

KIELEN PITKITTÄISTEN VÄRÄHTELYJEN HAVAITSEMINEN PIANON ÄÄNESSÄ

Heidi-Maria Lehtonen

Aalto-yliopiston sähkötekniikan korkeakoulu
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos
PL 13000, 00076 Aalto
heidi-maria.lehtonen@aalto.fi

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkittiin kuuntelukokeiden avulla, miten havaitsemme kielen pitkittäisiä värähtelyjä pianon äänessä. Aiemmin on arveltu, että nämä värähtelyt ovat kuultavissa erityisesti matalissa, voimakkaissa äänissä, mutta ei ole ollut selvää kuinka korkeissa äänissä ne ovat kuulon kannalta merkittäviä. Tämä tieto on tärkeää kehitettäessä tehokkaita, ihmisen kuulon mukaan optimoituja pianon fysiikkaan perustuvia synteesiaalgoritmeja, joissa kaikki soittimen äänen piirteet mallinnetaan laskennallisesti. Mikäli tiedetään, mitkä piirteet eivät ole merkittäviä, ne voidaan jättää mallintamatta ja säästää arvokasta laskentatehoa muihin toimintoihin.

Kielen pitkittäisillä värähtelyillä tarkoitetaan sekä pitkittäisiä moodeja, jotka syntyvät kielen vapaasta värähtelystä pitkittäissuunnassa, että ns. phantom-ääneksiä, jotka puolestaan aiheutuvat kielen poikittaisliikkeen aiheuttamasta pakkovärähtelystä. Phantom-äänokset ovat suhteellisen uusi ”löytö” pianon äänessä; ensimmäiseksi niistä kirjoittivat Nakamura ja Naganuma vuonna 1993 [1]. Myöhemmin nimensä niille antoi Conklin [2], joka myös raportoi niiden alkuperän [3]. Matemaattisen teorian pitkittäisille värähtelyille esittivät Bank ja Sujbert [4]. He myös esittivät, että pitkittäisiä moodeja ja phantom-ääneksiä voi käsitellä yhtenä kokonaisuutena. Ensimmäinen tieteellinen artikkeli pitkittäisvärähtelyjen havaitsemisesta pianon äänessä julkaistiin hiljattain [5].

Tämä artikkeli pohjautuu viitteessä [5] esitettyyn työhön. Kappaleessa 2 esitetään kuuntelukoemenetelmä sekä testissä käytetyt äänet, ja kappaleessa 3 raportoidaan kuuntelukokeen tulokset. Lopuksi kappaleessa 4 tehdään yhteenveto.

2 KUUNTELUKOKEET

Kuuntelukoe koostui kahdesta osatestistä. Ensimmäisessä osatestissä tutkittiin, miten koehenkilöt havaitsevat eroja sellaisten pianon äänten, joissa on mukana pitkittäiset värähtelykomponentit ja niiden äänten välillä, joista ne on jätetty pois. Tässä osatestissä käytettiin ABX-testimenetelmää [6]. Kokeen toinen osatesti oli preferenssitesti, jossa koehenkilöitä pyydettiin vastaamaan kunkin testiäänän osalta kysymykseen ”ovatko pitkittäisvärähtelyt niin merkittävä osa pianon ääntä, että ne pitäisi ottaa huomioon fysiikkaan perustuvassa pianosyntetisaattorissa?”.

2.1 Testiäänten generointi

Testiäänten generointia varten analysoitiin äänitettyjä pianon ääniä kolmesta soittimesta: Steinwayn flyygelistä, Yamahan pystypianosta ja Yamahan flyygelistä. Kaikki äänet oli soitettu *fortissimo*-dynamiikalla, sillä pitkittäiset värähtelykomponentit ovat merkittäviä juuri suurilla värähtelyamplitudeilla. Analyysin perusteella syntetisoitiin kustakin äänitetystä äänestä $r[n]$ poikittaiset värähtelykomponentit $s_{\text{poik}}[n]$, pitkittäiset värähtelykomponentit $s_{\text{pitk}}[n]$ ja jäännössiinaali $s_{\text{res}}[n]$, joka sisältää alkutransientin ja kaiku-pohjasta aiheutuvan ”kopsahduksen”.

