

# PIANON ÄÄNEN ANALYYSI JA SYNTEESI

**Heidi-Maria Lehtonen, Jukka Rauhala, Vesa Välimäki**

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

## 1 JOHDANTO

Piano on yksi yleisimmistä soittimista, joita on käytetty länsimaisessa musiikissa parin viime vuosisadan aikana. Tämä erittäin monipuolinen ja monimutkainenkin soitin on säilyttänyt paikkansa myös tavallisen kansan kodeissa. Nämä seikat tekevät pianon mallintamisesta erityisen kiinnostavaa ja haastavaa. Tarve laadukkaan parametriseen soitinmallin kehittämiseksi on selvä, vaikka erittäin korkeatasoisia sampleripianoja on nykyään saatavilla. Tämä johtuu siitä, että sampleritekniikkaan perustuvat soitinkoneistot eivät ole sopivia kaikkiin sovelluskohteisiin. Esimerkiksi mobiiliin viestintään liittyvien sovellusten toteuttamisen ehdoton edellytys on sekä muistin että laskentakapasiteetin tarpeen vähentäminen.

Modernin pianon juuret löytyvät vuodelta 1709, jolloin Bartolomeo Christofori modifioi pianon edeltäjää, cembaloa, vaihtamalla kieliä näpäneet plektrat vasaroihin. Uudella soittimella pystyttiin tämän muunnoksen seurauksena soittamaan eri voimakkuuksilla. Christofori kutsuikin uutta soitinta nimellä ”gravicembalo col piano et forte”, mikä on suomeksi ”suuri cembalo hiljaisella ja voimakkaalla”. Kolmen vuosisadan kuluessa soitin on kehittynyt kahdeksi erilliseksi instrumentiksi, flyygeliksi ja pystypianoksi.

Tässä artikkelissa tarkastelemme ensin pianon rakennetta, äänentuottomekanismia ja akustisia ominaisuuksia. Pohdimme myös, mitä eroa on pystypianolla ja flyygelillä. Tämän jälkeen käymme läpi soittimen äänelle ominaisia piirteitä, joista voidaan saada tietoa signaalianalyysien avulla. Esittelemme myös pianon digitaaliseen aaltojohtosynteesiin [1] kehittämiämme suodinsuunnittelutekniikoita, joiden avulla pystytään tehokkaasti mallintamaan häviöitä pianon äänessä.

## 2 PIANON RAKENNE

Pianon rakenne voidaan jakaa viiteen pääosaan: koskettimistoon, koneistoon, kieliin, kaikupohjaan ja runkoon [2]. Koskettimisto koostuu 88 koskettimesta, joista 52 on valkoisia ja 36 mustia. Kun soittaja painaa koskettimen alas, kielen päällä lepäävä vaimennin nousee ylös ja koneisto liikuttaa vasaraa kohti kosketinta vastaavaa kieliryhmää. Vasaran osuessa kieliryhmään kielet alkavat värähdellä, ja vasaran kineettinen energia siirtyy kielten moodeihin. Kielistä energia välittyy tallan kautta kaikupohjaan, joka vahvistaa ja värittää kuulemaamme ääntä.

### 2.1 Kielet

Kieliä on usein kutsuttu pianon sydämeksi. Konserttilyygelissä on yleensä 243 teräskieltä, mutta kielten määrä voi vaihdella soittimesta riippuen. Alimpia koskettimia vastaa yksi kieli, kun ylemmäksi mentäessä koskettimia vastaavat kahden tai kolmen kielen ryhmät. Tällä

ratkaisulla saadaan lisää ilmaisuvoimaa ylemmille koskettimille. Massiiviset ja pitkät (jopa 2 m) alimmat kielet on päällystetty yhdellä tai kahdella kerroksella metallia, jotta kielistä saataisiin taipuisimmat. Vastaavan kokoisten, päällystämättömien kielten synnyttämä ääni on erittäin epäharmoninen [2], mikä koetaan yleensä epämiellyttävänä piirteenä pianon äänessä. Ohuemat ja lyhyemmät diskanttikielet ovat päällystämättömiä.

