

# CEMBALON ÄÄNEN ANALYYSI JA SYNTEESI

Vesa Välimäki, Henri Penttinen, Jonte Knif\*, Mikael Laurson\*, Cumhuri Erkut

Teknillinen korkeakoulu  
Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio  
PL 3000, 02015 TKK, Espoo  
vesa.valimaki@hut.fi

\*Sibelius-Akatemia  
Musiikkiteknologian laitos  
PL 86, 00251 Helsinki

## 1 JOHDANTO

Kosketinsoitinten äänen synteesi on erityisen kiinnostavaa, koska tällaiset soittimet ovat kalliita, painavia ja saattavat vaatia äänenvoimakkuuden säätöä, joka ei onnistu luontevasti akustisissa soittimissa. Kosketinsoitinsynteesin ohjaus on helppoa, koska nykyisin on tarjolla runsaasti erilaisia MIDI-koskettimistoja, joista parhaat vastaavat laadultaan oikean pianon tai muun akustisen soittimen tuntua. Toinen vaihtoehto synteesin ohjaukseen ovat erilaiset sekvensseriohjelmat. Tässä artikkelissa keskitymme cembaloon, joka on yksi varhaisista, mutta edelleen aktiivisessa käytössä olevista, kosketinsoittimista. Se on suosittu varsinkin barokkimusiikissa.

Esittelemme cembalon akustiikkaa sekä cembalon äänen synteisiin kehittämämme menetelmän, joka perustuu soitinmallinnukseen. Äänitimme kesäkuussa 2003 cembalon ääniä sekä kaikupohjan impulssivasteita kaiuttomassa huoneessa TKK:lla. Äänitykset tehtiin tällä kertaa musiikkikäyttöön tarkoitettulla mikrofonilla (Schoeps) mittamikrofonin sijasta, koska äänityksen sävyllä on todettu olevan huomattava vaikutus synteesin äänenlaatuun. Tästä äänitetietokannasta voimme ajaa monenlaisia signaalianalyysijä, joista opitaan cembalon äänen piirteitä, ja voimme virittää synteesimallin parametrit sekä irrottaa tarvittavat herätesignaalit.

Käytämme äänisynteisiin samoja menetelmiä kuin aiemmin kitaran [1, 2] ja klavikordin [3, 4] tapauksessa. Värähtelevän kielen ääni tuotetaan aaltojohtomallilla [5, 6], joka voidaan tulkita myös Karplus–Strong-algoritmina [7] tunnetun yksinkertaisen synteesimenetelmän laajennukseksi. Tämä lähestymistapa vaikuttaa soveltuvan hyvin cembalon äänen synteisiin, koska Karplus–Strong-algoritmillä tuotetut äänet kuulostavat monien mielestä lähinnä cembalolta (mutta vain kun näytetaajuus on riittävän suuri, kuten 44,1 kHz). Korkealaatuinen ja luonnonmukainen cembalon äänen synteesi on kuitenkin suuri haaste.

## 2 CEMBALON TOIMINTAPERIAATE JA OMINAISUUKSIA

Cembalo on yksi vanhimpia kosketinsoittimia. Se kehitettiin klavikordin jälkeen ja se on nykyaikaisen pianon ja sen edeltäjän, fortepianon, esi-isä. Noin vuodelta 1440 on säilynyt cembalon mekaniikkaa kuvailevaa kirjallisuutta, ja varhaisimmat säilyneet soittimet ovat 1500-luvun alusta. Cembalo kuuluu äänentuottomekanisminsa puolesta näppäiltäviin kielisoittimiin. Kosketinta painettaessa sen takapää nousee ja nostaa luistia, johon kiinnitetty plektra näppää kieltä. Luistissa on vaimentimena pieni huopapala, joka lepää kielen päällä. Kosketin-

