Katholieke Universiteit Leuven

Departement Elektrotechniek

ESAT-SISTA/TR 2002-33

Simulatie van akoestische gitaren.[1]

Axel Nackaerts[2], Bart De Moor[3] and Rudy Lauwereins.[4]

March 1, 2002

[1]This report is available by anonymous ftp from *ftp.esat.kuleuven.ac.be* in the directory *pub/sista/nackaerts/reports/report_TechArt02.pdf*

[2]E-mail: *axel.nackaerts@esat.kuleuven.ac.be* This work is supported by several institutions: Research Council KUL: Concerted Research Action GOA-Mefisto 666, IDO; Flemish Government: Fund for Scientific Research Flanders (G.0256.97, G.0115.01, G.0240.99, G.0197.02, G.0407.02, ICCoS, ANMMM), AWI, IWT (Soft4s, STWW-Genprom , GBOU-McKnow, Eureka-Impact, Eureka-FLiTe, PhD grants); Belgian Federal Government: DWTC (IUAP IV-02 and IUAP V-10-29), Program Sustainable Development PODO-II (CP-TR-18); Direct contract research: Verhaert, Electrabel, Elia, Data4s, IPCOS.

[3]K.U.Leuven, Dept. of Electrical Engineering (ESAT), Research group SISTA, Kasteelpark Arenberg 10, 3001 Leuven-Heverlee, Belgium, Tel. 32/16/32 17 09, Fax 32/16/32 19 70, WWW: *http://www.esat.kuleuven.ac.be/sista*. E-mail: *bart.demoor@esat.kuleuven.ac.be*

[4]IMEC vzw, Kapeldreef 75, 3001 Leuven-Heverlee, Belgium, WWW: *http://www.imec.be/*.

