

Húros hangszerek fizikai alapú modellezése a geometriai nemlinearitás figyelembevételével

Doktori értekezés tézisei

Bank Balázs
okl. villamosmérnök

Témavezető:
Sujbert László
Ph.D.



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
2006

© 2006 Bank Balázs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
1117 Budapest, XI. Magyar Tudósok körútja 2.
Honlap: <http://www.mit.bme.hu/~bank>
Email: bank@mit.bme.hu

1. Előzmények, célkitűzések

A fizikai alapú hangszintézis lényege, hogy a leginkább elterjedt, jelmodell alapú eljárásokkal szemben nem a hallható hangot, hanem a hangszer hangkeltő mechanizmusát modellezi. A fizikai alapú hangszintézis három évtizedes múltra tekint vissza, ennek ellenére a módszer ipari alkalmazására csak elszórtan találunk példákat, melynek fő oka a jelmodellekhez képest nagyobb számítási igény. A számítási kapacitás növekedésével és a modellek fejlődésével azonban várható, hogy a fizikai modellek felvehetik a versenyt a piacon egyeduralmú mintavételes (gyakran PCM-nek nevezett) szintézissel, mely felvett minták visszajátszásán alapszik. A mintavételes szintézis hátránya, hogy a hangszer egyes részei közötti kölcsönhatásokat nem képes modellezni (pl. csatolt húrok rezgése), ill. a zenész által előállítható hangok összes változatát tárolni kell. Ezek a problémák elkerülhetők a fizikai modellezés alkalmazásával, ahol a modell egyes blokkjai a hangszer főbb részeinek felelnek meg (húros hangszerek esetében: gerjesztés, húr, hangszerterest). A modell paramétereit fizikailag értelmezhetőek (pl. húr hossza, vonó sebessége), így a virtuális hangszer vezérlése egyszerű, a zenész játéka könnyen figyelembe vehető. A fizikai modellezés további előnye, hogy a tudományos élet számára is hasznos információt nyújthat arról, hogy melyek az igazán lényeges jelenségek a hangkeltés során, ill. hogyan változna a hangszer hangja, ha annak fizikai paramétereit megváltoztatnánk.

A fizikai alapú hangszintézis első lépése a hangszer megismerése, azaz fel kell tární a hangszer főbb egységeit leíró törvényszerűségeket, ill. az egyes részek közötti kapcsolatot. Természetesen a hangszintézishez szükséges tudás nagy része az irodalomból megismerhető, hiszen a hangszerek működésének vizsgálata több évszázados múlttal rendelkezik, ugyanakkor egyes részletek kidolgozásánál ez a vizsgálat nem hagyható el. Az így felépített precíz hangszermodell időtartománybeli és térbeli diszkrétizáció után már alkalmas a hangszer rezgésének számítására, ám a számítási igény gyakran olyan nagy, hogy a valós idejű implementáció nem megoldható. Ezért szükséges olyan hangszintézis-algoritmusok kidolgozása, melyek a hangszer leíró egyenletek egyszerűsítésével a hatékonyságot nagymértékben megnövelik. Természetesen csak olyan jellegű elhanyagolásokkal élhetünk, melyek a hangminőséget csak csekély mértékben befolyásolják. Ehhez szükséges, hogy felismerjük, mely jelenségek fontosak a hangkeltés során.

Dolgozatom tárgyát a húros hangszerek modellezése képezi. Ezen hangszer-család esetében a legfontosabb építőelem maga a húr, hiszen az állítja elő a periodikus rezgést. Az ideális, végtelen hosszú húr transzverzális mozgását leíró differenciálegyenlet egy egydimenziós hullámegyenlet:

$$\mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad (1)$$

ahol y a húr transzverzális kitérése, x a pozíció a húron, t az idő, T a húrfeszültség és μ a húr egységnyi hosszra eső tömege [Morse and Ingard, 1968]. Természetesen a valóságos húron veszteség és diszperzió lép fel, ezeket további tagok hozzáadásával modellezzük. A hullámegyenlet időtartománybeli és térbeli diszkrétizációjával, azaz a deriváltak differenciákkal való helyettesítésével (véges differenciák módszere) a megoldás kiszámítható [Hiller and Ruiz, 1971].