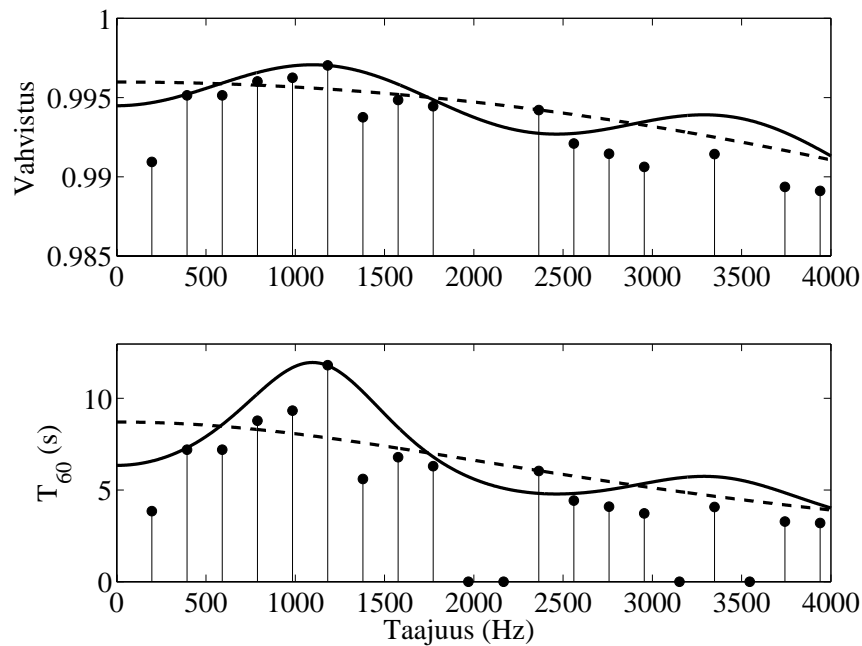
varren takapää on luistin alla. Kun kosketin nostetaan, luisti palaa ala-asentoon ja vaimenninhuopa sammuttaa kielen värähtelyn. Plektra on kiinnitetty pieneen jousikuormitettuun linkkuun, joka päästää plektran palaamaan kielen alle ilman uutta näppäystä. Kielen vaimentaminen ja plektran palauttaminen aiheuttavat vaimean äänen.

Cembalon muoto on ylhäältä katsoen kolmiomainen, kuten flyygeli. Siinä on yksi tai kaksi koskettimistoa, joilla soitetaan 2–4 äänikertaa. Koskettimistojen laajuus vaihtelee eri malleissa 4 ja 5 oktaavin välillä. Kahden äänikerran kielet ovat yleensä samassa vireessä ja niitä kutsutaan 8-jalkaisiksi rekistereiksi. Eri äänikertojen näppäyskoneisto sijaitsee eri kohdassa, mikä vaikuttaa niiden sointiväriin. Kolmas äänikerta on tyypillisesti viritetty oktaavia ylemmäs (4-jalkainen rekisteri). Valintakytkimen avulla koskettimisto saadaan soittamaan samanaikaisesti useita tai vain yhtä äänikertaa. Tällä tavoin soittaja voi muunnella sointiväriä ja äänenvoimakkuutta, joihin koskettimen soittovoimakkuus ei vaikuta kovin paljon.

Tässä tutkimuksessa käyttämämme soitin on Jonte Knifin ja Arno Pellon vuonna 2000 rakentama 240 cm pitkä ja 85 cm leveä cembalo (ks. kuva 1). Rakennusaineena käytetty puu on lämpökäsitelty ikääntymisen nopeuttamiseksi. Soittimessa on 2 koskettimistoa ja 3 äänikertaa ja se muistuttaa Italiassa ja Etelä-Saksassa rakennettuja cembaloja. Äänityksissä käytettiin Vallotti-viritystä, joka on yksi tyypillinen barokkimusiikissa käytetty viritysjärjestelmä. Kahdeksanjalkaisen äänikerran alin ääni on kontraoktaavin G, jonka perustaajuus on 46,4 Hz, ja ylin ääni on kolmiviivainen D, jonka perustaajuus on 1114,8 Hz, kun keski-A (yksiviivainen A) on 415 Hz eli selvästi nykyistä käytäntöä matalampi (vrt. A = 440 Hz). Nelijalkaisen rekisterin alin ja ylin ääni ovat näitä oktaavia korkeammat eli noin 93 ja 2200 Hz.



