



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Szalontai Péter Zoltán

Fizikai alapú elektronikus ütőhangszer megvalósítása

Diplomaterv

konzulens: dr. Bank Balázs

Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

2012

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott Szalontai Péter Zoltán, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy autentikált felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

.....

Szalontai Péter Zoltán

hallgató

Tartalom

Kivonat.....	4
Abstract.....	5
1. Bevezető.....	6
1.1. A dolgozat felépítéséről.....	8
1.2. A dob fizikájáról.....	9
1.2.1. A membrán.....	9
1.2.2. A dobttest hatása.....	14
1.2.3. A gerjesztés hatásai.....	16
1.2.4. Összefoglalás.....	17
1.3. A hangszintézisről.....	18
1.3.1. Hangminta alapú módszerek.....	18
1.3.2. Absztrakt módszerek.....	19
1.3.3. Fizikai alapú szintézis módszerek.....	22
1.3.4. Összegzés.....	29
2. A dobmodell bemutatása.....	30
2.1. A membrán modellje.....	30
2.2. A gerjesztés modellje.....	37
2.3. A dobttest modellje.....	43
2.4. Membrán-feszültség moduláció.....	46
2.5. A modell kimenetéről.....	50
2.6. Paraméterek.....	51
2.7. Összegzés, a modell értékelése.....	54
3. A modell vezérléséről.....	56
3.1. Ütésdetektálás.....	57
3.2. Az ütés erősségének becslése.....	61
3.3. Az ütés pozíciójának becslése.....	62
3.4. Összegzés.....	66
4. Az implementációról.....	67
4.1. A VST környezetről általában.....	67
4.2. A VST működéséről.....	68
4.3. A dobmodell implementációja a VST környezetben.....	70
4.3.1. A valós idejű működéssel kapcsolatos problémákról.....	70
4.3.2. A paraméterek beállítása, egyéb implementációs kérdések.....	72
5. Összefoglalás, fejlesztési lehetőségek.....	73
6. Függelék.....	74
6.1. A CD-melléklet tartalmáról.....	74

Kivonat

A számítógép az élő fellépések és a stúdiómunka fontos eszközévé vált az amatőr és a profi zenészek körében egyaránt. Zenei szoftvereket széles körben alkalmaznak felvételt készítésre, utómunkára, valamint koncertezés során. A zenei alkalmazások egy csoportját alkotják a virtuális hangszerek, melyeket főképp számítógépes zeneszerzéshez és fellépésekhez használnak.

A virtuális hangszerek gyakran egy létező hangszer hangját szintetizálják. A sokszor méretes, nehezen szállítható és drága hangszerek helyett kényelmes és olcsó megoldás lehet egy olyan virtuális hangszert használni, amely mesterségesen elő tudja állítani a helyettesítendő hangszer hangját. A hangszintézis megvalósítására sok megközelítést alkalmaznak, melyek egyike a fizikai alapú szintézis. A fizikai alapú virtuális hangszerek a hangkeltés fizikai folyamataira alkotott modell segítségével állítják elő a hangot. Ez elviekben a hangszer hangjának lehető legpontosabb közelítését teszi lehetővé. További előnye, hogy paraméterei fizikai jelentéssel bírnak.

A diplomatervezés során egy olyan virtuális ütőhangszer megalkotása volt a célom, melynek motorja egy fizikai alapokon megalkotott dobmodell. A dobmodell vezérlésére egy ütőfelület szolgál, ezen játszik a szoftvert használó zenész. A célom egy gazdagon paraméterezzhető, univerzális hangszer létrehozása volt, amely változatos dobhangok keltésére alkalmas.

A dolgozat bevezetőjében röviden összefoglalom a dobok hangkeltésének fizikáját, majd áttekintést nyújtok a hangszintézis módszerekről. A diplomaterv későbbi fejezeteiben először bemutatom a megvalósított dobmodellt, majd az annak vezérlésére kidolgozott módszerek leírása következik. A dolgozatot a VST környezetben való implementáció bemutatásával zárom.

Abstract

Computers have become important tools of studio work and live performances among both amateur and professional musicians. Musical software are widely used for recording, processing and for live shows as well. A particular type of musical applications are the virtual instruments, which are mainly used during computer aided composing and concerts.

In many cases, virtual instruments synthesise the sound of an existing musical instrument. Instead of using these large, expensive instruments that are often hard to transport, a convenient solution can be to play such virtual instrument that is capable of creating the sound of the original instrument.

Many approach exist for the synthesis of sound. One of them is physical synthesis. Physically based virtual instruments synthesise sound with the use of modelling the physical processes of sound creation. In theory, this approach leads to the most precise imitation of the sound of the original instrument. Another advantage is that its parameters have physical meaning.

The goal of this thesis was to create a virtual instrument that is founded on a physically based drum model. A striking surface serves as the controller of the model, the user plays on this device. My goal was to develop a versatile instrument with rich parameters that is capable of creating diverse drum sounds.

In the introduction of this work a short summary of the physics of sound creation in drums is presented then an overview of sound synthesis methods is given. In later chapters the drum model is proposed first, then the description of the algorithms used for its controlling follows. In the closing chapter the VST implementation of the model is presented.

1. Bevezető

Az elmúlt évtizedekben a PC-k elterjedésével párhuzamosan jelentek meg a szoftverek piacán a zeneszerkesztést, felvételt, keverést, stb. segítő programok. Az asztali számítógép napjainkra a zenészek fontos munkaállomásává vált. A számítási teljesítmény növekedésével egyre bonyolultabb jelfeldolgozási feladatok váltak kivitelezhetővé zenei szoftverek segítségével.

A legnépszerűbb alkalmazások a különböző, korábban hardveres úton megvalósított effektek szoftveres emulációi (torzító, zengető, kompresszor, stb.), valamint a virtuális hangszerek, melyek sok esetben létező, akár elektronikus hangszerek szoftveres utánezatai. A zenész közösség folyamatosan igényli az újabb eszközök fejlesztését, melyek bővíthetik lehetőségeiket, segíthetik kreativitásuk kibontakozását.

Virtuális hangszerek fejlesztésére a legkülönbözőbb szintézismódszereket alkalmaznak, melyek közül kiemelhető a fizikai alapú szintézis, amely egy hangszer hangját a hangképzés fizikai útját modellezve emulálja, így elviekben a legpontosabb szimulációt teszi lehetővé. A fizikai alapú szoftveres hangszerek fejlesztését a korábbiakban jelentősen hátráltatta, hogy a kielégítő minőségű hangot eredményező fizikai modellek számításigénye meghaladta a korabeli számítógépek képességeit. A modellek egyszerűsítésével kapott eredménynél pedig jobb minőséget produkáltak az egyéb szintézismódszerek. Mára ez a korlátozó körülmény kevésbé jelentős, a mai processzorok lehetővé teszik a jó minőségű fizikai modellek megvalósítását.

A nem fizikai alapú szintézismódszerek számos hangszer, hangszercsoport (pl. zongora, elektronikus billentyűs hangszerek) esetében megfelelő hangminőséget produkálnak (jól közelítik az eredeti hangszer hangját), azonban vannak olyan hangszerek, melyek hangjának emulálására nem adnak megfelelő megoldást. Ezekben az esetekben (pl. hegedű) a játékos nagyobb befolyással van a hangképzés dinamikájára, az ilyen fajta hangszerek többféle játékmódot tesznek lehetővé, s ezeket a körülményeket egy fizikai alapú modellben hatékonyabban lehet figyelembe venni. Ebbe a csoportba tartoznak az ütőhangszerek is. Természetesen a játékmód és a dinamika változatosságának figyelembevételéhez megfelelő vezérlést is biztosítani kell a virtuális hangszer számára. Fizikai alapú virtuális ütőhangszerekből kicsi a választék a piacon és különösen igaz ez a kézzel megütött dobokra. A valódi (nem virtuális) ütőhangszerek drágák, hangosak, szállításuk pedig nehézkes. Hasznos lehet tehát egy kisméretű, könnyen hordozható

elektronikus hangszer megalkotása, mely az eredeti hangszerek hangját szintetizálja. A diplomatervezés során ennek az igénynek próbáltam megfelelni.

Olyan eszköz létrehozását tűztem ki célul, amely nem egy konkrét kézi ütőhangszert (pl. dzsembé, konga) szimulál, hanem egy általános fizikai alapú modellel szolgál, melynek hangja sok fizikai paraméterrel befolyásolható, így univerzális ütőhangszerként funkcionál.

A fizikai alapú megközelítés lehetővé teszi, hogy a zenész valós időben változtassa a modell paramétereit, új hangzásokat létrehozva ezáltal. A paraméterek valós fizikai tartalommal rendelkeznek, beszédesek a felhasználók számára, így kezelésük értelemszerű.

A megvalósítani kívánt eszköznek eleme egy ütőfelület is. A dobszintetizátor felhasználója ezen az ütőfelületen játszik. Ennek megfelelően a rendszer részét képezi valamilyen érzékelő eszköz, amelyből a program előállítja a dobmodell vezérlését.

Az elkészült eszköz alkalmas lehet például az otthoni gyakorlás segítésére, ugyanis a szoftver vezérlő elemeként szolgáló ütőfelület önmagában jóval halkabb, mint a piacon kapható ütőhangszerek. A felhasználó ez esetben például fejhallgatón hallgatja saját játékát, azaz a modell kimenetét, így az ütőfelület saját hangja nem vegyül a szintetizált dobhanggal. Az eszköz alkalmazható továbbá stúdiófelvételekhez, valamint élő fellépések során is, amennyiben megoldható, hogy az ütőfelület vezérlését (az érzékelő rendszert) a színpadon lévő többi hangszer hangja ne zavarja meg.

1.1. A dolgozat felépítéséről

A bevezető fejezet további részében először a dob fizikájáról esik szó. Ebben ismertetem a dobhang kialakulásában részt vevő legfontosabb mechanizmusokat.

Ezután egy általános áttekintés következik a hangszintézis módszerekről. Ebben röviden bemutatom a széles körben alkalmazott módszereket, azok előnyeit, illetve hátrányait, valamint bővebb indoklással szolgállok arra nézve, hogy miért a fizikai alapú szintézist választottam. A folytatásban rátérek a fizikai alapú szintézismódszerek bemutatására. A leggyakrabban alkalmazott módszerek rövid leírása mellett bővebben bemutatom a dobmodell megalkotásához választott eljárást, a modális szintézist.

A második fejezetben következik a fizikai alapú dobmodell részletes bemutatása. Ismertetem a cirkuláris membrán mozgásának modális szintézissel történő modellezését, a gerjesztés modelljét, valamint a dobtest hatásának modelljét. Külön alfejezetet szentelek a membránfeszültség nemlinearitásának figyelembevételének. A fejezet végén összegzem a kialakított dobmodell lehetőségeit, korlátait.

A harmadik fejezet a dobmodell bemenetéül szolgáló jelek kinyeréséről szól. Bemutatom, milyen algoritmusok szolgálnak az ütőfelület hangjának elemzésére, ismertetem, hogyan szintetizálom a mikrofonnal vett hangjelből a modell bemenetét. Ez a fejezet három részre tagolódik. Elsőként az ütés, mint trigger-esemény detektálásáról esik szó, majd az ütés pozíciójának megállapításáról írok, végül az ütés erősségének becslésére szolgáló algoritmust mutatom be.

A negyedik fejezet az implementációt mutatja be. Egy általános bevezető szól a VST technológiáról, majd ismertetem az implementáció során felmerülő problémákat és azok megoldásait.

Az utolsó fejezetben összegzem, értékelem a munkámat, valamint kitérek az elkészült program továbbfejlesztési lehetőségeire is.

1.2. A dob fizikájáról

Ebben a fejezetben a dobhang keletkezésében szerepet játszó fizikai folyamatokról esik szó. A diplomatervezés során a célom egy általános modell megalkotása volt, amely gazdagon paraméterezhető, így változatos dobhangok keltésére alkalmas. Mivel nem egy konkrét hangszer fizikáját kellett vizsgálnom, ezért azokkal az alkotóelemekkel, illetve jelenségekkel foglalkoztam, melyek minden membrános ütőhangszerben jelen vannak.

1.2.1. A membrán

A dobhang keletkezésében a legfontosabb szerepet egy felület mentén kifeszített membrán játssza. A tradicionális hangszerekben a membránfelület általában kör, illetve ellipszis alakú, de ritkábban előfordul a téglalap alak is. A membrán anyaga a népi hangszerek esetében hagyományosan valamilyen állatbőr volt, manapság azonban már gyakoribb a szintetikus anyagok használata (pl. Mylar) [1, p. 584].

A membránon terjedő hullámfajták közül (transzverzális, longitudinális, torziós, stb.) számunkra azok az érdekesek, melyek a membránt körülvevő levegőnek nagy hatásfokkal képesek energiát közvetíteni, vagyis amelyek a hanghullámok kisugárzását (ezeket halljuk meg) okozzák. Ezek döntően a transzverzális hullámok, a többi hullámfajta hatása elhanyagolható, így a transzverzális hullámokra kell mozgásegyenletet felírunk [2, p. 194].

Az egyenlet felírásakor a következő közelítésekkel élhetünk. A membránt olyan testnek tekintjük, melyben a membrán tömege és a membránt feszítő erő a membrán síkjában egyenletesen oszlik el. A membránt egy határig rugalmasnak tekintjük. Úgy tekintjük, nem rendelkezik ellenállással a nyíró erőkkel szemben, viszont a hajlító erőkkel szembeni ellenállást figyelembe vesszük. Ezek a közelítések megengedhetőek, ha a membrán kitérés relatív kicsi és a membránt gerjesztő erők nem koncentrálnak kis területre [2, p. 196]. Később ezt a modellt kiegészítem a nagyobb amplitúdójú kitérésnek megfelelő hatás figyelembevételéhez. A dobmodellről szóló fejezetben térek ki a kiegészítés megvalósítására, melynek alapja, hogy a membránfeszültség amplitúdófüggésére írunk fel egyenletet.

A hanghullám energiája csökken a membránban való terjedés során. Ez többféle hatásnak tudható be (ezeket a hangszerek fizikájával foglalkozó szakirodalom nem részletezi kellőképpen), melyek közül a legjelentősebb a környező levegővel való

súrlódás, valamint a belső súrlódás a membrán anyagában a membrán deformációja következtében. A veszteségek meghatározzák a hanghullám elnyelődésének gyorsaságát. A jelenség, azaz a veszteségek hatása frekvenciafüggő.

A fenti megfontolások alapján a membrán mozgásának leírására a következő hullámegyenletet alkalmaztam [3]:

$$D\nabla^4 z(r, \varphi, t) + \sigma \frac{\partial^2 z(r, \varphi, t)}{\partial t^2} - T_0 \nabla^2 z(r, \varphi, t) + d_1 \frac{\partial z(r, \varphi, t)}{\partial t} + d_3 \frac{\partial \nabla^2 z(r, \varphi, t)}{\partial t} = f(r, \varphi, t) \quad (1.1)$$

ahol T_0 a membránfeszültség, σ a membrán tömegsűrűsége. A veszteségeket a d_1 és d_3 együtthatókkal paraméterezett tagok írják le (utóbbi a frekvenciafüggő veszteséget), míg a hajlítási merevséget a negyedrendű tag reprezentálja. Az egyenlet jobb oldala a membránt gerjesztő erő sűrűsége a felület mentén.

A membránban kialakuló hullámok lehetséges alakjára a membrán lezárása és a membrán alakja nagy befolyással bír. A membrán alakja dobok esetén leggyakrabban kör, ritkábban téglalap. A membrán lezárását merevnek tekintjük, azaz a membrán szélein a membrán kitérése nem lehet nullától különböző. Ezt a hullámegyenlet megoldása során az egyenlet peremfeltételeként vesszük figyelembe.

A membrán mozgásának szemléltetésére a mozgást leíró egyenlet modális megoldását célszerű segítségül hívni. Ekkor az egyenlet megoldását (az ismeretlen változót, vagyis a membrán transzverzális kitérését) szorzat alakjában keressük, ahol a szorzat mindegyik tagja kizárólag az egyenlet egy-egy független változójától függ. A szorzatot visszahelyettesítjük, majd az egyenletet úgy alakítjuk, hogy egyik oldalán az időtől, a másikon a helykoordinátáktól függő tag kerüljön. Ekkor a két oldal ugyanazzal a konstanssal kell, hogy egyenlő legyen, hiszen a két oldal más változóktól függ. Ez a változók szétválasztásának módszere a parciális differenciálegyenletek megoldásában, mellyel az időtől függő és a helytől függő tagokra külön közösleges differenciálegyenletet kapunk.

A következőkben ismertetem a módszer alkalmazását a négyzetes, valamint a cirkuláris membrán esetére.

1.2.1.1. Négyzetes membrán

Az egyszerűség kedvéért a veszteségeket, a membrán merevségét és a gerjesztést nem tartalmazó kétdimenziós hullámegyenletből indulunk ki [1, p. 71]:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{T}{\sigma} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (1.2)$$

Amennyiben a membrán kitérését a $z(x,y,t)=X(x)Y(y)\varphi(t)$ alakban keressük, a visszahelyettesítés után a helytől függő tagokra a következő egyenleteket kapjuk:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right) X = 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} + k^2 Y = 0 \quad (1.4)$$

ahol c a hullám sebessége, ω a körfrekvencia, míg k a hullámszám (ezek az egyenletek konstansai).

A fenti differenciálegyenleteknek (melyek egydimenziós hullámegyenletek) megoldásai a következők.

$$X(x) = c_1 * \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \quad (1.5)$$

$$Y(y) = c_2 * \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (1.6)$$

ahol $m,n= 0,1,2,\dots$, c_1 és c_2 konstansok, míg L_x és L_y a téglalap oldalainak hosszai. A fenti egyenletek kielégítik az X -re és Y -ra vonatkozó differenciálegyenleteket. A négyzetes membrán kitérését megadó hullámegyenlet megoldásának helytől függő tagja így:

$$z_{m,n} = \text{const} * \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (1.7)$$

Az időtől függő tag és megoldása:

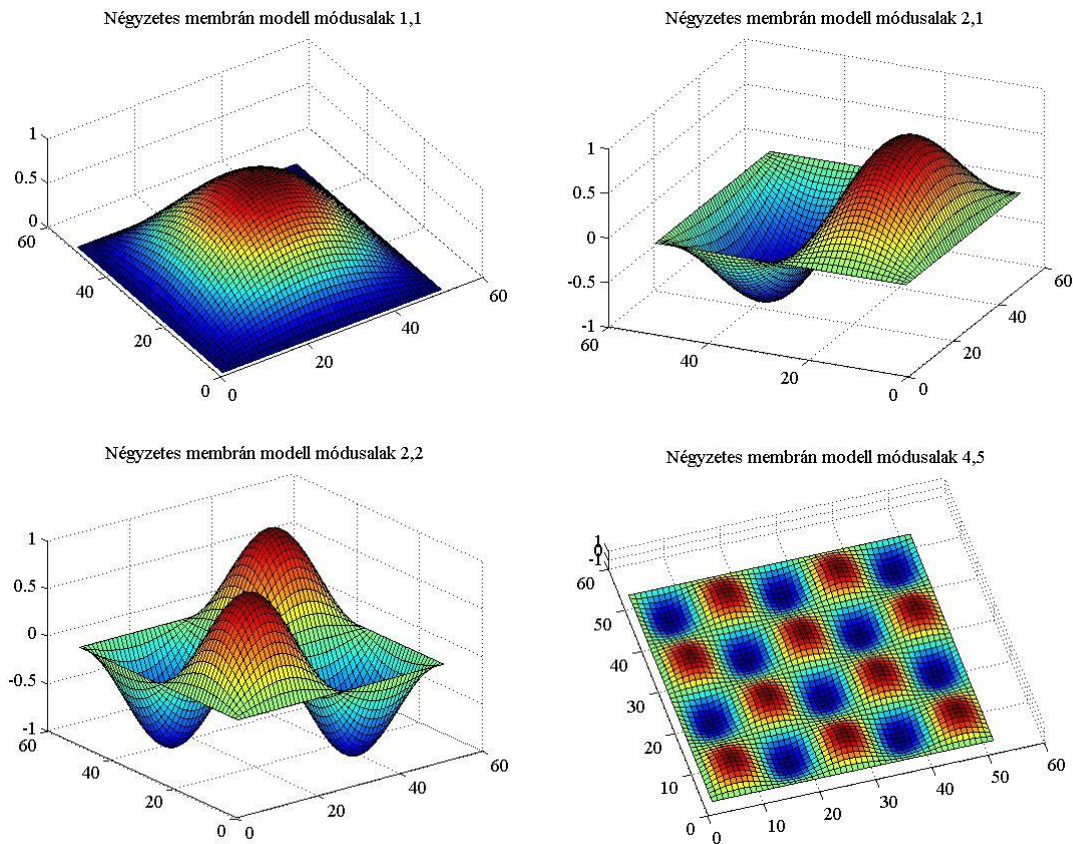
$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega^2\varphi = 0 \quad (1.8)$$

$$\varphi(t) = \text{const} * \sin(\omega t) + \text{const} * \cos(\omega t) \quad (1.9)$$

A fenti levezetést úgy értelmezhetjük, hogy a $z(m,n)$ -el jelölt módusalakok a membrán lehetséges rezgési módjait reprezentálják oly módon, hogy a módusalak minden pontja azonos fázisban oszcillál a módushoz tartozó frekvencián. Egy-egy módus egy állóhullámként fogható fel.

A (1.1) egyenletnek nem csak $z_{m,n}$ a megoldásai, hanem azok lineáris kombináció is. Így a membrán mozgását úgy képzelhetjük el, hogy az egyes módusoknak, mint különböző frekvenciájú - és a veszteségek figyelembevételkor különböző lecsengéssel rendelkező - állóhullámoknak a kitérései összegződésékként jön létre a transzverzális kitérés a membrán pontjaiban. Ez a fajta – módusok szerinti – felírás az alapja a modális szintézisnek, melyet a dobmodellemben alkalmazok.

Az 1.1 ábrán a négyzetes membrán néhány jellemző módusalakját ábrázoltam.



1.1. ábra Négyzetes membrán jellemző módusalakjai

A magasabb rendszámú alakok egyre több csomóvonallal rendelkeznek, azaz olyan vonalakkal, amelyek mentén a membrán kitérése nulla. Négyzetes membrán esetén a csomóvonalak párhuzamosak a membrán oldalaival. A négyzetes membrán esetében a módusoknak a membrán oldalaira vett vetületei a rezgő húr módusalakjai, azaz szinuszok.