Analyysin aluksi sekä poikittaisten että pitkittäisten värähtelykomponenttien taajuudet etsittiin äänitettyjen äänten spektristä käyttämällä puoliautomaattista algoritmia, joka etsii äänen spektristä piikit. Poikittaisia värähtelykomponentteja vastaavat, eksponentiaalisesti vaimenevat sinikomponentit mallinnettiin toisen asteen suotimilla [7], joiden navat estimoitiin FZ-ARMA-menetelmällä [8]. Poikittaiset värähtelykomponentit $s_{\text{poik}}[n]$ mallinnettiin suotimista saatujen impulssivasteiden avulla.

Mallinnetut poikittaiset värähtelykomponentit vähennettiin alkuperäisestä, äänitetystä äänestä ja pitkittäiset värähtelykomponentit $s_{\text{pitk}}[n]$ mallinnettiin samanlaisella analyysisynteesimenetelmällä kuin poikittaiset värähtelykomponentit. Jäännössiinaali $s_{\text{res}}[n]$ saatiin vähentämällä mallinnetut poikittaiset ja pitkittäiset värähtelykomponentit äänitetystä äänestä. Lopuksi muodostettiin testissä käytetyt ääniparit seuraavasti. Ääni, jossa pitkittäisiä komponentteja ei ole mukana (testiääni) saatiin summaamalla poikittaiset värähtelykomponentit ja jäännössiinaali:

$$y_{\text{testi}}[n] = s_{\text{poik}}[n] + s_{\text{res}}[n]. \quad (1)$$

Ääni, jossa pitkittäiset värähtelykomponentit ovat mukana (referenssiääni) muodostettiin vastaavasti summaamalla poikittaiset ja pitkittäiset värähtelykomponentit sekä jäännössiinaali:

$$y_{\text{ref}}[n] = s_{\text{poik}}[n] + s_{\text{pitk}}[n] + s_{\text{res}}[n]. \quad (2)$$

2.2 Koehenkilöt ja testiympäristö

Kahdeksan normaalikuuloista, iältään 23-35 -vuotiasta koehenkilöä osallistui kuuntelukokeeseen. Kaikilla heillä oli kokemusta jonkin soittimen soitosta useamman vuoden ajalta. Koehenkilöt 5-8 olivat soittaneet pianoa 10-15 vuotta, mutta koehenkilöillä 1-4 ei ollut juurikaan kokemusta pianonsoitosta. Tämän artikkelin kirjoittaja osallistui myös kuuntelukokeeseen (koehenkilö no. 8).

Kuuntelukoe suoritettiin Aalto-yliopiston signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitoksen kuunteluhuoneessa, ja koehenkilöt suorittivat kokeen yksi kerrallaan. Kokeen käyttöliittymä koodattiin Matlab-ohjelmalla ja äänet soitettiin koehenkilöille käyttäen Sennheiser HD580-kuulokkeita. Ennen varsinaisen kokeen alkua koehenkilöt tekivät harjoitustestin, jonka tarkoituksena oli tutustuttaa koehenkilö käyttöliittymään ja testiääniin. He saivat myös säätää äänenvoimakkuuden miellyttäväksi.

2.3 Testimenetelmä

Ennen varsinaista testiä suoritettiin pilottikoe, jonka tarkoituksena oli saada selville, mikä on pitkittäisten värähtelykomponenttien havaitsemisen kannalta kaikkein kiinnostavin perustaaajuusalue. Tähän testiin osallistui viisi koehenkilöä, joista kaksi osallistui myöhemmin varsinaiseen testiin. Pilottitestin tulosten perusteella testiäännet valittiin pianon koskettimiston alueelta $C_3 - F_6^\#$ (MIDI-indeksit 48-78, perustaaajuudet $f_0 = 130.1 - 740$ Hz). Tämä alue jaettiin puolen oktaavin kaistoihin ja näiltä kaistoilta etsittiin testiä varten ne äänet, joiden spektristä löytyi korkeimmat pitkittäiset värähtelykomponentit.