*Kuva 1. Tutkimuksessa käytetyssä cembalossa on kaksi koskettimistoa, kolme äänikertaa ja kaksi kielisiltaa. Tässä kuvassa soitinta viritetään TKK:n isossa kaiuttomassa huoneessa.*



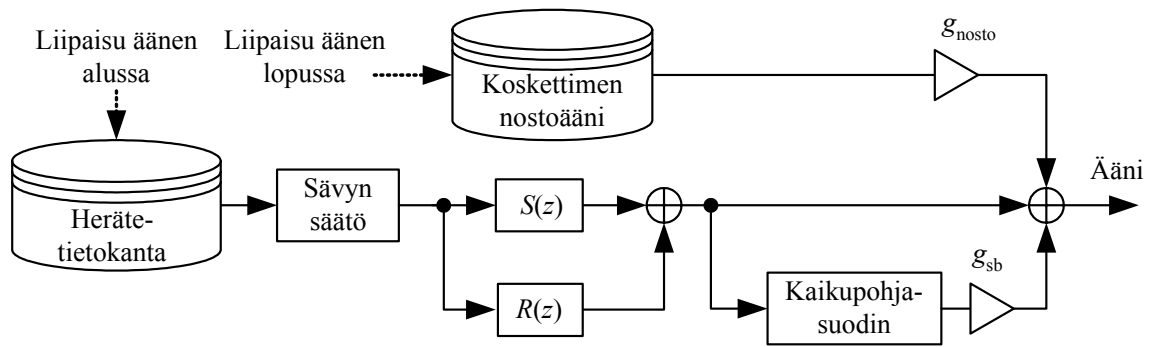
Kuva 2. Pisteet esittävät kielimallin silmukkavahvistusta (ylempi kuva) ja sitä vastaavaa vaimenemisaikaa (alempi kuva) harmonisten komponenttien taajuuksilla. Katkoviivat vastaavat silmukkavahvistusta ja vaimenemisaikaa, kun aiemmin käyttämämme 1. asteen IIR-suotimen amplitudivaste on sovitettu datapisteisiin. Yhtenäiset viivat ovat vastaavasti uudella kampa-IIR-suodinyhdistelmällä saatavat silmukkavahvistus ja vaimenemisaika taajuuden funktiona.

Kielen jäykkyys aiheuttaa sen, että eri taajuuskomponentit etenevät kielessä eri nopeuksilla. Tämä puolestaan aiheuttaa epäharmonisuutta, joka tarkoittaa sitä etteivät kielen harmoniset ole toisiinsa nähden täsmällisissä kokonaislukusuhteissa. Cembaloäänitteistä analysoitiin epäharmonisuuskertoimen  $B$  arvo eri kielille. Bassokielillä  $B$ :n arvo ei ylitä  $10^{-7}$  ja diskanttikielille suurin arvo on noin  $10^{-8}$ . Nämä arvot viittaavat siihen ettei epäharmonisuutta havaita [8], joten cembalon kielet voidaan syntetisoida täysin harmonisina. Se on käytännössä yksinkertaista ja tehokasta.

### 3 ÄNISYNTEESIMENETELMÄ

Olemme kehittäneet aiempien soitinmalliemme pohjalta cembalon äänen synteisiin soveltuvan menetelmän, joka on laskennallisesti kevyt. Mallinnusohjelma perustuu akustisen kitaran [1, 2] ja klavikordin [3, 4] soitinmalleihin.

Kielten värähtelystä aiheutuva ääni tuotetaan fysiikkaan perustuvalla digitaalisella aaltojohtomallilla [5, 6], johon olemme kehittäneet yksinkertaisen lisäyksen. Aiemmin äänen vaimeneminen eri taajuuksilla toteutettiin 1. asteen IIR-suodattimella, mutta nyt sen kanssa sarjassa on myötäkytketty kampsuodin, jolla saadaan vaihtelua vierekkäisten harmonisten vaimenemisnopeuteen. Laskennan määrä lisääntyy tämän muutoksen vuoksi erittäin vähän (vain 1 kerto- ja 1 yhteenlasku sekä viivelinjan luku- ja kirjoitusoperaatio per näyte) eikä muistintarve muutu, koska laskennassa käytetään hyväksi kielimallin viivelinjamuistia. Tämä uusi aaltojohtomalli tuottaa aiempaa luonnollisemmalta kuulostavia synteettisiä ääniä, joiden harmoniset vaimenevat eri nopeuksilla. Esimerkki uudesta suodinsuunnittelusta annetaan kuvassa 2.