Ennél azonban jóval kisebb számításigényt jelent a húrmodellezés legelterjedtebb módszere, a digitális hullámvezető [Smith, 1992]. Ismeretes, hogy a hullámegyenlet időtartománybeli megoldása két, egymással szemben haladó hullám szuperpozíciója:

$$y(x, t) = y^+(t - x/c) + y^-(t + x/c), \quad (2)$$

ahol y^+ a jobbra, ill. y^- a balra haladó hullám. Ha a két komponens (y^+ és y^-) térben mintavételezett, x szerinti értékeit két vektorban tároljuk, akkor a következő állapot számítása a vektorok tartalmának jobbra ill. balra tolásával könnyedén megtehető. Ez tulajdonképpen két késleltető vonalnak felel meg, mely cirkuláris buffereket alkalmazva különösen hatékony megvalósítást eredményez. A modellben a húr veszteségét és diszperzióját, valamint a húr lezárásainak hatását a késleltető vonalak közé illesztett szűrőkkel modellezzük.

A húrmodellezés harmadik legfontosabb módszere a modális felbontáson alapul, ahol a húr egyes módusainak rezgését számítjuk, a húr pillanatnyi alakját pedig a módusok összegzésével kapjuk:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} y_k(t) \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right), \quad (3)$$

ahol $\sin(k\pi x/L)$ a k -ik módus alakja és L a húr hossza [Morse and Ingard, 1968]. A módusok pillanatnyi amplitúdóját az $y_k(t)$ időfüggvények írják le, melyek tipikusan exponenciálisan lecsengő szinuszos függvények. Diszkrét idejű megvalósítás esetén az $y_k(t)$ függvényeket másodfokú rezonátorokkal számíthatjuk.

A húr rezgési energiáját a gerjesztéstől kapja, mely lehet impulzív (pl. pengetés, kalapácsütés), vagy folyamatos (vonás). Minden esetben jellemző, hogy a húr és a gerjesztés közötti kölcsönhatás kétirányú, azaz a gerjesztő erő a húr aktuális helyzetének függvénye [Fletcher and Rossing, 1998]. A gerjesztés modellezése leggyakrabban a gerjesztést leíró (ált. nulla dimenziós) differenciálegyenlet diszkrétizációját jelenti. Mivel a gerjesztés legtöbb esetben nemlineáris, a diszkrétizáció nem triviális, és akár numerikus instabilitáshoz vezethet.

A húr önmagában igen rossz sugárzó, mert sugárzási impedanciája nagyságrendekkel eltér a levegő impedanciájától. Ezt az impedanciaillesztést hivatott megoldani a hangszer teste, hatékonyabbá téve a hang kisugárzását. A hangszerhang fizikai alapú szintézisének leginkább számításigényes része a hangszertest

hatásának számítása, hiszen itt egy két- vagy háromdimenziós struktúra rezgésének számítása szükséges, szemben a húrral (egy dimenzió) és a gerjesztéssel (nulla dimenzió). Ezért gyakori, hogy a hangszertestet nem precíz fizikai modellel, hanem pl. csak az erő-hangnyomás átviteli függvényével modellezik.

Kutatásom célkitűzéseinek egyik része a már meglévő modellezési struktúrákhoz kapcsolódik. A húrmodellezés legelterjedtebb módszere digitális hullámvezető, ahol a modell által generált felhangok lecsengési idejeit a veszteségi szűrő határozza meg [Smith, 1992]. Célom olyan egyszerű és robusztus szűrőtervezési algoritmusok kidolgozása volt, melyek a lecsengési idők előírttól való eltérését minimalizálják. Másik ilyen terület a meglévő modellek hatékonyságának növelése, hiszen éppen a fizikai modellek nagy számításigénye jelenti elterjedésük legjelentősebb korlátját. Ezen a területen a hurok csatolt rezgése folytán kialakuló lebegés és kétütemű lecsengés (tkp. a felhangok amplitúdójának modulációja), valamint a hangszertest hatásának modellezésére koncentráltam. A nemlineáris gerjesztés modellezése esetében a numerikus instabilitás elkerülésére célom az eddigieknél egyszerűbb algoritmus kifejlesztése volt.