## 2.2 Kaikupohja, runko ja pedaalit

Kaikupohja on pianon tärkein ääntä säteilevä osa, johon kielten energiaa johtuu tallan kautta. Moderneissa pianoissa on yleensä kaksi tallaa, yksi bassokieliä varten ja toinen keskiääniä ja diskanttia varten. Tallat on yleensä valmistettu kovasta puusta häviöiden minimoimiseksi ja toisaalta kestävämpään paremmin kielistä aiheutuvaan suureen jännitykseen (jopa 1000 N kieltä kohti!). Suuresta jännityksestä johtuen pianon runko valmistetaan valuraudasta. Lisäksi valurautaisen kehyksen ansiosta viritysmahdollisuudet ovat paremmat, sillä yksittäisen kielen jännitys ei riipu niin voimakkaasti viereisten kielten jännityksistä.

Moderneissa pianoissa on joko kaksi tai kolme pedaalia. Oikean puoleinen pedaalit on aina kaikupedaali, joka alas painettuna nostaa kaikkien kielten vaimentimet ylös. Kun kosketin painetaan pohjaan, energiaa pääsee siirtymään muihin kieliin sekä tallan että sympaattisen resonanssin välityksellä. Tämä saa aikaan paitsi äänen soimisen koskettimen ylösnoston jälkeen, myös lisääntyneitä huojuntaa äänessä, kun myös muut kielet saavat värähdellä vapaasti. Muut pedaalit liittyvät yleensä äänen vaimentamiseen; erityisesti vasemman puoleinen *una corda* – pedaalit vaimentaa ääntä siirtämällä koskettimistoa oikealle siten, että vasara osuu koko kieliryhmän sijasta vain yhteen tai kahteen kieleen.[2]

## 2.3 Pystypianon ja flyygelin erot

Pystypiano ja flyygeli ovat kaksi eri soitinta. Kuitenkin se, miten niiden äänet eroavat toisistaan, on hankala kysymys. Tiettyjä eroja voidaan kuitenkin löytää. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että pystypianojen ääni on epäharmonisempi kuin flyygeleiden johtuen pystypianojen lyhyemmistä ja löysemmistä kielistä. Toisin kuin flyygelissä, pystypianossa vasarat ja vaimentimet liikkuvat horisontaalisesti, ja koneisto on erilainen mm. siten, että erittäin nopeat toistot koskettimien painalluksissa eivät ole mahdollisia. Lisäksi pystypianon kaikupohja on suorakulmainen, kun flyygelissä se on pyöreän epäsäännöllinen. Myös se, että pystypianossa kaikupohja on pystyssä toisin kuin flyygelissä, vaikuttaa äänen säteilyyn sekä siihen, miten ihminen äänen aistii [3].

# 3 PIANON ÄÄNELLE OMINAISIA PIIRTEITÄ

## 3.1 Häviöt ja äänen vaimeneminen

Koska suurin osa vasaran välittämästä energiasta säilyy kielen normaalimoodeissa, äänen vaimenemisnopeus riippuu siitä, kuinka nopeasti värähtelyenergia siirtyy kaikupohjaan. Häviöitä aiheutuu myös mm. sympaattisen resonanssin johdosta sekä ilmanvastuksesta. Vaimeneminen on kaksivaiheista: alussa ääni vaimentuu nopeasti, mutta muutaman millisekunnin kuluttua vaimeneminen hidastuu. Jälkiään eli hitaan vaimenemisen osuus riippuu siitä, kuinka paljon kieliryhmän kielten perustaaajuus poikkeaa toisistaan [4]. Myös värähtelyn suunta vaikuttaa vaimenemiseen, sillä tiedetään, että kaikupohjaa kohtisuorassa oleva värähtely vaimenee nopeasti, kun taas kaikupohjan suuntainen värähtely vaimenee hitaasti [4].