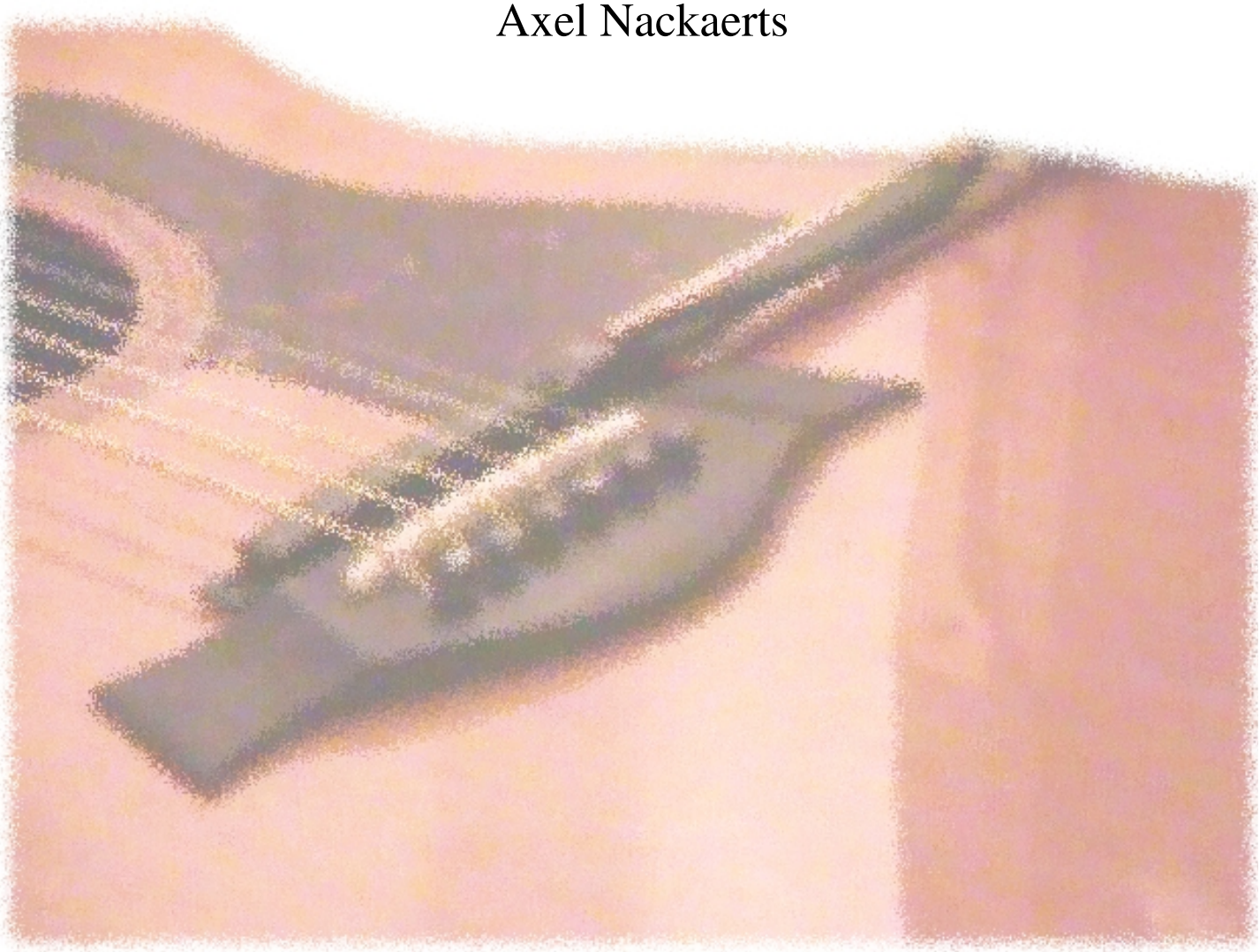
Abstract

This Technical Report gives an overview on the simulation of acoutic guitars.

Dept. Elektrotechniek – ESAT/SCD
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Heverlee

Simulatie van akoestische gitaren

Axel Nackaerts



Musica est exercitium arithmeticae occultum
nescientis se numerare animi.

Muziek is een onbewuste wiskundige oefening waarbij de ziel
niet weet dat hij telt

G. W. Leibniz, 1712

Musica est exercitium metaphysices occultum,
nescientis se philosofari animi

Muziek is een onbewuste metafysische oefening waarbij de
ziel niet weet dat hij filosofeert

A. Schopenhauer, 1859

INLEIDING

Klassieke gitaar, flamenco gitaar, elektrische gitaar, bas, banjo, ukulele, luit, ud, pi–pa, mandoline, gekkin, balalaïka, sitar, vina, tampura, ... Al deze min of meer exotische snaarinstrumenten hebben als gemeenschappelijk kenmerk dat ze getok–keld worden. Ze hebben allemaal dezelfde basisvorm, gelijkaardige snaren en een vergelijkbare speeltechniek. Waarom klinken ze anders en hoe kunnen we ze modelleren?

De akoestische analyse van de struktuur, de speeltechniek en de gebruikte materialen laat toe om de klank van eender welk muziekinstrument te voorspellen. De kunst bestaat erin om een bestaand instrument op zo'n manier te modelleren dat het instru–ment zelf niet meer noodzakelijk is. De toepassingen gaan van computer ondersteund ontwerp van nieuwe instrumenten, via bijzonder doeltreffende geluidscompressie–technieken tot een medium voor muzikale expressie waar componisten zich kunnen losmaken van de beperkingen van fysische speelbaarheid.

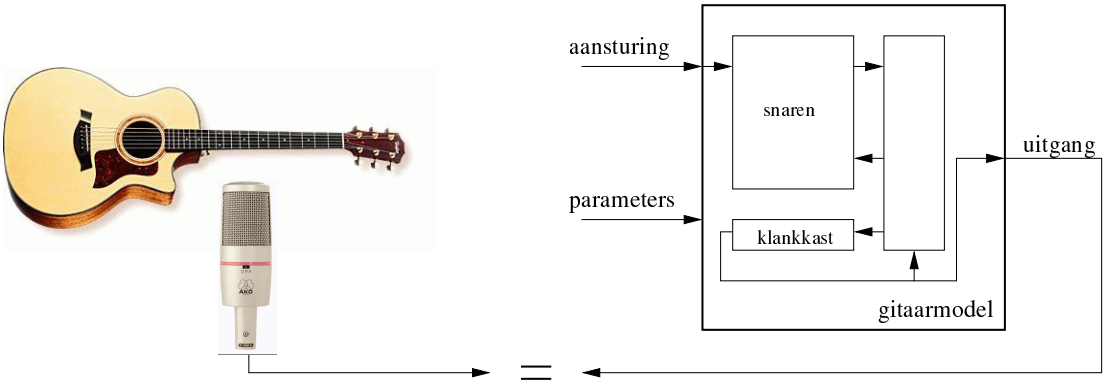
Projectomschrijving

Dit onderzoek is gericht op de verbetering van de geluidssynthese van akoestische instrumenten, meer bepaald de gitaar. Wavetable synthese, de tegenwoordig meestge–bruikte techniek, heeft geen realistisch, muzikaal of expressief geluid: een muzikant kan onmiddellijk het verschil horen tussen een gesynthetiseerde gitaar en een opname van het echte instrument.