A disszertáció második része a húr nemlineáris jelenségeire koncentrál. A húr nemlineáris tulajdonságai közül a dolgozat a geometriai nemlinearitásokkal foglalkozik, a húr anyagának nemlineáris viselkedését nem vizsgálja. A geometriai nemlinearitás megjelenésének oka, hogy bizonyos rezgési amplitúdó fölött a húr hossza nem tekinthető konstansnak, így a húr feszültség sem, ez pedig a longitudinális polarizáció gerjesztéséhez és új transzverzális komponensek megjelenéséhez vezet. Ezen jelenség vizsgálatára azért van szükség, mert a valódi húros hangszerek esetében megtalálható fantom felhangok [Conklin, 1999] és longitudinális rezgések nem modellezhetők a korábbi húrmodellekkel. Mivel a fantom felhangok keletkezését eddig nem sikerült megmagyarázni, célom volt egy olyan átfogó elmélet kidolgozása, mely segíti mind a jelenség jobb megértését, mind pedig hatékony hangszintézis-algoritmusok alapja lehet. A precíz modell kialakítása után célom volt annak vizsgálata, hogy a lineáris hangszermodellek milyen módon tehetők képessé a jelenség modellezésére, ill. milyen egyszerűsítésekkel élhetünk a hatékony megvalósítás érdekében.

2. Vizsgálati módszerek

Mivel kutatásom fő célja a valóságghú hangszintézis, ezért a módszerek kidolgozása során arra törekedtem, hogy csak az adott hangminőséghez minimálisan szükséges elemek kerüljenek beépítésre. Így például nem foglalkozom azzal, hogy a zongora testének egyes részei hogyan mozognak, ha a hangszintézishez elégséges a test átviteli függvényének ismerete. A zenei akusztika területén leginkább

a hangban megjelenő komponensek frekvenciáira, amplitúdóira, ill. lecsengési idejeire vagyunk kíváncsiak. Ennek megfelelően a paraméterbecslő algoritmusok kidolgozásánál arra törekedtem, hogy a szintetizált hang ezen paraméterei az eredeti hangok megfelelő paramétereikhez közel kerüljenek. Mindenütt célom volt a modellek és a paraméterbecslés egyszerűsítése. Így pl. ha a modell hatékonysága csak kismértékben lett volna növelhető a struktúra vagy a paraméterbecslés nagymértékű bonyolítása árán, akkor azt a megoldást rendszerint elvettem. A felállított modellekre jellemző, hogy jól beilleszthetők a villamosmérnöki területen ismert lineáris rendszerek elméletébe, ill. a digitális jelfeldolgozás problémakörébe.

Digitális szűrőtervezés esetén rendszerint egy átviteli függvényt specifikálunk, majd átvitelének ettől való eltérését minimalizáljuk. Ez a digitális hullámvezető veszteségi szűrőjének tervezésekor nem alkalmazható, mert a lecsengési idők hibája nemlineárisan függ a szűrő amplitúdóhibájától. Így ennek megoldására a szűrőtervezésben is jól ismert súlyozófüggvényes tervezést alkalmaztam. Az általános gyakorlattól eltérően a szükséges speciális súlyozófüggvény az amplitúdó, és nem a frekvencia függvénye. A leggyakrabban alkalmazott legkisebb fokszámú (egypólusú) veszteségi szűrő tervezésekor súlyozott polinomiális regressziót használtam, ami szintén a paraméterbecslés egyik alapmódszerének tekinthető.

