteen. Kokeissa myös rajoitettiin kuvattavan pään liikkeitä joko telineellä [27] tai pyytämällä tätä olemaan mahdollisimman paikoillaan [19]. Hahn [19] käytti kasvojen muokkaamiseen Psychomorph-ohjelmistoa [61, 64]. Vastaavasti Jarlier [27] laski affiniimuunnoksen koehenkilöiden kasvojen ja Karolinska Directed Emotional Faces -tietokannan [42] keskimääräisten kasvojen välille.

Edellä mainituissa tutkimuksissa on huomattavaa, että koehenkilöiden pään liikkeitä oli rajoitettu. Rajoittamalla liikettä vältetään kasvojen projektion muutosta kameralle, mutta tällöin myös menetetään alaluvussa 3.1 mainittu koehenkilön toiminnan rajoittamattomuus. Jos taas koehenkilön liikkeitä ei rajoiteta, kuvaan vaadittavat muokkaukset ovat suurempia. Tällöin myös muokkausten synnyttämät virheet ovat suurempia, mikä vääristää saatua lopputulosta. Projektio-ongelmaa voisi korjata käyttämällä kolmiulotteista päämallia, joka sovitettaisiin videokuvaan [1, 15]. Tällainen mallinnus kuitenkin on jätetty tämän työn ulkopuolelle.

3.5 Yhteenveto

Tämä luku esitteli tutkimuksen mitattavan puolen sisältäen mittauslaitteen, -tavan sekä mitattavan ilmiön esittelyn. Tämä ja edellinen luku muodostavat teoriapohjan, jolle työn empiirinen osa on rakennettu. Mittausmenetelmiä sekä koetilannetta käsitellään seuraavassa luvussa, jota seuraavat tulosten esittely ja analysointi.

4 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Edellisissä luvuissa tutustuttiin tämän työn akustiseen ja psykofysiologiseen taustaan. Lisäksi esiteltiin lämpökameran toimintaperiaate sekä työn kannalta oleelliset seurantamenetelmät. Tämä luku pohjautuu vahvasti edeltäjilleen ja esittelee menetelmät, joita käytettiin työhön tehdyssä kuuntelukokeessa sekä lämpökameradatan analysoinnissa.

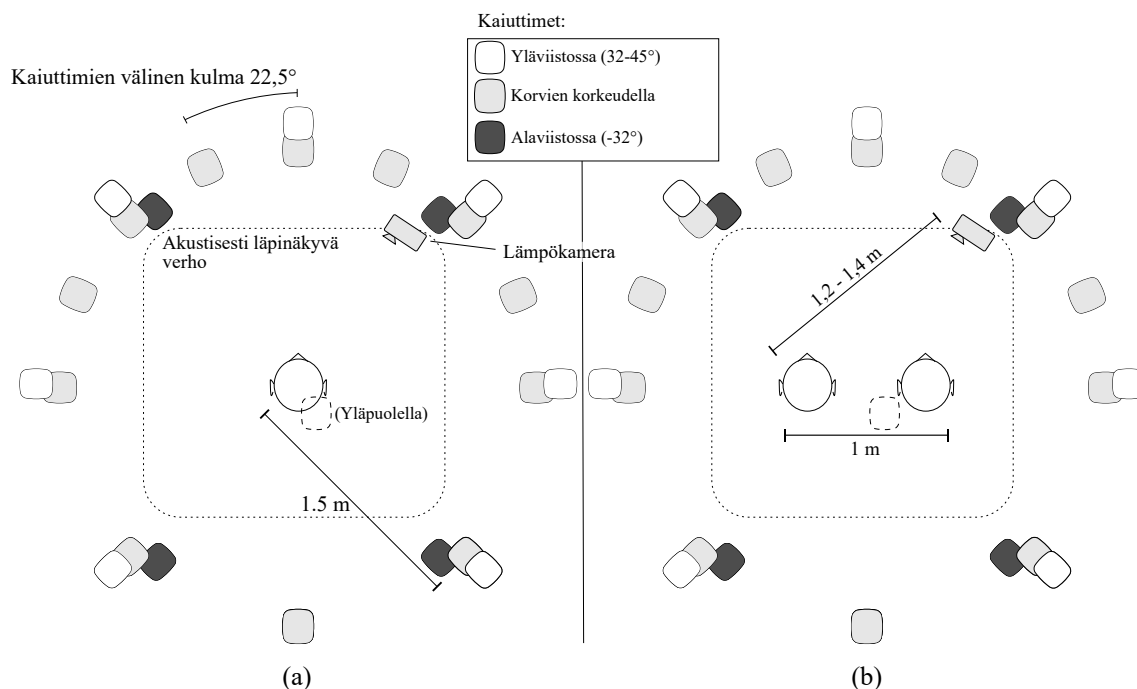
4.1 Seurantaohjelman toteutus

Lämpötilamittauksia varten toteutettiin ohjelmisto, jolla koehenkilön liikkeitä pystyi seuraamaan lämpökameratallenteesta. Pää tavoitteina ohjelmistolla oli tarjota työkalu, jolla lämpötilan mittaaminen kiinnostavilta alueilta tapahtuisi helposti. Tätä varten toteutettiin graafinen käyttöliittymä, jonka kautta lämpökameravideon avaaminen, käsittely, ja mittaus tapahtuivat. Kehitykseen käytettiin MATLAB-ohjelmointikieltä.

Kuvauksissa käytetyt lämpökameravideot ovat pakkaamattomia kuvasekvenssejä, jotka noudattavat GenICam-standardia [12]. Tiedoston alussa on ylätunnus (engl. header), joka kertoo muun muassa kameran tyypin, kuvausohjelmiston ja käytetyn objektiivin. Jokaisella ruudulla on myös oma ylätunnuksensa, josta selviää yhtälön (9) tarvitsemat lukuarvot kennodatan muuttamiseen lämpötiloiksi. Ruudut taas on esitetty suoraan kennodatana S . Kuvasekvenssien purku tehtiin itsetehdyllä moduulilla, joka luki oleelliset tiedot ylätunnuksista, muunsi kennodatan lämpötiloiksi ja palautti käyttäjälle tuloksena saadun lämpökamerakuvan.

Ohjelmasta löytyi toteutukset alaluvussa 3.4 esitellyille seurantamenetelmille. Käsinseurannan ja liikeseurannan pohjana käytettiin yhteistä seurantalaatikkototeutusta, kun taas kuvanmuokkauksessa hyödynnettiin käsin aseteltavia seurantapistettä. Käsinseurannassa laatikkoa siirrettiin ruutujen välillä käsin, kun taas liikeseuranta etsi laatikon sisältä kuvapiirteitä, joita se pyrki seuraamaan automaattisesti. Sekä liikeseuranta että kuvanmuokkaus hyödynsivät kohteen seurannassa Shin ja Tomasin kehittämää Kanade-Lucas-Tomasi-algoritmia [57].

Lämpötilamittaus tehtiin seurantalaatikon alueelta pikselien keskiarvona. Koko alueen keskiarvon lisäksi mitattiin pikseleistä lämpimimmän ja kylmimmän kymmenyksen keskiarvot. Silmämääräisessä tarkastelussa kuitenkin havaittiin, että lämpimin kymmenys oli epäherkkä lämpötilan muutoksille, kun taas kylmin kymmenys oli altis liikkeestä syntyneille virheille. Tästä syystä mittauksissa valittiin käytettäväksi koko alueen keskiarvo, jonka todettiin olevan epäherkin virheille suuremman pikseliotantansa vuoksi.



Kuva 6: Koejärjestely (a) yhdelle ja (b) kahdelle koehenkilölle. Lämpökamera sijoitettiin molemmissa kokeissa 1,2 – 1,4 m päähän kuulijoista koehenkilön silmien korkeudelle. Kuvat muokattu lähteestä [51].

4.2 Koejärjestely

Kuuntelukokeita tehtiin sekä yhdellä koehenkilöllä kerrallaan että pareittain. Kuvassa 6 on esitetty koejärjestely molemmille tapauksille. Molemmissa kokeissa käytettiin alaluvussa 2.5 esiteltyä 24 kaiuttimen järjestelmää. Yhden henkilön kokeessa koehenkilö istutettiin kaiutinjärjestelmän akustiseen keskipisteeseen, kun taas parikokeessa kuulijat istutettiin molemmin puolin tätä pistettä. Parikokeiden tarkoituksena oli selvittää, voisiko lämpökameraa käyttää ryhmien kuvaamiseen. Sen lisäksi, että menettelyllä voisi kasvattaa otannan kokoa, kuvaamisen voisi mahdollisesti siirtää myöhemmin myös oikeisiin konserttisaleihin.

Kuvauksissa käytettiin FLIR T620bx-lämpökameraa, jossa oli 13 mm objektiivi ja 640×480 resoluutio. Kameran suurin tuettu kuvanopeus olisi ollut 30 kuvaa sekunnissa, mutta vaadittavan tallennustilan säästämiseksi käytettiin 15 kuvan sekuntinopeutta. Lämpökamera asetettiin koehenkilöistä 1,2 – 1,4 m päähän etuoikealle, jotta kamera olisi poissa henkilön suorasta näkökentästä. Asettelussa huomioitiin, että kamera ei olisi suoraan kaiuttimen ja kuuntelupisteen välissä.

Lämpökameran sijoittelua rajoitti akustisesti läpinäkyvä verho, joka osoittautui infrapuna-alueella läpinäkymättömäksi; tämän takia kamera täytyi asettaa verhon

sisäpuolelle. Verho kierrettiin koko kuuntelualueen ympäri, mistä oli kaksi etua. Ensinnäkin kuulija ei kyennyt näkemään äänilähteitä, mikä esti äänen mahdollista lokalisoitumista yksittäisiin kaiuttimiin. Toiseksi kaiuttimet, jotka olivat lämpimiä, eivät näkyneet lämpökamerakuvassa häiritsevinä lämpölähteinä.

Kokeen pitäjä istui samassa kuunteluhuoneessa koehenkilöiden takana. Hänen tehtävänä oli ohjeistaa koehenkilöt, ohjata lämpökameraa, käynnistää kuuntelukoe ja ottaa ajoitukset näytteistä. Pitäjä ei osallistunut kokeeseen muilla tavoin.