De doelstellingen waren:

1. Hoge geluidskwaliteit
2. Modellering van het hele instrument
3. De meestgebruikte klassieke speeltechnieken moeten mogelijk zijn
4. De parameters moeten te bepalen zijn zonder gespecialiseerde apparatuur
5. De aansturing moet eenvoudig zijn

Om aan deze doelstellingen te voldoen werd gekozen voor de zogenaamde fysische modellering. Met deze vrij recente techniek bekijkt men het instrument als een geheel van onderdelen met bepaalde akoestische eigenschappen en bouwt men een



wiskundig model op dat het instrument zo goed mogelijk benadert. Er bestaan al enkele fysische modellen voor gitaren, maar deze zijn te beprekt of te complex om werkelijk gebruikt te kunnen worden. Met dit project wilden we een praktisch, door muzikanten bruikbaar model bekomen, dat toch de belangrijkste muzikale kwaliteiten van de gitaar heeft. De belangrijkste bijdrage is het samenvoegen van de verschillende snaar–modellen tot een virtueel instrument, met berekening en meting van de snaarkoppeling en de toepassing van geavanceerde wiskundige technieken om de modelparameters uit een eenvoudige opname af te leiden.

Geschiedenis

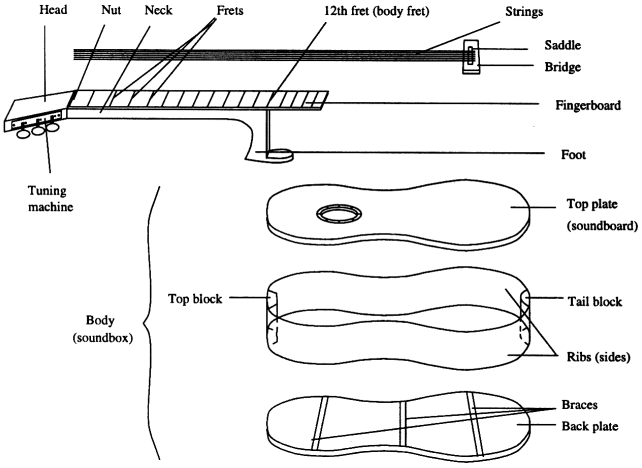
De getokkelde snaarinstrumenten behoren naast de fluiten tot de oudste instrumenten die de mensheid kent. De eerste sporen van luit– of gitaar–achtige instrumenten werden in het Midden–Oosten opgegraven en dateren uit 2000 B.C. Op Egyptische muurschilderingen zijn afbeeldingen van mensen teruggevonden die de vroege voorouders van de harp en de luit bespelen. Via de Egyptische en de Romeinse beschavingen werden deze instrumenten in Europa ingevoerd. Tijdens de Middeleeuwen waren ze vooral populair bij de rondtrekkende troubadours en bij hoflieden. Het aantal snaren werd van de oorspronkelijke vier, uitgebreid tot zes in de 18e eeuw door de Italiaanse luthiers. De gitaar zoals we die vandaag kennen is hoofdzakelijk te danken aan het meesterschap van *luthier* Antonio Torres. Tijdens de 20e eeuw werd een nieuwe draai gegeven aan de gitaarbouw: in plaats van de beweging van de snaar via een mechanisch systeem geluid te laten uitstralen, kan een elektromagnetische pickup en een versterker gebruikt worden. De elektrische gitaar heeft nochtans nog steeds heel veel gemeen met zijn Babylonische voorouder. Een goed model voor de akoestische gitaar zal dus ook bruikbaar zijn voor de hele familie van de getokkelde snaarinstrumenten, mits kleine aanpassingen die de eigenheid van de verschillende instrumenten bepalen.



Akoestiek van gitaren

Als voorbeeld voor de snaarinstrumenten werd gekozen voor de akoestische gitaar. De twee meest gangbare types akoestische gitaren zijn de klassieke gitaar met nylon snaren en de folk gitaar met metalen snaren. Deze laatste worden met verschillende klankkasttypes gebouwd, afhankelijk van de speelstijl waar ze voor ontworpen werden (blues, fingerpicking, strumming enz.). Alle akoestische gitaren hebben

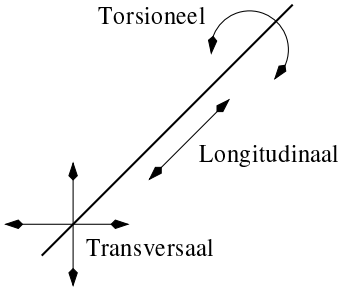
dezelfde basisstruktuur. De belangrijkste onderdelen voor de klankopwekking zijn de snaren, het ophangsysteem en de resonantiekast of klankkast.