A jelfeldolgozás területén gyakori, hogy nagy számításigényű feladatok esetén a multi-rate megközelítés – azaz hogy a rendszer különböző részei különböző mintavételi frekvenciákon üzemelnek – alkalmazásával csökkentjük a számításigényt. Ezt a módszert alkalmaztam a gerjesztésmo­dell numerikus stabilitásának megőrzésére, hiszen itt a stabilitás a gerjesztésmo­dell mintavételi frekvenciájának növelésével megőrizhető, a mintavételi frekvencia növelése azonban a mo­dell többi részénél az erőforrások pazarlását jelentené. A lebegés és kétütemű lecsengés modellezése esetén az a tény, hogy csak néhány, alacsony frekvenciás komponens modellezésére van szükség az alap húrmodell mellett, szintén lehetővé teszi az ezen komponenseket előállító rezonátorok alacsonyabb mintavételi frekvencián történő működtetését. A hangszertest átvitelét modellező digitális szűrő számításigénye szintén csökkenthető, ha az átvitel kisfrekvenciás részét (kb. 2 kHz-ig) modellező nagy fokszámú szűrő alacsonyabb mintavételi frekvencián üzemel. Ez a gyakorlatban azt eredményezi, hogy a magasabb frekvenciákon az approximáció kevésbé pontos, mint a kisfrekvenciás tartományban. Ez azért elfogadható, mert itt az emberi fül is kevésbé érzékeny az egyes rezonanciák pontos helyére és jóságai tényezőire.

A húr nemlineáris rezgését leíró, eddig megalkotott modellek jellemzően a rezgés első (vagy első egy-két) módusát vizsgálják, így nem alkalmazhatók húros hangszerek rezgésének modellezésére. Ezért kutatásom során a húr általános nem-

lineáris hullámegyenletéből indultam ki [Morse and Ingard, 1968], és olyan egyszerűsítéssel éltem, mely lehetővé teszi a lineáris rendszerek területén alkalmazott módszerek (átviteli függvény, konvolúció) alkalmazását. Ez konkrétan azt jelenti, hogy csak azt vizsgálom, hogy hogyan gerjeszti a transzverzális rezgés a longitudinális polarizációt, és a longitudinális rezgés transzverzálisra történő visszahatását elhanyagolom. Ennek eredményeképpen két lineáris parciális differenciálegyenlet jön létre, ahol a második egyenlet bemenete az első egyenlet kimenetének nemlineáris függvénye. A gyakorlat azt mutatja, hogy ez az egyszerűsítés a legtöbb húros hangszer esetén továbbra is jól magyarázza a valós jelenségeket. Mind a transzverzális, mind pedig a longitudinális rezgést modális komponensekre bontottam a (3) egyenletnek megfelelően, így a parciális differenciálegyenletek olyan másodrendű hagyományos differenciálegyenletekké estek szét, melyek az egyes módusok mozgását írják le. Mivel a módusok (egy bemenetű-egy kimenetű rendszerek) impulzusválasza kiszámítható, ezért a módusok rezgése ismert bemenet esetén konvolúcióval megkapható. A húr transzverzális rezgése tehát a lineáris rendszerek elmélete szerint számítható az adott gerjesztés (pl. pengetés) hatására. A longitudinális módusok bemenőjele a transzverzális módusok pillanatnyi amplitúdójából egy egyszerű nemlineáris függvény segítségével kiszámítható. Ha a longitudinális módusok bemenete ismert, azok rezgése is konvolúcióval számítható. A húron fellépő feszültséget egy térben állandó (de időben változó), valamint egy tér- és időfüggő komponensre bontottam. Ennek előnye, hogy a térben állandó komponens hatásának vizsgálata nagy múltra tekint vissza, így azok az eredmények továbbra is használhatók. Emellett a hűrfeszültség felbontása a húr mozgását leíró egyenletek egyszerűsödésével is jár.