4.3 Ääninäytteet

Tehdyssä kuuntelukokeessa koehenkilöille soitettiin ääninäytteitä, joilla pyrittiin herättämään tunnevaste kuulijassa. Näytteet oli muodostettu luvussa 2 esitellyn kaiutinorkesterin ja kaiuttomien äänitysten pohjalta. Musiikkina käytettiin lyhyttä näytettä Beethovenin seitsemännestä sinfoniasta, joka konvoloiitiin konserttisalien impulssivasteiden kanssa. Tutkittavana oli neljä eri salia: Vienna Musikverein (VM), Cologne Philharmonie (CP), Amsterdam Concertgebouw (AC) ja Helsingin Musiikkitalo (HM). Näistä VM ja AC ovat kenkälaatikko-, CP puoliareena- ja HM viinitarhasaleja. Kuten alaluvussa 2.2 jo todettiin, VM:ia pidetään yhtenä maailman parhaista konserttisaleista. Myös AC on sijoittunut korkealle salien välisissä vertailuissa, kun taas CP ja HM eivät kuuntelukokeiden perusteella ole olleet akustisesti yhtä vaikuttavia kuin edellämainitut verrokkinsa [51].

Aiemman tutkimuksen [51] mukaan orkesteria lähemmät paikat synnyttävät vahvempia psykofysiologisia reaktioita. Tästä syystä kuuntelupisteet valittiin saleissa eri etäisyyksiltä, jotta akustiikan synnyttämiä reaktioeroja saataisiin korostettua. Kuuntelupisteen etäisyys lavasta oli taulukon 4 mukaisesti 11 m VM:llä ja HM:llä, 19 m AC:llä ja 23 m CP:llä.

Alaluvussa 2.1 esiteltiin huoneakustisia parametreja, joiden on todettu olevan yhteydessä hyvään akustiikkaan. Taulukossa 4 näitä parametreja on listattu salikohtaisesti. Lukuarvot on laskettu tyhjissä saleissa tehdyistä mittauksista, mikä vaikuttaa erityisesti EDT:hen pidentävästi. Vaikutus näkyy erityisen hyvin VM:ssä, jossa EDT on 0,8 sekuntia pidempi täyteen saliin verrattuna. Suuri ero johtuu salin penkeistä, joita ei ole pehmustettu toisin kuin muissa kokeen saleissa. Kovat penkit absorboivat ääntä huomattavasti vähemmän kuin ihmiskeho, minkä takia ero kasvaa suureksi. Seuraavaksi suurin muutos tyhjän ja täyden salin välillä tapahtuu AC:ssa, kun taas CP:ssä ja HM:ssä muutokset jäävät pieniksi. Myös muutosten merkitsevyys jää pieneksi, koska yleisön absorptio ei juurikaan vaikuta varhaisten heijastusten voimakkuuteen.



Kuva 7: Kokeen ääniraidan rakenne. Jokaista musiikinäytettä edelsi 30 sekunnin satunnainen äänikatkelma ja seurasi 10 sekunnin hiljaisuus.

Kuvassa 7 on esitetty kokeen ääniraidan rakenne. Kokeessa oli yksi ääninäyte kutakin konserttisalia kohden. Jokainen näyte alkoi 30 sekunnin äänikatkelmalla, jonka tarkoituksena oli antaa näytteiden välille palautumisaikaa sekä vähentää todellisiin näytteisiin tottumista. Katkelma oli rakennettu samoista kaiuttomista soitinäänistä kuin itse kappaleetkin. Kyseinen ääni oli koostettu siten, ettei sillä ollut varsinaista musiikillista rakennetta [37]. Tila-akustiikaksi valittiin München Gasteig -sali äänitettynä 19 m:n päässä lavasta. Lopputuloksena saatiin ääni, joka muistutti soittajien itsenäistä harjoittelua lavalla ennen orkesterin viritystä. Edellä kuvatun äänen jälkeen soitettiin Beethovenin seitsemättä sinfoniaa 30 sekuntia. Näyte alkoi suurella crescendolla, jonka voitiin olettaa aiheuttavan psykofysiologisen reaktion koehenkilöissä. Ääninäytteiden väliin jätettiin kymmenen sekunnin hiljaisuus, jotta kasvojen lämpötilalle jäisi aikaa palautua.

4.4 Mittaustilanne

Kokeisiin osallistui yhteensä 11 henkilöä, joista kahdeksan oli miehiä ja kolme naisia. Henkilöistä 7 osallistui yksilö- ja 4 parikokeisiin. Aluksi koehenkilö täytti alkukyselyn, jossa selvitettiin kokeeseen vaikuttavia tekijöitä. Näiksi luettiin pintaverenkiertoon

Taulukko 4: Kuuntelukokeiden näytteissä käytetyt konserttisalit, käytetyn kuuntelupisteen etäisyys lavasta sekä salien ISO3382-1 -standardin mukaiset huoneakustiset parametrit. Konserttisalien muodot on merkitty seuraavilla lyhenteillä: kenkälaatikko (kl), puoliareena (pa) ja viinitarha (vt).

Sali	Muoto	Etäisyys (m)	EDT (s)	Selkeys (C_{80})	ASW (LEF)	LEV (LJ)	Voimakkuus (G)
VM	kl	11	2,9	-2,5	0,24	-1,5	5,7
CP	pa	23	1,9	-0,1	0,10	-7,9	1,1
AC	kl	19	2,6	-3,5	0,26	-3,6	3,0
HM	vt	11	2,1	0,3	0,13	-4,0	4,2

vaikuttavat aineet (kofiini, nikotiini ja alkoholi) sekä liikunta, koska näillä voisi olla vaikutusta koetulosten luotettavuuteen [26]. Henkilöä pyydettiin merkitsemään näistä ne tekijät, joita hän oli nauttinut tai harrastanut viimeisen kolmen tunnin aikana. Kyselyssä tiedusteltiin osallistujalta myös mahdollisesta kuulovammasta, jota ei kuitenkaan ollut kenelläkään vastaajista.

Seuraavaksi koehenkilöllä kuuntelutettiin alaluvussa 4.3 kuvailut ääninäytteet satunnaisessa järjestyksessä. Ennen kuuntelua henkilöä ohjeistettiin liitteen A dokumentilla valitsemaan neljästä musiikkiotteesta näyte, joka kuulosti hänen mielestään parhaalta. Tämän lisäksi henkilöä pyydettiin välttämään ylimääräistä liikettä, jotta myöhemmin tehtävästä lämpötilamittauksesta tulisi helpompaa. Koehenkilöitä kuvattiin lämpökameralla kuuntelun ajan, ja kokeen pitäjä kirjasi ylös crescendojen alkamisajankohdat videon aikaleimasta.

Kokeen jälkeen koehenkilöitä pyydettiin täyttämään loppukysely, jossa kysyttiin musiikin vaikutuksista. Kyselyssä selvitettiin, oliko koehenkilö tuntenut kylmiä väreitä, herkistymistä tai muita musiikin aiheuttamia selkeitä tuntemuksia kokeen aikana. Tämän lisäksi koehenkilöä pyydettiin ilmoittamaan parhaaksi havaitsemansa näyte.

Yleensä lämpökamerakokeissa koehenkilöä on pidetty koetilassa 10 – 20 minuuttia ennen varsinaista mittausta [26]. Tällöin henkilö ehtii sopeutua huoneen lämpötilaan, jolloin ihon lämpötila ei enää muutu huoneen vaikutuksesta [26]. Tässä kokeessa tätä niin kutsuttua akklimatisointia ei tehty, koska odottamisen oletettiin vaikuttavan mittaustuloksiin — 20 minuutin hiljaisuuden jälkeen mikä tahansa ääniärsyke saattaisi aiheuttaa havaittavan tunnereaktion.

4.5 Lämpötilojen analysointi

Kokeissa saadut lämpökameravideot käsiteltiin alaluvussa 4.1 esiteltyllä seurantaohjelmalla. Mittaukset tehtiin käsin- ja liikeseurannalla sekä ohjelman kuvanmuokkausominaisuutta hyödyntäen. Kaikissa tapauksissa lämpötila mitattiin kuvan 8 tavoin sieraimen ympäristöstä suorakaiteen muotoiselta alueelta.

Hengitys havaittiin suureksi virhetekijäksi, koska sierainaukon sisäpuolinen lämpötila vaihteli sisään- ja ulospuhallusten välillä merkittävästi. Erityisesti sisäänhengitys jäähdytti sierainaukon aluetta, mikä peitti muut nenän alueen lämpötilamuutokset. Tästä syystä videoista valittiin käsin ruutuja, joissa koehenkilö ei ollut hengittämässä sisään. Ensimmäinen ruutu valittiin 30 sekuntia ennen ensimmäisen näytteen crescendoa ja muut ruudut noin viiden sekunnin välein videon loppuun asti. Myöhemmin mittausprosessissa ruutuja valittiin ääninäytteiden lähtöaikojen ympäriltä noin kah-



Kuva 8: Mittauksissa tarkasteltu alue (keltainen suorakaide).

den sekunnin välein, jotta lämpötilamittauksen tarkkuus paranisi. Valittuja ruutuja käytettiin kaikissa kolmessa seurantatavassa vertailukelpoisuuden säilyttämiseksi.

Käsinmittauksessa ROI:t aseteltiin valittuihin ruutuihin silmämääräisesti ja niiden paikat tarkastettiin syntyneestä lämpötilakäyrästä. Virheellinen sijainti erottui suurena lämpötilamuutoksena mittauskäyrässä. Tällöin paikkaa korjattiin niin kauan, kunnes ROI oli sijoitettu kiitettävällä tarkkuudella sekä visuaalisesti että lämpötilan perusteella. Kokeen varsinaiset lämpötilamuutokset valittiin käsinseurannan mittauksista, koska se osoittautui myöhemmin kokeen aikana varmimmaksi seurantatavaksi erityisesti liikkuvan kohteen mittauksessa.