A magasabb rendszámú módusokhoz tartozó állóhullámok nagyobb frekvencián rezegnek. A négyzetes membrán esetében a módusfrekvenciák¹ között felfedezhető harmonikus kapcsolat, azaz vannak olyan módusfrekvenciák, melyek egész számú többszörösei egymásnak.

1.2.1.2. *Cirkuláris membrán*

Cirkuláris membrán esetén a kétdimenziós hullámegyenletet polárkoordinátákkal írjuk fel:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \varphi^2} \right) \quad (1.10)$$

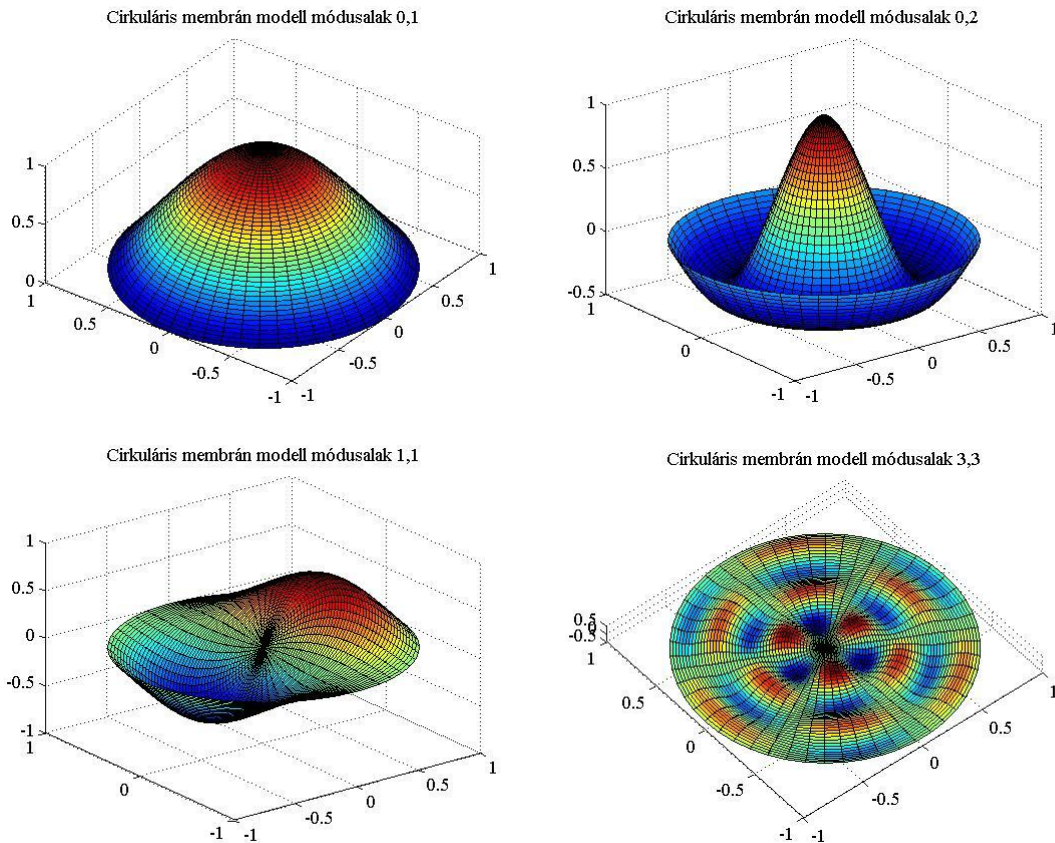
A változók szorzatának alakjában keresett megoldás sugártól függő tagjára Bessel egyenlet adódik, melynek megoldásai Bessel függvények. A szögtől függő tag megoldásával együtt a cirkuláris membrán módusalakjait, a hullámegyenlet helytől függő megoldásait a következő képlet írja le [3]:

$$K_{m,n}(r, \varphi) = \cos(m\varphi) * J_m(\mu_{m,n} \frac{r}{R}) \quad (1.11)$$

ahol $m = 0, 1, 2, \dots$, $n = 1, 2, \dots$, R a membrán sugara, J_m az m -edrendű, egyes típusú Bessel függvényt jelöli, $\mu_{m,n}$ pedig ennek a Bessel függvénynek az n -edik zérushelyét.

A cirkuláris membrán néhány jellegzetes módusalakját az 1.2 ábrán ábrázoltam. A csomóvonalak itt koncentrikus körök, illetve átmérő irányú egyenesek. Meg kell említeni, hogy cirkuláris membrán esetén a módusfrekvenciák között nincsen harmonikus kapcsolat.

¹ Több módushoz is tartozhat ugyanaz a frekvencia, így a módusfrekvencia kifejezés kissé pongyola. Ennek ellenére az egyszerűség kedvéért a továbbiakban is használom.



1.2. ábra Cirkuláris membrán jellemző módusalakjai

1.2.2. A dobtest hatása

A membrános ütőhangszerek hangját nagymértékben befolyásolja a dobtest. Három csoportba lehet sorolni a dobtestek fajtáit. Az első csoportba tartozó dobok teste a membránnal együtt körbezár egy levegővel teli üreget. Ilyen dob például az üstdob. A második csoportba az olyan dobok tartoznak, melyeknél az ütőfelületként használt membrán, a dobtest és az üreg másik felén egy másik membrán fogja közre a levegőt. Ilyen dobok a könnyűzenében alkalmazott dobszettek elemei (lábdob, tamok). A harmadik csoportba az olyan dobok tartoznak, melyeknél a dobtest nem zárja körül a levegőt, egyik fele szabadon marad.

A változatok számát növeli, hogy egyes esetekben például húrt feszítenek a testet határoló egyik membránra (pl. pergő dob). További variálási lehetőségként előfordul, hogy egy kisebb lyukat fúrnak a testbe. Maga a test alakja is nagy változatosságot mutat mindhárom csoport esetében.

Általánosságban elmondható, hogy a dobtest hatása a módusfrekvenciák megváltozásában érzékelhető. Önmagában már az, hogy a membrán levegővel van körülvéve, megváltoztatja a módusfrekvenciákat [1, p. 75]. A változás milyenségére

kevés általános törvényszerűség mondható el, ez nagymértékben az adott dobtest fajtájától (hogyan a fenti három csoportból melyikbe tartozik) és alakjától függ. Az is lehetséges, hogy az adott dobtest bizonyos módusok frekvenciáját emeli, míg más módusokét csökkenti.

A dobtest kifejezés alatt annak két részét egyaránt értjük. Egyrészt áll a légüregből, valamint az azt határoló anyagból. Kis mértékben az üreget határoló anyag (a tényleges test) is részt vesz a hangenergia kisugárzásában, azonban ez elhanyagolható a membrán által sugárzott hangsugárzáshoz képest [3]. A megvalósított dobmodellben a határoló anyagot tökéletesen merev testként kezeltem. Ezt a közelítést gyakran alkalmazzák a szakirodalomban, habár a tapasztalat azt mutatja, hogy különböző határoló anyagokkal épített azonos struktúrájú dobok hangja között lehet némi különbséget érzékelni. Mindazonáltal a test anyagával e dolgozatban nem foglalkozom, ugyanis a célom egy univerzális dobmodell létrehozása, mellyel reményeim szerint a paraméterek változtatásával elérhető változatosság kompenzálja azt a minimális varianciát, amelyet a különböző anyagok választása okozhat.

Cirkuláris membrán esetén a test által közrefogott levegőnek három hatása figyelhető meg [3]. Nem forgásszimmetrikus módusok esetén (ahol a módusoknak van átmérő irányú csomóvonala) a levegőüreg tehetetlenséggel rendelkező teherként viselkedik. Ezekben az esetekben a módus oszcillációja nem nyomja össze a levegőt, ellenben mintegy a membránra rakódó plusz tömegként csökkenti a módusokhoz tartozó frekvenciát.

Forgásszimmetrikus módusokra (ahol $m = 0$, mint az előző ábra felső két eseténél) a módus állóhullám mozgása kompresszálja a levegőt. Ekkor a levegő a membránhoz adódó plusz merevségként jelentkezik, így ebben az esetben a módusfrekvenciák megnövekednek.

A harmadik levegőüreghez kapcsolódó mechanizmus az, hogy amennyiben az üreg másik oldalán is egy membránnal van lezárva, csatolást valósít meg a két membrán között. Ekkor a két membrán egymáshoz képesti hangolása (mérete és feszítettsége) határozza meg a csatolás hatását.

Az első két hatás figyelembe vételére egy módszer, ha a dobmodellben a membránhoz tartozó tömeget és merevséget növeljük. A szakirodalomban kidolgozott módszerek állnak rendelkezésre a hozzáadandó – úgynevezett – effektív tömeg illetve merevség számítására. A dobmodellemben azonban egy másik megoldást követtem.

Rezgő rendszerek csatolására gyakran alkalmazott eljárás, hogy a két rendszert rugók, csillapítást képviselő tagok, valamint pontszerűnek tekintett tömegek használatával kapcsoljuk egymáshoz. Ezt a megoldást alkalmazhatjuk a közrefogott levegő csatolásakor, valamint azon keresztül egy másik határoló membrán bevonásakor is.

1.2.3. A gerjesztés hatásai

Membrános ütőhangszerek megütésére a két leggyakoribb technika valamilyen dobverő használata, illetve a kézi megütés. Ezen kívül léteznek egyéb megoldások, például a dobseprű, azonban ezek vizsgálatától most eltekintünk.

A gerjesztés hatása a dobhang képződésekor természetesen igen jelentős, hiszen a megütés során kerül a rezgő rendszerbe energia. Az ütőhangszerek esetében ez a gerjesztés mindig valamilyen impulzusszerű erőhatást jelent a membrán egy felületén szétterülve.

A kézi, illetve a dobverőt alkalmazó ütéstechnikák lényegesen különböznek egymástól. Általában a dobverőt alkalmazó technikák kevésbé változatosak a megütés módját tekintve. Ebben az esetben a megütés erejét és pozícióját van lehetőség megválasztani. A változatosság ebben az esetben a dobverőben lelhető fel. Rengeteg különféle méretű és anyagú verő használatos a különféle zenei műfajokban.

A kézi megütés változatosságát az adja, hogy sokféle lehetőség adódik a megütés erejének és helyének megválasztásán kívül is. A kéz különböző részeivel különböző nagyságú felületeken üthető meg a membrán: tenyerünk teljes felületével, annak egy részével, illetve egy vagy több ujjal. További variálási lehetőség, hogy két kezünk közül az egyiket akár rá is helyezhetjük a membránra, míg a másikkal ütünk. Ezzel egyrészt tompíthatjuk a membrán rezgését, másrészt, amennyiben nyomást helyezünk a membránra, növelhető annak feszültsége, ezzel a hangmagasság.

Sajnos azonban ahhoz, hogy a kézi megütés ilyen mértékű sokféleségét figyelembe tudjuk venni a dobmodellben, olyan vezérlést kell alkotnunk hozzá, ami lehetővé teszi ennyiféle bemenet létrehozását. Erre lehetőséget adhat, ha egy olyan ütőfelület adja a modell vezérlését, amelyet egy megfelelő térbeli felbontású nyomásérzékelő hálózattal látunk el.

Egy általános megoldás lehet mind a kézi gerjesztés, mind a dobverő csatolására az előző szakaszban említett tömegpont-rugó rendszer alkalmazása. Különböző struktúrák,

tömegek és rugóállandók, valamint csillapítások alkalmazásával változatos lehetőségek adódnak a gerjesztés modellezésére.

A legegyszerűbb eset a membrán és a gerjesztő test csatolására, ha a membrán és a gerjesztő testet reprezentáló tömegpont közé párhuzamosan egy rugót és egy csillapítótagot helyezünk.

Nem közvetlenül a dob fizikájához tartozik, de a dobmodell megalkotásakor meg kell vizsgálnunk, hogyan sugárzódik a hang a rezgő dobról a hallgató irányába. Azzal a közelítéssel élünk, hogy a sugárzásban csak a membrán vesz részt. Ennek következtében mindössze azt kell megfontolnunk, a membrán egyes pontjainak kitérése milyen hangnyomás-változást okoz a lehallgatás pontjában

1.2.4. Összefoglalás

Ebben a fejezetben áttekintettem a dobhang keletkezésekor lejátszódó fizikai folyamatokat, közülük is azokat, melyek a szakirodalom szerint érzékelhető hatással vannak a kialakuló rezgésre. A négyzetes membránon keresztül bemutattam a módusalakok levezetését a hullámegyenletből. A diplomatervezés során megvalósított dobmodell alapja a cirkuláris membrán modellje, melynek mozgására a szakaszban felírtam az (1.1) egyenletet. Ezután röviden ismertettem a membrán által keltett hang kölcsönhatását a hang kialakulását befolyásoló több rendszerrel, a gerjesztéssel, valamint a dobtesttel.

1.3. A hangszintézisről

Az első szintetizátorok megjelenése óta rengeteg különböző eljárást dolgoztak ki hangok elektronikus (hardveres és szoftveres) úton történő előállítására. A különböző célok (pl. gépi beszédgenerálás, tradicionális hangszerek emulálása), illetve felhasználási módok (pl. valós idejű, offline) eltérő megközelítéseket eredményeztek, valamint eltérő követelményeket támasztottak az algoritmusokkal szemben. Ily módon, a kialakult technikák változatossága, nagy száma miatt ennek a fejezetnek nem lehet célja a módszerek teljes körű ismertetése, rendszerezése. Ebben a fejezetben a zenei célú módszerekről lesz szó, három megközelítés szerint csoportosítva őket, melyek közül a modellnél alkalmazott, fizikai alapú megközelítés módszereit részletesebben mutatom be.

1.3.1. Hangminta alapú módszerek

Hangszintézis alkalmazásakor az egyik leggyakoribb cél egy létező hangszer hangjának szintetizálása. Ehhez kézenfekvő megoldásnak tűnik felvételeket készíteni a hangszerről, majd ezeket a felvételeket a szintézis során az adathordozóról lejátszani. Ezt a megközelítést nevezik minta alapú szintézisnek.

A módszer alkalmazása során lehetőleg minél nagyobb számú hangfelvételt készítenek az adott hangszerről, különböző módon gerjesztve azt (különböző erősséggel, más-más helyen megütve, pengetve, stb.). A cél egy olyan mennyiségű, minőségű mintaállomány létrehozása, amely kellően lefedi az adott hangszer dinamika és hangképtartományát a különböző játékmódokat is beleértve. A szintézis alapvetően felvett minták visszajátszásával történik. Ezen kívül a hangzás alakítására lehetőség van természetesen a digitális jelfeldolgozás eszközei által (például szűrők, burkológörbék alkalmazása, stb.).

A módszer előnye, hogy – értelemszerűen – tökéletesen adja vissza a szimulálni kívánt hangszer hangját. Ez azonban csak abban az értelemben igaz, hogy egy egyszeri megütés/pengetés/stb. hangját, ha létezik hozzá tartozó felvételünk, képesek vagyunk teljesen hűen reprodukálni.

Valójában azonban folyamatos játék esetén olyan kölcsönhatások is lezajlanak a hangszerekben, melyeket a külön-külön, hangonkénti megszólaltatás nem reprezentál. Például egy húros hangszer esetében, több húr egyidejű megszólaltatásakor csatolás

alakulhat ki a húrok között. Minden olyan eset ide tartozik, ahol a hangok egyenkénti és együttes megszólalásához különböző mechanizmusok tartoznak.

Az ilyen jelenségek bizonyos esetekben a hallgató által érzékelhető különbséget okoznak. Ezt kiküszöbölhetjük még több felvétel készítésével. Azonban, ha például egy zongoráról úgy szeretnénk felvételeket készíteni, hogy minden egyes billentyű lenyomását felvesszük mindegyik másik billentyű együttes lenyomása mellett, s mindezt a korábbiaknak megfelelően nagy felbontással a dinamikát tekintve - tehát sokféle erősséggel - láthatjuk, hogy ez kezelhetetlen mennyiségű minta rögzítését igényelné.

A módszer hátránya tehát a magas tárolókapacitás igény. A zenei alkalmazásokban használatos mintavételi frekvenciát alkalmazva (pl. 44.1 kHz) akár több száz megabyte tárhelyre szükségünk lehet egy hangszer kielégítő minőségű minta alapú szintetizálásához.

Ezt a tárigényt jelentősen csökkenteni lehet, ha nem ragaszkodunk a hang teljes hosszának visszajátszásán alapuló megközelítéshez. Ekkor a hang kezdeti, tranzienst szakaszának lejátszása után a hang „zengő” szakaszáról készült, az eredetinel jóval rövidebb felvétel ismételt lejátszásával, valamint valamilyen burkológörbe alkalmazásával állítják elő a hangot [4, p. 11].

A módszer legnagyobb hátránya, hogy a szintetizálás során semmilyen befolyással nem tudunk lenni a hangképzésre, csak a felvett minta utófeldolgozása (az alkalmazott szűrők, burkolók, stb.) paraméterezhető.

Nagy előnye viszont, hogy számítási kapacitást szinte nem igényel, mindössze a memória, vagy más tárolóból történő kiolvasás művelete foglalja a processzort. Emiatt, és az eredetihez való nagyfokú hangbeli hűség miatt - a fenti hátrányok ellenére - az egyik leggyakrabban használt módszer létező hangszerek hangjának szintézisére. Különösen igaz ez az ütőhangszerek esetére, ahol az egyéb módszerek kevesebb sikerrel emulálják az eredeti hangszer hangját.

1.3.2. Absztrakt módszerek

A hatvanas, hetvenes évekbeli kezdeti próbálkozások során a szintetizátorgyártásban, mikor létező hangszerek hangját próbálták mesterségesen előállítani, rengeteg olyan megoldás született, amely ugyan (legalábbis kezdetben) sikertelennek mutatkozott az utánzásban, de létrehozott új, a „természetben” elő nem forduló hangzásokat. Ezek a

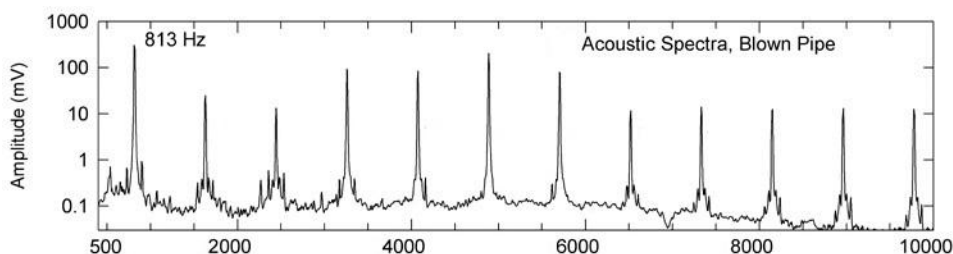
módszerek alkalmasak lehetnek valódi hangszerek emulálására is, de a koncepció (és az elektronikus zene, mint műfaj), miszerint ez nem feltétlenül célja a szintetizálásnak, megszületett.

Az ebbe a kategóriába sorolt technikák valamilyen absztrakt, kreatív megoldást kínálnak hangkeltésre. Sok esetben valamilyen elektronikai, pl. híradástechnikai megoldást (pl. modulációk) ültetnek át zenei kontextusba.

1.3.2.1. *Additív szintézis*

Ezzel a módszerrel közvetlenül és pontosan egy kívánt spektrumú jelet generálhatunk. Matematikai alapja, hogy a periodikus jelek Fourier-sorba fejthetőek, azaz felírhatóak különböző amplitúdójú, frekvenciájú és fázisú szinuszos tagok összegeként.

Az additív szintézis szinusz oszcillátorok kimenetének összegzését jelenti. Amennyiben a célunk olyan hang keltése, melynek spektruma viszonylag kevés számú, diszkrét harmonikusból áll, ez a módszer hatékonynak bizonyul. Abban az esetben, mikor egy adott frekvenciának csak egész számú többszöröseinek megfelelő szinuszokat összegzünk, harmonikus additív szintézisről beszélünk. Utóbbi esetet alkalmazhatjuk például orgonahang előállítására, ahol a sípok hangja meglehetősen közeli a tiszta szinuszhoz, és egymáshoz képest frekvenciáik harmonikus viszonyban állnak (lásd 1.3 ábra [5]).



1.3. ábra Orgona spektrum

Általában egy valós hangszer szimulálásakor a spektrum, illetve spektrogram vizsgálatából indulnak ki az additív szintézis alkalmazásakor. Meg kell állapítani, milyen frekvenciájú szinuszok összegzésére van szükség, s azok amplitúdójára milyen burkoló görbét kell illeszteni.

Az IFFT eljárás alkalmazásakor, mely az additív szintézis egy válfaja, a generálandó jel Fourier transzformálja a rendszer bemenete, közvetlenül a spektrumot tervezik, ebből inverz transzformálással állítják elő a jel időfüggvényét.

Az additív szintézis hátránya, hogy a felhasználó által kezelhetetlen mennyiségű paraméterrel rendelkezik (akár több száz oszcillátor frekvenciája, lecsengése), ráadásul ezek használata nem intuitív. Továbbá olyan jeleket, melyek szélessávú komponenseket is tartalmaznak (ütőhangszerek esetében gyakori például), ezzel a módszerrel nem hatékony előállítani. A módszer olyan esetekben, amikor a hangszer hangjában jelentős szerepet játszó kezdeti tranziens komponens van, szintén nem hatékony.

1.3.2.2. Szubtraktív szintézis

Gyakori megközelítés, hogy a hang generálásának alapja valamilyen széles spektrumú jel előállítása, a kívánt hangképet pedig ennek a szélessávú jelnek a szűrésével kapjuk meg. Az ilyen az elvet alkalmazó módszereket szubtraktív szintézis módszereknek hívjuk.

A kiinduló jel lehet valamilyen periodikus jel, amely ugrásokat tartalmaz, így széles spektrumú. Erre a célra tipikus választás a négyszög-, háromszög-, illetve fűrészjel. Ebben az esetben a generált jel spektruma harmonikus komponensekből fog állni. Lehet azonban valamilyen szélessávú - például fehér - zaj is.

Gyakori megoldás, hogy az alapul szolgáló jelet egy vagy több rezonáns szűrő tagon vezetik keresztül. Az ilyen megoldást alkalmazó szintetizátorokra terjedt el az analóg szintetizátor kifejezés².

1.3.2.3. Modulációs szintézis

Modulációs szintézis összefoglaló néven lehet illeszteni azokat a módszereket, ahol két jel valamilyen egymásra hatásából (pl. a szorzatukból) állítanak elő hangot. A két jel egyike a híradástechnikából átvett kifejezéssel illetve a vivő jel, míg a másik a moduláló jel. A hangszintézisbeli alkalmazásoknál mindkét jel frekvenciája a hangfrekvenciás tartományba (20 Hz – 20 kHz) esik.