A húr nemlineáris rezgésének szintézisére az eddig létező, bevált hűrmodellezési módszerek kombinációját, ill. kiegészítését választottam. Ennek előnye, hogy így egy létező modellarchitektúra könnyen kiegészíthető a nemlineáris jelenségek modellezéséhez szükséges komponensekkel. Mivel a longitudinális hullám terjedési sebessége a transzverzálisénál lényegesen nagyobb, így a hallható tartományba csak néhány (jellemzően tíz körüli) longitudinális felharmonikus esik. Azokban az esetekben, amikor csak néhány módus rezgésének modellezése szükséges, a modális szintézis a leghatékonyabb, így itt is ezt alkalmaztam. Ez jól kapcsolódik a húr geometriai nemlinearitását leíró, általam kidolgozott modellhez, hiszen az is a modális megközelítést alkalmazza. A húr transzverzális rezgésének számításánál a három fő módszer (véges differenciák, digitális hullámvezető, modális szintézis) alkalmazhatóságát is megvizsgáltam a tekintetben, hogy mennyire alkalmasak a longitudinális módusok gerjesztésének számítására. A modell fokozatos egyszerűsítésével több alternatívát adtam a hangsintézis alkalmazások számára, melyek a modellezés pontosságában és számításigényében

térnek el.

3. Új tudományos eredmények

1. tézis. Új módszereket dolgoztam ki a digitális hullámvezető veszteségi szűrőjének lecsengési időn alapuló tervezésére.

1.1. A leggyakrabban használt, egypólusú veszteségi szűrő tervezésére nyújtottam polinomiális regresszió alapuló módszert. A módszer kidolgozása kapcsán levezettem az egypólusú veszteségi szűrőt alkalmazó digitális hullámvezető lecsengési idejét, és közelítő megfeleltetést találtam az egypólusú szűrő és a húr differenciálegyenletének paraméterei között.

1.2. Robusztus, a gyakorlatban jól használható módszert mutattam be magasabb fokszámú veszteségi szűrő tervezésére. A módszer a lecsengési időnek a szűrő amplitúdómenetétől való függését elsőfokú Taylor-sorral közelíti, és az ebből adódó súlyozófüggvény alkalmazásával éri el, hogy a lecsengési idők hibáját minimalizálja.

2. tézis. Hatékony megoldásokat adtam húros hangszerek fizikai modellezésére alkalmas struktúrák implementációjára.

2.1. A gerjesztésmo­dell numerikus stabilitásának megőrzésére új módszert javasoltam, mely szerint a gerjesztés modellje a húrmodellhez képest magasabb (pl. kétszeres) mintavételi frekvencián üzemel.

2.2. Megmutattam, hogy néhány rezonátor párhuzamos működtetése az alap húrmodell (pl. digitális hullámvezető) mellett jól alkalmazható a lebegés és két-ütemű lecsengés modellezésére. A módszer csak azon felhangok lebegését modellezi, ahol ez a jelenség domináns. A rezonátorok alacsonyabb mintavételi frekvencián üzemelnek a húrmodellhez képest, így a jelenség modellezésének számításigénye jelentősen csökken az ismert megoldásokhoz képest.

2.3. Multi-rate megközelítés alkalmazását javasoltam a hangszertest erő-hangnyomás átviteli függvényének modellezésére. A hallható frekvenciatartomány alsó felében egy nagy fokszámú szűrőt alkalmazunk, amely a rendszer mintavételi frekvenciájának nyolcadán vagy negyedén fut, a frekvenciatartomány felső felében pedig egy alacsony fokszámú szűrő közelíti a hangszertest átvitelét. A módszer a számításigényt nagymértékben csökkenti a hagyományos szűrőtervezéshez képest, a minőség kismértékű romlása mellett.

3. tézis. Hangszintézis céljára jól használható, átfogó modellt alkotam fémhúrok rezgéseire, amely figyelembe veszi a transzverzális és longitudinális polarizációk csatolását is.

3.1. A húr nemlineáris viselkedésének olyan osztályozását mutattam be, mely segítségével a húr fizikai paramétereinek, a rezgés amplitúdójának valamint felharmonikus-tartalmának függvényében megbecsülhető, hogy milyen jelenségek dominálnak a rezgés során. Az így készült „térkép” világosan megmutatja az egyes esetek közötti különbségeket és hasonlóságokat.

3.2. Zárt alakban megadtam a húr nemlineáris egyenletének megoldását arra az esetre, amikor a hűrfeszültség térben nem tekinthető konstansnak, de a hűrfeszültség változásának hatása elhanyagolható a transzverzális rezgésre. Ez a hangszerekben leggyakrabban alkalmazott, erősen feszített fémhúrok esetén fennáll. Az így nyert modális modell a longitudinális módusok szabad rezgését és fantom felhangok keletkezését együttesen kezeli.