Liikeseurannassa ensimmäisen ruudun ROI aseteltiin käsinseurannan kanssa yhtenevästi. Tämän jälkeen menetelmä määrittä mittausalueen sijainnin muihin valittuihin ruutuihin automaattisesti. Menetelmiä vertailtiin sekä lämpötilojen että seuranta-tarkkuuden osalta. Seurantalaatikoiden sijaintiero tarkasteltiin tehtävää varten kehitetyllä menetelmällä. Menetelmä mittasi laatikoiden peittämistä kuvapisteistä

yhteisten pisteiden suhteellista määrää s :

$$s = \frac{K \cap L}{K \cup L}, \quad (13)$$

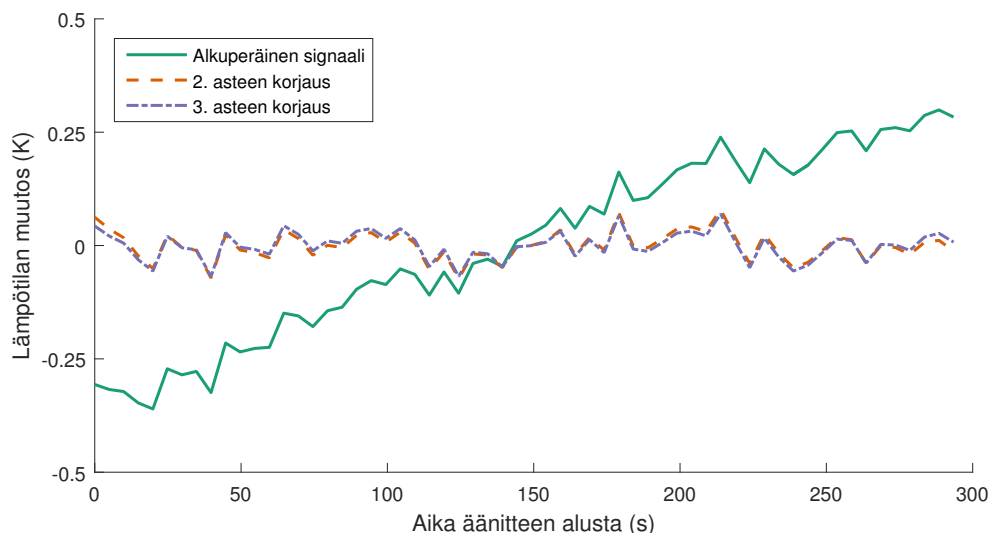
jossa K on käsinseuranta- ja L liikeseurantalaatikon sisältämät kuvapisteeet. Seurantalaaatikoiden ollessa yhtenevät s saa arvon 1, kun taas täysin erillään oleville laatikoille s on vastaavasti 0. Tällöin mitä suurempi s :n arvo on, sitä tarkemmin seurantalaaatikot ovat päällekkäin ja siten myös useampi mittaukseen käytetty kuvapiste on sama laatikoiden välillä.

Kuvanmuokkauksessa seurantapisteeet aseteltiin ensimmäiseen ruutuun käsin, mikä jälkeen menetelmä laskee liikeseurannan tapaan pisteiden paikat muille ruuduille. Myös ROI aseteltiin ensimmäiseen mittausruutuun yhtenevästi muiden menetelmien kanssa. Selkein ero muihin seurantamenetelmiin tapahtui tämän jälkeen. Mittausalueen liikuttamisen sijaan kuvanmuokkaus hyödynsi seurantapisteeitä muovatakseen muita ruutuja ensimmäisen kuvan kaltaiseksi. Kuvanmuokkausta verrattiin kahden edellä kuvattuun menetelmään ainoastaan lämpötilamittauksen kautta, koska lähestymistapa mittaukseen oli niistä poikkeava.

Lämpötilamittauksen jälkeen käyrille tehtiin silmämääräinen tarkastelu, jossa havaittiin ääniärsykkeestä riippumaton nouseva trendi lähes kaikissa mittauksissa. Tämä nousu suodatettiin sovittamalla mittauspisteisiin toisen ja kolmannen asteen polynomit, jotka vähennettiin alkuperäisestä signaalista. Eriasteisia polynomeja sovellettiin kahdesta syystä. Ensinnäkin kolmannen asteen polynomi saattaisi kuvata lämpötilamuutoksia liian tarkasti, jolloin oikeita reaktion aiheuttamia muutoksia saattaisi suodattua pois. Toisaalta toisen asteen polynomi saattaisi olla liian yksinkertainen, mikä sekä vääristäisi tuloksia.

Kuvassa 9 on esitetty esimerkki polynomikorjauksesta. Tasainen lämpötilan nousu, joka näkyy alkuperäisessä signaalissa, on saatu poistettua kummastakin käyrästä. Pienet muutokset ovat kuitenkin myös säilyneet eikä nouseva trendi piilota niitä alleen. Kuvasta 10 löytyvät kokeen kaikki lämpötilamittaukset korjauskäyrineen.

Mittauspisteiden riippumattomuutta parannettiin keskiarvoistamalla lämpötila 10 sekunnin ajalta ennen ja jälkeen näytteen ensimmäisen crescendon. Näin jokaiselle koehenkilölle saatiin jokaista konserttialia kohden yksi ennen-jälkeen -lämpötilapari. Mahdollisesti viivästynyt reaktio pyrittiin havaitsemaan viivästämällä jälkimmäistä keskiarvoistusikkunaa 0, 3 ja 5 sekuntia crescendon alusta. Saadut ennen-jälkeen näyteparit ryhmiteltiin konserttialin, näytejärjestyksen sekä lempisalin mukaan ja saaduissa ryhmissä näytteitä vertailtiin parinäytteiden t-testillä (engl. paired samples



Kuva 9: Esimerkki lämpötilan nousun korjaamisesta toisen ja kolmannen asteen polynomikorjauksilla. Alkuperäisessä signaalissa (vihreä) esiintyvä lämpötilan nousu on suodattunut korjatuissa signaalissa (punainen ja violetti).

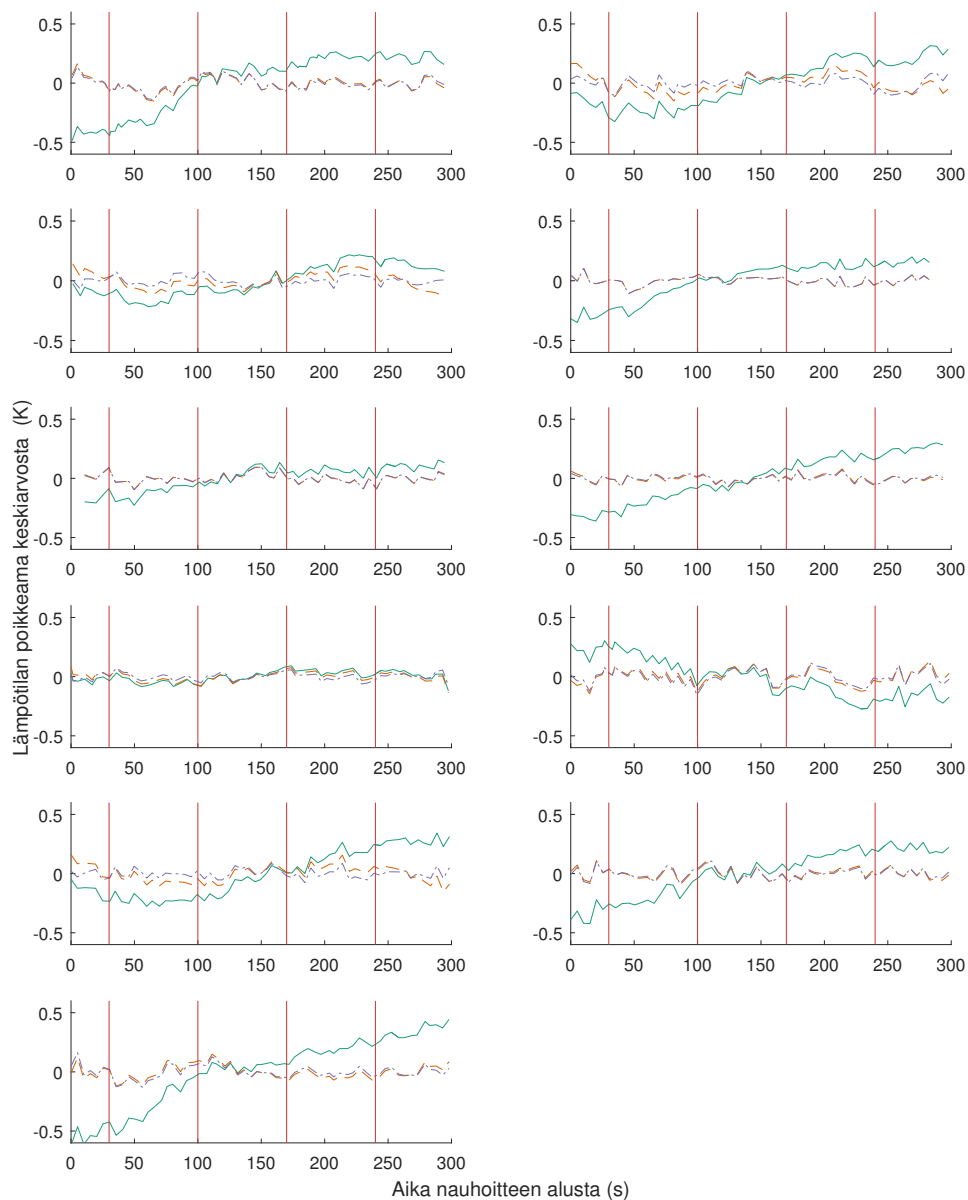
t-test).

T-testin tuloksena ryhmälle saadaan kaksi lukuarvoa: $t_{(df)}$ ja p . Arvo $t_{(df)}$ kuvaa yksinkertaistetusti, kuinka paljon näytteiden välisen poikkeaman keskiarvo eroaa Studentin t-jakauman odotusarvosta. Suuri negatiivinen arvo kertoo, että ryhmän lämpötila on keskimäärin noussut, ja vastaavasti suuri positiivinen arvo viittaa yleiseen jäähtymiseen. Arvon alaviite df kertoo puolestaan vapausasteiden määrän.

Parametri p kuvastaa tulosten merkitsevyyttä. Suuri p :n arvo ($p \rightarrow 1, 0$) kertoo, että ennen ja jälkeen vällinneiden lämpötilojen keskiarvot ovat käytännössä samat. Pienet p :n arvot ($p < 0, 05$) taas kuvastavat tilastollisesti merkittävää eroa vertailtavien keskiarvojen välillä.