Kuva 3. Cembalosyntetisaattorin lohkokkaavio yhden kielen osalta. Samaa rakennetta käytetään kaikkien kolmen äänikerran kielille, mutta parametrien arvot ja tietokantojen sisältö poikkeavat toisistaan.

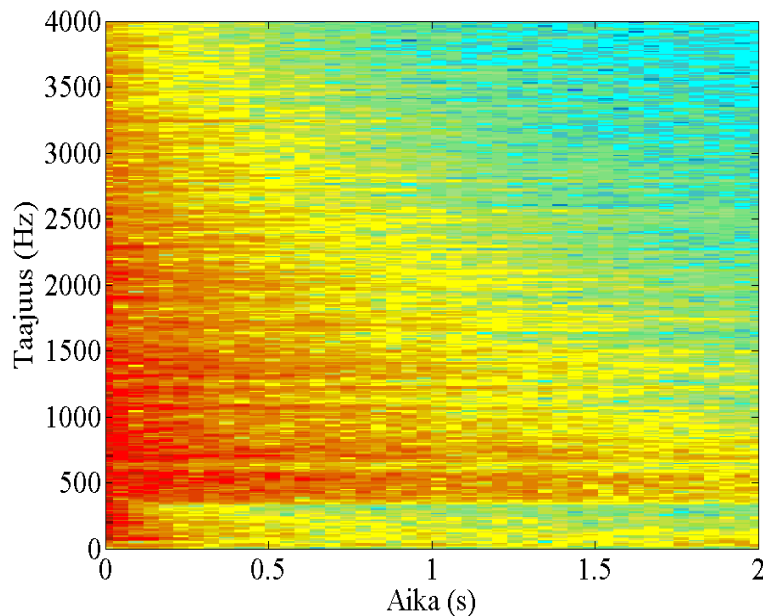
Kuvan 2 esimerkki näyttää kuinka syntetisaattorin tuottamien harmonisten vaimenemisajat viritetään vastaamaan mitattuja. Mustilla pisteillä esitetystä mitatussa datassa on huomattavaa vaihtelua vierekkäisten pisteiden välillä. Toisin sanoen cembalon äänen viereiset harmoniset voivat vaimentua aivan eri nopeudella. Aiemmin käyttämämme 1. asteen suodin ei pysty jäljittelemään tätä ilmiötä, vaan, kuten kuvan 2 katkoviivat näyttävät, matalataajuiset harmoniset vaimenevat hieman hitaammin kuin korkeataajuiset ja viereisten harmonisten väliset erot ovat erittäin pieniä. Uutta suodinta vastaavat ominaisuudet näytetään kuvassa 2 yhtenäisellä viivalla. Se on saatu aiheuttamalla 1. asteen suotimen vasteen ympärille aaltoilua, joka on sovitettu siten, että hitaimmin vaimenevan harmonisen vaimenemisaika (n. 12 s) saadaan toteutettua tarkasti. Samalla alemmat harmoniset vaimenevat alle 10 sekunnissa.

Cembalosyntetisaattorin lohkokkaavio esitetään kuvassa 3 yhdelle kielelle. Kosketinta painettaessa poimitaan herätesignaalitietokannasta oikea heräte, joka syötetään sävynsäätösuotimen kautta kielimalliin  $S(z)$  sekä sen rinnalla olevaan resonaattoriin  $R(z)$ . Kielimalli  $S(z)$  on edellä esitelty uusi rakenne, joka tuottaa värähtelevän kielen ääntä. Resonaattorin keskitaajuus on viritetty lähelle jonkun harmonisen taajuutta siten, että aiheutetaan alkuperäisessä äänessä kuultava huojunta [9, 10]. Näin saatu äänisignaali suodatetaan vielä kaikupohjasuodattimella, josta kerrotaan enemmän kappaleessa 4. Lopullinen ääni on yhdistelmä kielimallin kuivaa ja kaikupohjasuodattimella suodatettua ääntä.