3.3. A hűrfeszültség térben állandó és változó komponensekre bontásával megadtam a kapcsolatot a modális modell és az irodalomban leggyakrabban alkalmazott, térben állandó hűrfeszültséget feltételező modell között. Megmutattam, hogy ez utóbbi az általam kidolgozott modell speciális esetének tekinthető.

4. tézis. Hatékony eljárásokat dolgoztam ki a fizikai modellezés területén leggyakrabban használt transzverzális hűrmodellek kiegészítésére, így alkalmassá téve őket a longitudinális rezgések modellezésére.

4.1. Kidolgoztam egy olyan összetett hűrmodellt, ahol a longitudinális komponenseket a transzverzális rezgés által nemlineárisan gerjesztett rezonátorok modellezik. A transzverzális rezgés modellezésére mind a véges differenciás, mind pedig a modális modellek alkalmasak. A módszerrel lehetőség nyílik a transzverzális és longitudinális polarizáció kétirányú csatolásának modellezésére is. A javasolt modellek a mindkét polarizációt véges differenciák módszerével számító hűrmodelleknél lényegesen alacsonyabb számításgényűek.

4.2. Megmutattam, hogy a digitális hullámvezető eredeti koncepciójának megfelelően nem alkalmazható a longitudinális polarizáció gerjesztésének számítására, ha a húron a diszperzió jelensége fellép. Megmutattam, hogy a diszperziós szűrő részekre bontásával a probléma – a hatékonyság csökkenése árán – elkerülhető.

4.3. Az előző modelleknél is hatékonyabb, „fizikai információn alapuló” módszereket dolgoztam ki a longitudinális rezgés modellezésére, melyekben a transzverzális hűrmodellt kiegészítő jelmodell paramétereit a húr fizikai modelljéből számítjuk.

4. Az eredmények hasznosíthatósága

Doktori disszertációm eredményei kétféle módon hasznosíthatók. Az első, második és negyedik tézis közvetlenül alkalmazható hangszintézis céljaira. Az első két tézisben javasolt megoldások alkalmazásával a már létező hangszintézis-struktúrák számításigénye csökkenthető, ill. az általuk előállítható hang minősége javítható. A negyedik tézis alkalmazásával lehetőség nyílik az eddigi modellek kiegészítésére, képessé téve őket a nemlineárisan gerjesztett longitudinális polarizáció modellezésére.

Az eredmények másik csoportja a harmadik tézishez kapcsolódik. Ez a tézis a geometriai nemlinearitás elméleti vizsgálatát tartalmazza, így inkább alapkutatás jellegű. Ennek megfelelően a tézis eredményei elsősorban akusztikusok és hangszerkészítők számára lehetnek hasznosak, hiszen a nemlineáris húrrezgés jobb megértését segítik. Az alkalmazott módszertan (modális megközelítés és a hűrfeszültség felbontása) további kutatások kiindulópontja lehet. Ilyen kutatási terület a húr lezárásának hatása és a két transzverzális polarizáció nemlineáris kölcsönhatása.

5. A doktori disszertációhoz kapcsolódó publikációk

5.1. Folyóiratcikkek

- [1] B. Bank and L. Sujbert, „Generation of longitudinal vibrations in piano strings: From physics to sound synthesis,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, pp. 2268–2278, April 2005.
- [2] B. Bank, F. Avanzini, G. Borin, G. De Poli, F. Fontana, and D. Rocchesso, „Physically informed signal-processing methods for piano sound synthesis: a research overview,” *EURASIP J. on Appl. Sign. Proc.*, vol. 2003, pp. 941–952, September 2003.
- [3] B. Bank and V. Välimäki, „Robust loss filter design for digital waveguide synthesis of string tones,” *IEEE Sign. Proc. Letters*, vol. 10, pp. 18–20, January 2003.
- [4] B. Bank, J. Márkus, A. Nagy, and L. Sujbert, „Signal- and physics-based sound synthesis of musical instruments,” *Periodica Polytechnica, Ser. Electrical Engineering*, vol. 47, no. 3–4, pp. 269–295, 2003.