Amennyiben a két jel szorzatával dolgozunk, amplitúdómodulációról beszélünk. Ennek hatására a vivő jel mellett oldalsávok jelennek meg a spektrumban. A vivő és moduláló jel egyaránt lehet szinuszos, illetve szélesebb spektrumú.

A különböző választásokkal meglehetősen eltérő alkalmazásokra nyílik lehetőség. Például alacsony frekvenciájú (20 Hz-nél kevesebb), szinuszos moduláló jel alkalmazásával tremolo hatás kelthető [6].

² Ennek oka, hogy kezdetben ezeket a szintetizátorokat analóg áramkörökkel valósították meg.

Használatos az FM, és PM moduláció is, melyeknél a moduláló jel a vivő jel frekvenciájára, illetve fázisára van hatással.

A modulációs szintézis módszerek közös jellemzője, hogy kicsi számításigény mellett, mindössze pár oszcillátor alkalmazásával állítható elő olyan harmonikusokban gazdag, széles sávú jel, melynek spektrumára a modulációs paramétereken keresztül közvetlen befolyásunk van, ami nagy variációs lehetőséget jelent. Például FM szintézis esetén, ha a (szinuszos) vivő és a moduláló jel frekvenciájának hányadosa egész szám, a generált jel harmonikus komponensekből áll.

Az absztrakt módszerek kategóriában felsorolt eljárásoknak sok különböző változata létezik. Gyakran ezeket egymással kombinálva alkalmazzák. Amennyiben létező hangszerek hangjának szintézisére használják őket, a sikeres utánzás általában nagy intuíciót igényel, hiszen ezek a módszerek nem követnek olyan hangképzési modellt, amely a létező hangszerekben végbemenő hangterjedést reprezentálná. Számításigényük némileg nagyobb a felvett minta alapú eljárásoknál, azonban nem tekinthető jelentősnek.

Előnyük a minták lejátszásán alapuló technikákhoz viszonyítva, hogy sok paraméterezési lehetőség adódik. Ezek a paraméterek azonban nem túl beszédesek (fizikai jelentésük nincs), a felhasználó számára nehezen jósolható a hatásuk.

1.3.3. Fizikai alapú szintézis módszerek

A fizikai alapú hangszintézis nem közvetlenül a hangszer által generált jelalakot közelíti valamilyen intuitív módszerrel, hanem a hangot létrehozó fizikai folyamatot modellezi. Ennek következtében egyrészt a fizikai leírás egyre nagyobb fokú pontosításával tetszőlegesen közelíthető az emulálni kívánt hangkép, másrészt lehetővé válik a folyamat befolyásolása paraméterek által. Ezek a paraméterek pedig valós fizikai jelentéssel bírnak, így a felhasználó könnyebben jósolhatja meg hatásukat. Használatukkal a hangkép valós időben változtatható, nagyfokú szabadságot, változatosságot adva ezzel a felhasználó kezébe.

A fizikai alapú szintézis egyik előnye a felvett minta alapú szintézissel szemben a természetesebb hangzás. A felvett minta alapú szintézis korlátaival (diszkrétisével) szemben, alkalmazásával a kialakítható hangképek és a létrehozható hangok egy folytonos, végtelen halmazt alkotnak, ezáltal a szintetizált hang természetesebb hatást kelthet. Hátránya a nagy számításigény, amely az alapul szolgáló fizikai modell

bővítésével nő. Azonban napjainkra az elektronikus eszközök számítási kapacitása elérte azt a szintet, hogy valós időben képesek legyenek megbirkózni a fizikai alapú szintézis által támasztott követelményeknek.

A fizikai alapú modellezés során lajstromba vesszük a hang létrejöttét, képződését befolyásoló folyamatokat, és kiválasztjuk ezeknek egy optimális részhalmazát, melyet figyelembe veszünk. Részhalmazról beszélünk, hiszen nyilvánvalóan csak a szándékaink szabnak határt annak, hogy milyen részletességgel írjunk le egy folyamatot. Racionalizálni kell a figyelembe vett kölcsönhatások számát oly módon, hogy csak azokat vegyük számításba, amelyek észrevehető javulást okoznak a hangzásban. Szem előtt kell tartanunk a figyelembe vett folyamatok számításigényét is. Kézenfekvőnek tűnik, hogy a fizikai alapú szintézis valódi hangszerek hangjának rekonstruálására való. Amellett, hogy ez az elsődleges cél az alkalmazásakor, valójában a megközelítés lehetővé teszi teljesen újszerű hangzások kialakítását is. Egy valós fizikai folyamaton alapuló modell esetén is, a paraméterek olyan extrém beállításaiival, ami a természetben nem fordulhatna elő, fizikailag megvalósíthatatlan hangszerek modelljét alkothatjuk meg.

A fizikai leírás eredményeképpen általában egy parciális differenciálegyenletet (a továbbiakban PDE) kapunk. A PDE ismeretlen változója általában a rezgő test (húr, membrán) térbeli (adott iránybeli) kitérése. Az adott időpillanatbeli kitérés meghatározására, a PDE megoldására, illetve annak közelítésére többféle módszer létezik, melyek más-más szempontok, illetve problémák esetén lehetnek optimálisak. A továbbiakban ezek közül néhány ismertetése következik.

1.3.3.1. Véges differenciák módszere

A véges differenciák módszerének kiindulópontja a hangszerre felírt, fizikai megfontolásokkal előállított parciális differenciálegyenlet, illetve egyenletek.

A véges differenciák módszere egy numerikus módszer differenciálegyenletek megoldásának közelítésére. A differenciálegyenletekben szerepelő deriváltakat úgynevezett véges differencia egyenletekkel becsli.

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_0} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{y(x_0 + \Delta x) - y(x_0)}{\Delta x} \quad (1.12)$$

Az (1.12) egyenlet az elsőrendű derivált értékének határértékes definíciója az x_0 pontban. A véges differenciák módszerének alkalmazásakor a parciális differenciálegyenletet időben és térben is diszkretizáljuk. Az egyenletben szereplő deriváltakat véges differencia egyenletekkel helyettesítjük, vagyis az adott pontbeli deriváltakat a környező értékek lineáris kombinációjával közelítjük. Az (1.12) egyenletben szereplő elsőrendű derivált közelítése lehet például:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_i} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta x} \quad (1.13)$$

ahol

$$y_i = y(i * \Delta x) \quad (1.14)$$

Amennyiben ismerjük a fizikai modellt leíró PDE összes kezdeti-, valamint peremfeltételét, a megoldást iteratívan számíthatjuk a véges differenciák segítségével. A módszer pontossága a deriváltak közelítésére alkalmazott képletek pontosságától, valamint az időbeli és térbeli mintavételezés sűrűségétől függ.

A véges differenciák módszere ugyan nagyon pontos eredményt szolgáltat, de számításigénye meglehetősen nagy, sőt nagyszámú térbeli pont és magasabb rendű deriváltak számítása esetén a memóriaigénye is nagy lehet. Mivel minden – az egyenletben szereplő – fizikai mennyiség értékét számolja minden időpillanatban, analízis célokra alkalmasabb lehet, mint szintézisre. Azokban az esetekben azonban, mikor a modellként szolgáló differenciálegyenletnek zárt alakú megoldása nem ismert, csak ez a módszer áll rendelkezésre. A következő két szakaszban elővezetett mindkét eljárás alapja, hogy a problémára felírt differenciálegyenletnek ismert zárt alakú megoldása.

1.3.3.2. Digitális hullámvezető szintézis

Fizikai alapú szintézis alkalmazásakor a hangszerben keletkezett hanghullámok terjedését próbáljuk meg leírni. A hanghullámok terjedését a hullámegyenletek írják le. A legegyszerűbb eset az egydimenziós, veszteség tagokat nem tartalmazó hullámegyenlet [1, p. 37]:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1.15)$$

A képletben y a rezgő test (pl. egy dimenziós esetben húr) kitérése a rezgés síkjában, x a hullám terjedésének irányába mutató (ez merőleges a kitérés irányára) koordináta, t az idő, c pedig a hullámterjedés sebessége.

A digitális hullámvezető szintézis kiindulópontja ennek az egyenletnek a d'Alembert-féle megoldása, az úgynevezett haladóhullám megoldás [7, p. 25]:

$$y(x, t) = y^+(x - ct) + y^-(x + ct) \quad (1.16)$$

E szerint a kialakuló hullám tekinthető két ellentétes irányban terjedő hullám összegének. A megoldás érvényes bármilyen alakú hullámra.

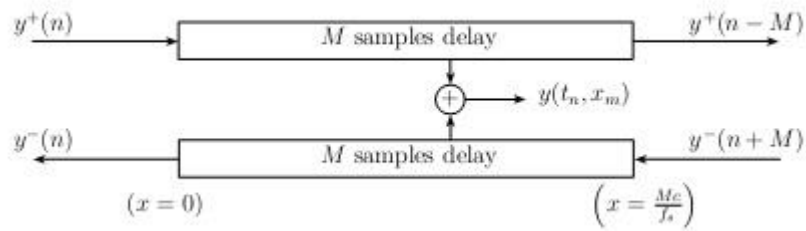
A digitális hullámvezető szintézis az (1.16) egyenlet időben és térben diszkrétizált formáját alkalmazza.

$$y(m * \Delta x, n * \Delta t) = y^+(m * \Delta x - n * \Delta t) + y^-(m * \Delta x + n * \Delta t) \quad (1.17)$$

Egy időegység alatt a hullám egy téregységnyit halad. A térbeli és időbeli mintavételi pontokban a formula pontos eredményt ad, feltéve, hogy a terjedő hullámalak nem tartalmaz frekvenciakomponenst a Nyquist-frekvencia fölött [7, p. 27]. A köztes helyeken pedig interpolációval számolhatunk eredményt.

A digitális hullámvezető szintézist olyan esetekben alkalmazzák, ahol egydimenziós hullámterjedés határozza meg a hangszer hangját, például húros hangszerek esetében. Itt a hullám terjedése a vonal mentén egy késleltetővonallal modellezhető (az (1.17) formulában a két tag két késleltetővonalnak felel meg).

Ha egy húr mozgására alkalmazzuk a módszert, a húr egy pontjának adott időpillanatbeli kitérését két késleltetővonal adott pillanatbeli értékének összegzésével kapjuk.



1.4. ábra Digitális hullámvezető: késleltetővonalak [7, p. 27]

A hullámvezetőkben, valós eseteket modellezve, figyelembe kell vennünk egyrészt a terjedő hullám energiájának disszipálódását, azaz a veszteségeket, valamint a hullámvezetők határain bekövetkező esetleges visszaverődéseket. A visszaverődések a késleltetővonalak egymásba csatolásával oldhatóak meg, például a húr esetében úgy, hogy a vonalak kimenetei a másik bemenetére csatlakoznak. A veszteségek figyelembe vételéhez szűrők alkalmazása a használatos, ahogyan a valós hangszerekben szintén jelenlévő diszperzió (a hullám sebessége frekvenciafüggő) jelenségének figyelembevételére is.

Kétdimenziós, illetve térbeli modellek készítésére megalkották a digitális hullámvezető módszer megfelelő kiterjesztéseit (waveguide mesh). A modellek ebben az esetben hálók, melyek pontjai között késleltetővonalak találhatóak. Dob membránjának modellezésére például alkalmazható kétdimenziós waveguide mesh. A többdimenziós esetekben a hálózat topológiájának megválasztása kulcskérdés. Ezekben az esetekben számolni kell azzal, is, hogy a szomszédos pontok közti terjedés sebessége függhet az iránytól is [4, p. 70].

A digitális hullámvezető módszer a legelterjedtebb módszerek közé tartozik a fizikai alapú hangszintézis területén. Ennek egyik oka egyszerű implementálhatósága (pl. DSP-n történő megvalósításkor ideális, hogy a modell számításakor többnyire az adat egyik helyről a másikra történő memóriabeli másolásáról van szó [7, p. 24]). Egydimenziós hullámterjedéssel leírható problémákra hatékony, amikor hosszabb késleltetővonalak alkalmazására nyílik lehetőség. Két- illetve háromdimenziós kiterjesztései (waveguide mesh) már a véges differenciás módszerrel összemérhetően nagy számításigényűek [4, p. 100].

1.3.3.3. *Modális szintézis*

A modális szintézis szintén a PDE analitikus megoldásán alapszik. A digitális hullámvezető módszerrel szemben, ahol a hullámegyenlet úgynevezett haladó hullám megoldását használtuk, a modális szintézis során az úgynevezett modális alakban

keressük a megoldást. Bizonyos problémák (pl. tipikus egyszerűbb geometriai elrendezések) esetén ez zárt alakban megkapható, így a feladat megoldása tetszőleges pontossággal számolható.

A modális szintézis használatakor a PDE megoldását olyan alakban keressük, hogy az egy - a változók szétválasztása szerinti - szorzat. A megoldás így elkülönül időtől, valamint helytől függő részekre, azok szorzata. Ezzel a módszerrel a PDE felbomlik végtelen számú közönséges (egyváltozós) differenciálegyenletre a helytől függő tag megoldásainak végtelen száma miatt. Az (1.15) egyenletben megadott egydimenziós hullámeqyenlet megoldását egy rezgő húr modális szintézise során például a következő (helytől valamint időtől függő tagok szorzata) alakban keressük:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} y_k(t) * \sin\left(\frac{k\pi x}{L}\right) \quad x \in [0, L] \quad (1.18)$$

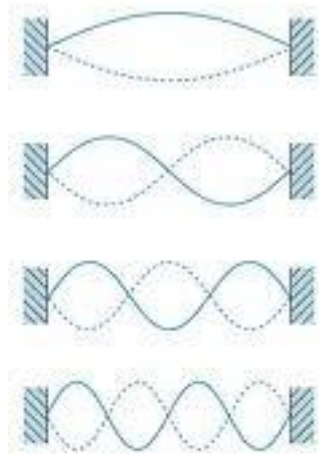
Ha a fenti egyenletben mutatott alakban keressük a megoldást, a PDE a következő közönséges másodrendű differenciálegyenletekre bomlik fel, amely a módusokra ilyen alakú:

$$\frac{d^2 y_k}{dt^2} + a_{1,k} \frac{dy_k}{dt} + a_{0,k} y_k = 0 \quad (1.19)$$

A megoldás helytől függő részére kiadódó megoldások a mozgás állóhullámai (módusai). Az (1.19) egyenlet alapján felírható a módusok, mint rezonátorok impulzusválasza:

$$y_{\delta,k}(t) = A_k e^{-\frac{t}{\tau_k}} * \sin(2\pi f_k t) \quad (1.20)$$

Az (1.15) egyenlet megoldása (pl. a rezgő test adott pontbeli kitérése) tekinthető úgy, mint végtelen számú, lecsengő szinuszos állóhullám rezonátor kimenetének az adott pontbeli összege. Egy-egy módusban (állóhullám rezonátorban) a hullámalak minden pontja ugyanabban a fázisban – a módushoz tartozó – frekvenciával oszcillál. Az alábbi ábrán a rezgő húr néhány jellemző módusalakja látható.



1.5. ábra Rezgő húr módusalakjai

Modális szintézist alkalmazhatunk abban az esetben is, ha nem áll rendelkezésre a rendszer fizikai leírása, vagy abból a módusfrekvenciák és a módusok lecsengési együtthatói (melyek a hangszer – frekvenciafüggő – veszteségei következtében jellennek meg) nem számíthatóak ki. Ekkor a módusfrekvenciákat és a lecsengési időket például az emulálni kívánt hangszer mérésével határozzuk meg, esetleg intuitív módon kitalálunk valamit, létrehozva ezzel egy mesterséges hangszer modelljét. További lehetőség, hogy egy számításigényét tekintve nem hatékony, de pontos módszerrel - mint amilyen a véges differenciák módszere – offline módon, határozzuk meg a módusfrekvenciákat és a lecsengési időket.

A módus rezonátorokat egymással párhuzamosan kapcsolt másodfokú szűrőtagokkal implementálhatjuk, amik tulajdonképpen (1.20)-at valósítják meg.

A hely szerinti megoldások, azaz a módusalakok általános problémákra, mint amilyen az egy dimenziós húr, vagy a dobmodellben használt négyzetes- vagy cirkuláris membrán esete, ismertek. Ezért ezekre a problémákra a modális szintézis jó megoldást jelent, hiszen tetszőleges pontosság érhető el az eredményben aszerint, hogy mekkora számú módust veszünk figyelembe. A pontosság és a számításigény így könnyen kézben tartható.

A gyakorlatban nyilván csak véges számú módust tudunk figyelembe venni, azonban a módusok számának korlátossága nem jelent nagy minőségbeli korlátot, ugyanis a nagyon nagy frekvenciákhoz tartozó módusok hatását az emberi hallás már nem érzékeli, vagyis meghúzható egy olyan frekvenciakorlát, amely feletti módusokat már nem számolunk ki. Így a pontos eredmény igen jó közelítése valósítható meg.

1.3.4. Összegzés

Ebben a fejezetben a fellelhető hangszintézis módszereknek mindössze csak egy kis részét ismertettem, a fentebb leírt módszerek azonban bemutatják a legfontosabb megközelítési módokat.

A diplomatervezés során a célom egy olyan dobmodell létrehozása volt, amely fizikai alapokon nyugszik és valós fizikai paraméterekkel vezérelhető. Fontos követelmény volt, hogy az alkalmazott módszer ne csak pontos eredményt adjon, de számításigénye alkalmassá tegye valós idejű alkalmazásra. Leginkább az utóbbi követelmény indokolta, hogy a fizikai alapú eljárások közül a modális szintézist válasszam, ugyanis a felhasznált módusok számával ez a fajta modell könnyen skálázható. A digitális hullámvezető szintézis a membrán esetére, azaz kétdimenziós problémára nem alkalmazható, annak kétdimenziós kiterjesztése, a waveguide mesh pedig a véges differenciás módszerhez hasonlóan nagy számításigényű.

2. A dobmodell bemutatása

Ebben a fejezetben ismertetem a megvalósított dobmodellt. A modell alapjául az 1.2 fejezetben leírtak szolgálnak. Bemutatom, hogy a dobhang képződésében szerepet játszó fizikai jelenségeket miként építettem be a modellbe.

A bemutatott algoritmusokat Matlab-ban teszteltem, a fejezet ábráit szintén ezzel a programmal készítettem.

2.1. A membrán modellje

A modell alapja a cirkuláris membrán. Ennek leírására a korábbiakban ismertetett parciális differenciálegyenletet alkalmaztam:

$$D\nabla^4 z(r, \varphi, t) + \sigma \frac{\partial^2 z(r, \varphi, t)}{\partial t^2} - T_0 \nabla^2 z(r, \varphi, t) + d_1 \frac{\partial z(r, \varphi, t)}{\partial t} + d_3 \frac{\partial \nabla^2 z(r, \varphi, t)}{\partial t} = f(r, \varphi, t) \quad (2.1)$$

A fenti egyenlet leírja a membránban terjedő transzverzális hullámok mozgását. Tartalmazza a hajlítási merevség, valamint a frekvenciafüggő veszteségek figyelembe vételére szolgáló tagokat. A modell gerjesztése a membrán felületén eloszló erő (az egyenlet jobb oldala).

A membrán kitérésének számítását a modális szintézis segítségével valósítottam meg. Ez azért lehetséges, mert a fenti egyenletnek a cirkuláris alakot reprezentáló peremfeltétel alkalmazása esetén ismerjük zárt alakú megoldását.

Az alkalmazott peremfeltétel:

$$z(r, \varphi, t) = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{és } \nabla^2 z(r, \varphi, t) = 0 \text{ ha } r = R \quad (2.3)$$

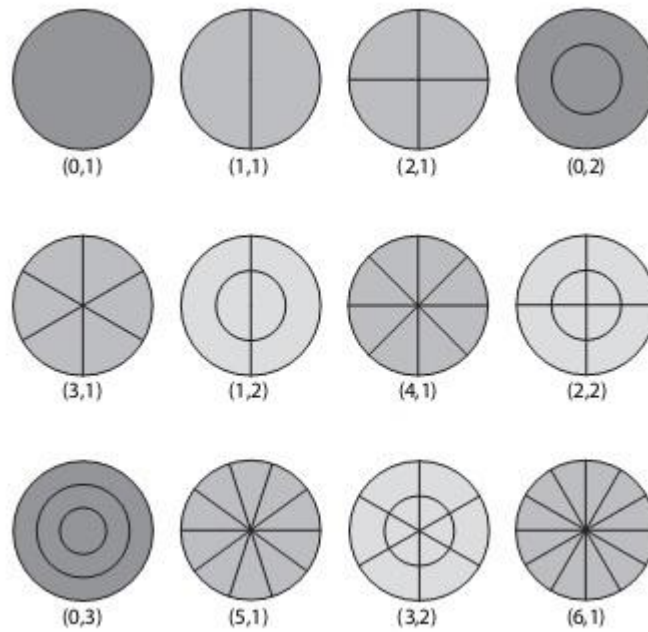
ahol R a membrán sugara, vagyis a kör alakú membrán szélein a kitérés, valamint a görbület nulla.