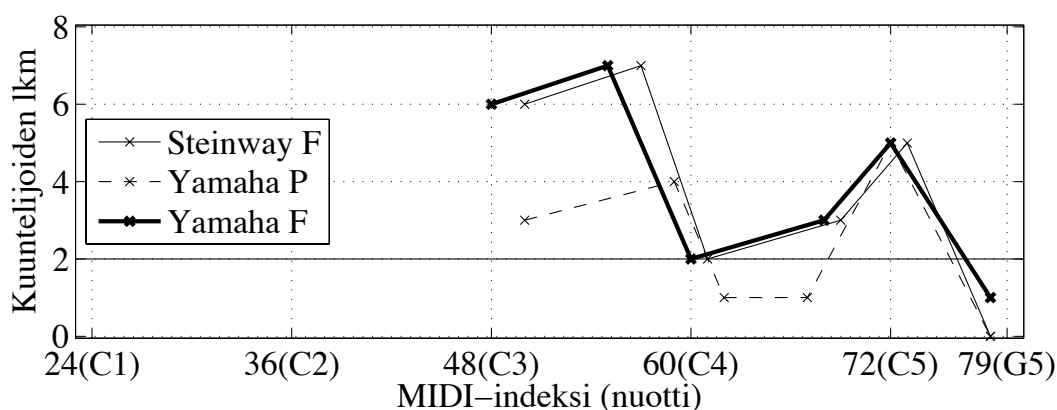
Varsinaisessa testissä, jossa pitkittäisten värähtelykomponenttien havaittavuutta tutkittiin, käytettiin ABX-testimenetelmää [6]. Tässä testissä X oli tuntematon referenssiääni, A oli testiääni ja B oli referenssiääni. Koehenkilö sai kuunnella näitä ääniä niin monta kertaa kuin halusi, ja päätöksen tehtyään hän vastasi kysymykseen ”onko X sama kuin A vai B?”. ABX-testi jaettiin kolmeen osaan, joissa kussakin tutkittiin ääniä kolmesta eri soittimesta. Jokaisesta soittimesta oli mukana kuusi ääniparia. Nämä kuusi testitapausta toistettiin koehenkilölle 16 kertaa, ja niiden järjestys oli satunnainen. Kaksi ensimmäistä osaa testistä suoritettiin yhdessä sessiossa ja kolmas osa sekä preferenssitestit suoritettiin toisessa sessiossa, joka järjestettiin eri päivänä kuin ensimmäinen sessio.

Preferenssitestissä koehenkilöiltä kysyttiin, ovatko erot testi- ja referenssiäänien välillä niin merkittäviä, että ne pitäisi ottaa huomioon kehitettäessä pianosyntetisaattoria. Koehenkilöt pystyivät vastaamaan ainoastaan ”kyllä” tai ”ei”. Tämä testi koostui kolmesta lyhyestä osasta, joissa kaikissa tutkittiin ääniä kustakin kolmesta eri soittimesta. Nyt mukana oli kahdeksan testiääntä jokaisesta soittimesta: ABX-testin äänen lisäksi mukaan otettiin kaksi matalaa ääntä. Nämä matalat äänet jätettiin pois ABX-testistä, koska pilottitestissä kaikki koehenkilöt osasivat erottaa äänet, joissa pitkittäiset värähtelykomponentit olivat mukana niistä äänistä, joissa niitä ei ollut.