4.6 Yhteenveto

Tässä luvussa esiteltiin kokeessa käytetyt menetelmät. Luvussa käsiteltiin koejärjestelyä, ääninäytteitä, mittaustilannetta sekä seurantaohjelmistoa, joka kehitettiin analyysia varten. Lopuksi tutustuttiin mitatun lämpötilasignaalin jälkikäsitteilyyn ja analyysimenetelmiin, joiden avulla pyrittiin löytämään näytteiden aiheuttamat lämpötilamuutokset. Analyysin tulokset löytyvät seuraavasta luvusta.



Kuva 10: Mitatut sekä 2. ja 3. asteen polynomeilla korjatut lämpötilakäyrät koehenkilöittäin. Ääninäytteiden alkamisajat on merkitty kuvaajiin punaisella pystyviivalla.

5 Tulokset

Edellisissä luvuissa esiteltiin työn teoreettinen pohja ja mittausmenetelmät. Tämä luku käy läpi saadut tulokset, joiden tarkastelu on jätetty seuraavaan lukuun.

Liitteessä B on esitetty 2. asteen polynomilla korjatut lämpötilat jokaiselle konserttisalille koehenkilöittäin. Esitetyt lämpötilat ovat poikkeamia korjatun aikasarjan keskiarvosta, minkä takia ne vaihtelevat nollan molemmin puolin. Arvot on laskettu käsinseurannalla mitatuista lämpötiloista.

Taulukossa 5 on t-testin tulokset konserttisaleittain, näytteittäin, suosikkisalin sekä korjaavan polynomien mukaan. Vertailtaessa korjaamattomien ja korjattujen lämpötilojen t-arvoja huomataan, että korjaamattomissa signaaleissa kyseinen tunnusluku on 1 – 2 yksikköä pienempi kuin korjatuilla verrokeilla. Ero todennäköisesti johtuu kuvassa 9 esitetystä signaalin ryömimisestä. Myös korjattujen signaalien välillä on havaittavissa eroja varsinkin näytejärjestyksen perusteella ryhmitellyissä testeissä.

Merkittäviä muutoksia nenän alueen lämpötilassa havaittiin eniten näytteen kuuntelujärjestyksen perusteella. Toisen asteen korjauksella (cresc. +5 s) lämpötila laski ensimmäisen ja viimeisen näytteen kohdalla ($p=0,018$ ja $p=0,008$ järjestyksessä), kun taas kolmas näyte nosti nenän lämpötilaa ($p=0,015$). Konserttisaleista merkittäviä muutoksia aiheutti ainoastaan CP (3. asteen korjaus, viive 5s, $p=0,039$).

Parimittausten vaikutusta tuloksiin arvioitiin laskemalla t -arvot ainoastaan koehenkilöille, jotka oli kuvattu yksin. Laskenta tehtiin eniten merkitsevyyttä saaneella korjauksella (2. aste) ja viivästyksellä (cresc. +5 s). Taulukossa 6 on t-testin tulokset ilman pareittain kuvattuja koehenkilöitä. Vertaillessa tunnuslukuja taulukon 5 vastaaviin arvoihin voidaan huomata, että tulokset ovat menettäneet merkitsevyytensä. Suoraa vertailua yksilö- ja parisuoritusten välillä ei voitu tehdä otannan pienuuden vuoksi.

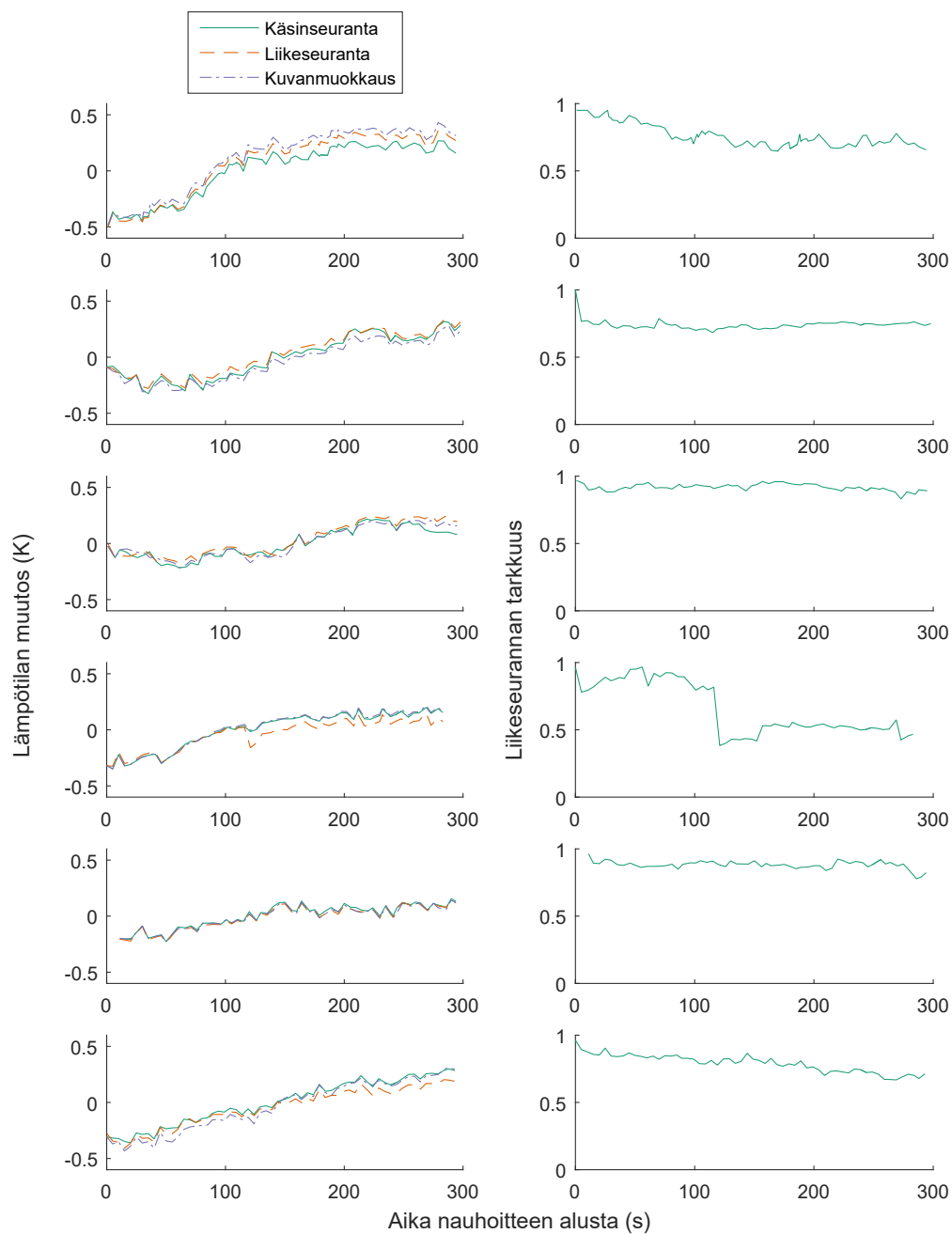
Kuvissa 11 ja 12 on vertailtu eri seurantamenetelmien antamia lämpötilamittauksia. Keskimääräinen poikkeama käsinseurannan lämpötilasta oli liikeseurannalle $0,072$ °C ja kuvanmuokkaukselle $0,059$ °C. Seurannassa syntyneet virheet ovat selkeimmin näkyvillä kuvan 12 ylärivin vasemmanpuoleisessa kuvaajassa, jossa sekä liikeseuranta että kuvanmuokkaus kadottivat kohteen nopean liikkeen takia. Paremmiin seurantatarkkuutta voi tutkia tarkastelemalla kuvien oikeaa saraketta, joissa liike- ja käsinseurantaa on vertailtu yhtälön (13) avulla. Toisiaan vastaavat kuvaajat on sijoitettu kuvissa rinnakkain.

Taulukko 5: t-testin tulokset korjaamattomille ja korjatuille lämpötiloille. Testissä on vertailtu lämpötiloja ennen ja jälkeen ääninäytteen kuuntelun. Tunnusluvut on ryhmitelty konserttialin, näytteen esitysjärjestyksen ja lempisalin perusteella, jonka lisäksi lopputilan keskiarvoistusikkuna on laskettu 0, 3 ja 5 sekunnin viivästyksillä crescendon (cresc.) jälkeen. Laskeva lämpötilan keskiarvo näkyy t-testissä positiivisena t:n arvona. Taulukossa on korostettu tilastollisesti merkittävät muutokset ($p < 0,05$).