A cirkuláris membrán módusalakjait meghatározhatjuk, ha a polárkoordinátákkal felírt kétdimenziós hullámeqyenletre (1.10 egyenlet) alkalmazzuk a változók szétválasztásának módszerét. Ekkor az egyes változókra külön közönséges

differenciálegyenleteket kapunk, melyeknek ismertek a megoldásai, ahogy arról az 1.2 fejezetben már szó esett. A cirkuláris membrán módusalakjait, azaz a szorzat alakú megoldás helytől függő tagjait a következő egyenletek írják le³:

$$K_{m,n,1}(r, \varphi) = \cos(m\varphi) * J_m(\mu_{m,n} \frac{r}{R}) \quad (2.4)$$

$$K_{m,n,2}(r, \varphi) = \sin(m\varphi) * J_m(\mu_{m,n} \frac{r}{R}) \quad (2.5)$$



2.1. ábra Cirkuláris membrán módusalakjai [8]

A membrán kitérése a segítségükkel ekkor így írható le [3]:

$$z(r, \varphi, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{i=1}^2 \frac{\hat{z}_{m,n,i}(t) * K_{m,n,i}}{\|K_{m,n}\|_2^2} \quad (2.6)$$

ahol $\hat{z}_{m,n,i}$ jelöli az egyes módusok dinamikáját leíró tagokat. A szummában szereplő hányados nevezőjében a módusalakok szorzatának a cirkuláris membrán felületén vett integrálja szerepel súlyozó tagként:

³ J_m az m-edrendű, egyes típusú Bessel függvényt jelöli, $\mu_{m,n}$ pedig ennek a Bessel függvénynek az n-edik zérushelyét.

$$\begin{aligned}\|K_{m,n}\|_2^2 &= \int_0^R \int_0^{2\pi} K_{m,n,1} K_{m',n',1} r dr d\varphi \\ &= \int_0^R \int_0^{2\pi} K_{m,n,2} K_{m',n',2} r dr d\varphi\end{aligned}\quad (2.7)$$

melynek értéke [2, p. 212]:

$$\|K_{m,n}\|_2^2 = 0, \text{ ha } m \neq m' \text{ vagy } n \neq n' \quad (2.8)$$

$$\|K_{m,n}\|_2^2 = \pi R^2 A_{m,n}, \text{ ha } m = m' \text{ vagy } n = n' \quad (2.9)$$

ahol

$$A_{0,n} = [J_1(\mu_{0,n})]^2 \quad (2.10)$$

$$A_{m,n} = \frac{1}{2} [J_{m-1}(\mu_{m,n})]^2 \quad (2.11)$$

$\hat{z}_{m,n,i}$ kiszámításához a (2.6) alakot kell behelyettesítenünk a membrán egyenletébe, majd a módusalakkal való beszorzás után integrálnunk kell a membrán felületén:

$$\hat{z}_{m,n,i}(r, \varphi, t) = \int_0^R \int_0^{2\pi} z(r, \varphi, t) K_{m,n,i} r dr d\varphi \quad (2.12)$$

A fenti művelet eredményeképpen az egyes módusok dinamikáját leíró közönséges differenciálegyenleteket kapunk [3]:

$$\begin{aligned}\ddot{\hat{z}}_{m,n,i}(t) + \frac{1}{\sigma} \left[d_1 + d_3 \left(\frac{\mu_{m,n}}{R} \right)^2 \right] \dot{\hat{z}}_{m,n,i}(t) \\ + \left(\frac{\mu_{m,n}}{R} \right)^2 \left[\frac{D}{\sigma} \left(\frac{\mu_{m,n}}{R} \right)^2 + c^2 \right] \hat{z}_{m,n,i}(t) = \frac{1}{\sigma} \hat{f}_{m,n,i}(t)\end{aligned}\quad (2.13)$$

ahol c a hullám terjedési sebessége, $c = \sqrt{(T_0/\sigma)}$.

A fenti egyenlet tartalma, hogy $\hat{z}_{m,n}$ egy gerjesztett másodrendű oszcillátor. A módushoz tartozó oszcillátor paramétereit a membránt leíró differenciálegyenlet paramétereit

határozzák meg. A fenti egyenlet jobb oldalán az egyes módusokra eső gerjesztés szerepel, melyet a következő módon számolhatunk ki:

$$\hat{f}_{m,n,i}(r, \varphi, t) = \int_0^R \int_0^{2\pi} F(r, \varphi, t) K_{m,n,i} r dr d\varphi \quad (2.14)$$

ahol $F(r, \varphi, t)$ a membrán adott pontjára ható felületi erősűrűség.

A (2.13) egyenlet Laplace-transzformálásával (a gerjesztést Dirac-impulzusnak vesszük) kapjuk meg a másodrendű módusrezonátorok átviteli függvényét:

$$H_{m,n,i}(s) = \frac{\frac{1}{\sigma}}{s^2 + 2\alpha_{m,n,i}s + \omega_{m,n,i}^2} \quad (2.15)$$

ahol:

$$2\alpha_{m,n,i} = \frac{1}{\sigma} \left[d_1 + d_3 \left(\frac{\mu_{m,n}}{R} \right) \right] \text{ és} \quad (2.16)$$

$$\omega_{m,n,i}^2 = \left(\frac{\mu_{m,n}^2}{R} \right)^2 \left[\frac{D}{\sigma} \left(\frac{\mu_{m,n}}{R} \right)^2 + c^2 \right] \quad (2.17)$$

A szűrők impulzusválaszai lecsengő szinuszok, melyek frekvenciái, illetve lecsengési tényezői [9]:

$$f_{m,n,i} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega_{m,n,i} - \frac{(2\alpha_{m,n,i})^2}{4}} \quad (2.18)$$

$$\tau_{m,n,i} = \frac{1}{\alpha_{m,n,i}} \quad (2.19)$$

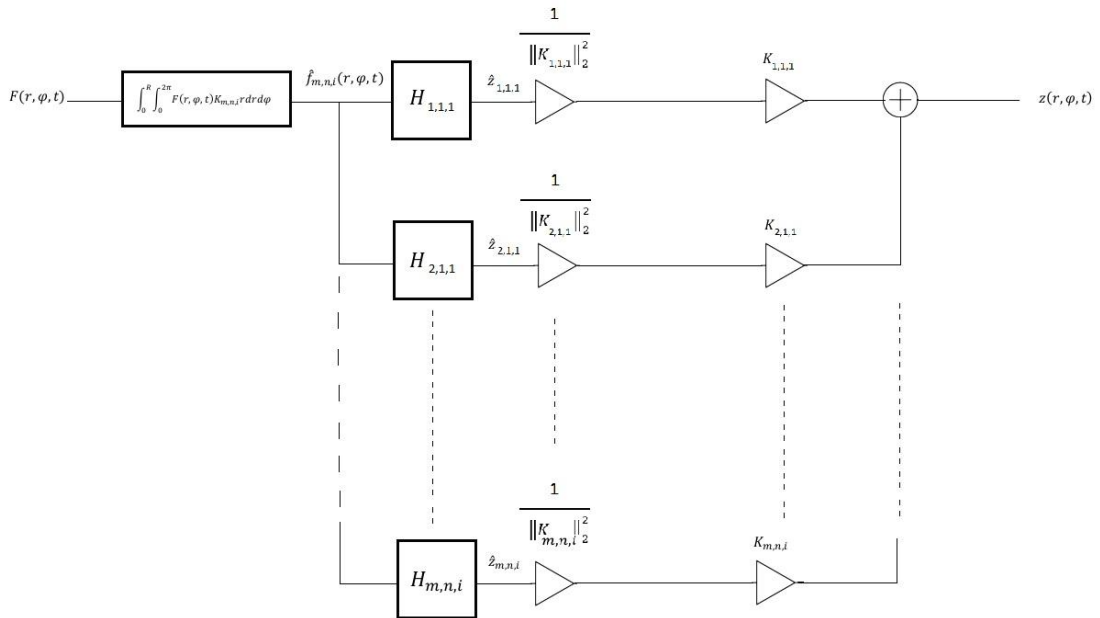
Látható, hogy a veszteségek, és a membrán (hajlítási) merevsége egyaránt befolyásolják a módusfrekvenciákat (előbbi növekedése csökkenti, utóbbi növekedése növeli). A módusrezonátorokhoz tartozó lecsengési időket teljes mértékben a veszteségek határozzák meg. A merevséget reprezentáló tag D együtthatójának meghatározása a következő képlettel történik [3]:

$$D = \frac{Qh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.20)$$

Itt h jelöli a membrán vastagságát, Q a membrán anyagának Young modulusa (rugalmassági állandója), ν pedig a Poisson tényező.

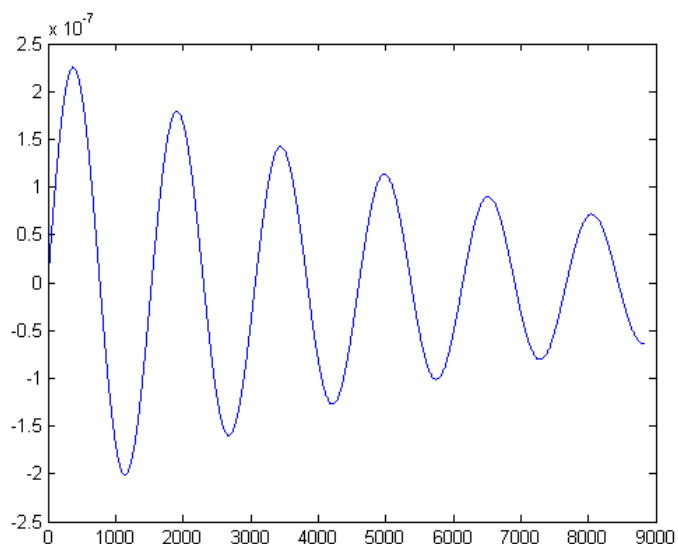
A cirkuláris membrán modelljét tehát másodrendű szűrőtagok párhuzamos kapcsolásával valósíthatjuk meg a modális szintézis módszerét alkalmazva. A szűrők bemenetét a gerjesztő erő alapján a (2.14) képlettel számolhatjuk. A modell kimenetét, vagyis a membrán adott pontbeli, adott időpillanatbeli kitérését pedig a (2.6) képlettel határozhatjuk meg.

Az alábbi ábrán a párhuzamos szűrőtagokkal való megvalósítást ábrázoltam.



2.2. ábra Modális szintézis párhuzamos másodrendű szűrő tagokkal

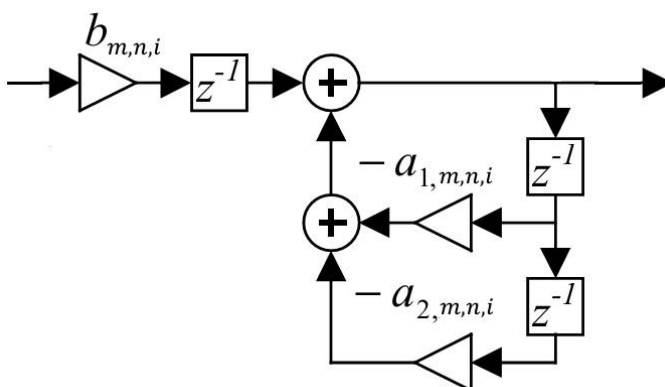
A következő ábrán egy a móduszrezonátorokhoz tartozó jellemző impulzusválaszt ábrázoltam.



2.3. ábra Szűrő impulzusválasz

A membrán kitérést számító modell tehát párhuzamos másodfokú szűrők kimeneteit a módusalakokkal súlyozva összegzi. A szűrők bemenetét a (2.14) képlettel számolhatjuk a membrán pontjaira ható erők időfüggvényéből.

A modell szoftveres megvalósításához diszkrétizálnunk kell a szűrőket. A diszkrétizálásra az impulzus invariáns transzformációt alkalmaztam. Ez a módszer nem okoz frekvenciatorzulást (mint például a bilineáris transzformáció), valamint a rendszerbe egy mintányi késleltetést visz be [10]. A bevitt késleltetés haszna, hogy ily módon elkerüljük a késleltetés-mentes hurkok kialakulását a rendszerben, amelyek triviális megoldása numerikus instabilitást okozhatna. Az alábbi ábrán a módusszűrők blokkvázlatát ábrázoltam:



2.4. ábra A módus szűrőtagok blokkvázlata

A szűrők implementálására hatékony, és a modell megvalósításakor alkalmazott módszer, ha a szűrők kimenetét azok rendszeregyenletével számoljuk ki. Az

impulzusválaszokat diszkrétizálva és a z-transzformáció elvégezve, vagy a folytonos idejű átviteli függvényt közvetlenül diszkrétizálva felírható a diszkrét idejű átviteli függvény, melyből a rendszeregyenlet könnyen megállapítható.

A diszkrét idejű átviteli függvény:

$$H_{m,n,i}(z) = \frac{b_{m,n,i}z^{-1}}{1 + a1_{m,n,i}z^{-1} + a2_{m,n,i}z^{-2}} \quad (2.21)$$

melynek pólusai:

$$p_{m,n,i} = e^{j2\pi\frac{f_{m,n,i}}{f_s}} e^{-\frac{1}{\tau_{m,n,i}f_s}} \quad (2.22)$$

ahol f_s a mintavételi frekvencia és:

$$b_{m,n,i} = \frac{A_{m,n,i}}{f_s} \text{Im}\{p_{m,n,i}\} \quad (2.23)$$

$$a1_{m,n,i} = -2\text{Re}\{p_{m,n,i}\} \quad (2.24)$$

$$a2_{m,n,i} = |p_{m,n,i}|^2 \quad (2.25)$$

A modális szintézis alkalmazása azzal a kedvező helyzettel szolgál, hogy a modell számításigénye skálázható. A (2.6) egyenlet szerint a membránt kitérést a szűrők kimenetének súlyozott összegzésével kapjuk. A tökéletesen pontos eredményhez végtelen számú tagnak kell szerepelnie az összegben, azaz végtelen számú módust kell tartalmaznia a modellnek. Ez a gyakorlatban természetesen nem kivitelezhető. Fontos döntés tehát, hogy a modellben hány módust vegyünk számításba, azaz hány darab párhuzamos szűrőtag kimenetét számoljuk. Ez a szám akár a felhasználó által módosítható paraméterként is szerepelhet a modellben. Ezzel a felhasználó kezébe adnánk a modell skálázásának lehetőségét.

Bizonyos számú módus alkalmazása esetén a további módusok figyelembevétele nem hallható a modellen. Ez függ a hallgató hallásának érzékenységétől is, azonban általánosan elmondható, hogy a 20 kHz feletti frekvenciájú módusokat nem érdemes számolni a modellben, mert ezek kimenete már kívül esik az emberi hallás

frekvenciatartományán [11]. Ez jelenti tehát a racionális korlátot a módusok számának meghatározásakor.

Az alábbi táblázat egy tipikusnak tekinthető paraméterbeállítás mellett mutatja a módusokhoz tartozó frekvenciákat. A tipikus paraméterbeállítás azt jelenti, hogy a membrán legalacsonyabb rendű módusának frekvenciája a 30 és 1 kHz közötti tartományba esik.

(m,n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	114	261	410	558	707	855	1004	1153	1301	1450
1	181	332	482	631	780	929	1077	1226	1375	1524
2	243	398	550	700	850	1000	1149	1298	1447	1596
3	302	462	616	768	919	1069	1219	1368	1518	1667
4	359	524	680	834	986	1137	1288	1438	1588	1737
5	415	584	743	898	1052	1204	1355	1506	1656	1806
6	470	643	805	962	1117	1270	1422	1573	1724	1875
7	525	702	866	1024	1180	1335	1487	1640	1791	1942
8	579	759	926	1086	1243	1399	1552	1705	1858	2009
9	632	816	985	1147	1306	1462	1617	1770	1923	2075
10	685	873	1044	1208	1367	1525	1680	1835	1988	2141

2.1. táblázat Módusfrekvenciák tipikus értékei (Hz)

Amennyiben a (0,1) módus frekvenciája az említett intervallumban van, azaz a membrán hangolása a gyakorlatban előforduló eseteknek megfelelő, maximum pár száz módus elég, hogy az emberi hallás tartományába eső részt lefedjük.

A dobmodellben a membránt az itt leírtaknak megfelelően valósítottam meg. A fejezet további részében a modális szintézissel implementált membrán modellhez kapcsolódó többi fizikai jelenség megvalósítását mutatom be.

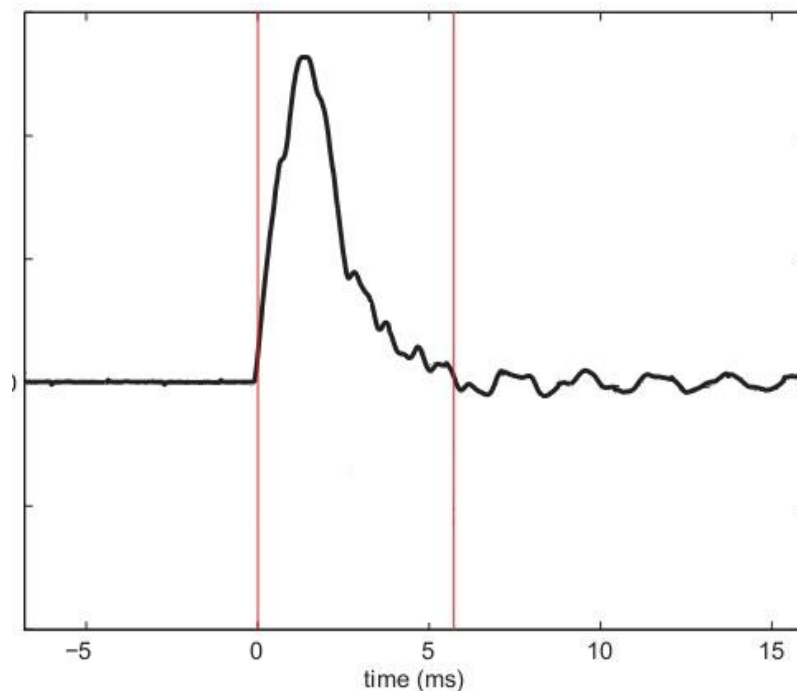
2.2. A gerjesztés modellje

A membrán gerjesztésére olyan modellt szerettem volna alkotni, amely dobverővel, illetve kézzel történő megütésre egyaránt alkalmazható. A gerjesztés modell paraméterei lehetőséget kell, hogy adjanak a változatos, akár kézi, akár dobverős megütés érzetének kialakítására, bár az elsődleges cél a kézzel ütött ütőhangszerek modellezése volt, így elsősorban az ilyen típusú gerjesztés modellezésére törekedtem.

A gerjesztés modelljének kialakításakor arra törekedtem, hogy a szakirodalomban fellelhető mérések eredményeit (pl. [12]) figyelembe vegyem. Szerencsére bőven találni olyan tanulmányokat, melyek dobok megütésével kapcsolatos mérések eredményeiről számolnak be. A modellt összevetve ezek eredményeivel következtethetünk a modell jóságára.

Egzakt fizikai leírását a kéz és a membrán kölcsönhatásának a szakirodalomban nem találtam. A - gyakrabban előforduló - dobverős gerjesztéssel foglalkozó cikkek intuitív modelleket alkalmaznak a lejátszódó jelenségek leírására.

Általános megközelítés, hogy a gerjesztés és a membrán kapcsolatát egy tömeg-rugó-csillapítás rendszerrel írják le. A diplomatervezés során én is ezt az eljárást alkalmaztam.



2.5. ábra Gerjesztés jellemző erőalakja [12]

A fenti ábrán a membránra a membránt megütő test által ható erő jellemző időfüggvénye látható, dobverővel történő megütés esetén. Látható, hogy a gerjesztés impulzusszerű. Leolvasható az ábráról, hogy a kölcsönhatás igen rövid idő alatt, körülbelül 5 ms alatt lezajlik. Olyan modell alkotása volt a cél, amellyel a fentihez hasonló erőalak adódik.

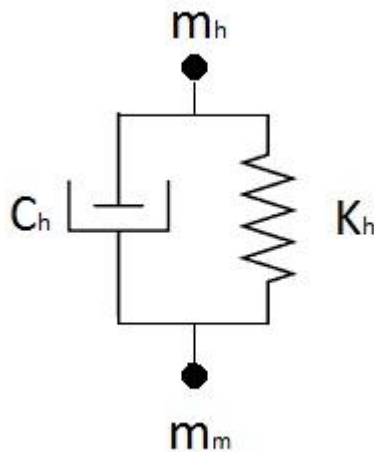
A modell alapjául a [9]-ban ismertetett kalapács modell szolgált. Ebben a zongora húrját megütő kalapács egy tömegpontként jelenik meg, amely a húrhoz egy rugóval kapcsolódik. A kölcsönhatás leírása a Hooke törvény, valamint Newton második

törvénye alapján történik. A rugóállandó ebben a modellben nemlineáris, a rugó összenyomódásával a rugó egyre keményebb lesz. Ez azt a jelenséget feltételezi, hogy a zongora kalapácsának fején lévő filcszerű anyag merevsége a húrral való összeütközés során, ahogyan összenyomódik, egyre nagyobb lesz.

A kézi megütés pontos leírására egy lehetséges eljárás, ha méréseket végzünk valamilyen erőmérő eszközzel. Erre a diplomatervezés során nem volt lehetőségem, a szakirodalomban pedig nem találtam olyan modellt, amely kifejezetten a tenyér mechanikai, rugalmassági tulajdonságait foglalná magába.

A fentiek miatt a modell alapja [9] kalapács modellje volt, melyet azonban kiegészítettem egy csillapítást reprezentáló taggal.

A modell elrendezését az alábbi stilizált ábrán ábrázoltam:



2.6. ábra A gerjesztés modell struktúrája

A membránt megütő test egy tömegpont, amely egy rugóval és egy csillapító taggal kapcsolódik a membránt reprezentáló tömegpontra. A kölcsönhatás eredményeképp a gerjesztő testben keletkező rezgésekkel nem foglalkozunk, mert ezek nem vesznek részt a hangkép kialakításában. Emiatt a kalapács/dobverő/kéz modellezhető egy tömegponttal. A membrán esetében azonban el kell döntenünk, hogy a kölcsönhatásban a membránt képviselő tömegpontot minek feleltetjük meg.

Tekinthetjük úgy, hogy a membrán egy adott pontját jelképezi, azt a pontot, ahol megütjük. Azonban a korábbiakban a membránt leíró egyenletnél a közelítések alkalmazásának egyik feltétele éppen az volt, hogy a membránt gerjesztő erők nem koncentrálódnak kis területre (tehát nem Dirac jellegűek a térben). Másrészt ez a

megközelítés a valóságnak sem felel meg, hiszen akár egy dobverő feje, akár egy tenyér vagy az ujjak nem egy diszkrét pontban érintkeznek a membránnal.

A fentiek miatt úgy döntöttem, a membránt a kölcsönhatásban reprezentáló tömegpont egy a megütés középpontja körüli körben lévő pontokat jelképezi.

A membrán és a dobverő/kéz közti erőhatást a következő egyenletekkel írtam le:

$$F_h(t) = K_h(z_h(t) - z_m(t))^{Ph} + C_h(v_h(t) - v_m(t)) \quad (2.26)$$

$$F_h(t) = -m_h \frac{d^2 z_h(t)}{dt^2} \quad (2.27)$$

ahol K_h , C_h , m_h a dobverő/kéz rugóállandója, csillapítási tényezője, valamint tömege, z_m , z_h , v_m és v_h pedig a dobverő/kéz és a membrán tömegpont pozíciója illetve sebessége.