Kun soittaja vapauttaa koskettimen, vaimennin osuu kieleen ja pyrkii sammuttamaan äänen. Cembalossa vaimentimet eivät ole läheskään yhtä tehokkaita kuin esimerkiksi pianossa. Siksi jotkut harmoniset komponentit jäävät soimaan pitkään koskettimen nostamisen jälkeen. Tämä ilmiö voidaan mallintaa uuden aaltojohtomallin avulla säätämällä kampasuotimen myötäkytkentäkerrointa siten, että osa harmonisista vaimenee nopeasti ja osa soi kauemmin. Lisäksi tietokannasta soitetaan lyhyt sample, joka vastaa koskettimen nostoääntä.

#### 4 KAIKUPOHJAN MALLINTAMINEN

Synteettiseen ääneen luodaan kaikupohjan kolahdusta ja suodatusvaikutusta vastaava ilmiö digitaalisella suodattimella. Suodattimella mallinnetaan kaikupohjan ja kaikukopan aiheuttamien moodien suodatusvaikutus, jonka lisäksi mallinnetaan kielisillan takana oleva kieliosuus, 4-jalkaisen äänikerran korkein oktaavi, jossa ei käytetä vaimentimia, sekä kielen korkeat moodit, joita vaimennin ei pysty hiljentämään.



Kuva 4. Aika-taajuuskuvaaja cembalon akustisesta säteilystä, kun kielisiltaa lyödään impulsivivasaralla. Tummat alueet (värikuvassa punaiset) vastaavat suurta tasoa. Huomionarvoista on alle 350 Hz taajuuksien nopea vaimeneminen.

Kuva 4 esittää cembalon akustisen säteilyn vasteen, kun 8-jalkainen talle on herätetty impulsivivasaralla sen keskikohdasta. Kuvasta nähdään kuinka vaimenemisaika alle 350 Hz taajuuksilla on paljon pienempi kuin taajuusalueella 350 – 1000 Hz. Vastaavat  $T_{60}$ -ajat näillä taajuuskaistoilla ovat noin 0,5 s ja 4,5 s. Tämä selittyy sillä, että keski- ja korkeilla taajuuksilla kaikupohjan lisäksi värähtelevät osa kielistä ja kielisillan takana olevat kieliosuudet ja ne vaimenevat hitaammin kuin puu- ja ilmamoodit.

Kuten esimerkiksi viitteissä [11, 9, 12] ehdotetaan, soittimen kaikukopan vaste voidaan mallintaa kaikualgoritmeilla. Tässä työssä kaikupohja mallinnetaan menetelmällä, joka on esitelty viitteessä [13]. Se on muunnos takaisinkytketystä viiveverkosta (engl. feedback delay network) [14]. Kaikualgoritmin kanssa käytetään kaskadissa äänensävysuodatinta vaimentamaan pieniä taajuuksia (alle 350 Hz) ja alipäästösuodattamaan ylimpiä taajuuksia.

Tyypillisesti kaikualgoritmilta halutaan mahdollisimman tasainen amplitudivaste, mutta soittimen kaikupohjaa mallinnettaessa se ei ole tavoiteltavaa. Vasteeseen saadaan sopiva väritymä käyttämällä suhteellisen lyhyitä viivelinjooja. Jotta taajuusriippuva vaimeneminen saadaan mitoitettua oikein, nolla- ja Nyquist-taajuuksien ( $f_s/2$ , kun näytetaajuus on  $f_s$ ) vaimenemisaikojen suhteeksi valitaan 0,065 ja vaimenemisaika ( $T_{60}$ ) 0 Hz taajuudella asetetaan 6 sekunniksi. Äänensävysuodattimena käytetään 4. asteen Butterworth-ylipäästösuodinta, jolla pienet taajuudet leikataan pois. Herätetietokannan näytteet ovat noin 0,45 s pitkiä, joten ne sisältävät kaikki nopeasti vaimenevat moodit alle 350 Hz taajuuksilla eikä niitä siksi tarvitse mallintaa erikseen. Kaikupohjan spektriverhokäyrää jäljitellään 10. asteen IIR-suotimella, joka suunnitellaan lineaariennustuksen avulla.