3 TULOKSET

3.1 ABX-testin tulokset

ABX-testin tulokset on esitetty kuvassa 1. Pysty akselin arvot kertovat niiden koehenkilöiden lukumäärän, jotka ovat kuulleet eron 12 tapauksessa 16:sta. Tämä perustuu siihen, että mikäli koehenkilö arvaa vastaukset, hän saa 75 % tapauksesta oikein alle 5 % todennäköisyydellä. Tämä raja on yleisesti käytössä ABX-testin tulosten tulokinnassa [6]. Kuten kuvasta nähdään, tulokset ovat samankaltaisia kaikkien kolmen soittimen tapauksessa. Merkittävyyden rajaksi valittiin 25 %, eli kahden koehenkilön kahdeksasta on havaittava ero vähintään 75 % testitapauksista (vaakaviiva kuvassa 2). Yli puolet koehenkilöistä kuuluivat eron testi- ja referenssiäänien välillä aina nuottiin C_4 ($f_0 = 261.6$ Hz) asti; tämän jälkeen käyrässä on nähtävissä kuoppa, jonka jälkeen yli puolet koehenkilöistä kuuluivat eron jälleen nuotin C_5 ympäristössä. Toistaiseksi on epäselvää, mistä tämä kuoppa johtuu, mutta se voidaan todeta, että pitkittäiset värähtelyt havaitaan aina nuottiin C_5 ($f_0 = 523.3$ Hz) asti. Koehenkilökohtaiset tulokset on esitetty viitteessä [5].



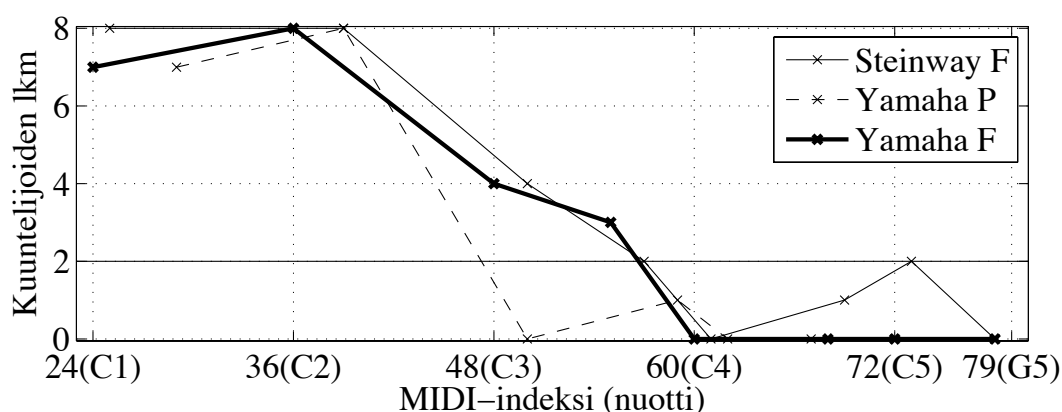
Kuva 1: ABX-testin tulokset Steinwayn flyygelille (ohut yhtenäinen viiva), Yamahan pystypianolle (katkoviiva) ja Yamahan flyygelille (paksu yhtenäinen viiva). Pystyakselin arvot osoittavat niiden koehenkilöiden lukumäärän, jotka havaitsivat eron testi- ja referenssiäänten välillä 75 % tapauksista. Vaakaviiva esittää kynnyksiarvoa, joksi valittiin 25 % (useampi kuin kaksi koehenkilöä kahdeksasta on kuullut eron vähintään 75 % testitapauksista).

3.2 Preferenssitestin tulokset

Kuvassa 2 on esitetty preferenssitestin tulokset. Pystyakselin arvot esittävät niiden koehenkilöiden lukumäärän, jotka ovat olleet sitä mieltä, että ero testi- ja referenssiäänten välillä on niin suuri, että pitkittäiset värähtelykomponentit on otettava huomioon pianosyntetisaattorissa. Kuvasta voidaan nähdä, että pitkittäiset värähtelyt ovat koehenkilöiden mielestä hyvin merkittävä osa pianon ääntä erityisesti kahden matalimman oktaavin alueella kaikkien kolmen soittimen tapauksessa. Mikäli rajaksi otetaan se, että useampi kuin kaksi koehenkilöä kahdeksasta pitää eroa merkittävänä (vaakaviiva kuvassa 2), voidaan todeta, että pitkittäiset värähtelykomponentit pitäisi mallintaa pianosyntetisaattorissa aina nuottiin A_3 ($f_0 = 220$ Hz) asti.