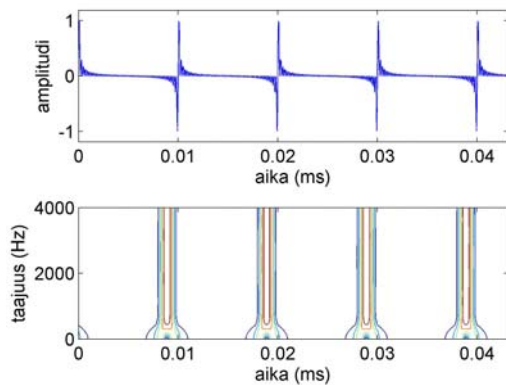
Lisäksi pianon äänestä voidaan huomata, että osäänesten vaimenemisajat vaihtelevat. Jopa vierekkäisten osäänesten vaimenemisajat voivat vaihdella voimakkaastikin. Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin sanoa, että korkeammat osäännekset vaimenevat nopeammin kuin matalammat. Vaimenemisajat voidaan mitata äänitteistä, ja tulosten avulla saadaan tietoa synteettisiä ääniä varten. Mittaaminen kuitenkin edellyttää, että osäännekset voidaan erotella luotettavasti. Erottelua vaikeuttaa se, että ne eivät ole täsmälleen perustaaajuuden monikertoja. Osäänesten taajuuksien selvittäminen edellyttää epäharmonisuuskertoimen mittaamista.

### 3.2 Dispersio

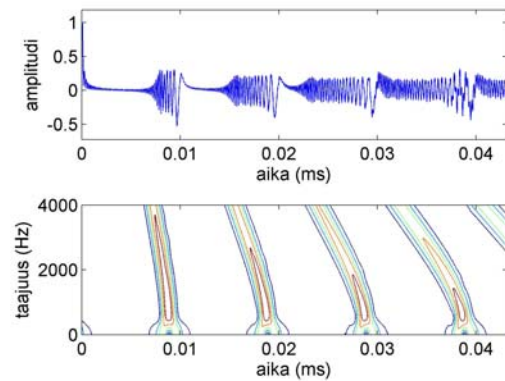
Pianon kielten jäykkyys ja kiinnitykset estävät kielten vapaan värähtelyn. Tällöin korkeammat taajuudet kulkevat kielessä nopeammin kuin matalat, eli syntynyt ääni on dispersiivinen. Spekttrissä tämä näkyy ylempien osäänesten taajuuksien nousemisena siten, että harmonisen  $k$  taajuus  $f_k$  voidaan laskea kaavasta

$$f_k = kf_0 \sqrt{1 + kB^2}, \quad (1)$$

missä  $B$  on epäharmonisuuskertoimen ja  $f_0$  on äänen nimellisperustaaajuus [5]. Pianon äänessä dispersio voidaan havaita erityisesti matalilla koskettimilla sointivärin muutoksena [6]; dispersio tekee äänestä ”muhkeamman” kuuloisin. Yleisesti ollaan sitä mieltä, että kielten täytyy olla dispersiivisiä, jotta piano kuulostaisi ”oikealta pianolta”, mutta liian voimakas epäharmonisuus koetaan epämiellyttävänä piirteenä pianon äänessä. Kuvassa 1 on havainnollistettu dispersioilmiötä synteettisen äänen spektrogrammin avulla: (a)-kohdan tapauksessa kyseessä on harmoninen ääni ja (b)-kohdan tapauksessa epäharmoninen ääni.



Kuva 1(a). Harmonisen äänen aaltomuoto ja spektrogrammi. Äänen perustaaajuus on 100 Hz; ääni sisältää 49 osäänestä [7].

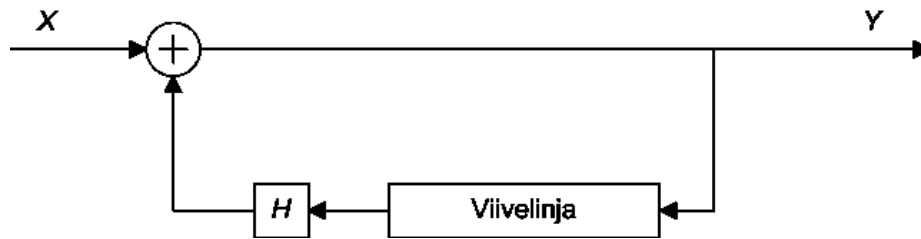


Kuva 1(b). Epäharmonisen äänen (epäharmonisuuskertoimen  $B = 10^{-4}$ ) aaltomuoto ja spektrogrammi. Äänen perustaaajuus on 100 Hz; ääni sisältää 49 osäänestä [7].