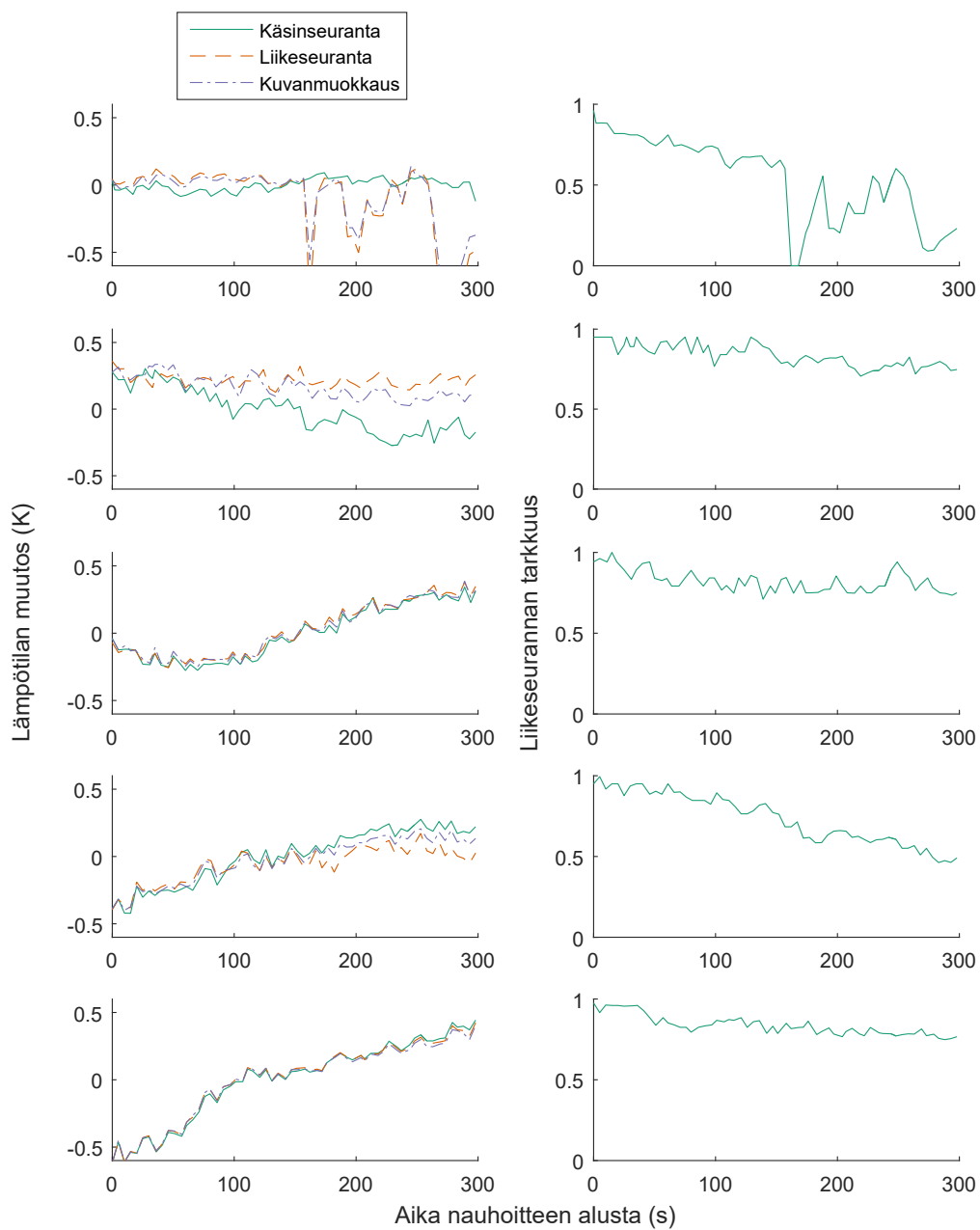
Sali/Ehto	Ilman korjausta					
	(cresc. +0 s)		(cresc. +3 s)		(cresc. +5 s)	
	$t_{(10)}$	p	$t_{(10)}$	p	$t_{(10)}$	p
Kaikki (df = 43)	-2,055	0,046	-2,350	0,023	-1,817	0,076
VM	0,524	0,611	0,199	0,846	-0,527	0,609
CP	-1,651	0,130	-1,943	0,081	-0,594	0,566
AC	-1,541	0,154	-1,692	0,122	-1,653	0,129
HM	-1,342	0,209	-1,135	0,283	-0,619	0,550
1. näyte	0,532	0,606	0,209	0,839	0,214	0,835
2. näyte	-2,784	0,019	-2,544	0,029	-1,719	0,116
3. näyte	-3,534	0,005	-5,331	0,000	-5,026	0,001
4. näyte	0,848	0,416	1,865	0,092	2,084	0,064
Suosikkisali	-1,599	0,141	-1,352	0,206	-1,188	0,262
	2. asteen korjauksella					
	(cresc. +0 s)		(cresc. +3 s)		(cresc. +5 s)	
	$t_{(10)}$	p	$t_{(10)}$	p	$t_{(10)}$	p
Kaikki (df = 43)	0,576	0,568	0,908	0,369	1,433	0,159
VM	2,049	0,068	1,822	0,098	1,434	0,182
CP	0,888	0,395	0,528	0,609	1,881	0,089
AC	-0,783	0,452	-0,713	0,492	-0,578	0,576
HM	-0,360	0,726	0,173	0,866	0,509	0,622
1. näyte	2,036	0,069	2,186	0,054	2,813	0,018
2. näyte	-0,751	0,470	-0,363	0,724	0,309	0,764
3. näyte	-2,284	0,045	-3,095	0,011	-2,925	0,015
4. näyte	2,027	0,070	3,727	0,004	3,268	0,008
Suosikkisali	-0,159	0,877	0,479	0,642	0,434	0,674
	3. asteen korjauksella					
	(cresc. +0 s)		(cresc. +3 s)		(cresc. +5 s)	
	$t_{(10)}$	p	$t_{(10)}$	p	$t_{(10)}$	p
Kaikki (df = 43)	0,208	0,836	0,426	0,672	0,936	0,355
VM	1,819	0,099	1,383	0,197	0,912	0,383
CP	1,065	0,312	0,771	0,459	2,367	0,039
AC	-0,715	0,491	-0,667	0,520	-0,544	0,599
HM	-0,783	0,452	-0,470	0,648	-0,142	0,890
1. näyte	1,248	0,240	1,148	0,278	1,292	0,225
2. näyte	-0,510	0,621	-0,091	0,929	0,551	0,594
3. näyte	-1,820	0,099	-2,545	0,029	-2,552	0,029
4. näyte	1,111	0,293	2,389	0,038	2,759	0,020
Suosikkisali	-0,197	0,847	0,416	0,686	0,302	0,769

Taulukko 6: t-testin tulokset ilman pareittain kuvattuja koehenkilöitä.

Sali/Ehto	Ilman parimittauksia, 2. asteen korjaus (cresc. +5 s)	
	$t_{(6)}$	p
Kaikki (df = 27)	0,506	0,617
VM	0,258	0,805
CP	1,172	0,286
AC	0,328	0,754
HM	-0,650	0,540
1. näyte	1,478	0,190
2. näyte	-0,295	0,778
3. näyte	-1,804	0,121
4. näyte	2,020	0,090
Suosikkisali	0,255	0,807



Kuva 11: Vasemmassa sarakkeessa liikeseurannalla (punainen) ja kuvanmuokkauksella (violetti) tehdyt lämpötilamittaukset koehenkilöille 1 – 6. Vertailukohtana on käsinseurannalla tehty mittaus (vihreä). Oikeassa sarakkeessa on vertailtu liikeseurannan tarkkuutta käsinseurantaan vastaavissa mittauksissa. Arvo on seurantalaitikoiden yhteisten pikselien määrä suhteessa kaikkiin laatikoiden peittämiin pikseleihin.



Kuva 12: Liikeseurannan ja kuvanmuokkauksen antamat lämpötilamittaukset verrattuna käsinseurantaan koehenkilöille 7 – 11. Poikkeamat koehenkilöllä 7 (ylin kuvapari) johtuvat seurattavan kohteen kadottamisesta.

6 Analyysi

Edellisessä luvussa esiteltiin tulokset lämpötilan muutoksille, seurantatarkkuudelle ja parimittauksen vaikutuksille. Tässä luvussa tulkitaan saatuja tuloksia, pohditaan virhelähteitä ja lopulta vastataan luvussa 1 esitettyyn tutkimuskysymykseen.

Tulosten tarkastelu

Taulukossa 5 esitellyt tulokset lämpötilamittauksille ovat riippuvaisia korjaukseen käytetystä polynomista, mikä muuttaa tulosten merkittävyyttä ja siten tekee niiden tulkitsemisesta haastavaa. Toisen asteen korjauksella merkittävyyden raja ylittyy 1., 3. ja 4. näytteen kohdalla, kun viive on 5 sekuntia. Vastaavasti 3. asteen korjauksella ylitys tapahtuu ainoastaan kahdessa jälkimmäisessä näytteessä, jolloin 1. näytettä ei enää voi pitää merkittävänä. Kuvan 10 lämpötilakäyrät selittävät osin erot: alkuvaiheessa pienemmän korjauksen käyrä seuraa uskollisemmin alkuperäisen lämpötilakäyrän muotoa, kun taas korkeampi korjaus suodattaa alun vahvat lämpötilan muutokset. Tässä työssä tilanne tulkitaan 2. asteen korjauksen eduksi, mutta myös vastakkaista päätöstä voitaisiin pitää perusteltuna.

Korjattujen tulosten perusteella näytteen soittojärjestyksellä on enemmän vaikutusta kasvojen lämpötilaan kuin itse saliakustiikalla. Tulos ei ollut odotettu, kun sitä verrataan alaluvussa 3.3 esiteltyyn Pätyksen ja Lokin [51] tutkimukseen. Toisaalta muutosten oletettiin olevan pieniä, joten todelliset reaktiot ovat voineet peittyä eri virhetekijöiden alle.

Koehenkilöparien kuvaaminen osoittautui teknisesti mahdolliseksi. Käytetyn lämpökameran kuvatarkkuus riitti hyvin mittaustarpeisiin, ja mitatut lämpötilakäyrät olivat yhtä laadukkaita kuin mitä yksittäin kuvatuilta koehenkilöiltä saatiin. Parimittauksilla oli silti mahdollisia vaikutuksia tuloksiin, sillä jättämällä parimittaukset pois tarkastelusta edellä esitellyt tulokset lämpötilamittauksille menettivät merkittävyytensä. Taulukon 6 perusteella mitkään taulukon 5 vastaavista tuloksista eivät ole merkitseviä.

Tarkkaa syytä parimittausten vaikutuksista koetuloksiin ei tiedetä, koska vaihtoehtoja on useita. Ero voi johtua esimerkiksi siitä, että musiikkiin reagoiva henkilö sattui kuulumaan pareittain mitattavien joukkoon. Toisaalta parit saattoivat vaikuttaa tiedostamatta toisiinsa ja aiheuttaa reaktioiden samanlaistumisen, mikä olisi vääristänyt tuloksia parin kollektiivisen reaktion suuntaan. Myös kamerasuunnan lämpenee parimittauksissa samalla tavoin kahdella henkilöllä, jolloin kyseisen virheen vaikutus kertaantuu tuloksiin.

Sekä liikeseuranta että kuvanmuokkaus osoittautuivat toimiviksi tavoiksi vähentää koehenkilön liikkeen vaikutusta mittaustuloksiin. Molemmat menetelmät pystyivät mittaamaan lämpötilaa yhtä tarkasti kuin käsinseuranta, kun kohde liikkui vain vähän eikä kuvakulma mittausalueeseen muuttunut merkittävästi. Menetelmistä lähemmäksi käsinseurannan lämpötilamittausta pääsi kuvanmuokkaus, mutta menetelmien välinen keskimääräinen lämpötilapoikkeama erosi vain noin $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ toisistaan.