4 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esitetyssä työssä tutkittiin sitä, kuinka korkeissa pianon äänissä ihmiset havaitsevat pitkittäiset värähtelykomponentit. Mukana oli syntetisoituja ääniä kolmesta soittimesta: Steinwayn flyygelistä, Yamahan pystypianosta ja Yamahan flyygelistä. Koehenkilöille soitettiin testiääniä, joissa pitkittäisiä värähtelykomponentteja ei ollut ja referenssiääniä, joissa ne oli mukana. Testimenetelmänä käytettiin ABX-testiä. Tulokset osoittavat, että pitkittäiset värähtelykomponentit havaitaan aina nuottiin C_5 ($f_0 = 523.3$ Hz) asti. Lisäksi koehenkilöt osallistuivat toiseen testiin, jossa kysyttiin onko ero testi- ja referenssiäänten välillä niin suuri, että se pitäisi ottaa huomioon pianosyntetisaattorissa. Tämän testin tulokset osoittavat, että ero on merkittävä nuottiin A_3 ($f_0 = 220$ Hz) asti.



Kuva 2: Preferenssitestin tulokset Steinwayn flyygelille (ohut yhtenäinen viiva), Yamahan pystypianolle (katkoviiva) ja Yamahan flyygelille (paksu yhtenäinen viiva). Pystyakselilla on niiden koehenkilöiden lukumäärä, joiden mielestä ero testi- ja referenssiään-ten välillä on merkittävä. Vaakaviiva esittää kynnyksarvoa, joksi valittiin 25 % (useampi kuin kaksi koehenkilöä kahdeksasta on pitänyt eroa merkittävänä).

4.1 Kiitokset

Artikkelissa esitetty alkuperäinen työ on tehty yhdessä Balázs Bankin kanssa. Heidi-Maria Lehtosen työtä rahoittaa Suomen Akatemia (projekti no. 122815).

VIITTEET

- [1] NAKAMURA I & NAGANUMA D, Characteristics of piano sound spectra, in *Proc. Stockholm Music Acoust. Conf.*, pages 325–330, Stockholm, Sweden, 1993.
- [2] CONKLIN H A, Piano strings and “phantom” partials, *J. Acoust. Soc. Am.*, **102**(1997) 1, 659.
- [3] CONKLIN H A, Generation of partials due to nonlinear mixing in a stringed instrument, *J. Acoust. Soc. Am.*, **105**(1999) 1, 536–545.
- [4] BANK B & SUJBERT L, Generation of longitudinal vibrations in piano strings: From physics to sound synthesis, *J. Acoust. Soc. Am.*, **117**(2005) 4, 2268–2278.
- [5] BANK B & LEHTONEN H M, Perception of longitudinal components in piano string vibrations, *J. Acoust. Soc. Am. Express Lett.*, **128**(2010) 3, EL117–EL123.
- [6] CLARK D, High-resolution subjective testing using a double-blind comparator, *J. Audio Eng. Soc.*, **30**(1982) 5, 330–338.
- [7] BANK B, Perceptually motivated audio equalization using fixed-pole parallel second-order filters, *IEEE Signal Process. Lett.*, **15**(2008), 477–480.
- [8] KARJALAINEN M, ESQUEF P A A, ANTSALO P, MÄKIVIRTA A, & VÄLIMÄKI V, Frequency-zooming ARMA modeling of resonant and reverberant systems, *J. Audio Eng. Soc.*, **50**(2002) 12, 1012–1029.