### 3.3 Huojunta

Kolmas tärkeä pianon äänelle ominainen piirre on huojunta. Huojunta johtuu pääasiassa kieliryhmän kielten toisistaan hieman poikkeavista perustaaajuuksista. Kun vasara herättää kieliryhmän värähtelemään, kielet alkavat värähdellä samassa vaiheessa. Koska kielet ovat kuitenkin eri vireessä, huojuntaa kuuluu selvästi jo muutaman millisekunnin päästä. Lisäksi kieliä ei voida tarkastella kutakin omana systeeminään, vaan ne ovat voimakkaasti

kytköksissä toisiinsa sekä sympaattisen resonanssin että tallan kautta välittyvän energian siirtymisen kautta. Tuloksena on näin hyvin monimutkainen värähtelevä systeemi, jonka kaikkia ominaisuuksia ei varmasti vielä edes kunnolla tunneta.



Kuva 2. Kielimallin lohkokkaavio.  $X$  on herätesignaali,  $Y$  lähtösignaali ja  $H$  häviösuodin.

#### 4 PIANON ÄÄNEN SYNTEESI DIGITAALISELLA AALTOJOHTOTEKNIKALLA

Digitaalinen aaltojohtosynteesi perustuu aaltoyhtälön kulkuaaltoratkaisuun [8]. Ratkaisu voidaan kirjoittaa kahden pianon kielessä etenevän aallon superpositiona ja diskretoida näytteistämällä aallot tietyin väliajoin sekä ajan että paikan suhteen. Kun yksi aikayksikkö vastaa yhtä paikkayksikköä ja molemmat aallot etenevät koko kielen läpi, systeemiä voidaan simuloida takaisinkytkentäsilmutkkaan sijoitetun viivelinjan avulla. Näin saadaan aikaan periodinen signaali, jonka perustaajuus riippuu viivelinjan pituudesta. Ottamalla kielen häviöt huomioon voidaan takaisinkytkentäsilmutkkaan lisätä erityinen häviösuodin, joka ottaa huomioon osäänesten vaimenemisen eri nopeuksilla. Kuva 2 havainnollistaa kielimallin rakennetta.

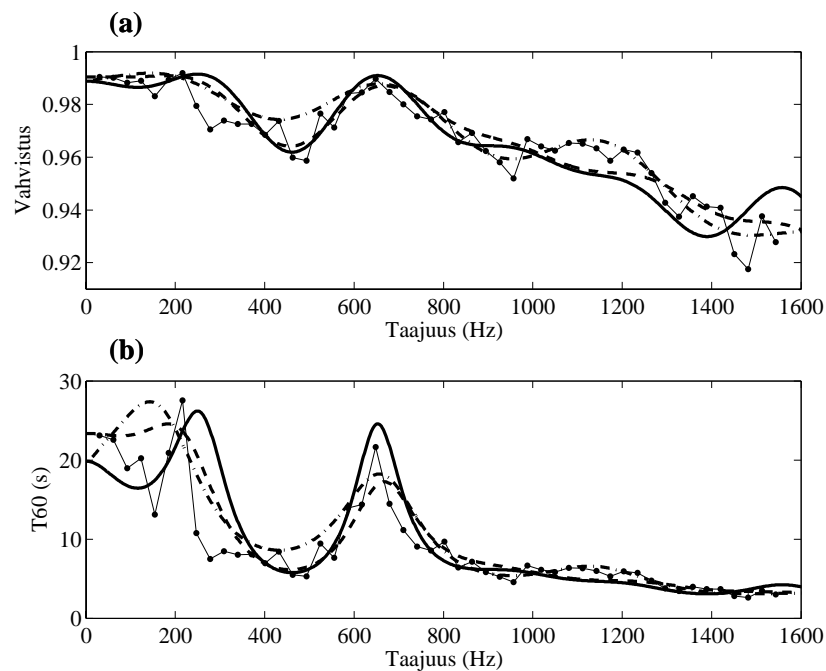
##### 4.1 Häviöiden mallintaminen

Pianon kielen häviöitä aiheuttavat tekijät voidaan mallintaa ns. häviösuotimella, joka säätää eri osäänesten vaimenemisnopeudet synteettisessä äänessä. Periaatteessa karkea yksinkertaistus voitaisiin tehdä sovittamalla matala-asteinen alipäästösuodin kielimalliin, mikä aiheuttaisi korkeiden osäänesten vaimenemisen nopeammin kuin matalien. Tämä ei kuitenkaan riitä, mikäli halutaan realistisen kuuloinen lopputulos. Erityisesti matalien äänten tapauksessa tämä on tärkeää, sillä osääneksiä on äänessä kymmeniä, joiden epätasainen vaimeneminen on selvästi kuultavissa.