5.2. Nemzetközi konferenciák

- [5] B. Bank and L. Sujbert, „Efficient modeling strategies for the geometric nonlinearities of musical instrument strings,” in *Proc. Forum Acusticum 2005*, (Budapest, Hungary), August 2005.
- [6] B. Bank and L. Sujbert, „A piano model including longitudinal string vibrations,” in *Proc. Conf. on Digital Audio Effects*, (Naples, Italy), pp. 89–94, October 2004.
- [7] B. Bank and L. Sujbert, „Modeling the longitudinal vibration of piano strings,” in *Proc. Stockholm Music Acoust. Conf.*, (Stockholm, Sweden), pp. 143–146, August 2003.
- [8] B. Bank, G. De Poli, and L. Sujbert, „A multi-rate approach to instrument body modeling for real-time sound synthesis applications,” in *Proc. 112th AES Conv., Preprint No. 5526*, (Munich, Germany), May 2002.
- [9] B. Bank, „Accurate and efficient modeling of beating and two-stage decay for string instrument synthesis,” in *Proc. MOSART Workshop on Curr. Res. Dir. in Computer Music*, (Barcelona, Spain), pp. 134–137, November 2001.
- [10] F. Avanzini, B. Bank, G. Borin, G. De Poli, F. Fontana, and D. Rocchesso, „Musical instrument modeling: The case of the piano,” in *Proc. MOSART Workshop on Curr. Res. Dir. in Computer Music*, (Barcelona, Spain), pp. 124–133, November 2001.
- [11] B. Bank, V. Välimäki, L. Sujbert, and M. Karjalainen, „Efficient physics-based sound synthesis of the piano using DSP methods,” in *Proc. 10th Eur. Sign. Proc. Conf.*, (Tampere, Finland), pp. 2225–2228, 2000.
- [12] B. Bank, „Nonlinear interaction in the digital waveguide with the application to piano sound synthesis,” in *Proc. Int. Computer Music Conf.*, (Berlin, Germany), pp. 54–58, 2000.

5.3. Hazai konferenciák

- [13] B. Bank and L. Sujbert, „Longitudinal waves in piano strings: Do we need to model them?,” in *Proc. 10th BUTE Mini-Symposium*, (Budapest, Hungary), pp. 42–43, February 2003.

- [14] B. Bank and L. Sujbert, „A multi-rate approach to piano soundboard modeling,” in *Proc. 9th BUTE Mini-Symposium*, (Budapest, Hungary), pp. 44–45, February 2002.
- [15] B. Bank and L. Sujbert, „Model based synthesis of piano sound,” in *Proc. 8th BUTE Mini-Symposium*, (Budapest, Hungary), pp. 52–53, February 2001.

5.4. Kutatási jelentés

- [16] B. Bank, „Physics-based sound synthesis of the piano,” Master’s thesis, Budapest University of Technology and Economics, Hungary, May 2000. Published as Report 54 of HUT Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, URL: <http://www.mit.bme.hu/~bank/thesis>.

Hivatkozások

- [Conklin, 1999] Conklin, H. A. (1999). Generation of partials due to nonlinear mixing in a stringed instrument. *J. Acoust. Soc. Am.*, 105(1):536–545.
- [Fletcher and Rossing, 1998] Fletcher, N. H. and Rossing, T. D. (1998). *The Physics of Musical Instruments*. Springer-Verlag, New York, USA. 2nd ed. (1st ed. 1991).
- [Hiller and Ruiz, 1971] Hiller, L. and Ruiz, P. (1971). Synthesizing musical sounds by solving the wave equation for vibrating objects: Part 1. *J. Audio Eng. Soc.*, 19(6):462–470.
- [Morse and Ingard, 1968] Morse, P. M. and Ingard, K. U. (1968). *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill.
- [Smith, 1992] Smith, J. O. (1992). Physical modeling using digital waveguides. *Computer Music J.*, 16(4):74–91. URL: <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/wg.html>.