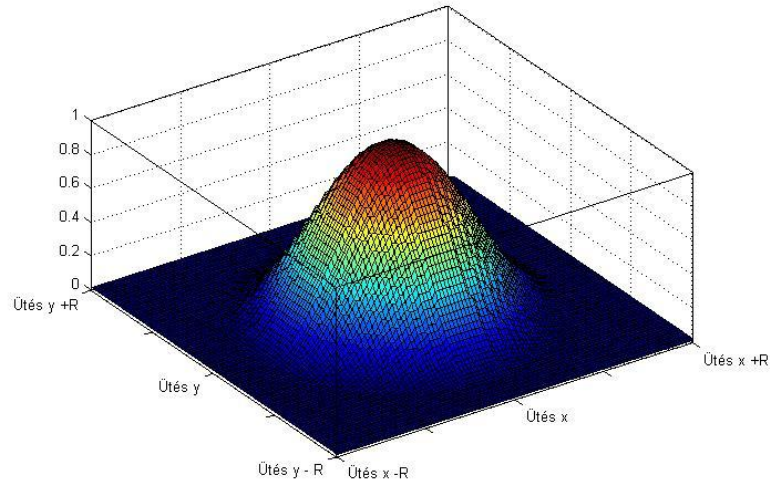
A Hooke törvénynek megfelelően a rugóállandó és a rugó összenyomódásának (a kéz/dobverő és a membrán tömegpont vertikális helyzete közti különbség) szorzata megadja az összenyomás miatt kifelé mutató erőt. A rugóállandó a korábbiakban már említetteknek megfelelően nemlineáris, ezt a Ph exponens képviseli.

A csillapítást a dobverő/kéz és a membrán sebességkülönbsége határozza meg, ahogy az általában a csillapítást okozó fizikai jelenségeknél (súrlódás, viszkozitás) történik.

A második egyenlet Newton második törvénye, melyből kiszámíthatjuk a dobverő/kéz és a membrán között fellépő erőből a gerjesztő test gyorsulását.

F_h segítségével a (2.14) képlettel számíthatjuk a módusokat reprezentáló szűrők bemenetét. A korábbiakban említésre került, hogy a membrán tömegpont a membrán egy adott körben lévő pontjait reprezentálja. Így F_h az ebben a körben lévő pontokra egyaránt hat, az integrálást pedig ezen a kör alakú felületen kell elvégezni. F_h -t nem tekintjük konstansnak a megütés körének felületén.

A valóságban a dobverő/kéz és a membrán között ható erő az ütésfelület középpontjától távolodva csökken. Ezt úgy vettem figyelembe, hogy F_h -t egy térbeli Hanning ablakkal súlyozom, mielőtt az integrálás megtörténne.



2.7. ábra Az erő eloszlása az ütés középpontjának környezetében

Az előzőeknek megfelelően a membrán tömegpont vertikális pozícióját képviselő z_m is a körön belüli membrán pontok közös jellemzője. Mégpedig a körön belüli membrán kitérések átlaga:

$$z_m(t) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^2 \hat{z}_{m,n,i} \frac{\int_0^R \int_0^{2\pi} K_{m,n,i}(r, \varphi) r dr d\varphi}{\pi R^2 \|K_{m,n,i}(r, \varphi)\|_2^2} \quad (2.28)$$

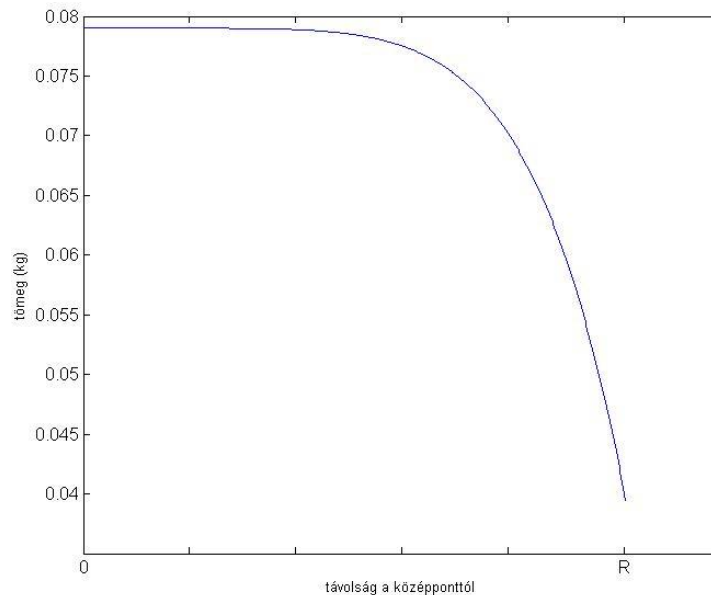
ahol R az ütőfelület sugara. A modellben való használathoz a kölcsönhatás számításához használt egyenleteket szintén diszkrétizálnunk kell. Ehhez ismét az impulzus-invariáns transzformációt alkalmaztam. A (2.26) képlet felírása ekkor mindössze a folytonos idő változó diszkrétre történő kicseréléséből áll. A Newton törvény diszkrét alakja, a dobverő/kéz kitérésére felírva pedig:

$$z_h[n] = -F_h[n] \frac{1}{m_h} \left(\frac{1}{f_s} \frac{1}{1 - z^{-1}} \right)^2 z^{-1} \quad (2.29)$$

Mivel elsősorban a kézi megütés szimulálására törekedtem, a modellbe további kiegészítéseket tettem. Ha egy dobót a tenyerünkkel ütünk meg, a dobbőr szélén kisebb felületen vagyunk képesek érintkezni a membránnal, tenyerünk egy része „lelóg”, vagy csak az ujjainkkal érintjük. Ennek modellezésére a gerjesztés modell néhány paramétere változik a megütés helyének függvényében. Egyrészt a megütés felületének körét, amelyhez a membránt képviselő tömegpont tartozik, csökkentem. Másrészt csökkentem

a kézhez tartozó tömeg értékét is. A rugóállandót növelem. Úgy veszem, amikor a szélén ütjük meg a dobot, azt egy kisebb felületen, csak az ujjainkkal tudjuk megütni, kisebb tömeggel, viszont nagyobb keménységgel.

Mindhárom esetben a membrán középpontjától való távolság nemlineáris (hatodik hatvány) függvénye a csökkenés, illetve a növekedés mértéke. A tömeg a felére csökken, míg a rugóállandó másfélszeresére nő.

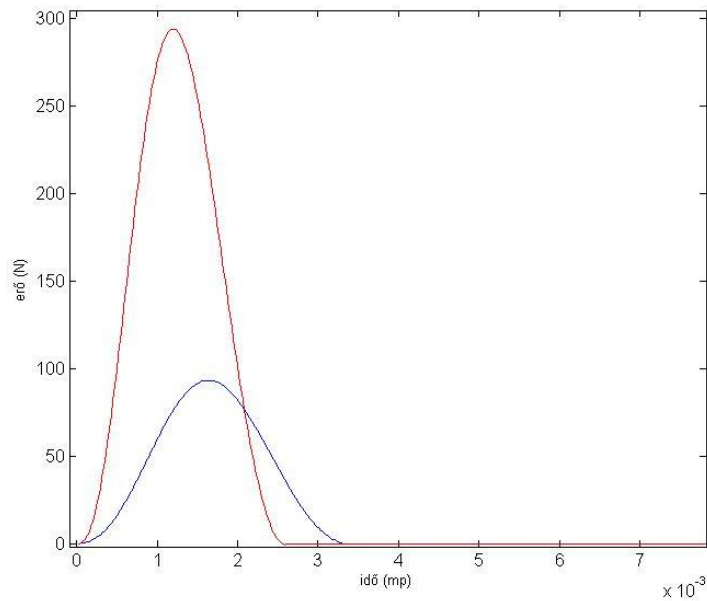


2.8. ábra A kéz tömegének nemlineáris csökkenése

Az itt leírt modellt annak tükrében készítettem, hogy a modell bemenetétül szolgáló vezérlő felület mindössze a megütés helyét, illetve egy az erősségéhez rendelt mérőszámot tud szolgáltatni. A vezérlőfelületről szóló fejezetben részletesen szó esik ennek okairól.

Abban az esetben, ha a gerjesztésről részletesebb képünk lenne, a vezérlés nem csak egy térbeli pontra szolgáltatna információt, az itt bemutatottnál szofisztikáltabb modell készítésére is lehetőség nyílna. Például a membrán ebben az esetben több tömegponttal modellezhetnénk a tömeg-rugó-csillapítás modellben.

Az alábbi ábrán a megvalósított modellből származó erőalakok láthatóak. Egy nagyobb (piros vonal), valamint egy kisebb (kék vonal) kezdősebességű kalapács esetét ábrázoltam. A korábbi, mérésből származó ábrával összevetve megállapítható, hogy a gerjesztés modell az ottanihoz hasonló erőalakokat szolgáltat.



2.9. ábra A dobverő/kéz és a membrán között ható erő a gerjesztés modell által számítva

2.3. A dobttest modellje

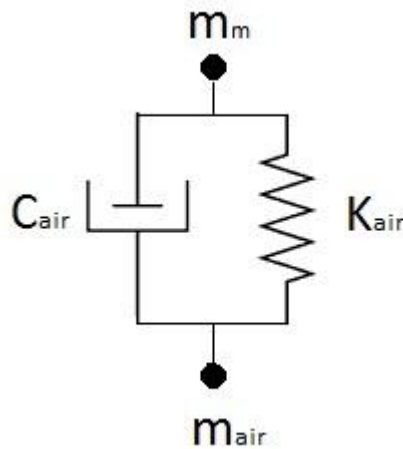
Az 1.2 fejezetben áttekintettem az általában használatos dobttest struktúrákat. Közülük (a három eset: a levegő üreget teljesen körülzáró test, a test egy másik membránnal közösen zárja be a levegőt, egyik végén szabad test) a modellben az egyik végén nyílt dobttest struktúrát valósítottam meg. Úgy ítélt meg, ez jobban megfelel annak a követelménynek, hogy minél változatosabb dobhangok keltésére legyen alkalmas a modell.

A dobttest formáját (alakját) nehezen lehet paraméterként vezetni egy modellbe, ezért egy konkrét forma kiválasztása mellett kell a modellt megalkotni. Zárt dobttest esetén a test formája (a méretei mellett) még annál is jobban meghatározza a hangszer hangját, mint a szabadon hagyott végű, vagy membránnal zárt test esetében teszi.

A gerjesztés modellhez hasonlóan itt is a tömegpont-rugó-csillapítás modellt alkalmaztam a membrán és a dobttest által közrefogott levegő kapcsolatának leírásához. A dobttest anyagával, a testben keltett rezgésekkel nem foglalkoztam, az 1.2 fejezetben leírtakat figyelembe véve elhanyagoltam ennek hatását.

A dobttest formáját hengernek választottam, melynek fedőlapja a cirkuláris membrán. A test által bezárt levegőoszlopot egy a membránhoz egy rugóval és egy csillapító taggal csatlakozó tömegpontként modelleztem. Ez úgy képzelhető el, hogy a levegőoszlop a membrán mozgásának hatására, mint egy dugattyú mozog a testben. Az üreg falával és a membránnal való súrlódás, valamint a belső viszkozitás következtében a légdugattyú

veszít a mozgási energiájából, ezt modellezi a csillapító tag. A rendszer egy csillapított oszcillátornak tekinthető. Az alábbi ábrán a modell struktúrája látható.



2.10. ábra A dobtest modelljének struktúrája

A membrán mozgásának hatására a levegőoszlop minden kis elemi térfogata egyrészt fel-alá mozog, másrészt összenyomódik. Ezt a valójában elosztott paraméterű rendszert (a levegőoszlopot) tehát egy koncentrált paraméterű rendszerrel modellezem. A tömegpont képviseli a légoszlop tehetetlenségét, míg a rugó a sűrítetőségét.

Többféle lehetőség adódik a paraméterek számítására. Az egyik, hogy az egész légoszlopot (dugattyú) tömegpontnak tekintem, ebben az esetben a rugóállandóra és a csillapító tagra nincs modellem, azokat heurisztikusan kell megválasztanom, esetleg paraméterként a felhasználó kezébe adnom.

A másik lehetőség, hogy a levegőoszlop egyik részét tömegpontnak, másik részét rugónak (és csillapító tagnak) tekintem. Levegőoszlop rugóállandójának megállapítására létezik kidolgozott módszer [13]:

$$K_{\text{levegő}} = \frac{\gamma P_a S}{L} \quad (2.30)$$

ahol S a henger fedőlapjának területe, L a légoszlop hossza, P_a légoszlopban fennálló légnyomás (ez esetben az atmoszférikus légnyomás), míg γ az adiabatikus gázállandó. A levegő tömegpontnak tekintett részének tömege számítható a térfogatából, valamint tömegsűrűségéből. A 20 Celsius fokok, száraz levegő tömegsűrűsége [14]:

$$\rho = 1.2041 \frac{kg}{m^3} \quad (2.31)$$

Ekkor a kérdés az, hogy a légoszlop mekkora hányadát tekintjük rugónak és mekkorát tömegpontnak. Mivel a cél nem egy konkrét dobtest fizikai modelljének létrehozása, ezt az arányt, mint paramétert a felhasználó kezébe adhatjuk. Valójában emiatt akár a tömeg-rugó-csillapítás rendszer mindegyik paraméterét szabadon hagyhatjuk a felhasználónak. Erre további okot ad, hogy a veszteségeket reprezentáló csillapítási tényező megállapítására nincs modellünk⁴.

A modellben a membránt képviselő tömegpont [3] alapján ezúttal a teljes membrán felületére vett átlagkitérés tömege. Az átlagkitérés a gerjesztés modellben már alkalmazott (2.28) képlettel számolhatjuk, ezúttal a membrán teljes felületén kell integrálnunk. A membrán és a levegő tömegpont között ható erő:

$$F_{air}(t) = K_{air}(z_{air}(t) - z_m(t)) + C_{air}(v_{air}(t) - v_m(t)) \quad (2.32)$$

$$F_{air}(t) = -m_{air} \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \quad (2.33)$$

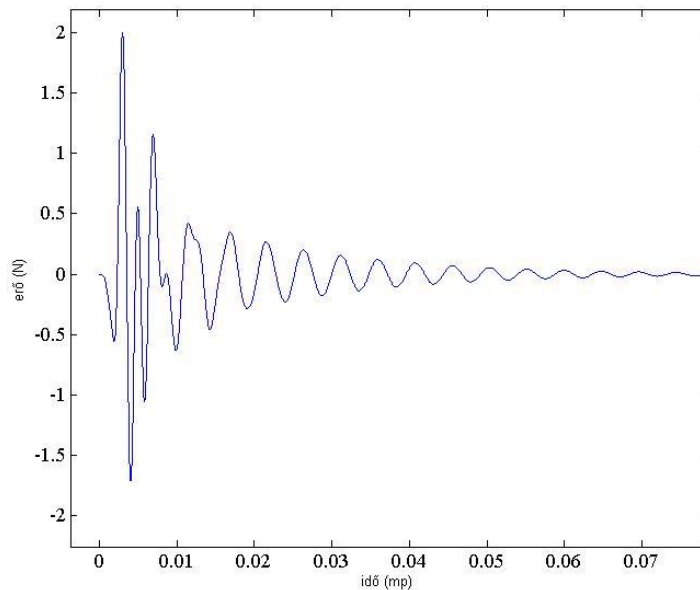
A membrán és a légoszlop között ható erőből a módusra eső gerjesztést a (2.14) képlet szerint számolhatjuk, azonban az erő ezúttal egyenletesen oszlik el a membránon, nem függ a helytől, így kihozható az integrálás elé:

$$f_{m,n,i}^{(air)}(t) = \frac{F_{air}(t)}{S} \int_0^R \int_0^{2\pi} K_{m,n,i}(r, \varphi) r dr d\varphi \quad (2.34)$$

A modell egyenleteit a korábban már bemutatott módon itt is az impulzus-invariáns transzformációval diszkretizáltam.

Az alábbi ábrán a membrán (az átlagkitérésének helyzetében lévő tömegpont) és a légoszlop között ható erőt ábrázoltam egy tipikus esetben:

⁴ [19] alapján a levegőoszlop viszkozus állandóját kiszámolva a veszteségeket a levegő viszkozus csillapításával próbáltam modellezni, ez a megközelítés azonban nem adott valóságos eredményeket.



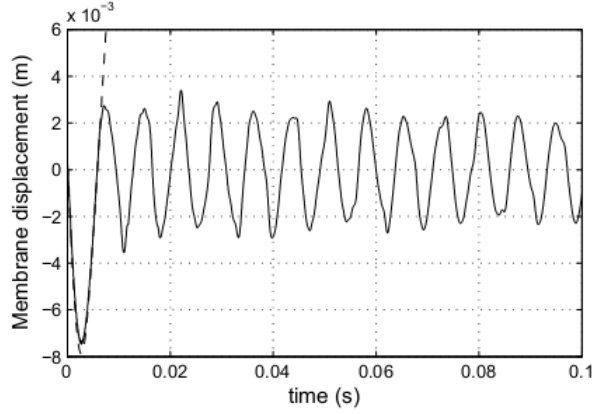
2.11. ábra Membrán és a levegőoszlop közötti erőhatás időfüggvénye

2.4. Membrán-feszültség moduláció

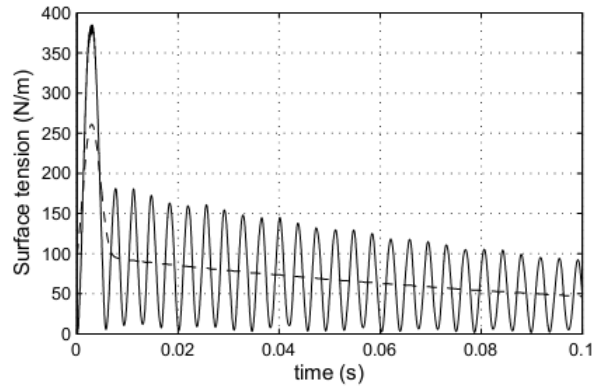
Kellően nagy amplitúdójú rezgések mellett a membrán viselkedése nemlineárisává válik a membránfeszültség megváltozása miatt [15]. Bizonyos membrános ütőhangszereknél (például a hagyományos könnyűzenei dob szettek tamtamjai) ez jelentősen megváltoztatja a hangzást, érdemes lehet tehát beépíteni a modellbe.

A dobmodellben korábban azzal a feltételezéssel éltünk (kimondatlanul), hogy a membrán területe változatlan. Nagy amplitúdójú kitéréseknél a közelítés nem engedhető meg. A nagy kilengés hatására megnövekedett membrán felület hatása abban nyilvánul meg, hogy megnövekszik a feszültség a membránban. Általában a membrán megütés utáni kezdeti kitérése egy magas csúcs, amely után a kitérés amplitúdója fokozatosan csökken. Ekkor a membránfeszültség a megütés pillanatában felvesz egy kiugró értéket, majd a kitéréshez hasonlóan csökkenő amplitúdóval oszcillál. Ezt a (2.12) ábrán ábrázoltam.

Ez a dob hangjában egy hirtelen hangmagasság-esésként érzékelhető, tehát a megütés pillanatában hallott hangmagasság hirtelen lecsökken és beáll egy állandónak érzékelt szintre. Ez a hatás nem mindig van jelen a dobok hangjában, pontosabban nem mindig érzékelhető. Ehhez kellően nagy erősségű ütés és megfelelő paraméterű dob szükséges. Érdemes lehet azonban a modellt ezzel a hatással valóságosabbá, színesebbé tenni.



(a)



(b)

2.12. ábra Membrán kitérés és a tőle függő membrán feszültség [15]

A membránfeszültség és a membrán kitérés függésének leírására létezik pontos matematikai leírás [15] (a membrán kitérés alatt a középpont kitérését értik ez esetben):

$$T_{NL}(z) = \frac{Eh}{2\pi R^2(1-\vartheta^2)} \int_0^R \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{\partial z}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial z}{\partial \varphi} \right)^2 \right] r dr d\varphi \quad (2.35)$$

Ezt a (2.1) membránegyenletben

$$T = T_0 + T_{NL}(z) \quad (2.36)$$

behelyettesítéssel tudjuk számításba venni (T_0 a nyugalmi feszültség). A membránfeszültség nemlineáris részének (T_{NL}) a fenti módon történő számítása azonban rendkívül számításigényes. A [15]-ben kidolgozott eljárás alapján a membránfeszültség nemlinearitásának hatása hatékony módon építhető a membrán modellbe. Az ebben vázolt megoldást alkalmaztam a dobmodellben, a szakaszban bemutatott egyenletek, levezetések [15]-ből, valamint [16]-ből származnak. A nemlineáris feszültség tag

felírható egy kvázistatikus komponens és egy gyorsan oszcilláló komponens összegeként. A javasolt közelítés lényege, hogy a jelenséget a kvázistatikus taggal közelítsük, elhanyagolva a másik tagot. A kvázistatikus tag a nemlineáris feszültség rövid időre vett átlagának tekinthető. A (2.12) szaggatott vonallal rajzolva látható a kvázistatikus komponens.

A közelítés használatával jól szimulálható a jelenség hatása. A közelítés haszna, hogy a kvázistatikus tag felírható a membrán energiájának lineáris függvényeként, a membrán energiáját pedig nagyságrendekkel kevesebb számításigény mellett kalkulálhatjuk.

A membránfeszültség nyugalmi feszültséghez adódó részét a következő kifejezéssel közelítjük:

$$T_{qs}(t) = \frac{Qh}{2\pi R^2(1 - \vartheta^2)T_0} E_m(t) \quad (2.37)$$

Az egyenletben a hányados számlálójában Q -val a membrán Young modulusát jelöltük, míg E_m a membrán pillanatnyi energiáját jelenti.