Äänitteestä mitatun harmonista  $k$  vastaavan vaimenemisajan  $\tau_k$  ja suotimen vastaavan vahvistuksen  $g_k$  välillä on suhde

$$g_k = e^{-\frac{1}{f_0 \tau_k}}. \quad (2)$$

Kun suotimen haluttu vahvistus on tiedossa, voidaan etsiä suodinkertoimet, jotka toteuttavat mahdollisimman hyvin annetun spesifikaation. Suotimen vaihevasteen tulisi lisäksi olla lineaarinen, jotta harmonisten taajuuudet eivät siirtyisi. Kertoimien löytäminen ei kuitenkaan ole triviaali ongelma, sillä toivottu magnitudivaste on yleensä monimutkainen ja kattaa vain pienen osan audiokaistasta. Lisäksi suotimen asteluku on minimoitava laskentakapasiteetin säästämiseksi. Yleensä mallintamisessa pyritään kuulon kannalta olennaisiin ratkaisuihin, ja häviösuodinsuunnittelussa tärkeinä seikkoina yleisesti pidetään pisimpään soivien osäänesten mallintamista tarkasti [9].



Kuva 3. (a) Suotimen haluttu vahvistus (pisteet) ja kolmen suunnittelutekniikan avulla tuotetut tulokset: [10]:ssä esitetyllä tekniikalla suunniteltu 5. asteen suodin (katkoviiva), [11]:ssa esitetyllä suunnittelutekniikalla tehty 5. asteen suodin (yhtenäinen viiva) ja 201-asteinen perinteisellä suodinsuunnittelutekniikalla suunniteltu suodin (katkopisteviiva). (b) Vastaavat tulokset  $T_{60}$ -alueessa.

Olemme kehittäneet ongelmaan kaksi suunnittelutekniikkaa, jotka yksinkertaistavat annettua amplitudivastetta painottamalla kuulon kannalta tärkeitä seikkoja ja päätyvät matala-asteiseen häviösuotimeen. Ensimmäisessä tekniikassa pyritään ensin valitsemaan tärkeimmät osaaänokset, joiden vaimenemisajat halutaan mallintaa mahdollisimman tarkasti [10]. Tämän jälkeen suodinparametrit voidaan määrittää halutulle suotimen asteluvulle käyttämällä hyväksi taajuussämplästekniikkaa. Toinen suunnittelutekniikka [11] käyttää hyväksi perinteisiä suodinsuunnittelutekniikoita, mutta tekee sovittamisen dataan sellaisella alikaistalla, joka on mallintamisen kannalta kaikkein kiinnostavin. Kun sopiva matala-asteinen suodin on löytynyt, se voidaan ylösnäytteistää suotimen toteutusta varten. Kuva 3(a) esittää tavoitteena olevan magnitudispesifikaation sekä suotimien vastaavat magnitudivasteet ja kuva 3(b) havainnollistaa osaaänösten  $T_{60}$ -aikoja sekä suunnittelemiemme suodinten avulla saavutettavia vastaavia tuloksia. Kuvista voidaan nähdä, että molemmat suunnittelemamme 5. asteen suotimet (yhtenäinen viiva ja katkoviiva) mallintavat hyvin annetun magnitudispesifikaation pääpiirteitä. Käytännössä yhtä hyvin toimii myös 201-asteinen perinteisellä suodinsuunnittelutekniikalla tehty suodin (katkopisteviiva), mutta sen asteluku on 40-kertainen verrattuna kehittämillämme tekniikoilla suunniteltuihin suotimiin.