Ongelmia seurannassa ilmeni automaattisilla menetelmillä, kun kohde alkoi liikkua enemmän. Näitä tilanteita olivat esimerkiksi vahva ilmehtiminen sekä pään pyörittely. Tällöin sekä liikeseuranta että kuvanmuokkaus kadottivat seurantapisteen, jolloin seuranta keskeytyi. Myös ROI:n ajautumista paikoiltaan on kuvien 11 ja 12 perusteella havaittavissa. Ajautuminen on kuitenkin arvioitu vain liikeseurannalle, sillä kuvanmuokkauksen tarkkuuden arviointi on huomattavasti haastavampaa.

Virhelähteet

Kokeessa oli monia virhelähteitä, jotka olisi pitänyt huomioida toteutuksessa. Ensimmäisenä on huomioitava otannan pienuus verrattuna odotettuun epätarkkuuteen. Alaluvussa 3.3 mainittu epävarmuus koetun tunteen syntymiselle oli 55 – 65 %, jonka perusteella 11 mittausta on vähän. Näytteiden pitkäkestoisuus on myös oletusarvoisesti heikentänyt tunnereaktioita, joita jälkimmäiset musiikinäytteet ovat synnyttäneet. Näistä syistä otantaa tulisi kasvattaa ainakin kaksinkertaiseksi, jotta saadut tulokset olisivat edustavia.

Otanta on myös liian pieni, jotta voitaisiin varmuudella määrittää parimittauksen vaikutus tuloksiin. Pidetyssä kokeessa vain neljä koehenkilöä oli kuuntelutettu pareina, minkä takia parimittauksia ei kannattanut vertailuttaa yksilösuorituksiin. Vertailu olisi mielekkäämpi, jos jokainen henkilö kuuntelisi näytteet sekä yksin että toisen henkilön kanssa. Tällöin olisi mahdollista verrata ryhmiä keskenään ja selvittää, onko parimittauksilla vaikutusta lämpötilamuutoksiin.

Seurantalaaatikon koko vaikuttaa osaltaan tuloksiin. Kuten kuvassa 8 nähdään, ROI on mitattavaan alueeseen (sieraimen yläpuolinen alue) verrattuna suuri. Tämä osaltaan vaimentaa mitattua lämpötilamuutosta kyseisellä alueella. Toisaalta suurempi seurantalaaatikko on vähemmän herkkä pienille sijainnin epätarkkuuksille suuremman kuvapistetotannan vuoksi. Suuri seurantalaaatikko parantaa myös liikeseurannan tarkkuutta, koska sen sisälle mahtuu useampia kuvapiirteitä.

Koehenkilöiden ohjeistus saattoi sekin osaltaan vaikuttaa tulosten luotettavuuteen. Kuten liitteestä A ilmenee, koehenkilöitä neuvottiin valitsemaan kuulluista neljästä näytteestä se, joka kuulosti heistä parhaalta. Kyseinen tehtävänanto on vaatinut

kuulijaa keskittymään musiikin arviointiin, mikä on saattanut puolestaan vaimentaa tunnereaktioita. Koska ohjeistuksessa kerrottiin myös näytteiden määrä etukäteen, nenän lämpötilan vaihtelut saattoivat johtua ainoastaan kuulijan reaktioista kokeen etenemiseen — ensimmäinen näyte koettiin kiinnostavaksi, toinen ja kolmas näyte jäivät vaisuiksi ja neljäs näyte innosti jo kokeen loppumisen takia.

Akklimatisoinnin tekemättä jättäminen vaikutti hyvin todennäköisesti tuloksiin. Jo alaluvussa 4.5 mainittu lämpötilan tasainen nousu johtui todennäköisesti juuri tästä puutteesta. Myös kameran kuvakenno yleensä lämpenee kennoarvojen lukemisen takia, mikä osaltaan aiheuttaa kuvadatasta riippumatonta lämpötilan muutosta. Tästä syystä tulevissa kokeissa tulisikin antaa kameran sopeutua vähintään tunti koehuoneen lämpötilaan. Alaluvussa 4.4 annettu peruste akklimatisoinnin poisjättämiselle täytyisi myös kiertää. Hiljaisuuden voisi täyttää esimerkiksi kohinaa muistuttavalla äänellä, jotta musiikin äkillinen alkaminen ei aiheuttaisi kuulijassa tunnereaktiota.

Näyterakenne aiheutti hämmennystä osalla koehenkilöissä. Näytettä ennen soitettu pseudosatunnainen katkelma yhdistettiin usein varsinaiseen näytteeseen, vaikka katkelma olikin kaikissa tapauksissa sama. Tällöin kuulijan saattoi turhautua liian samanlaisten näytteiden takia. Rakennetta voisi parantaa korvaamalla kyseinen katkelma vaikka samalla kohinalla, jossa koehenkilö akklimatisoidaan. Hälyksi soveltuisi esimerkiksi veden solina, koska kyseiselle äänelle on vaikea hahmottaa rakennetta. Veden ääni ja itse näyte myös eroaisivat toisistaan selvästi, mikä selkeyttäisi näyterajoja koehenkilöille. Täyteäänenä voisi käyttää myös yleisön hälinää, joka soveltuisi hyvin konserttitaliteemaan. Häly ei saisi kuitenkaan sisältää informaatiota ja siitä pitäisi myös varmistaa, ettei se tunnu kuulijasta häiritsevältä.

Näytteiden alkamiskohdan ylöskirjaaminen tuo koetuloksiin oman virhetekijänsä. Kuten alaluvussa 4.4 mainittiin, näytteiden alkamisajankohdat merkittiin ylös käsin. Käytäntö on altis virheille, koska kokeenpitäjän tulisi kyetä merkitsemään alkamiskohta täsmälleen samaan kohtaan jokaista näytettä. Virhettä voisi vähentää kirjaamalla ylös ainoastaan näytesarjan alkamisajankohdan. Tällöin näytteiden alut voisi laskea jälkikäteen tästä aikaleimasta, jolloin kokeentekijän huolimattomuudelle jäisi vähemmän sijaa. Paras lopputulos kuitenkin saataisiin, jos aikaleima tallennettaisiin automaattisesti lämpökameravideon aikaleimasta.

Johtopäätökset

Lämpökameran käyttöä mittausvälineenä musiikin tunnetutkimuksessa ei voi sulkea pois. Eri virhelähteet todennäköisesti peittivät kokeissa syntyneet reaktiot, minkä

takia tämän kokeen tulokset ovat epäluotettavia. Suurimpina haasteina voidaan pitää akklimatisaation puutetta sekä otannan pienuutta, jotka molemmat voitaisiin korjata helposti uusimalla kokeet. Puolestaan akustiikan vaikuttavuuden tutkimiseen lämpökamera on luultavimmin liian karkea työkalu. Lämpötilamuutokset ovat alun perinkin pieniä, jolloin koehenkilön pienikin liike peittää eri akustiikkojen väliset lämpötilaerot alleen.

Kuten alaluvussa 3.3 kävi ilmi, musiikin tunnetutkimusta ei ole vielä tiettävästi tehty lämpökameralla. Tulevaisuudessa olisikin hyvä tutkia kuuntelun psykofysiologisia vaikutuksia kasvojen lämpötilaan ja yhdistää näitä tuloksia jo kartoitettuihin tunnetiloihin. Kun musiikin lämpövaikutukset tunnettaisiin, olisi helpompaa havaita pienempiä muutoksia mittauksissa. Tällöin akustiikan vaikutusten tutkiminen lämpökameralla voisi mahdollistua.

Tulevaisuudessa olisi hyvä selvittää myös useamman henkilön kuvaamista yhtäaikaaisesti. Edut olisivat selkeät varsinkin otannan kerryttämisessä. Tämän lisäksi vaikutusten selvittäminen rakentaisi perustaa yleisön kuvaamiselle esimerkiksi konserttialissa tai elokuvateattereissa, jolloin yksittäisen teoksen tunnevaikutuksia voitaisiin tutkia samassa tilassa joukolla koehenkilöitä. Tässä työssä osoittautui, että ainakin parimittaus on teknisesti mahdollista. Työssä ei kuitenkaan pystytty todentamaan, etteikö kahden henkilön kuvaaminen vaikuttaisi tuloksiin. Virhelähteiden pohdinnassa esitetyllä yksilö-parivertailukokeella tähän voitaisiin ottaa kantaa.

7 Yhteenveto

Tässä työssä tarkasteltiin, kuinka lämpökamera soveltuu konserttisaliakustiikan ja musiikin vaikuttavuuden tutkimiseen. Aikaisemmissa tutkimuksissa oli havaittu, että konserttisalin akustiikka voi osaltaan voimistaa musiikin aiheuttamia psykofysiologisia reaktioita. Lämpökameralla näitä reaktioita voitaisiin tutkia ilman kontaktia kuulijaan, mikä osaltaan teki menetelmästä mielenkiintoisen.

Lämpökameran käyttöä tutkittiin kuuntelukokeilla, joissa koehenkilöitä kuvattiin yksittäin ja pareittain samalla, kun heille soitettiin musiikkia neljällä eri saliakustialalla. Koehenkilöitä opastettiin kokeen jälkeen valitsemaan omasta mielestään paras ääninäyte. Videotallenteista mitattiin lämpötila sieraimen yläpuoliselta alueelta 2 – 5 s välein käsin, ja lämpötilat keskiarvoistettiin 10 sekunnin ajalta ennen ja jälkeen mitattavaa ärsykettä. Mittausta avustamaan kehitettiin myös liikeseuranta- ja kuvanmuokkaustyökalut, joilla saatuja lämpötiloja verrattiin käsin mitattuihin tuloksiin.

Käsinseurannassa saatiin viitteitä siitä, että ääninäytteiden soittojärjestys vaikutti enemmän nenän alueen lämpötilaan kuin konserttisalien akustiikka. Tulokset kuitenkin todettiin epäluotettaviksi pienen otannan ja lukuisten virhetekijöiden vuoksi. Kahden henkilön mittausta yhtä aikaa osoittautui mahdolliseksi, mutta jälleen pieni otanta esti arvioimasta yhteiskuvauksen vaikutuksia tuloksiin. Sekä kuvanmuokkaus että liikeseuranta osoittautuivat toimiviksi työkaluiksi vähentämään mittausten aiheuttamaa työkuormaa. Menetelmät toimivat parhaiten henkilöillä, jotka eivät liikkuneet paljoa kuvauksen aikana.