## KIITOKSET

Henri Penttinen tekee väitöskirjatyötään opetusministeriön ja Suomen Akatemian rahoittamassa Pythagoras-tutkijakoulussa. Cumhur Erkut työskentelee ALMA-nimisessä EU-hankkeessa (Algorithms for the Modelling of Acoustic Interactions, IST-2001-33059).

## LÄHTEET

1. LAURSON M, ERKUT C, VÄLIMÄKI V & KUUSKANKARE M, Methods for modeling realistic playing in acoustic guitar synthesis. *Computer Music J* **25**(2001)3, 38–49. <http://lib.hut.fi/Diss/2002/isbn9512261901/>.
2. LAURSON M, VÄLIMÄKI V & KUUSKANKARE M, Kitaramusiikin korkealaatuinen synteesi. *Akustiikkapäivät 2001*, 8.–9.10.2001, Espoo, 17–22. <http://www.acoustics.hut.fi/asf/publicat/akup01/akup01artikkelit.html>.
3. VÄLIMÄKI V, LAURSON M & ERKUT C, Commuted waveguide synthesis of the clavichord. *Computer Music J* **27**(2003)1, 71–82. <http://mitpress.mit.edu/CMJ> (näyteartikkeli, valitse kohta 'Sample Articles').
4. VÄLIMÄKI V & LAURSON M, Klavikordin äänen synteesi. *Akustiikkapäivät 2001*, 8.–9.10.2001, Espoo, 23–28. <http://www.acoustics.hut.fi/asf/publicat/akup01/akup01artikkelit.html>.
5. SMITH J O, Physical modeling using digital waveguides. *Computer Music J* **16**(1992)4, 74–91. <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/pmudw/>.
6. KARJALAINEN M, VÄLIMÄKI V & TOLONEN T, Plucked-string models: from the Karplus–Strong algorithm to digital waveguides and beyond. *Computer Music J*, **22**(1998)3, 17–32. <http://www.acoustics.hut.fi/publications/>.
7. KARPLUS K & STRONG A, Digital synthesis of plucked-string and drum timbres. *Computer Music J* **7**(1983)2, 43–55.
8. JÄRVELÄINEN H, VÄLIMÄKI V & KARJALAINEN M, Audibility of the timbral effects of inharmonicity in stringed instrument tones. *Acoustics Research Letters Online* **2**(2001)3, 79–84. <http://ojps.aip.org/ARLO/>.
9. BANK B, *Physics-Based Sound Synthesis of the Piano*. Raportti 54, TKK, akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Espoo, 2000. <http://www.acoustics.hut.fi/publications>.
10. BANK B, VÄLIMÄKI V, SUJBERT L & KARJALAINEN M, Efficient physics-based sound synthesis of the piano using DSP methods. *Proc European Signal Processing Conf (EUSIPCO 2000)*, 5.–8.9.2000, Tampere, vol. 4, 2225–2228.
11. ROCCHESSE D, Multiple feedback delay networks for sound processing. *Proc X Colloquio di Informatica Musicale*, 1993, Milano, Italia, 202–209.
12. PENTTINEN H, KARJALAINEN M, PAATERO T & JÄRVELÄINEN H, New techniques to model reverberant instrument body responses. *Proc International Computer Music Conf*, 18.–22.9.2001, Havana, Kuuba, 182–185.
13. VÄÄNÄNEN R, VÄLIMÄKI V, HUOPANIEMI J & KARJALAINEN M, Efficient and parametric reverberator for room acoustics modeling. *Proc International Computer Music Conf*, 25.–30.9.1997, Thessaloniki, Kreikka, 200–203.
14. JOT J M & CHAIGNE A, Digital delay networks for designing artificial reverberators. *AES 90th Convention*, 19.–22.2.1991, Pariisi, Ranska, Preprint no. 3030.