## 4.2 Muita pianon äänen synteesissä käytettyjä tekniikoita

Laadukkaan synteettisen äänen tuottamiseen tarvitaan lisäksi tapoja mallintaa dispersioita sekä huojuntaa. Edellä mainitun ilmiön tuottamiseen tehokkain tapa on liittää kuvan 2 kielimalliin kokopäästösuodin, katso esim. [12] ja [13], jonka magnitudivaste on vakio, mutta jonka vaiheen kulkuaikeavaste aiheuttaa korkeiden taajuuksien etenemisen nopeammin järjestelmässä. Huojuntaa voidaan puolestaan mallintaa kahden rinnakkaisen kielimallin

avulla, jotka on viritetty hieman eri vireeseen. Bank ym. [14] ovat käyttäneet apuna myös laskennallisesti kevyempiä, kielimallin rinnalle kytkettäviä resonaattoreita, jotka tehokkaasti mallintavat yksittäisten osaaänesten huojuntaa.

Pianon kaikupohjan mallintaminen voidaan tehdä erilaisten kaikulaitteiden avulla, katso esim. [13]. Nämä huoneakustiikassa paljon käytetyt järjestelmät sopivat hyvin myös soittimien mallinnukseen, kunhan saavutetaan riittävä mooditiheys ilman yksittäisten taajuuksien liiallista ja epäluonnollista korostumista. Kaikulaitteiden suunnittelu on kuitenkin sikäli ongelmallista, että parametrien valinta ei ole juurikaan kytköksissä kaikupohjan fysikaalisiin ominaisuuksiin. Työtä tällä alueella tulee varmasti riittämään tulevaisuudessa.

## 5 KIITOKSET

Tämä työ liittyy Suomen Akatemian rahoittamaan projektiin no. 104934.

## LÄHTEET

1. SMITH J O, Physical modeling using digital waveguides. *Computer Music J.* **16**(1992)4, 74-91. <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/pmudw/>.
2. FLETCHER N H ja ROSSING T D, *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, New York, 1991.
3. WOGRAM K ja MORI T, Is a grand piano always better than an upright piano, 146s ASA Meeting, Austin, Texas, 2003. <http://www.acoustics.org/press/146th/Wogram.htm>.
4. WEINREICH G, Coupled piano strings. *J. Acoust. Soc. Am.* **62**(1977)6, 1474-1484.
5. FLETCHER H, BLACKHAM E D ja STRATTON R, Quality of piano tones. *J. Acoust. Soc. Am.* **34**(1962)6, 749-761.
6. JÄRVELÄINEN H, Piirteiden havaitseminen näpättyissä kielisoitinäänissä. *Musiikki* **33**(2003)1, 32-45.
7. RAUHALA J ja VÄLIMÄKI V. Pianon äänen synteesi. *Proc. IX Suomen musiikintutkijoiden symposium*. Jyväskylä, Suomi, 2005.
8. SMITH J O, Techniques for Digital Filter Design and System Identification with Application to the Violin. Väitöskirja, Dept. of Music, Stanford Univ., Stanford, CA, 1983.
9. BANK B ja VÄLIMÄKI V, Robust loss filter design for digital waveguide synthesis. *IEEE Signal Processing Letters.* **10**(2003)1, 18-20.
10. RAUHALA J, LEHTONEN H-M ja VÄLIMÄKI V, Multi-ripple loss filter for waveguide piano synthesis. *Proc. Int Computer Music Conf.* Barcelona, Espanja, 2005.
11. LEHTONEN H-M, RAUHALA J ja VÄLIMÄKI V, Sparse multi-stage loss filter design for waveguide piano synthesis. *Proc. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. New Paltz, New York, Yhdysvallat, 2005.
12. VAN DUYNE, S A ja SMITH J O, A simplified approach to modeling dispersion caused by stiffness in strings and plates. *Proc. Int Computer Music Conf.* Århus, Tanska, 1994.
13. BANK B, Physics-Based Sound Synthesis of the Piano. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Raportti 54, Espoo 2000. <http://home.mit.bme.hu/~bank/thesis/pianomod.pdf>
14. BANK B, VÄLIMÄKI V, SUJBERT L ja KARJALAINEN M, Efficient physics-based sound synthesis of the piano using DSP methods. *Proc. European Signal Processing Conf.* Tampere, Suomi, 2000.