Lämpökamera on toimiva työkalu musiikin tunnetutkimuksessa. Akustiikan vaikuttavuuden tutkimuksessa siitä ei kuitenkaan ole vielä hyötyä, koska virhetekijöitä on paljon. Jos näitä tekijöitä saataisiin karsittua ja musiikin vaikutukset kasvojen lämpötilaan tunnettaisiin, menetelmä voisi tulevaisuudessa saavuttaa akustiikan tutkimukseen tarvittavan tarkkuuden.

Viitteet

- [1] Baltrušaitis, T., Robinson, P. ja Morency, L.-P. 3D constrained local model for rigid and non-rigid facial tracking. Teoksessa: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE, 16.–21.6.2012. ISSN 1063-6919, s. 2610–2617. DOI: 10.1109/CVPR.2012.6247980.
- [2] Barron, M. The subjective effects of first reflections in concert halls—The need for lateral reflections. *Journal of Sound and Vibration*, osa 15, nro 4, 1971, s. 475–494. ISSN 0022-460X. DOI: 10.1016/0022-460X(71)90406-8.
- [3] Barron, M. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2 painos. Spon Press, Abingdon, Oxon, Iso-Britannia, 2009. ISBN 978-0-203-87422-6.
- [4] Beranek, L. *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. 2. painos. Springer Science & Business Media, Cambridge, Yhdysvallat, 2003. ISBN 0-387-95524-0.
- [5] Beranek, L. L. Concert hall acoustics—2008. *Journal of the Audio Engineering Society*, osa 56, nro 7/8, 2008, s. 532–544.
- [6] Beranek, L. L. Concert hall acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 131, nro 4, 2012, s. 3242–3242. DOI: 10.1121/1.4708096.
- [7] Bradley, J. S. ja Soulodre, G. A. The influence of late arriving energy on spatial impression. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 97, nro 4, 1995, s. 2263–2271. DOI: 10.1121/1.411951.
- [8] Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G. ja Berntson, G. Psychophysiological Science: Interdisciplinary Approaches to Classic Questions About the Mind. Teoksessa: Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G. ja Berntson, G. (toim.) *Handbook of Psychophysiology*, 3. painos, luku 1. Cambridge University Press, New York, NY, Yhdysvallat, 2007. ISBN 978-0-521-84471-0, s. 1–16.
- [9] Daniels, A. *Field Guide to Infrared Systems, Detectors, and FPAs*. 2. painos. SPIE Press, Bellingham, Washington, Yhdysvallat, 2010. ISBN 978-0-819-48080-4. DOI: 10.1117/3.853623.
- [10] Eveland, C. K., Socolinsky, D. A. ja Wolff, L. B. Tracking human faces in infrared video. *Image and Vision Computing*, osa 21, nro 7, 2003, s. 579–590. ISSN 0262-8856. DOI: 10.1016/S0262-8856(03)00056-8.

- [11] FLIR System. RTools Application Note: Background offset correction. Sähköinen käyttöopas. Viitattu: 27.11.2015. Saatavissa: <http://flir.custhelp.com/ci/fattach/get/1667/>.
- [12] FLIR System. GenICam ICD FLIR AX5 Camera - PC. Sähköinen käyttöopas, 2013. Viitattu: 27.11.2015. Saatavissa: https://graftek.biz/system/files/137/original/FLIR_AX5_GenICam_ICD_Guide_052013.pdf?1376925336.
- [13] Furuya, H., Fujimoto, K., Ji, C. Y. ja Higa, N. Arrival direction of late sound and listener envelopment. *Applied Acoustics*, osa 62, nro 2, 2001, s. 125–136. ISSN 0003-682X. DOI: 10.1016/S0003-682X(00)00052-9.
- [14] Garbey, M., Sun, N., Merla, A. ja Pavlidis, I. Contact-free measurement of cardiac pulse based on the analysis of thermal imagery. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, osa 54, nro 8, 2007, s. 1418–1426. ISSN 0018-9294. DOI: 10.1109/TBME.2007.891930.
- [15] Goldenstein, S., Vogler, C. ja Metaxas, D. 3D facial tracking from corrupted movie sequences. Teoksessa: *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, osa 1. IEEE, 27.6.–2.7.2004. ISSN 1063-6919, s. I-880–I-885 Vol. 1. DOI: 10.1109/CVPR.2004.1315124.
- [16] Goldstein, A. Thrills in response to music and other stimuli. *Physiological Psychology*, osa 8, nro 1, 1980, s. 126–129. ISSN 0090-5046. DOI: 10.3758/BF03326460.
- [17] Haan, C. H. ja Fricke, F. R. Statistical investigation of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria. *Applied Acoustics*, osa 35, nro 2, 1992, s. 105–127. ISSN 0003-682X. DOI: 10.1016/0003-682X(92)90026-O.
- [18] Haas, H. The influence of a single echo on the audibility of speech. *Journal of the Audio Engineering Society*, osa 20, nro 2, 1972, s. 146–159.
- [19] Hahn, A. C., Whitehead, R. D., Albrecht, M., Lefevre, C. E. ja Perrett, D. I. Hot or not? Thermal reactions to social contact. *Biology Letters*, osa 8, nro 5, 2012. ISSN 1744-9561. DOI: 10.1098/rsbl.2012.0338.
- [20] Harrison, L. D. ja Loui, P. Thrills, Chills, Frissons, and Skin Orgasms: Toward an Integrative Model of Transcendent Psychophysiological Moments in Music.

- Frontiers in Psychology*, osa 5, nro 790, 2014. ISSN 1664-1078. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00790.
- [21] Hevner, K. Experimental studies of the elements of expression in music. *The American Journal of Psychology*, osa 48, nro 2, 1936, s. 246–268. DOI: 10.2307/1415746.
- [22] Hidaka, T., Beranek, L. L. ja Nishihara, N. A comparison between shoebox and non-shoebox halls based on objective measurements in actual halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, osa 123, nro 5, 2008, s. 2973–2973. DOI: 10.1121/1.2932466.
- [23] Hodges, D. Psychophysiological measures. Teoksessa: *Handbook of music and emotion: Theory, research, applications*, luku 11. Oxford University Press, Oxford, Iso-Britannia, 2010. ISBN 978-0-19-923014-3, s. 279–311.
- [24] Hodges, D. A. Bodily responses to music. Teoksessa: Hallam, S., Cross, I. ja Thaut, M. (toim.) *The Oxford handbook of music psychology*, 2. painos, luku 12. Oxford University Press, Great Clarendon Street, Oxford, Iso-Britannia, 2016. ISBN 978-0-19-872294-6, s. 183–196.
- [25] Ioannou, S., Ebisch, S., Aureli, T., Bafunno, D., Ioannides, H. A., Cardone, D., Manini, B., Romani, G. L., Gallese, V. ja Merla, A. The Autonomic Signature of Guilt in Children: A Thermal Infrared Imaging Study. *PLoS ONE*, osa 8, nro 11, 2013, s. 1–11. ISSN 19326203. DOI: 10.1371/journal.pone.0079440.
- [26] Ioannou, S., Gallese, V. ja Merla, A. Thermal infrared imaging in psychophysiology: Potentialities and limits. *Psychophysiology*, osa 51, nro 10, 2014, s. 951–963. ISSN 1469-8986. DOI: 10.1111/psyp.12243.
- [27] Jarlier, S., Grandjean, D., Delplanque, S., Diaye, K. N., Cayeux, I., Velazco, M. I., Sander, D., Vuilleumier, P. ja Scherer, K. R. Thermal analysis of facial muscles contractions. *IEEE Transactions on Affective Computing*, osa 2, nro 1, 2011, s. 2–9. ISSN 1949-3045. DOI: 10.1109/T-AFFC.2011.3.
- [28] Jones, B. F. A reappraisal of the use of infrared thermal image analysis in medicine. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, osa 17, nro 6, 1998, s. 1019–1027. ISSN 0278-0062. DOI: 10.1109/42.746635.

- [29] Juslin, P. N. From everyday emotions to aesthetic emotions: Towards a unified theory of musical emotions. *Physics of Life Reviews*, osa 10, nro 3, 2013, s. 235–266. ISSN 1571-0645. DOI: 10.1016/j.plrev.2013.05.008.
- [30] Juslin, P. N. ja Sloboda, J. A. Music and Emotion. Teoksessa: Deutsch, D. (toim.) *The Psychology of Music*, 3 painos, luku 15. Elsevier Inc., Lontoo, Iso-Britannia, 2013. ISBN 978-0-12-381460-9, s. 583–645.
- [31] Jänig, W. Autonomic nervous system. Teoksessa: Schmidt, R. F. ja Thews, G. (toim.) *Human physiology*. Springer Berlin Heidelberg, Saksa, 1989. ISBN 978-3-642-73831-9, s. 333–370. DOI: 10.1007/978-3-642-73831-9_16.
- [32] Khalfa, S., Isabelle, P., Jean-Pierre, B. ja Manon, R. Event-related skin conductance responses to musical emotions in humans. *Neuroscience Letters*, osa 328, nro 2, 2002, s. 145–149. ISSN 0304-3940. DOI: 10.1016/S0304-3940(02)00462-7.
- [33] Khalfa, S., Roy, M., Rainville, P., Dalla Bella, S. ja Peretz, I. Role of tempo entrainment in psychophysiological differentiation of happy and sad music? *International Journal of Psychophysiology*, osa 68, nro 1, 2008, s. 17–26. ISSN 0167-8760. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2007.12.001.
- [34] Kistler, A., Mariauzouls, C. ja von Berlepsch, K. Fingertip temperature as an indicator for sympathetic responses. *International Journal of Psychophysiology*, osa 29, nro 1, 1998, s. 35–41. ISSN 0167-8760. DOI: 10.1016/S0167-8760(97)00087-1.
- [35] Kocher, A. A. ja Vigeant, M. C. Relationships between perceived room acoustic quality and perceived reverberance, listener envelopment, and tonal quality. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, osa 25, nro 3, 2015, s. 331–338. DOI: 10.1037/pmu0000071.
- [36] Kuraoka, K. ja Nakamura, K. The use of nasal skin temperature measurements in studying emotion in macaque monkeys. *Physiology & behavior*, osa 102, nro 3, 2011, s. 347–355. ISSN 0031-9384. DOI: 10.1016/j.physbeh.2010.11.029.
- [37] Kuusinen, A. An Anechoic Audio Corpus for Room Acoustics and Related Studies. *Proceedings of the EAA Joint Symposium on Auralization and Ambisonics*, 2014. DOI: 10.14279/depositonce-19.
- [38] Kuusinen, A., Pätynen, J., Tervo, S. ja Lokki, T. Relationships between preference ratings, sensory profiles, and acoustical measurements in concert halls. *The*