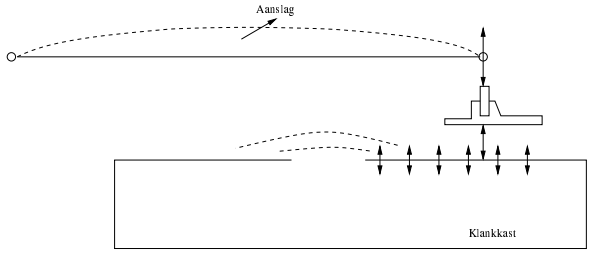
De speler brengt de snaren in beweging door ze eventjes vast te nemen en weer los te laten. De manier en de plaats waar dat gebeurt bepaalt de initiële snelheid en verplaatsing van de snaar. De snaar begint te trillen. Daar de doorsnede van een snaar te klein is (kleiner dan de golflengte van de geluidsgolf) om een noemenswaardige energieoverdracht naar de omringende lucht te kunnen onderhouden (akoestische kortsluiting), vindt de belangrijkste interactie tussen het instrument en de omringende lucht plaats via de bovenste plaat van de klankkast (het klankbord). De energieoverdracht van de snaar naar het klankbord gaat door de aanhechting van de snaren (het zadel). Akoestisch bekeken valt de gitaar dus uiteen in drie delen: de speler/speeltechniek (snaarexcitatie), de snaren (trilling) en de klankkast (uitstraling).

De akoestische gitaar wordt bespeeld door de snaren te betokkelen met de vingertoppen of een hulpmiddel (zoals een plectrum). In de klassieke en de flamenco speelstijl zijn er twee types aanslagen. Deze zijn de *apoyando* (neerwaartse beweging van de snaar, waarbij de vinger komt te rusten op de lagere snaar) en *tirando* (neerwaartse beweging van de snaar, de vinger raakt geen andere snaren aan). Wanneer de speler een reeds trillende snaar aanraakt hebben verschillende fenomenen plaats. Eerst wordt de oorspronkelijke trilling snel gedempt en nieuwe trillingen ontstaan in de twee delen van de snaar. De vinger beweegt naar beneden (richting klankbord) en de snaar glipt over de vingernagels heen en begint te trillen. Deze interactie duurt zo'n 100 ms. De speler kan het karakter van de toon wijzigen door een andere speelstijl of aanslagplaats te kiezen. Theoretisch bekeken bepaalt de vorm van de snaar na de aanslag (initiële verplaatsing) welke harmonischen aanwezig zullen zijn. Zo zullen bij bijvoorbeeld een symmetrische aanslag enkel symmetrische harmonischen aanwezig zijn (de 1e, 3e, 5e, 7e enz.). Praktisch komt dit niet voor, aangezien de snaar een eindige stijfheid heeft, de ophanging niet perfect is en het aanslaginstrument (vinger of plectrum) een bepaalde breedte heeft. Toch is de theoretische aanname een