A [16] által bevezetett módszert alkalmaztam a membrán energiájának számítására. E szerint a membrán energiája a következő képlettel közelíthető:

$$E[n] = \Delta E[n] + gE[n - 1] \quad (2.38)$$

ahol ΔE a membránnak a gerjesztés által adott pillanatban átadott energia. Az összeg második tagja egy exponenciálisan (g értéke 0 és 1 közötti) lecsengő komponens. A membrán megütése által a rendszerbe injektált energia a ΔE tag révén jelenik meg az energiában, majd a gerjesztés eltűnése után a második tag dominál, így $E[n]$ felveszi azt az alakot, melyet T_{qs} a (2.12) ábra szerint. E és T_{qs} között, ahogy a (2.37) képlet is mutatja, csak skálázás történik, tehát ha az $E[n]$ időfüggvénye helyes, a közelítésünk jó. Az energia-megmaradás törvényének értelmében:

$$E_h + E_m + W = 0 \quad (2.39)$$

A gerjesztő test energiájának (E_h) egyik része átadódik a membránnak (E_m), másik része a csillapító tagon hővé alakul (W). A gerjesztés modellről szóló szakaszban szerepelt a membrán és a gerjesztő test közötti erőhatást leíró egyenlet (2.26), mely alapján leírható a dobverő/kéz energiája a membránnal való kontaktus alatt. A kalapács

energiájának kiszámolására a következő képletet használtam (annak diszkretizálása után):

$$E_h(t) = \frac{1}{2} m_h \dot{z}_h(t)^2 + K_h \frac{(z_h(t) - z_m(t))^{P_h+1}}{P_h + 1} \quad (2.40)$$

T_{qs} számítása tehát: először meghatározzuk a kalapács energiáját, majd annak megváltozása (a csillapításon elvesztett energiával csökkentve) adja a membrán energia növekményét:

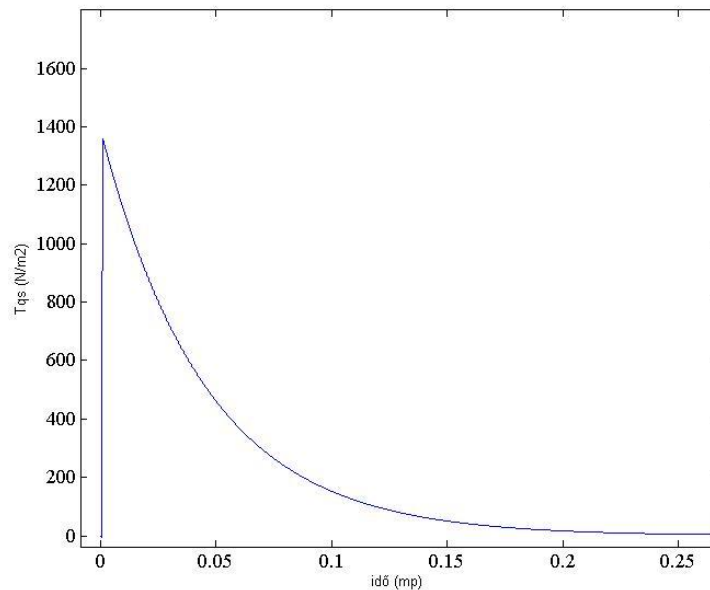
$$\Delta E[n] = -(E_h[n] - E_h[n-1]) - \Delta W \quad (2.41)$$

$$\Delta W = C_h((z_h(t) - z_m(t)) - (z_h(t-1) - z_m(t-1))) * (v_h(t) - v_m(t)) \quad (2.42)$$

A (2.42) egyenletben a csillapító tagon disszipálódó energiát a tag és a membrán között ható erőnek a mozgás mentén vett integráljának (a munka definíciója) téglányösszegével közelítem.

A fenti két képletet a (2.38) egyenletben felhasználva megkapjuk a membrán energia becslését, abból pedig (2.37) segítségével a járulékos membránfeszültség közelítését.

Az alábbi ábrán a megvalósított modellel számított T_{qs} egy jellegzetes alakját ábrázoltam nagy amplitúdójú gerjesztés esetén:



2.13. ábra A járulékos membránfeszültség jellegzetes alakja

2.5. A modell kimenetéről

A bemutatott modell kimenetként a membrán bármely pontjának kitérését szolgáltatja. Nem esett szó korábban azonban arról, hogyan alakul ki a membrán kitéréséből az a jel, amely a hangkártya bemenetére kerül.

A precíz megoldás azt követelné meg, hogy a membrán kitérésék és a levegőben keletkező hanghullámok közötti összefüggésre leírást adjunk. Ekkor valamilyen modellt kellene, hogy alkossunk a membránra, mint hangsugárzóra.

A problémára egy vázlatos megközelítést mutat be [1, p. 598]. E szerint az egyes módusokat, mint különböző monopol, dipol, quadropol, stb. sugárzóként kell kezelni, és az ilyen típusú sugárzókra kidolgozott egyenletekből számolhatjuk, hogy a hallgató pozíciójába mekkora hangteljesítményt juttatnak el.

Pontos modell felépítése igen bonyolult feladat lehet, akár nagy számításigénnyel. Továbbá erősen függ a dobtest felépítésétől is. Egy zárt testű dobra másik modell érvényes, mint egy nyitottra [1, p. 184].

A fentiek tükrében, valamint figyelembe véve, hogy a modellnek nem célja egy adott hallgatópozícióbeli érzet rekonstrukciója, a sugárzásra a következő egyszerű modellt alkottam.

A membrán egy-egy pontjában számított kitérés időfüggvénye önmagában kielégítő, dobszerű hangot produkál. Így néhány alkalmasan megválasztott pont kitérésének kombinációja alkalmas lehet a modell kimenetének. A membrán egyes pontjait, mint

különálló sugárzókat modelleztem, melyek a hallgatótól egyenlő távolságra vannak. A hallgató pozíciójában ezért kitéréseik átlagát tekintettem a membrán hangjának. Ennek az átlagkitérésnek, valamint a levegőoszlop, mint tömegpont kitérésének az összege adja a dobmodell kimenetét. Ez az egyszerű modell durva közelítés, azonban megfelelő eredményt produkál, és gyakran alkalmazzák [1, p. 171].

2.6. Paraméterek

A modell bemutatása után ebben a szakaszban a modell paraméterezését ismertetem. A célkitűzés olyan program implementálása volt, amely fizikai tartalommal bíró paraméterekkel rendelkezik, amelyeket a felhasználó könnyen tud kezelni.

A (2.1) egyenletben szereplő, a membrán mozgását leíró egyenlet minden paramétere elérhető a felhasználó számára. A membrán mérete (sugara, vastagsága), a membrán feszültsége, tömegsűrűsége, valamint a membrán merevségét meghatározó tagok (rugóállandó, Poisson tényező) közvetlenül befolyásolhatóak a felhasználó által. Ezek együttese határozza meg a módusfrekvenciákat. A membrán által keltett hangmagasságérzetet elsősorban a membrán feszültségének, a membrán sugarának, valamint tömegének változtatásával tudjuk befolyásolni.

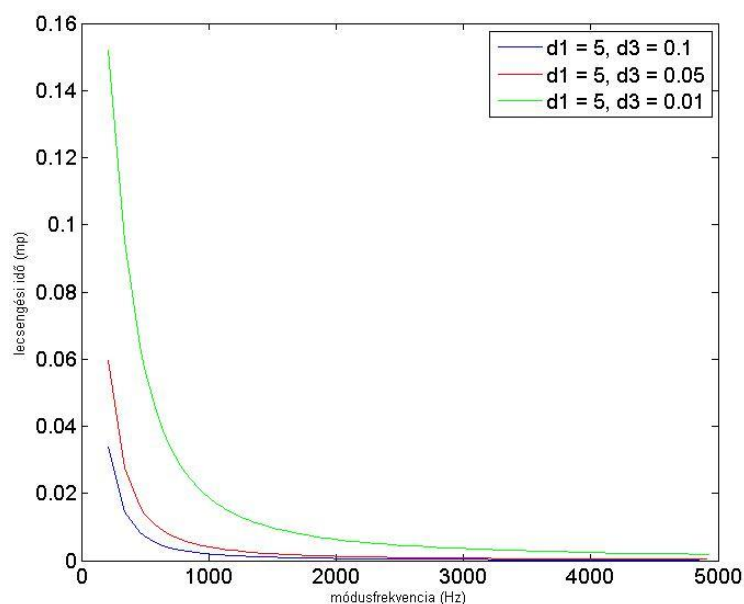
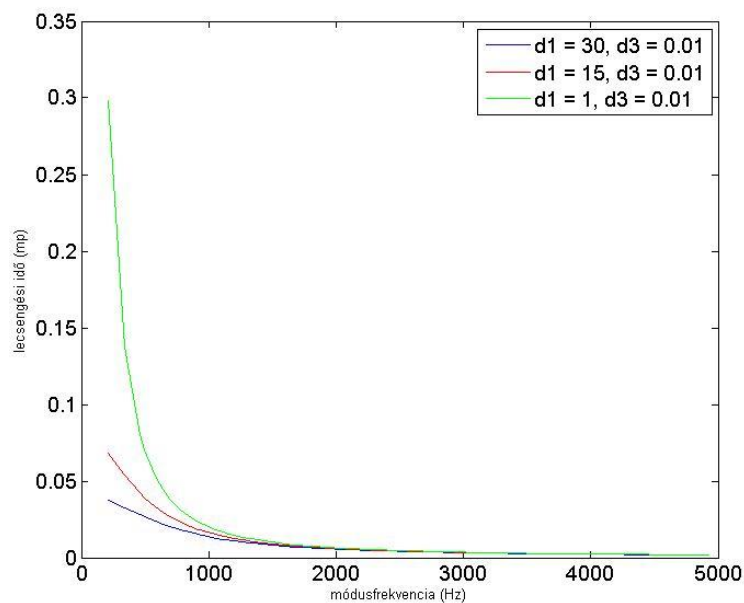
Az ütőfelület nagysága a modellben állandó, a membrán közepén egy 5 cm átmérőjű kör. A sugár állításával így a felület és a teljes membránfelület aránya állítható.

A korábbiakban nem esett szó a membrán veszteségeit szimbolizáló d_1 és d_3 együtthatók értékéről. Ezek dimenzió nélküli állandók.

$$2\alpha_{m,n,i} = \frac{1}{\sigma} \left[d_1 + d_3 \left(\frac{\mu_{m,n}^2}{R} \right) \right] \quad (2.16)$$

$$\tau_{m,n,i} = \frac{1}{\alpha_{m,n,i}} \quad (2.19)$$

A korábban már ismertett (2.16) és (2.19) képletek írják le a módusok lecsengési idejének frekvenciafüggését. A 2.14-es ábrán ábrázoltam néhány tipikus érték mellett a lecsengéseket.



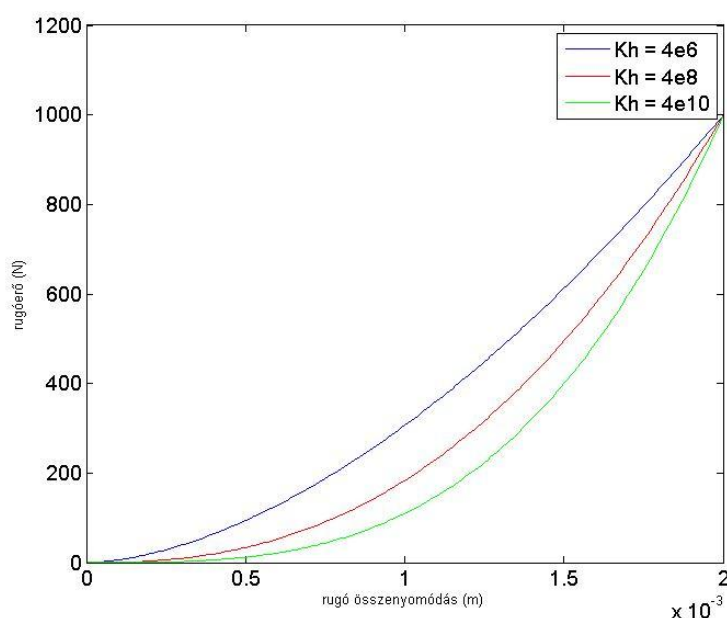
2.14. ábra A lecsengési idők frekvenciafüggése

A paraméterek közül d_1 a módusfrekvenciáktól független, míg d_3 a frekvenciafüggő lecsengést állítja be. Minél nagyobb d_3 értéke, a módusok lecsengései annál inkább frekvenciafüggőek lesznek, a nagyobb frekvenciákhoz tartozó módusok gyorsabban csengenek le. Alacsony frekvencián inkább d_1 , míg magasabb frekvenciákon inkább d_3 határozza meg a lecsengést.

A gerjesztésmodellben a dobverő/kéz tömege, valamint rugóállandója állítható. A rugóállandó nemlineáris, a (2.26) egyenletben a rugóerőt P_h exponenssel együtt határozza meg:

$$F_h = K_h(\Delta z)^{P_h} \quad (2.43)$$

A modellt úgy valósítottam meg, hogy a rugóállandó változtatásával a hatványgörbe alakja legyen változtatható, azaz a megadott K_h -ből P_h -t úgy számítom, hogy egy feltételezett maximális rugó-összenyomódáshoz ugyanaz az erőérték tartozzon (a feltételezett maximális erőérték). Ezáltal a felhasználó azt tudja befolyásolni, az összenyomódáskor a rugóerő mennyire hirtelen növekedjen meg. Az illesztés pontja, azaz a maximális erőérték, szintén állítható. Állítható továbbá a kalapács, azaz a dobverő/kéz csillapítási együtthatója is.



2.15. ábra A kalapács rugóerő meredeksége állítható

A dobtest rezonátor modelljét úgy állítottam be, hogy az az arány, amely azt határozza meg, hogy a légoszlop térfogatának mekkora része rugó és mekkora tömegpont, fix (0.5). A felhasználó a dobtest rezonancia-frekvenciáját, valamint lecsengési idejét állíthatja (azt az időt, amely alatt az amplitúdó e-ed részére csökken), a légoszlop rugóállandóját, valamint csillapítási tényezőt a modell ezekből számolja. Azért döntöttem emellett, mert a dobtest modellje kevésbé egzakt fizikai leírás alapul, a felhasználó számára így egyszerűbb közvetlenül beállítani a kívánt hatást.

A felhasználó számára állítható a membrán-feszültség moduláció g paramétere is. Ezzel azt tudja meghatározni, a nagy amplitúdójú gerjesztés hangmagasság növelő hatása milyen gyorsan csengjen le.

Az alábbi táblázatban a paraméterek egy-egy tipikus értékét adtam meg. A táblázatban a membránra vonatkozó értékek a Mylar anyagú dobbröhöz tartozó értékek, a többi paraméter egy-egy tipikus érték, amely mellett kielégítő, dobszerű hangzás áll elő.

Paraméter	Jellemző érték	Mértékegység
Membrán sugár	0.13	m
Membrán vastagság	0.0005	m
Membrán tömegsűrűség	0.6217	kg/m ²
Membrán rugóállandó	4e9	Pa
Membrán Poisson tényező	0.38	-
Membrán feszültség	3500	N/m ²
Membrán d1	5	-
Membrán d3	0.02	-
Kéz tömeg	0.29	kg
Kéz rugóállandó	4e7	Pa
Kéz maximális erő	1000	N
Kéz csillapítási tényező	1.4	sec
Dobtest rezonancia frekvencia	200	Hz
Dobtest lecsengési idő	0.4	sec
Feszültség moduláció g	0.9995	-

2.2. táblázat Jellemző paraméter értékek

2.7. Összegzés, a modell értékelése

A szakirodalom felhasználásával Matlabban fizikai alapokon nyugvó, modális szintézist alkalmazó dobmodellt implementáltam. A cirkuláris membrán modellje az egzakt (az ismerttetett közelítések mellett) fizikai leírason alapul. A gerjesztés modelljének alapjául a [9]-beli zongorahang szintézishez alkalmazott kalapács modell szolgált, ezt kiegészítettem a csillapítást modellező taggal. A gerjesztés modellje absztrakt modell, amely megkísérli releváns fizikai paraméterekkel leírni a gerjesztés mechanizmusát. A modell kimenete, a membrán és a gerjesztő test között ható erőalak a szakirodalomban fellelhető méréseknek megfelelő eredményt ad. A gerjesztésmodell hiányossága, hogy paraméterei, valamint struktúrája intuitív módon kerültek megalkotásra. A tényér, mint

ütőfelület mechanikájának pontos fizikai leírása alapul szolgálhat egy pontosabb gerjesztésmodell megalkotásához.

A dobtest hatását a gerjesztéshez hasonlóan egy absztrakt, tömeg-rugó-csillapítás rendszerrel modelleztem. A szakirodalomban találhatunk eljárásokat konkrét hangszerek esetén a test által közrefogott levegő hatásának figyelembevételére (effektív tömeg, effektív merevség képletek [1, p. 587]), azonban ezek a levezetések nem univerzálisak, az adott dob struktúrára érvényesek. Mivel a cél egy univerzális modell létrehozása volt, ezért inkább az intuitív, absztrakt megvalósítást választottam (az egyik végén nyílt dobtest esetére), amely könnyen bővíthető a kétfelmembrános, esetleg a zárt dobtest esetére.

A modell kimenetét a membrán kitérések lineáris kombinációjából állítottam elő.

A CD mellékleten található egy Matlab GUI, amellyel a modellt, a paraméterek változtatása kipróbálható, valamint a membrán kitérés, illetve a kimenet spektruma kirajzolható.

3. A modell vezérléséről

Ebben a fejezetben bemutatom, milyen megoldásokat alkalmaztam a modell vezérlésének előállítására.

A dobmodellről szóló fejezet ismertette a gerjesztés modelljét. Ebben említettem, hogy a gerjesztés leírására meglehetősen pontos megoldást adna egy az ütőfelületre szerelt nyomásérzékelő hálózat⁵. Ebben az esetben gerjesztés modellre nem is volna szükség, a mérőeszköz által szolgáltatott erőalakokból közvetlenül tudnánk számítani a módusok bemenetét.

Ilyen mérőeszköz beszerzésére azonban nem volt lehetőségem, ez az elkészült eszköz felhasználói körét is jelentősen leszűkítené. Ezért az ütőfelület bemikrofonozásával, a mikrofon(ok) által szolgáltatott jelből állítottam elő vezérlő jeleket a modell számára.

A vezérlési információt előállító algoritmusnak képesnek kell lennie arra, hogy az ütőfelület megütésének tényéről, az ütés erősségéről, valamint a megütés pozíciójáról képet adjon. Ezért az ütőfelületnek olyannak kell lennie, hogy a hangjából minél könnyebben lehessen következtetni a fentiekre. Az ütés pozíciójának megállapításához szükséges, hogy az ütőfelület másképpen szóljon a különböző helyeken megütve.

Az ütőfelületet keresztapám készítette el számomra, aki faszobrász végzettségű. Az elkészült eszköz az alábbi fényképeken látható.



3.1. ábra Az ütőfelület

Anyaga préslemez, átmérője 25 cm, magassága 5 cm. A bal oldali képen az ütésre szolgáló felület, a jobb oldalin az eszköz alja van felül. Az eszköz üreges, az alján lévő

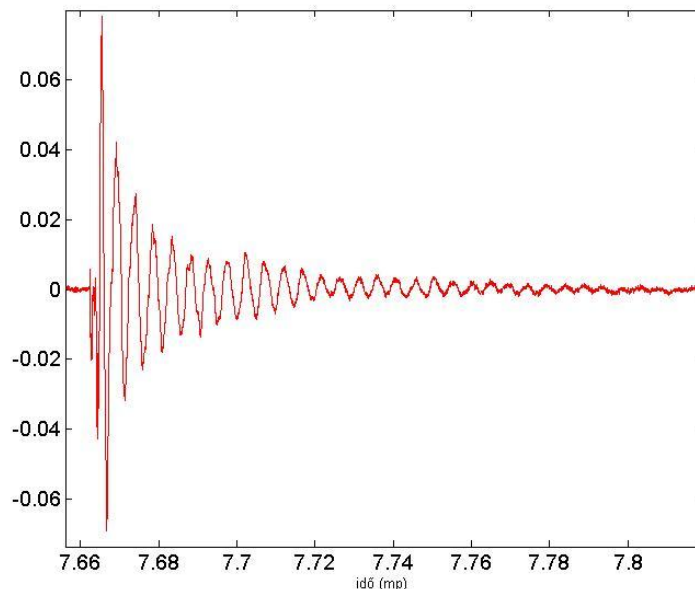
⁵ Használható lenne rezgésmérő, gyorsulásmérő is.

lyuk annak reményében került rá, hogy Helmholtz rezonátorként funkcionálva egy rezonanciát hoz létre, ami megkönnyíti az ütés pozíciójának megállapítását.

Az algoritmusok kidolgozásához hangfelvételeket készítettem az ütőfelületen történő játékról. A Matlab *wavread* parancsa segítségével vektorokba olvastam be a felvételeket, majd elemeztem őket.

3.1. Ütésdetektálás

Az első feladat az ütést detektáló algoritmusának elkészítése volt. Az alábbi ábrán látható egy felvétel egy megütésről (a felületet közepén ütöttem meg tenyérrel):



3.2. ábra Az ütőfelület (kézi) megütéséről készült felvétel időfüggvénye

Látható, hogy az eszköz hangja egy tranziens felfutó szakasz után egy csillapodó szinuszhoz hasonló módon lecseng. Megállapítható, hogy az ütések pillanatának meghatározása valamilyen csúcsetektáló algoritmus alkalmazható.

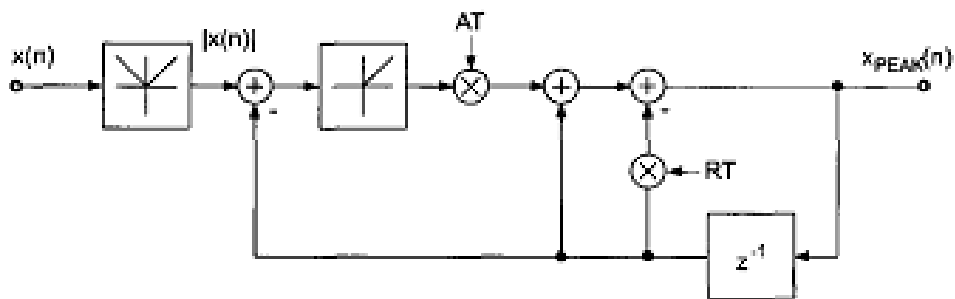
Fontos, hogy a játékról készült felvételben lokális csúcsokként megjelenő ütések az algoritmusnak valós időben kell jeleznie. Szintén fontos, hogy az ütésről megállapított vezérlési információnak az ütés után viszonylag rövid időn belül rendelkezésre kell állnia.

Az eszköz használhatatlan lenne, ha a felület megütése után a vezérlési információ, és emiatt a dobmodell által generált hang olyan hosszú idő után állna elő, hogy a felület megütését és a modell által generált hang megjelenését a felhasználó két külön eseményként érzékelné. Ahhoz, hogy a késlekedést ne érzékelje a zenész, és az eszköz

használható legyen, a dobmodell hangjának körülbelül 10-20 milliszekundumon belül meg kell jelennie az ütéshez képest [17].

A jelben tehát valós időben kell lokális csúcsokat detektálnunk, a jel rövid szakaszaiból. Az ábra alapján megállapítható az is, hogy fontos, hogy jól állítsuk be azt a szakaszt, amelyen belül a helyi maximumot keressük. Ha ez a szakasz túl rövid, egy ütés hangjában több csúcsot is találni fogunk, ha túl hosszú, egymás utáni ütéseknel a csak az egyiket fogjuk detektálni.