- Journal of the Acoustical Society of America*, osa 135, nro 1, 2014, s. 239–250. DOI: 10.1121/1.4836335.
- [39] Kwon, Y. ja Siebein, G. W. Chronological analysis of architectural and acoustical indices in music performance halls. *Journal of the Acoustical Society of America*, osa 121, nro 5, 2007, s. 2691–2699. DOI: 10.1121/1.2713663.
- [40] Lokki, T. Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls. *Physics Today*, osa 67, nro 1, 2014, s. 27. DOI: 10.1063/PT.3.2242.
- [41] Lokki, T., Pätynen, J., Kuusinen, A. ja Tervo, S. Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 132, nro 5, 2012, s. 3148–3161. DOI: 10.1121/1.4756826.
- [42] Lundqvist, D. ja Litton, J. E. *The Averaged Karolinska Directed Emotional Faces - AKDEF*. Karolinska Institutet, Kliinisten neurotieteiden laitos, Psykologian osasto, Tukholma, Ruotsi, 1998. ISBN 91-630-7164-9.
- [43] Minkina, W. ja Dudzik, S. *Infrared thermography: errors and uncertainties*. 1. painos. John Wiley & Sons, Chichester, Iso-Britannia, 2009. ISBN 978-0-470-68224-1.
- [44] Nakanishi, R. ja Imai-Matsumura, K. Facial skin temperature decreases in infants with joyful expression. *Infant Behavior and Development*, osa 31, nro 1, 2008, s. 137–144. ISSN 0163-6383. DOI: 10.1016/j.infbeh.2007.09.001.
- [45] Nguyen, H., Kotani, K., Chen, F. ja Le, B. A thermal facial emotion database and its analysis. Teoksessa: Klette, R., Rivera, M. ja Satoh, S. (toim.) *Image and Video Technology: 6th Pacific-Rim Symposium*. Springer Berlin Heidelberg, Saksa, 2013. ISBN 978-3-642-53842-1, s. 397–408. DOI: 10.1007/978-3-642-53842-1_34.
- [46] Pavlidis, I., Levine, J. ja Baukol, P. Thermal imaging for anxiety detection. Teoksessa: *IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum: Methods and Applications*. IEEE, 2000, s. 104–109. DOI: 10.1109/CVBVS.2000.855255.
- [47] Pavlidis, I., Tsiamyrtzis, P., Shastri, D., Wesley, A., Zhou, Y., Lindner, P., Buddhharaju, P., Joseph, R., Mandapati, A., Dunkin, B. et al. Fast by nature-how stress patterns define human experience and performance in dexterous tasks. *Scientific Reports*, osa 2, 2012. DOI: 10.1038/srep00305.

- [48] Pulkki, V. Spatial sound generation and perception by amplitude panning techniques. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo, Suomi, 2001.
- [49] Pätynen, J. A virtual loudspeaker orchestra for studies on concert hall acoustics. Väitöskirja, Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu, Mediatekniikan laitos, Espoo, Suomi, 2011.
- [50] Pätynen, J. ja Lokki, T. The Acoustics of Vineyard Halls, is it so Great After all? *Acoustics Australia*, osa 43, nro 1, 2015, s. 33–39. ISSN 1839-2571. DOI: 10.1007/s40857-015-0011-x.
- [51] Pätynen, J. ja Lokki, T. Concert halls with strong and lateral sound increase the emotional impact of orchestra music. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 139, nro 3, 2016, s. 1214–1224. DOI: 10.1121/1.4944038.
- [52] Pätynen, J., Tervo, S. ja Lokki, T. Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatiotemporal responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 133, nro 2, 2013, s. 842–857. DOI: 10.1121/1.4770260.
- [53] Pätynen, J., Tervo, S. ja Lokki, T. Amplitude Panning Decreases Spectral Brightness with Concert Hall Auralizations. Teoksessa: *Audio Engineering Society Conference: 55th International Conference: Spatial Audio*, P-13. Audio Engineering Society, Helsinki, Suomi, 27.–29.8.2014.
- [54] Rogalski, A. *Infrared detectors*. CRC press, Boca Raton, FL, Yhdysvallat, 2010. ISBN 978-1-4200-7671-4.
- [55] Rumsey, F., Zieliński, S., Kassier, R. ja Bech, S. On the relative importance of spatial and timbral fidelities in judgments of degraded multichannel audio quality. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 118, nro 2, 2005, s. 968–976. DOI: 10.1121/1.1945368.
- [56] Schroeder, M. R., Gottlob, D. ja Siebrasse, K. F. Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 56, nro 4, 1974, s. 1195–1201. DOI: 10.1121/1.1903408.

- [57] Shi, J. ja Tomasi, C. Good features to track. Teoksessa: *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE, 21.–23.6.1994. ISSN 1063-6919, s. 593–600. DOI: 10.1109/CVPR.1994.323794.
- [58] Sloboda, J. A. Music structure and emotional response. *Psychology of music*, osa 19, nro 2, 1991, s. 110–120. DOI: 10.1177/0305735691192002.
- [59] Soulodre, G. A. ja Bradley, J. S. Subjective evaluation of new room acoustic measures. *The Journal of the Acoustical Society of America*, osa 98, nro 1, 1995, s. 294–301. DOI: 10.1121/1.413735.
- [60] Steketee, J. Spectral emissivity of skin and pericardium. *Physics in medicine and biology*, osa 18, nro 5, 1973, s. 686. DOI: 10.1088/0031-9155/18/5/307.
- [61] Sutherland, C. *A basic guide to Psychomorph*. University of York, Psykologian osasto, 2015.
- [62] Tervo, S., Pätynen, J., Kuusinen, A. ja Lokki, T. Spatial decomposition method for room impulse responses. *Journal of the Audio Engineering Society*, osa 61, nro 1/2, 2013, s. 17–28.
- [63] Tervo, S., Pätynen, J. ja Lokki, T. Spatio-temporal energy measurements in renowned concert halls with a loudspeaker orchestra. *Proceedings of Meetings on Acoustics*, osa 19, nro 1, 2013, 015019. DOI: 10.1121/1.4799424.
- [64] Tiddeman, B., Burt, M. ja Perrett, D. Prototyping and transforming facial textures for perception research. *IEEE Computer Graphics and Applications*, osa 21, nro 5, 2001, s. 42–50. ISSN 0272-1716. DOI: 10.1109/38.946630.
- [65] Tsiamyrtzis, P., Dowdall, J., Shastri, D., Pavlidis, I. T., Frank, M. G. ja Ekman, P. Imaging facial physiology for the detection of deceit. *International Journal of Computer Vision*, osa 71, nro 2, 2007, s. 197–214. ISSN 1573-1405. DOI: 10.1007/s11263-006-6106-y.
- [66] Vatner, S. F. Effects of hemorrhage on regional blood flow distribution in dogs and primates. *Journal of Clinical Investigation*, osa 54, nro 2, 1974, s. 225–235. ISSN 0021-9738. DOI: 10.1172/JCI107757.
- [67] Vianna, D. M. L. ja Carrive, P. Changes in cutaneous and body temperature during and after conditioned fear to context in the rat. *European Journal of Neuroscience*, osa 21, nro 9, 2005, s. 2505–2512. ISSN 1460-9568. DOI: 10.1111/j.1460-9568.2005.04073.x.

- [68] Vladimir J. Konečni, A. B., Rebekah A. Wanic. Emotional and Aesthetic Antecedents and Consequences of Music-Induced Thrills. *The American Journal of Psychology*, osa 120, nro 4, 2007, s. 619–643. ISSN 00029556.
- [69] Watmough, D., Fowler, P. W. ja Oliver, R. The thermal scanning of a curved isothermal surface: implications for clinical thermography. *Physics in Medicine and Biology*, osa 15, nro 1, 1970, s. 1. DOI: 10.1088/0031-9155/15/1/301.
- [70] Zentner, M., Grandjean, D. ja Scherer, K. R. Emotions evoked by the sound of music: characterization, classification, and measurement. *Emotion*, osa 8, nro 4, 2008, s. 494–521. DOI: 10.1037/1528-3542.8.4.494.

A Ohjeistus koehenkilölle

Alla on koetilanteen ohjeistus muodossa, jossa se esitettiin koehenkilöille.

Tässä kokeessa kuulet neljä ääninäytettä. Tehtävänäsi on kertoa, mikä näytteistä kuulosti mielestäsi parhaalta. Kokeen aikana tehdään mittauksia, joiden takia ylimääräistä liikettä tulisi välttää. Kokeen kesto on noin 15 minuuttia.

In this experiment you will hear four sound samples. Your task is to tell which sample you think sounded the best. There are ongoing measurements during the experiment which requires you to avoid excess movement. The duration of the experiment is about 15 minutes.

B Taulukko mitatuista lämpötiloista

Taulukko B1: 2. asteen polynomilla korjatut lämpötilat kaikille saleille koehenkilöittäin. Lämpötiloista on poistettu koko mittausarjan keskiarvo.

Koehenkilö	Lämpötila (°C)							
	VM		CP		AC		HM	
	ennen	jälkeen	ennen	jälkeen	ennen	jälkeen	ennen	jälkeen
1	-,01	-,04	,06	,05	-,03	,03	,01	-,03
2	,00	-,12	-,06	-,07	,01	,05	-,07	-,06
3	,03	,02	,02	,02	-,01	-,01	,03	,05
4	-,02	-,01	-,02	,00	,00	,02	,04	,03
5	-,02	-,02	,00	,02	,07	-,03	-,02	,00
6	,01	-,04	,02	-,02	,03	,00	,00	-,01
7	,03	,03	,05	,04	-,08	,00	,03	,03
8	,00	,04	,04	,05	,03	-,01	-,09	,01
9	-,07	-,07	,05	,01	-,03	-,01	,02	,04
10	,06	,01	,06	,05	-,03	,02	,04	,01
11	-,01	-,05	,09	,14	-,02	,01	,00	-,03