goed startpunt. Er zijn drie elementaire trillingsmodes voor een snaar, namelijk de transversale, de longitudinale en de torsionele modes [1]. De transversale mode wordt nog eens opgedeeld in de horizontale en de verticale polarisatie. Dit onderscheid zal bij het modelleren belangrijk blijken. Bij gitaren is de transversale mode de belangrijkste. Bij de piano wint de longitudinale mode aan belang en voor strijkers is het noodzakelijk alle modes in rekening te brengen. De trilling zelf wordt gedempt door wrijving met de omringende lucht, verliezen in de snaarophanging en visco–elastische verliezen in de snaar zelf. De trilling van de snaar wordt ook beinvloed door de spanning van de snaar. Wanneer de snaar trilt, zal de lengte wijzigen en dus de spanning, wat resulteert een een verschuiving van de fundamentele frequentie bij grote amplitudes. Daarnaast is er ook nog de snaar–klankkast interactie en de snaar–snaar interactie. De trilling van de snaar wordt hoofdzakelijk uitge–straald door trilling van de klankkast. De snaren zijn met het klankbord verbonden door het zadel en de brug, en oefenen een kracht uit op de klankkast. De platen van de klankkast en de ingesloten luchtholte hebben een betere akoestische impedantie dan de snaren zelf om energie over te dragen naar de omringende lucht. De bouw en materiaalkeuze beinvloeden de resonatiefrequenties van de klankkast en "kleuren" het uitgestraalde geluid, wat elk instrument zijn typische klank geeft. Typisch liggen de laagste resonantiefrequenties van de klankkast rond 90 à 100 Hz (de zg. Helmholtz resonantiefrequentie van de klankkast) en rond 170 à 250 Hz (de eerste resonantie–mode van het klankbord). De klankkast bepaalt daarnaast ook het ruimtelijke uitstralingspatroon. Een goede modellering vraagt inbreng van zowel akoestische principes, wiskundige technieken en zeker ook een praktische kennis van de speel–techniek. Een gitaar is schijnbaar zo eenvoudig dat de zuiver wetenschappelijke kijk snel leidt tot het verwaarlozen van bepaalde eigenschappen. Dikwijls blijkt dat gitaarspelers en componisten net die effecten willen, die door de wetenschappelijke analyse van secundair belang worden geacht. Om niet in deze val te lopen werd contact gezocht met componisten en werd het klassieke en fingerpicking gitaarspel aangeleerd. De informatie beschikbaar voor gitaarbouwers mag niet onderschat worden. Uit de subjectieve beschrijving van de invloed van verschillende houtsoorten voor het klankbord kan bijvoorbeeld afgeleid worden dat (wiskundig gezien) een niet–lineaire compressie in het model aanwezig moet zijn.



De volgende sectie bespreekt de wiskundige modellering van de akoestische gitaar, evenals de experimenten die werden uitgevoerd om tot een goede parameterset te komen.

MODELLERING

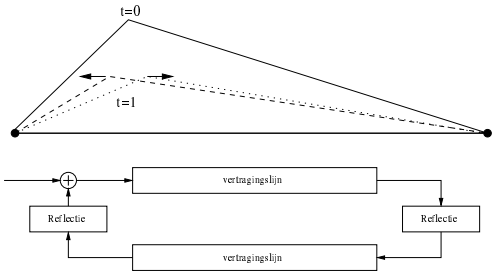
Vetrekkend van het bouwplan van een gitaar werd een wiskundig model opgebouwd. Wiskunde en muziek zal al eeuwenlang verbonden [5]. De huidige wiskundige tech–nieken maken een uiterst gedetailleerd model mogelijk. Om tot een goed model te komen moeten de volgende aspecten in rekening worden gebracht:

1. De normale trilling van de snaren
2. De vertikale en horizontale transversale trillingsmodes
3. De invloed van de klankkast

Het eerste aspect is het best gekend, aangezien de trilling van een snaar beschreven wordt door de algemene golfvergelijking met welgekende randvoorwaarden. De invloed van de verschillende trillingsmodes werd in de bestaande fysische modellen wel in rekening genomen, maar zonder performant parameterestimatie–algoritme. De invloed van de klankkast werd in de bestaande modellen op een verkeerde wijze beschouwd, waardoor belangrijke gitaristieke effecten niet mogelijk waren [3].

Digitale golfgeleider model

De algemene oplossing van de golfvergelijking voor een snaar kan bekeken worden als een lineare combinatie van twee lopende golven, een links– en een rechtslopende golf [1, 2]. De digitale versie kan bekomen worden door deze oplossing te discretiseren en efficiënt te implementeren, gebruik maken van digitale golfgeleiders. Deze zijn in essentie niets anders dan teruggekoppelde digitale vertragingslijnen. De golfvoor–planting op de snaren is dus relatief eenvoudig te modelleren [3, 4]. Alle effecten van de ophanging, de frequentie–afhankelijke dem–ping of veranderingen van snaarspanning worden opgevangen door lineare filters te gebruiken om de reflectie te berekenen. Deze reflectiefilters zijn de kern van het model: deze omvattend de fysische struktuur en de eigenschappen van de materialen gebruikt voor het klankbord, het zadel en de snaren.