Zenei effektekben gyakran alkalmaznak úgynevezett burkolókövetőket, amelyek a jel burkológörbáját követik. Az ütésdetektáláshoz egy ilyen blokkot használtam fel. A felhasznált megoldás blokkvázlata [18]-ből:



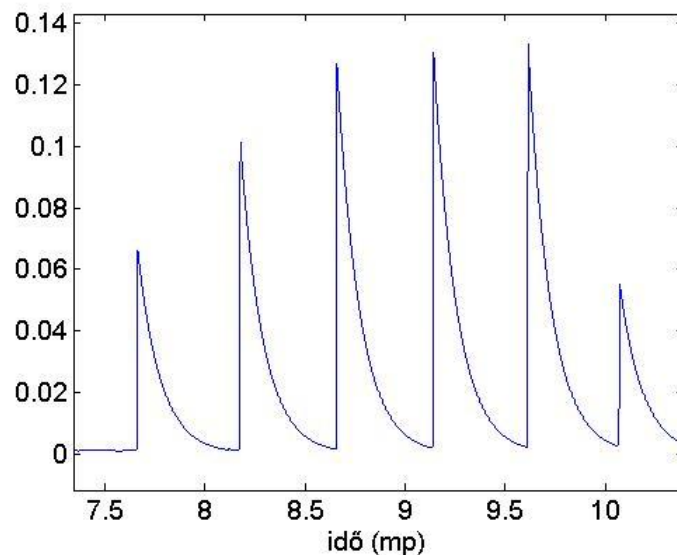
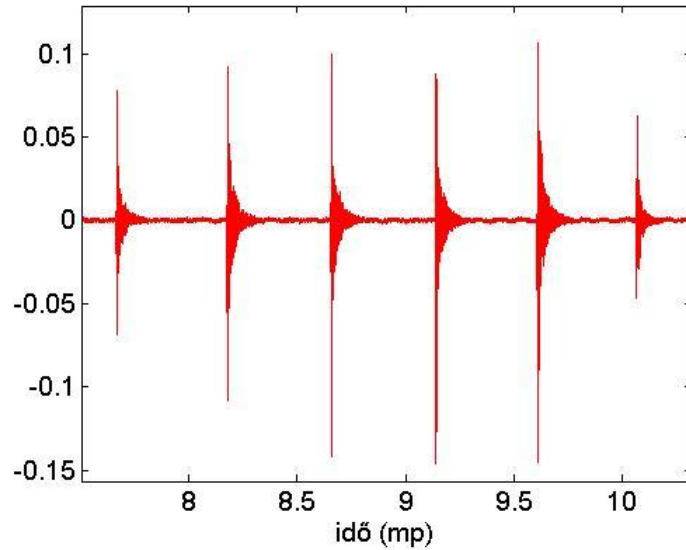
3.3. ábra Burkoló követő blokkvázlata

Rendszeregyenlete:

$$x_{peak}[n] = pos(abs(x[n] - x_{peak}[n - 1])) * AT + x_{peak}[n - 1] * (1 - RT) \quad (2.44)$$

Amennyiben a bemenő jel abszolút értéke nagyobb a kimenet (a burkoló) előző értékénél, azaz a jel felfutóban van, a kimenet követi a bemenetet. Ha a bemenő jel csökkenni kezd, azaz abszolút értéke kisebb a burkoló előző értékénél, a kimenet a burkoló előző értékének exponenciálisan csökkenő értéke, tehát nem követi a bemenetet, hanem lassan csökken. A két konstans tag, AT és RT szolgál az eszköz kalibrálására (AT a követés gyorsaságát, RT a csökkenés gyorsaságát állítja be).

Működését az alábbi ábrákkal szemléltetem:



3.4. ábra Felül: Hangfelvétel az ütésekről Alul: a burkolókövető kimenete

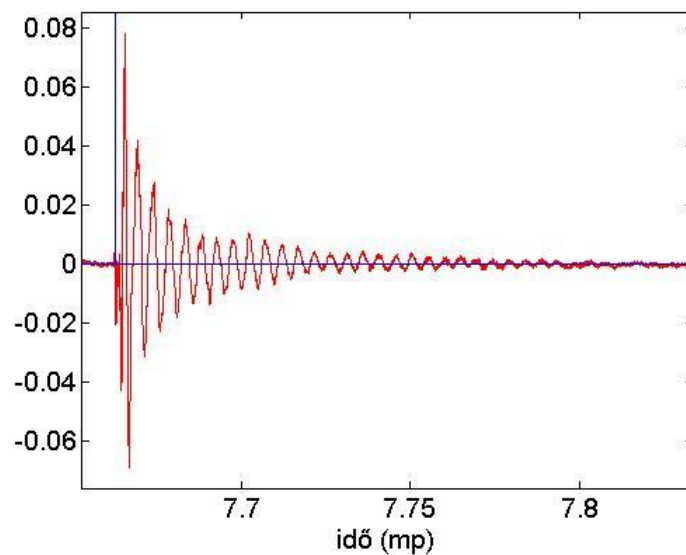
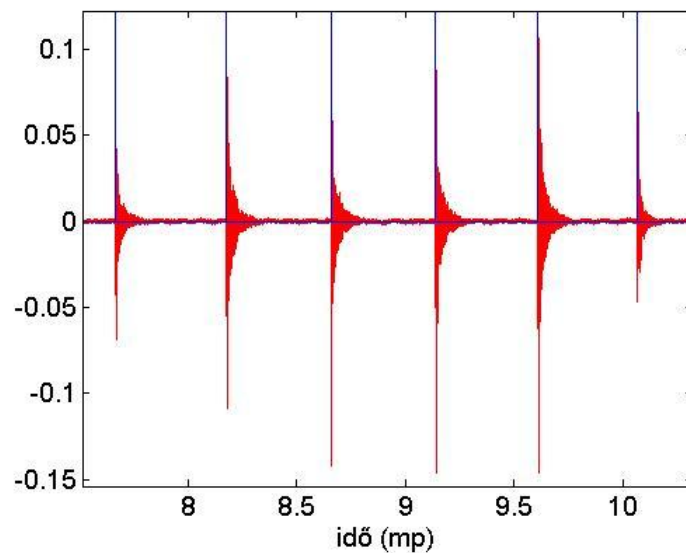
Az ábrákon látható esetben RT kicsi (0.0004), emiatt az elengedési idő igen rövid. A követés gyorsra van állítva ($AT=0.1$) Megfigyelhető, hogy az ütések helyén a burkolókövető hirtelen felfut, majd viszonylag gyorsan exponenciálisan lecseng, azaz „megtalálja” a csúcsokat.

A dobmodell bemenetként nem a fenti burkológörbére van szükségem, hanem azokon a pontokon, ahol annak hirtelen felfutásai vannak, az ütésdetektornak egy logikai jel, egy állapotváltozó értékét kell beállítania. Ezért az ütés tényét a burkoló deriváltjából állapítom meg.

Gyengébb erejű ütéseknel az ütésről készült felvétel, és így a burkológörbe meredeksége kisebb a felfutásnál, míg nagyobb erejű ütéseknel nagyobb. Így azzal,

hogy a derivált mely értékénél, azaz mekkora meredekségnél állítja be az algoritmus az állapotváltozót „ütés történt” értékre, a detektálás érzékenységét lehet beállítani.

Az alábbi ábrákon az ütésdetektáló algoritmus kimenetét és az ütésekről készült felvételt közösen ábrázoltam. Azokra a pontokra, ahol a detektáló „találatot” jelez, a detektáló kimeneteként egy 1-es értéket tettem (kék görbe).



3.5. ábra Az ütésdetektor kimenete

Látható, hogy a detektáló jól működik, az ütések megtalálja a jelben. A második ábrán az első ütést ábrázoltam közelebbről. Megfigyelhető, hogy az algoritmus – megfelelő kalibráció mellett – gyakorlatilag késleltetés nélkül szolgáltatja a kívánt eredményt.

3.2. Az ütés erősségének becslése

Az ütés érzékelésekor gerjeszthetjük a dobmodellt, ehhez azonban meg kell adnunk a modellnek, hol és milyen erősséggel ütjük meg a membránt. Az ütés erősségének meghatározására effektív érték számítást alkalmaztam.

A fejezet korábbi szakaszában írtam róla, hogy a modell késleltetésének 10-20 ms-nál kisebbnek kell lennie. Feltételezve, hogy a modell implementációjának számításigénye is okoz néhány ms késleltetést, úgy ítélem meg, a vezérlési információk kinyerését az ütés detektálása utáni maximum 10 ms mintáiból kell megoldanom. Ez azt jelenti, hogy például a zenei szoftverekben legáltalánosabb mintavételi frekvencia (44,1 kHz) mellett 441 mintából kell becslést adni mind az ütés erősségére, mind a pozíciójára. Ahogy a (3.2) ábrából is látszik, egy-egy ütés ennél akár jóval több idő alatt cseng le teljesen.

Az ábrából azonban az is látszik, hogy az ütés energiájának nagy része a kezdeti szakaszba koncentrálódik, így joggal feltételezhetjük, hogy annak energiájából következtethetünk a megütés energiájára.

A korábbiak alapján akár a burkoló csúcsaiból is becsülhetnénk az ütés erősségét, késleltetés nélkül, azonban az ütés pozíciójának detektálása lehetetlen késleltetés nélkül (egy minta késleltetéssel), a rendszerbe tehát mindenképpen bekerül némi csúszás.

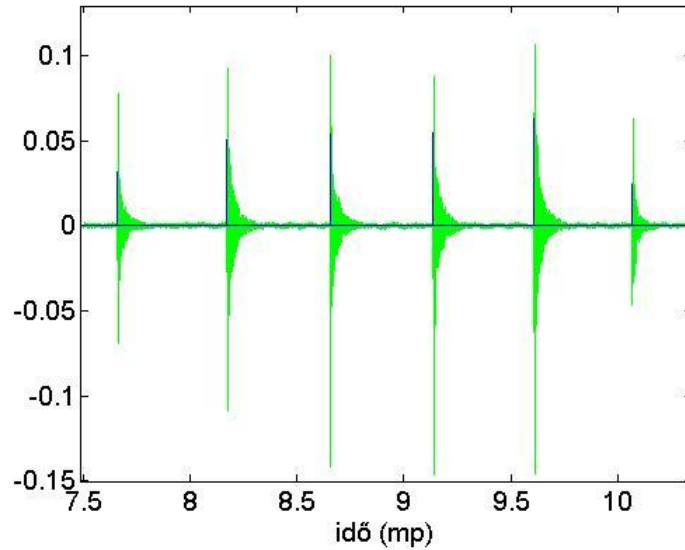
A fentiek miatt az ütés erősségének becslésére egyszerű megoldást választottam: az ütés utáni 10 ms-nyi minta effektív értékét számoltam a következő képlet szerint:

$$X_{rms}[n] = \frac{1}{\frac{fs}{100}} \sqrt{\sum_{p=0}^{\frac{fs}{100}-1} x[n-p]^2} \quad (2.45)$$

Az alábbi ábrán a (3.5) ábrával ellentétben a felvétel mintáira nem 1 értékű pontokat rajzoltam, hanem az effektív mérés értékét. Az RMS értéknek megfelelő kék vonal magassága láthatóan követi a szabad szemmel is becsülhető ütésenergiát.

A dobmodell bemenete a dobverő/kéz tömegpont mozgása. Az RMS értéket skálázom, majd a kapott érték lesz a gerjesztő test kezdősebessége. Amint a modellben a dobverő/kéz tömegpont a kezdősebesség hatására érintkezésbe lép a membránnal, elindul a szintézis folyamat.

Arra kell már csak választ adnunk, a membrán mely pontjával érintkezzen a gerjesztő tömegpont, pontosabban melyik pont legyen az érintkezés középpontja.



3.6. ábra Ütés RMS értékek

3.3. Az ütés pozíciójának becslése

A vezérlésmodell legnagyobb kihívása a megütés helyének megállapítása volt. Mivel az ütőfelület, valamint a cirkuláris membrán modell egyaránt körszimmetrikus, úgy tekintettem, az ütőfelület és a modell hangját csak a sugár koordináta határozza meg. Azt kell tehát megállapítani, az ütőfelület középpontjától mennyire távol történt a megütés.

Az ütőfelületről két mikrofonnal készítettem felvételeket, és ezeket Matlab-ban elemeztem. Azt vártam, a két mikrofont különböző pozícióba helyezve a két mikrofon jelének valamilyen (effektív érték, spektrum) arányából következtethetők az ütés helyére. Természetesen az ideális az lenne, ha egy mikrofon jeléből sikerülne megfelelő eredményt produkálni.

Az egyik mikrofont az ütőfelület közepe fölé helyeztem, míg a másikat az ütőfelület széléhez. Olyan hangfelvételeket készítettem, melyeken az ütőfelületet a közepétől indulva egyre kintebb ütöm meg. Többféleképpen is elvégeztem a mérést, más-más irányokba (a külső mikrofon felé, azzal ellentétes irányba, stb.) távolodva a középponttól.

Az ütőfelület hangja szerencsére hallgatás alapján is megkülönböztethetően más a közepén, illetve a szélén ütve. A közepétől kifelé indulva az ütés hangja sokáig nem változik, egy mély frekvenciás módus dominál, míg a széléhez közel, pár centiméternyi szakaszon magasabb módusok válnak dominánssá.

A kétmikrofonos megoldás abban az esetben adhat jó megoldást, ha a szélén lévő mikrofon nem azért ad más jelet, mert különböző távolságra van az ütés helyétől, mint a másik mikrofon, hanem azért, mert az ütőfelület széle (mindenhol körben) például erősebben sugározza a magas frekvenciás módusokat (legalábbis a mélyekhez viszonyítva), ha a szélén ütjük meg, mint a közepe. Ellenkező esetben, ha a távolság a fő oka a két mikrofon jelében meglévő különbségnek, akkor ez a különbség kevéssé a két jel spektrumeloszlásában, mint inkább effektív értékében jelenik meg. Ebben az esetben viszont nem elég két mikrofon, hiszen a szélső mikrofon felőli szélén történt megütés esetén más arányt mutat a két mikrofon jelének energiája, mintha a szélső mikrofontól távoli szélén ütnénk meg az eszközt.

A mikrofonok jeleinek spektrumát elemezve próbáltam intuitív megoldást találni arra, hogy a két jelet milyen szűrésnek vessem alá, és milyen módon számoljam ezek energiájának arányát ahhoz, hogy a modell megfelelő következtetést adjon a pozícióra. Bár a feltételezés, miszerint az ütőfelület széléhez helyezett mikrofon más spektrumú jelet vesz, mint a közepéhez tett, valamelyest fennállt, végül nem a két mikrofon által vett jel valamilyen spektrumarányát használtam fel a megoldáshoz.

Szerencsére ugyanis egy mikrofon használatával is sikerült megoldást találni a problémára, akár a középső jelét, akár a szélsőét használva.

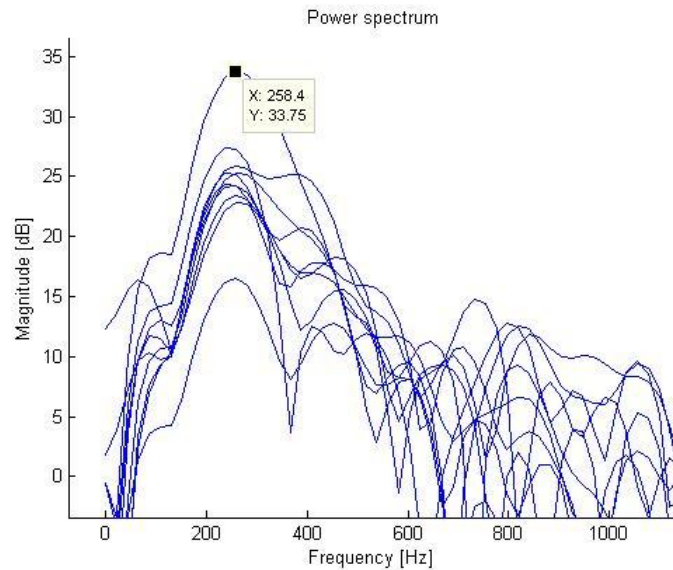
A szélső pozícióban történő ütés jelének spektrumát vizsgálva több komponens jelentősebb arányban van jelen szélső, mint középső megütéskor. Ugyanígy a középső megütés esetén is vannak olyan spektrumkomponensek, melyek erőteljesebb arányban vannak jelen.

Az alkalmazott eljárás alap gondolata az volt, hogy találjak egy-egy frekvenciasávot, amelyekben lévő komponensek egymáshoz képesti teljesítményaránya becslést ad az ütés pozíciójára. Az egyik frekvenciasáv a szélső megütésnél erőteljes komponenseket, a másik a középső megütésnél erőteljeseket tartalmazza. Így teljesítményeik valamilyen kombinációja, aránya megadhatja, hogy az ütés spektruma mennyire hasonlít a szélső ütésére és mennyire a középsőére, azaz az ütés mennyire szélén illetve mennyire középen történt.

Az algoritmus kikísérletezésekor többféle sávszűrő alkalmazásával próbálkoztam. A legjobban működő megoldás során a szélső ütéshez egy 150 Hz alatti sávot társítottam, a középső megütéshez pedig a 150 Hz és 350 Hz közötti sávot. Ez különösnek tűnhet, hiszen a hangmagasság a szélső megütésnél egyértelműen magasabb, mint a közepén

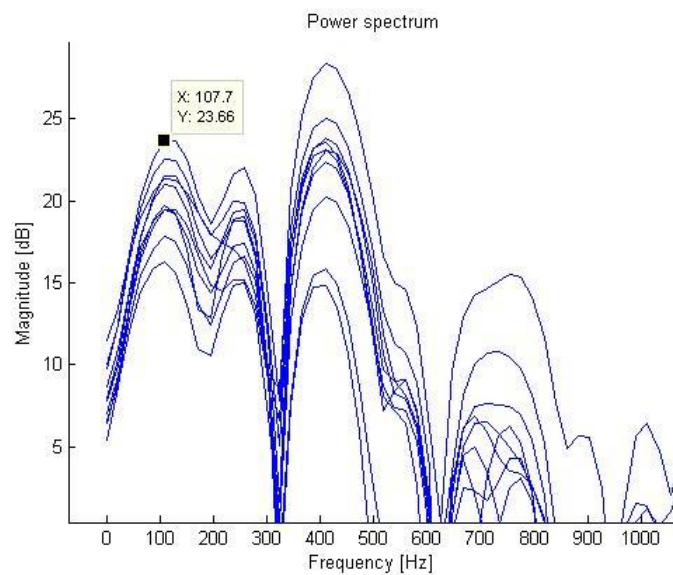
ütve az ütőfelületet. Ez a 150 Hz alatti komponens mégis a többihez képest nagyobb arányban van jelen, mint a középső megütés esetén.

Az alábbi ábrán a közepén megütött ütőfelületről készült felvételek spektrumai láthatóak, 7 különböző felvétel spektruma egymásra rajzolva.



3.7. ábra A közepén megütött ütőfelület spektruma

Megfigyelhető, a körülbelül 150 és 350 Hz közé eső komponensek dominálnak. A szélén megütött ütőfelület felvételéről készült spektrum pedig, szintén 7 felvétel egymásra rajzolva:



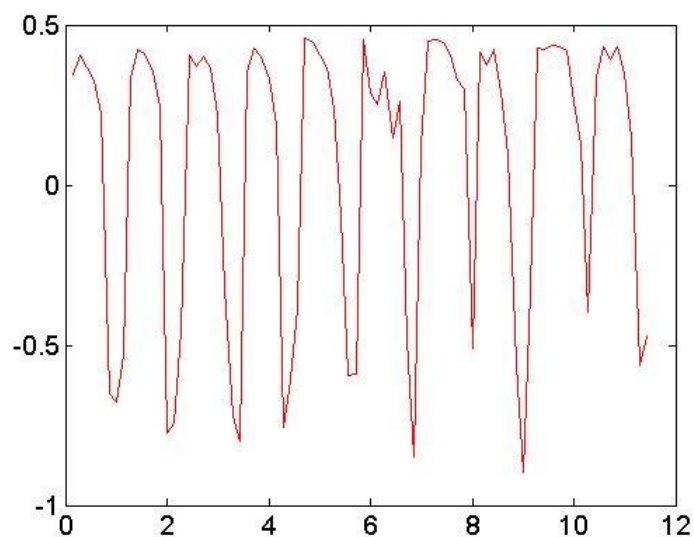
3.8. ábra A szélén megütött ütőfelület spektruma

Látható, hogy az arányokat tekintve jelentősebbek a körülbelül 60 és 180 Hz közötti komponensek.

Az ütés pozíciójának megállapítására a fentiek miatt két szűrőt alkalmaztam, mind a kettő egy-egy negyedrendű IIR szűrő, melyet a Matlab *butter* parancsával terveztem. Az egyik egy aluláteresztő szűrő, 150 Hz vágási frekvenciával (a kicsivel 150 Hz felett komponenseket még kevésbé csillapítja, így a 180 Hz körüli határ érvényesül). A másik egy sávszűrő, 150 Hz illetve 350 Hz vágási frekvenciákkal.

Az algoritmus a következő. Az ütés érzékelése utáni 10 ms idő alatt érkező mintát megsűröm a két szűrővel, majd a (2.45) képlettel becsülöm a teljesítményüket. A két teljesítmény valamilyen súlyozású összegéből adódik az ütés pozíciójára utaló érték. A súlyozás határozza meg, hogy milyen szélsőértékek közé skálázódjon az algoritmus kimenete.

Az alábbi ábrán ábrázoltam az ütéspozíció detektáló algoritmus kimenetét. A felvételen, melyre az ábra készítése esetén alkalmaztam, középről kifelé haladó (hetes) ütéssorozatokat végeztem. Emiatt a detektálás eredménye egy fűrészjelre kell, hogy hasonlítson. Látható, hogy az algoritmus kimenete felveszi a cikkcakkos alakot, követi a középről való kifelé haladást.



3.9. ábra A pozíció érzékelés kimenete ismételt, középről kifelé haladó ütéssorozatok esetén

Annak, hogy az ábra nem tökéletes fűrészjel, több oka van. Az algoritmus a mikrofon jelének spektrumából becsül, és a tapasztalatok azt mutatják, néha nem a legszélén, hanem attól egy kissé beljebb történő ütés hozza elő az ütőfelületből a sávszűrő által kiemelt komponenst. Továbbá pontatlan maga a minta feljátszása is, nyilvánvalóan nem

sikerült mindig pontosan egyenletesen kifelé haladnom az ütésekkel. Továbbá a megvalósított algoritmus tökéletlensége is okozója a pontatlanságnak.