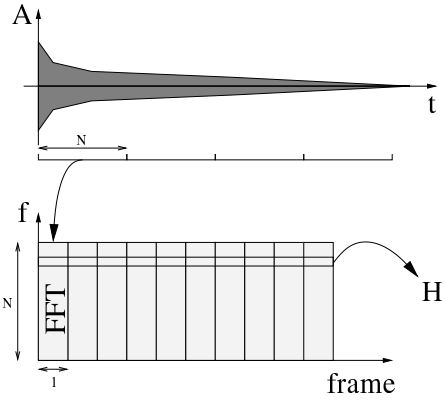


Trillingsmodes

Zoals in de inleiding reeds vermeld heeft een snaar verschillende trilllingsmodes. Voor een gitaar zijn vooral de vertikale en de horizontale van belang. Door de bouw van de gitaar is het ophangpunt licht anisotroop, zodat de eigenschappen van de golfvoortplanting lichtjes verschillen voor de vertikale en horizontale trillingsmode. Dit is equivalent met twee snaren met een klein lengteverschil, wat leidt tot andere fundamentele frequenties. Het verschil is zodanig klein dat het bijzonder moeilijk meetbaar is (enkele tiendes van een Hz). Anderzijds is zo'n klein verschil duidelijk hoorbaar als zwevingen, en moet het dus in rekening worden gebracht.

In de systeemidentificatie is de berekening van dicht bij elkaar gelegen systeempolen

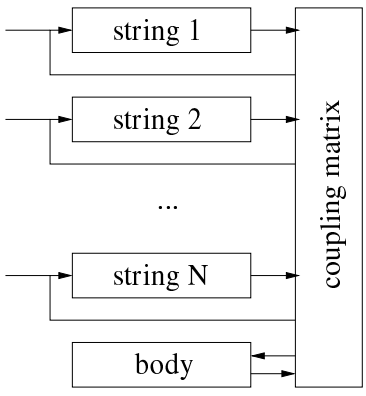
niet eenvoudig. De klassieke methodes als de Fouriertransformatie of de *energy decay relief* [7], bieden niet voldoende resolutie om de twee frequenties te onderscheiden. Een aangeslagen gitaarsnaar biedt bovendien ook nog het probleem dat het geluid slechts licht gedempt is, wat een lang signaal oplevert. Het bleek noodzakelijk om een techniek die gebruikt wordt in de medische NMR spectroscopie aan te passen zodat ook lange, exponentieel gedempte signalen geanalyseerd konden worden. Deze methode is de zogenaamde Hankel Singular Value Decomposition (HSVD), uitgebreid door gebruik te maken van subband technieken [8]. Van de opname van de aangeslagen gitaarsnaar wordt eerst een spectrogram opgebouwd door middel van een reeks FFTs. Elke frequentieband wordt nu afzonderlijk beschouwd. Van al de frequentiebanden worden nu de systeempolen bepaald door de HSVD toe passen per band en slechts de twee belangrijkste polen te berekenen. Dit algoritme levert nu een reeks dempingscoefficienten voor alle frequentiebanden, of anders gezegd, alle parameters nodig om een model op te bouwen dat exact dezelfde klank zal voortbrengen als de echte gitaar, mits dezelfde aanslagfunctie als ingangssignaal wordt gebruik.



Snaarkoppeling

Een belangrijk aspect om een natuurlijk klinkend geluid te verkrijgen is de koppeling van de snaren. Wanneer een snaar wordt aangeslagen, zullen de andere snaren in meer of mindere maten meetrillen en zo de uitsterftijd en de zwevingen beinvloeden. Het door ons ontwikkelde model integreert alle virtuele snaren tot een virtueel instrument, rekening houdend met de snaarkoppeling.

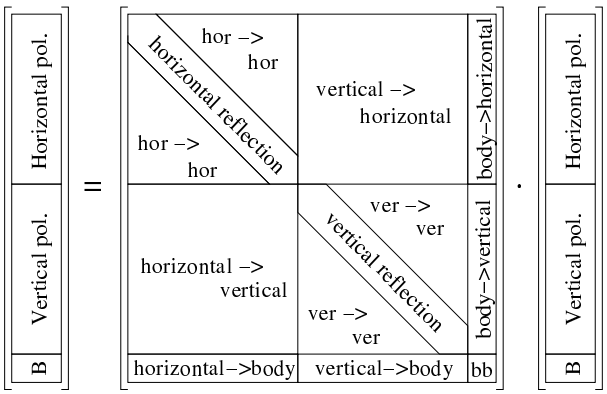
Theoretisch is de snaarkoppeling sterk verwant met een reeks slingers die aan dezelfde balk hangen. Als een slinger in beweging wordt gebracht, zullen de andere na een tijd meer of minder meetrillen. Dit is een gevolg van de overdracht van energie door het ophangpunt van de ene slinger naar de andere. Er werd een stelsel vergelijkingen opgesteld dat dit proces volledig beschrijft. Voor de eenvoudige gevallen, bijvoorbeeld als er maar twee snaren zijn, kan een analytische oplossing gevonden worden die de modelparameters exact bepaalt. Voor grotere systemen, zoals de volledige gitaar, met zes snaren en twee polarizaties per snaar, is het niet meer analytisch oplosbaar en moet dus een benaderende oplossing gezocht worden. Dit leidt uiteindelijk tot het volledige gitaarmodel [9]. De kern van het model is een matrix die het verband beschrijft tussen de "uitgang" van alle snaren en de klankkast en een nieuwe "ingang" van snaren en



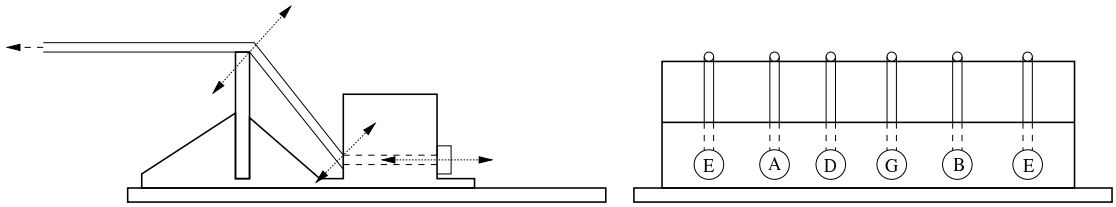
klankkast.

$$Ingang = M \,.\, Uitgang + Excitatie$$

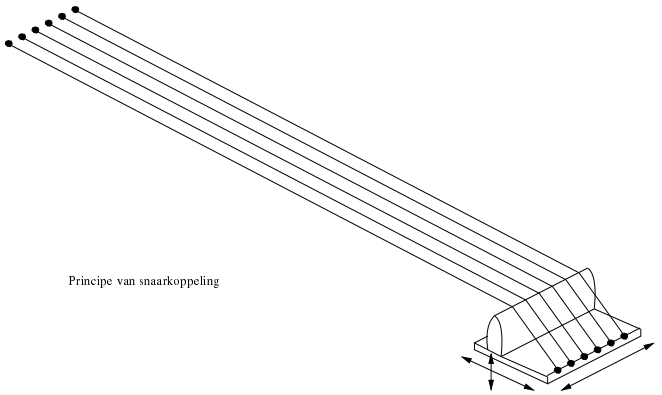
Deze koppelingsmatrix M heeft een interessante struktuur:



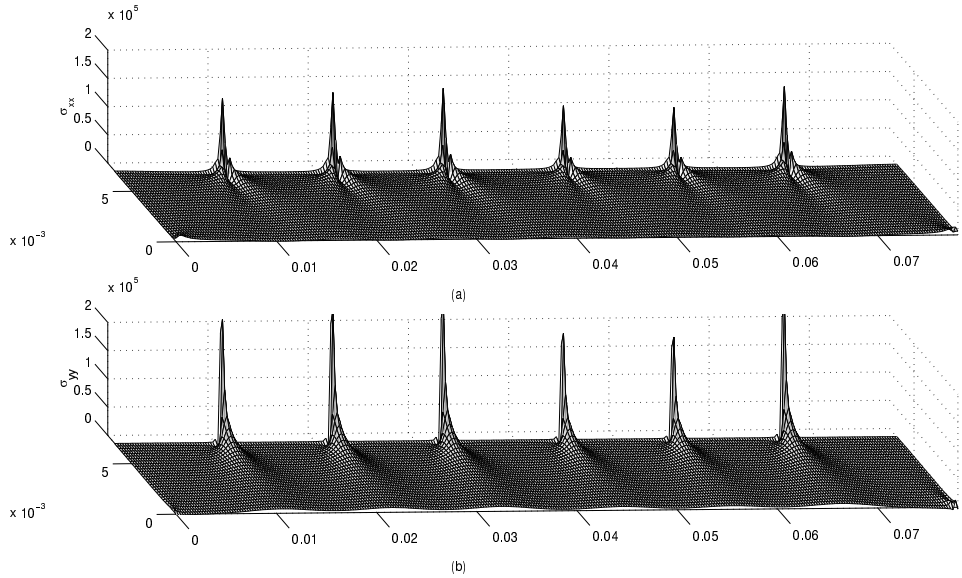
Voor toepassing in reele tijd is deze matrix echter nog te complex en is dus een benadering noodzakelijk. Het belangrijkste punt voor de snaarkoppeling is de verbinding tussen de snaren en de klankkast (het zadel). Op dit punt komen alle snaren samen, zodat ze niet meer als onafhankelijk aanzien kunnen worden. Om een beter begrip te krijgen van de invloed die de snaren op elkaar uitoefenen werd een eindig elementen model opgesteld [6]. Dit liet toe om de interne drukverdeling in het zadel te berekenen en de eigenlijke koppeling in X en Y richting te bepalen. Het eindige elementen model is opgebouwd op basis van de afmetingen en materialen van een Yamaha C70 klassieke gitaar. Eerst werd de statische belasting berekend, voor de typische spanningswaarden van de gebruikte snaren. Onderstaande figuur toont de 3D struktuur en aanhechting van de snaren.