3.4. Összegzés

A vezérlés kinyerésére szolgáló algoritmus kidolgozásakor az volt a célom, hogy egy, vagy két mikrofon jeléből sikerüljön detektálni az ütés időbeli pontját, valamint becslést adni az ütés erősségéről és sugárirányú pozíciójáról.

A detektáláshoz egy burkológörbe követő blokkot alkalmaztam, melynek kimenetének meredekségéből sikeresen detektáltam az ütések. Az ütés erősségére az ütés utáni 10 ms-nyi minta effektív értékéből adtam becslést. Próbálkozással sikerült olyan eljárást kidolgoznom, mely egy mikrofon jelének (ugyanúgy 10 ms-nyi minta) két különböző szűrővel való szűrésével, a szűrt jelek teljesítményeiből következtet az ütés pozíciójára.

A kidolgozott eljárások működnek, az ütés helyének becslése ugyan némi pontatlanságot mutat.

4. Az implementációról

4.1. A VST környezetről általában

A dobmodell implementációját VST (Virtual Studio Technology) környezetben oldottam meg. A VST a Steinberg cég szabványa, mely vállalat elsősorban audió felvételre, zeneszerkesztésre, illetve zenei utómunkálatok elvégzésére alkalmas szoftverek fejlesztésével foglalkozik.

A '90-es évektől kezdődően az asztali számítógépek teljesítménye egyre inkább lehetővé tette, hogy a drága és nagy helyigényű audió munkaállomásokat szoftveres megoldásokkal helyettesítsék. Megjelentek a piacon a zenei felvételek, valamint az azokon végzett utómunka (keverés, effektezés illetve egyéb jelfeldolgozás) elkészítésére használatos szoftverek.

A fenti típusú, s többek között a Steinberg által is fejlesztett zenei szoftverek fontos elemei a különböző jelfeldolgozási feladatokat, illetve effektezést megvalósító programrészek, pl. kompresszorok, zenetők, torzítók stb. Ilyen jellegű, a zenei kreativitást segítő, bővítő, újabb és újabb programelemekre csillapíthatatlan igény mutatkozik a zenei szoftverek felhasználói részéről. A Steinberg cég - felismerve, hogy a PC-s audió munkaállomásokba a fenti elemek modulárisan illeszthetők lehetnek – létrehozta a VST szabványt, amellyel lehetővé vált úgynevezett pluginok fejlesztése a technológia ismerői számára. A szabad forráskódú szabvány nyilvános fejlesztői csomagjának felhasználásával bárki létrehozhat VST pluginokat, melyeket bármely a VST szabványt támogató úgynevezett host program futtatni tud. A különböző, zenei effektezést és egyéb feldolgozást megvalósító pluginok ily módon modulárisan épülhetnek be a technológiát támogató zenei programokba.

A kezdeményezés hatalmas siker lett, szinte forradalmat indított el a számítógépes zeneszerkesztés világában. Ma már ezres nagyságrendben lelhetőek fel a világhálón a lelkes amatőrök és professzionális vállalatok által egyaránt fejlesztett VST alkalmazások, és szinte minden komolyabb zenei szerkesztő program támogatja a szabványt, tehát képes VST hostként működni. A technológia később kibővült a VSTi fantázianevű VST hangszerekkel, melyek MIDI üzeneteket fogadó szintetizátorok.

4.2. A VST működéséről

A VST szabvány (mely jelenleg a 3.5-ös verziójánál tart) néhány C++ osztályt definiál, melyek a host program és a plugin együttműködését valósítják meg, valamint azokat a metódusokat deklarálják, melyeket a plugin fejlesztőjének implementálnia kell, illetve adott esetben felüldefiniálni. A fejlesztés során az egyik megadott osztályból kell származtatnunk saját VST plugin osztályunkat.

Microsoft Windows platformon a forrásfájlok fordításának eredménye egy DLL (Dynamic Link Library) fájl. Ezt a .dll kiterjesztésű fájlt kell elérnie a plugint futtatni kívánó host programnak.

A futtató program szempontjából a VST plugin fekete doboznak tekinthető. A plugin egy adott audió jelfolyamon végez műveleteket. Ezt a jelfolyamot a host program a plugin rendelkezésére bocsátja, majd várja a feldolgozás eredményét. A futtató programnak nem kell semmilyen további információval rendelkeznie a plugin belső működéséről.

Szerencsére ez az egyszerűség a fejlesztő oldalról is tapasztalható. A program működésének központi eleme egy függvény, melyet a host program a plugin futása során folytonosan meghív. Ennek a függvénynek a host átadja a feldolgozni kívánt minták helyét a memóriában, a minták számát (a feldolgozás így, blokkonként történik, s a blokkméret az adatfolyam továbbítása során változó is lehet), valamint azt a memóriacímet, melyre a feldolgozás eredményét, azaz a plugin kimenetét várja. Így a lényegi feladat a plugin programozója számára ennek a függvénynek a helyes megvalósítása.

A jelfeldolgozási folyamat során szükség lehet különböző adatok, pl. régebbi bemeneti minták, paraméterek tárolására. Ezekhez tetszőlegesen hozhatunk létre változókat a plugint megvalósító osztályunkban, valamint a feldolgozáshoz szükségesnek tartott egyéb segédfüggvényeket is. A fentebb említett fekete doboz jelleg miatt ugyanis a host program nem korlátoz minket ebben. A plugin betöltésekor a futtató program meghívja a plugin konstruktorát (programunk inicializálásához szükséges teendőket itt érdemes megvalósítani), és onnantól kezdve csak a „streamelés”, azaz a plugin objektumon az adott processzási metódus hívogatása történik meg.

Zenei szerkesztő programoknál a legfontosabb paraméterek közé tartozik, hogy az audió feldolgozás milyen mintavételi frekvencia, illetve bitmélység mellett történik. A VST technológia rugalmas ebben a tekintetben, a plugin fejlesztőjén (és természetesen a host

programon) múlik, hogy felkészíti-e programját különböző pontosságú (általában 32 és 64 bites jelfolyamot képesek szolgáltatni a host programok) adatok feldolgozására, illetve alkalmassá teszi-e többféle mintavételi frekvencián történő működésre.

Hasonló rugalmasság jellemzi a csatornák számát is, ugyanis a VST szabvány nem tartalmaz megkötést sem a bemeneti, sem a kimeneti csatornák számát illetően, így lehetőségünk nyílik akár 5.1-es hangrendszerre is audió effektet írni.

A VST programok rendelkezhetnek a felhasználó által vezérelhető paraméterekkel is. Ehhez a pluginnek rendelkeznie kell valamilyen felhasználói felülettel. Némely futtató alkalmazás (pl. Cubase) a megfelelő paraméterkezelő metódusok megléte esetén biztosít egy saját primitív GUI-t a plugin számára, azonban igényesebb, tetszetős grafikájú felület készítésére is van lehetőség, aminek fejlesztéséhez a technológia szintén nyújt segédosztályokat.

Valójában tehát a host program nem csak az audió jelfolyamot biztosítja a VST program számára, hanem a külön szálon futó GUI felületről érkező paraméterváltozásokat is továbbítja felé.

Érdemes említést tenni a VSTi nevű bővítés működéséről is. A VST instrumentek (hangszerek) nem effektként, azaz jelfeldolgozó modulként funkcionálnak, hanem – amint a nevük is utal erre – hangszerként használhatóak a zeneszerkesztési folyamatban. Bemenetként a hardveres és szoftveres zenei alkalmazások között általánosan elterjedt MIDI szabvány jeleit fogadják. Ezek a jelek származhatnak egy a számítógéphez kívülről csatlakoztatott MIDI kontrollerből (pl. a komolyabb szintetizátorok képesek MIDI kontrollerként működni), vagy egy MIDI sávról a zeneszerkesztő programban. A MIDI jelek egyfajta kottafolyamként képzelhetőek el, a kontrolleren leütött billentyűket azonosítják, a leütés erősségét hordozzák, illetve egyéb paraméterek vezérlését is támogatják (pl. egy potméter állása egy MIDI vezérlőn).

A VST hangszer szintén blokkokban kap a host program felől egy jelfolyamot, azonban ez a jelfolyam ezúttal nem audió jel, hanem MIDI események sorozata. A program ezek alapján pedig tetszőleges audió, illetve MIDI kimenetet állít elő.

Dobmodelletem VSTi formájában is implementáltam. Ebben a verzióban a modellt nem a bemikrofonozott ütőfelülettel, hanem pl. egy MIDI kontrollerként funkcionáló szintetizátorral vezérelhetjük.

4.3. A dobmodell implementációja a VST környezetben

4.3.1. A valós idejű működéssel kapcsolatos problémákról

A VST megvalósítás alapja a Matlab-ban megírt dobmodell. A Matlab-ban fejlesztett, offline módon futtatott algoritmusokat kellett átültetnem valós időben futó C++ kóddá. Ebben a fejezetben a VST plugin létrehozásával kapcsolatos problémákat mutatom be.

A valós idejű futáshoz szükséges, hogy a rendszerben az ütésdetektálás miatt már jelenlévő 10 ms késleltetésen túl jelentős késleltetés már ne adódjon a rendszerhez. Ezért nagyon fontos, hogy a kód optimális legyen abból a szempontból, hogy redundáns számítások ne forduljanak benne elő, azok a változók, amelyek a modell működése során nem változtatják értéküket, ne számolódjanak újra minden egyes mintára. A plugin konstruktorában ezért meghívódik egy inicializáló metódus, ami a kezdeti értékeket beállítja a program futása során állandó értékű változók számára. A további gyorsítás érdekében, hogy a program indulása is a lehető leghamarabb megtörténjen, a sok számítást igénylő inicializálás fájlból történik.

A Bessel-függvények zérushelyeit, a módusalakok vektorait (Bessel-függvény értékek), a (2.6) egyenlet nevezőjében szereplő norma értékeit, valamint a detektálás során használt IIR szűrők együtthatóit a Matlab segítségével előre kiszámoltam, majd egy szövegfájlba mentettem. A plugin inicializációja során a vektorok értékeit a fájlokból töltöm fel.

A számításigényt nagyban meghatározza, hogy hány módust veszünk figyelembe a modell számításakor, továbbá a membrán felületén milyen térbeli felbontást alkalmazunk. Annak érdekében, hogy a program garantáltan szaggatásmentesen fusson egy átlagos mai számítógépen, ezeket az értékeket fixre állítottam, tehát a felhasználó nem szabályozhatja őket. A tapasztalat azt mutatta, hogy 64 módus számítása mellett stabil a valós idejű működés. Ez a módusszám kellően nagy ahhoz, hogy az ennél több módus alkalmazásával számított hang és e között a felhasználó ne érzékeljen különbséget. A modell térbeli felbontása 51 sugárirányú és 51 szögirányú pont. Tehát a módusalakokat, a norma értékeit, az integrálokat, stb. 51*51-es polárkoordinátás felbontással számítja a program.

A (2.28) integrál számítása (a dobttest modelljében, valamint a gerjesztés modelljében egyaránt használjuk, különböző felületre) függ a sugár nagyságától. A sugár a felhasználó által szabadon állítható paraméter, így ezeket az integrálokat nem tudjuk

előre generálni és fájlból olvasni. Ezek a program inicializálásakor, valamint a sugár értékének megváltozásakor számolódnak. Utóbbi esetben a modell a számítás miatt pár tizedmásodpercre „megakad”, azonban ez nem okoz problémát a felhasználó számára, feltételezve, hogy a paraméter állítása közben a zenész nem játszik az ütőfelületen.

A program számításigényének jelentős hányadát okozza, hogy a membránfeszültség-moduláció modellezése miatt a módusrezonátorok pólusai (a módusfrekvenciák) változnak a modell futása közben, ezeket folytonosan újra kell számítani. Ahhoz, hogy a valós idejű működés megvalósítható legyen, csak minden tizedik mintára frissítem ezeket az értékeket. Ez a kompromisszum azonban nem okoz hallható különbséget.

A plugint 16 bites verzióban implementáltam, ami azt jelenti, hogy a host program 16 bites float típusú adatblokkokat ad a bementére, valamint a program kimenete is 16 bites float adatfolyam. A pluginon belül azonban double értékekkel számolok, csak közvetlenül a modell kimenetén konvertálom a mintákat float-tá. Ennek oka, hogy a Matlabban double pontossággal számolom a modell értékeit (a fájlba generált vektorok is double precizitásúak), és ily módon a VST implementáció és a Matlab modell értékei a kerekítési hiba jelenléte nélkül összehasonlíthatóak, vagyis megállapítható, hogy a VST plugin jól működik-e.

A hibakeresést, ellenőrzést a következőképpen oldottam meg. A plugint Visual Studio 2010 környezetben fejlesztettem, a VST SDK 2.4 példaprojektjeinek felhasználásával. A program kipróbálásához, valamint debuggoláshoz a Cubase 5 zeneszerkesztő programot alkalmaztam. A fordítás eredménye egy dll fájl, ami közvetlenül nem futtatható. A Visual Studio azonban lehetőséget biztosít a debuggolásra ebben az esetben is, ha megadjuk számára azt a programot, amivel a dll-t futtatni fogjuk. A Cubase indítófájlját megadva így lehetővé vált a programban breakpointok elhelyezése, a működés figyelése, ellenőrzése.

A Cubase felhasználó felületén grafikus indikátorok találhatóak, amelyek a CPU foglaltságát, valamint a hangkártya buffer telítettségét jelzik. Ezek segítségével nyomon tudtam követni, valamint kalibrálni tudtam a plugin számításigényét.

A fejlesztés és a program kipróbálása Intel Pentium 2.5 GHz-es processzoron történt. Az elkészült plugin a Windows Task Manager alapján működés közben a processzor teljesítmény 20 %-t foglalja (memóriaigénye kevesebb, mint 1 MByte).

4.3.2. A paraméterek beállítása, egyéb implementációs kérdések

A VST pluginek felhasználói paraméterei (melyek a GUI-n megjelennek), 0 és 1 közötti float értékek. Ezért az összes felhasználó által befolyásolható változót a GUI felől érkező 0 és 1 közé eső érték alapján be kell skálázni. A paraméterek kezdőértékeit, valamint szélsőértékeit a tapasztalatok alapján úgy állítottam be, hogy a program lehetőleg dobszerű hangot produkáljon a paraméterek bármely beállítása esetén.

A dobmodellhez két új paramétert kapcsoltam az implementáció során. Az egyik hangerőszabályzóként működik, azt határozza meg, az ütésdetektáló algoritmus által szolgáltatott RMS értékből mekkora kezdősebesség származzon a dobverő/kéz számára. A másik új paraméter az ütésdetektálás érzékenységét szabályozza, azt állítja be, a burkolókövető kimenetének deriváltjának mekkora értéke felett jelezzen ütést a rendszer.

Egy megütés után a program körülbelül 0.7 mp -ig generál kimenetet. Úgy ítélt meg, ennél hosszabb lecsengési idejű dobhang beállításának a gyakorlatban nincs értelme (valójában ez is jókora ráhagyást jelent). Sokszor azonban két megütés között ennél jóval kevesebb idő telik el. Amennyiben a dobhang generálása közben újabb ütést detektál a program, megszakítja az előző ütés kimenetének generálását, és az új vezérlési információknak megfelelően (erősség, pozíció), elkezdi számítani az új hang kimenetét.

A generált dobhang végéhez érve, valamint, ha a dobhang lejártá előtt újabb hang előállítása kezdődik, pattanás tapasztalható a hangban. Ennek oka, hogy a generált kimenet – bár a 0.7 mp végén már nincs hallható hang – hirtelen megy át egy nem nulla értékből nullába, valamint új hang kezdése esetén is ugrás lesz a jelben, amit szintén egy pattanásszerű hangként érzékelünk. Ennek a jelenségnek az elkerülésére a generált hang elejének, valamint végének mintáit (50-50 mintát) Hann ablakkal ablakozom. Amennyiben a kiüsztatás előtt érkezik új hang, a pattanás elkerüléséhez előre tudni kellene, hogy mikor következik be az újabb megütés. Szerencsére azonban a detektálásban jelenlévő késleltetés miatt lehetőség van erre a „jóslásra”. Az ütés detektálása utáni 10 ms-ben még nem kezdődik meg az új hang generálása, hiszen ekkor a vezérlési információ előállítása történik meg. Így lehetőség van az új ütés kimenetének beüsztatása előtt az előző ütés hangját ablakozni.

5. Összefoglalás, fejlesztési lehetőségek

A diplomatervezés során a feladatom egy fizikai alapokon működő elektronikus ütőhangszer létrehozása volt. A cél egy univerzális eszköz készítése volt, amely nem egy konkrét, létező hangszer hangját szintetizálja, hanem egy általános dobmodell alapján állít elő változatos dobhangokat.

A szakirodalom áttekintése után képet kaptam a dobok hangjának keletkezésekor lejátszódó fizikai folyamatokról, valamint a hatékony szintézis módszerekről. Az olvasottak alapján Matlab-ban megalkottam a dobmodellt, melynek alapja a membrán modális szintézissel történő modellezése. A gerjesztés, valamint a dobtest hatását egy-egy tömeg-rugó-csillapítás rendszerrel modelleztem. A membránfeszültség nemlinearitását a membrán energiájának becslésén alapuló módszerrel vettem számításba.

A dobmodell vezérléséhez elkészült egy ütőfelület, melynek bemikrofonozásával a modell bemenő jeleit állítom elő. A mikrofon jeléből a vezérlési információk kinyerésére (ütésetektálás, erősség, pozíció megállapítása) próbálgatással Matlab-ban dolgoztam ki algoritmusokat.

A dobmodellt VST környezetben implementáltam. Az implementáció legfontosabb követelménye az volt, hogy a modellnek valós időben (maximum 10-20 ms késleltetéssel) kell működnie.

Az elkészült program működik, az ütőfelület hangjából az algoritmus sikeresen detektálja a megütést, valamint kielégítően becsli annak erősségét, pozícióját. A modell segítségével változatos dobhangok állíthatóak elő.

Az ütőfelületen történő játék pontosabb figyelembe vétele válna lehetővé, ha a vezérlés előállítására valamilyen érzékelő hálózatot (pl. nyomásérzékelők) használnánk a mikrofon helyett. További fejlesztési lehetőség rejlik a gerjesztésmodellben, amennyiben a kéznek, mint ütőeszköznek pontosabb mechanikai leírását alkalmaznánk. A dobtest modelljét tovább lehetne fejleszteni úgy, hogy ne csak a nyitott végű, hanem a másik végén membránnal, vagy merev testtel zárt esetet is választani lehessen. A modell kimenete pontosítható, ha a membrán kitérésekből egy pontosabb sugárzásmodellel számítjuk a hallgató által érzékelt hangot.

6. Függelék

6.1. A CD-melléklet tartalmáról

A mellékleten megtalálható a VST plugin C++ forráskódja (VST kod mappa).

A Matlab könyvtárban található .fig fájlt a Matlab *guide* parancsával megnyitva a dobmodell Matlab verziója egy GUI felületen kipróbálható.

A VSTHost mappában a *vsthost.exe* elindításával a program MIDI vezérlésű verziója kipróbálható. A Fájl/New Plugin menüponttal a *vstx_drumsynth.dll* fájlt kell ehhez betölteni. A menüsor billentyű ikonjával előhozható a program alján egy billentyűsor, mellyel a dobmodell kipróbálható. A magasabb hangok felé egyre jobban a szélén „ütjük meg” a dobot. A plugint jelképező ablakocskán található egy potméterszerű zöld, ikon. A paraméterek ezzel az ikonnal hozhatóak elő.

A Hangmintak nevű mappában két hangfájl található, melyeket az ütőfelületen való játékkal generáltam. A *kifele.mp3* felvételen középről egyre kintebb ütöm meg a felületet. A *random.mp3* nevű fájl pedig egy szabad játékról készült felvétel hallható. Mindkét felvétel közben változtattam a paraméterek beállításait.

Irodalomjegyzék

- [1] N. H. Fletcher and T. D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, 1999.
- [2] P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, 1968.
- [3] F. Avanzini and R. Marogna, "A Modular Physically Based Approach to the Sound Synthesis of Membrane Percussion Instruments," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 18, no. 4, pp. 891-902, 2010 May.
- [4] T. Tolonen, V. Valimaki and M. Karjalainen, *Evaluation of Modern Sound Synthesis Methods*, 1998.
- [5] T. Huber, B. Collins, C. Hendrickson and M. Pineda, „Vibrational Modes of an Organ Reed Pipe,” [Online]. <http://physics.gac.edu/~Huber/organs/vibrometer/>. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].
- [6] „Sound Synthesis Theory/Modulation Synthesis,” [Online]. http://en.wikibooks.org/wiki/Sound_Synthesis_Theory/Modulation_Synthesis. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].
- [7] J. A. Laird, *The Physical Modeling of Drums Using Digital Waveguides PhD Dissertation*, 2001.
- [8] A. Wagner, *Analysis of Drumbeats - Interaction between Drummer, Drumstick and Instrument Master's thesis*, 2006.
- [9] B. Bank, S. Zambon and F. Fontana, "A Modal-Based Real-Time Piano Synthesizer," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 18, no. 4, pp. 809-821, 2010 May.
- [10] L. Rabiner and B. Gold, *Theory and Application of Digital Signal Processing*, 1975.
- [11] „Hearing Range,” [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_range. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].
- [12] S. Dahl, M. Grossbach and E. Altenmüller, "Effect of dynamic level in drumming: Measurements of striking velocity, force, and sound level," in *Forum Acusticum*, Aalborg, 2011.
- [13] „DiracDelta.co.uk Air Spring,” [Online]. <http://www.diracdelta.co.uk/science/source/a/i/air%20spring/source.html>. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].
- [14] „Wikipedia: Density of air,” [Online]. http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].
- [15] R. Marogna, F. Avanzini and B. Bank, "Energy Based Synthesis of Tension Modulation in Membranes," in *13th DAFX Conference*, Graz, 2010 Sept.
- [16] F. Avanzini, R. Marogna and B. Bank, "Efficient synthesis of tension modulation in strings and membranes based on energy estimation," *Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 897-906, 2012.
- [17] „Optimising The Latency Of Your PC Audio Interface,” [Online]. <http://www.soundonsound.com/sos/jan05/articles/pcmusician.htm>. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].
- [18] DAFX - Digital Audio Effects, 2002.
- [19] „Gas Viscosity Calculator,” [Online]. <http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.htm>. [Hozzáférés dátuma: 05 2012].