De oplossing van dit systeem liet zien dat de spanningen redelijk gelocaliseerd zijn rond de snaren zelf. Bovendien is de tijdsconstante voor het bereiken van mechanisch evenwicht zeer kort, wat toelaat om een statische berekening te gebruiken voor snaartrillingen tot 10 kHz.



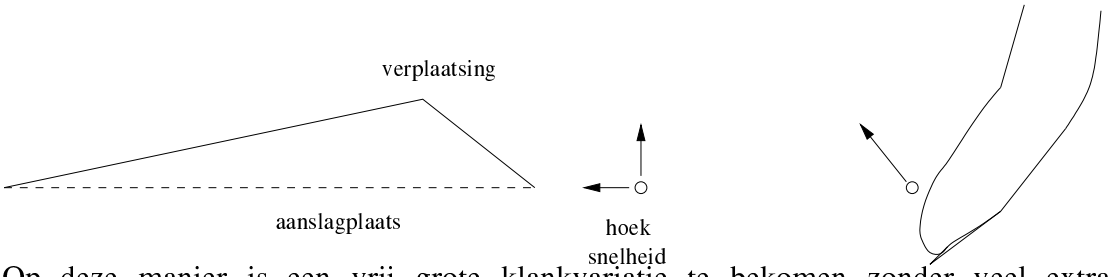
Principe van snaarkoppeling



In bovenstaande figuur is het resultaat te zien voor (a) de horizontale richting en (b) de vertikale richting [9]. Om de koppeling te berekenen werd een eenheidskracht aangelegd in zowel de X als de Y richting. Hieruit blijkt dat een kracht in de vertikale richting via het zadel zo goed als geen invloed heeft op de andere snaren, en dat de resulterende verplaatsing volledig wordt verwerkt door het klankbord. Door de beweging van het klankbord zullen de andere snaren uiteraard ook bewegen, maar deze beweging wordt gedomineerd door de eigenschappen van de klankkast en niet meer door het zadel zelf. Een kracht in de horizontale richting geeft een heel ander beeld. Hier zal het hele zadel als het ware wegschuiven. De aangelegde kracht heeft rechtstreeks invloed op de nabijgelegen snaren. Verder gelegen snaren zullen minder koppeling ondervinden. Dit laat toe om de koppelingsmatrix aanzienlijk te vereenvoudigen door veel elementen gelijk te stellen aan nul.

Excitatie

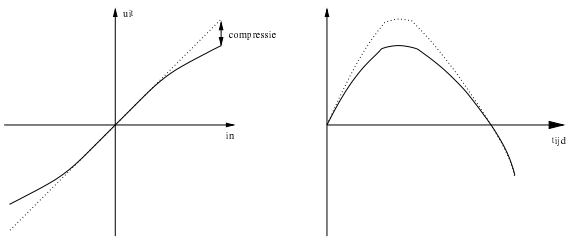
Het model moet met een welbepaalde invoer geëxciteerd worden om de echte gitaarklank te simuleren. In het ideale geval zou dezelfde invoer gebruikt moeten worden als op het echte instrument: de aanslag van de gitaarspeler. Jammer genoeg is de beweging van een vinger over een snaar slecht bij benadering te begrijpen, aangezien geen enkele gitaarspeler in staat om precies de beweging te beschrijven. Er is bovendien ook een groot verschil in klankkleur te horen tussen dezelfde gitaar bespeeld door een beginneling en iemand met jarenlange training. De exact ingespeelde aanslag is berekenbaar uit de opname, maar dit resulteert in een vrij ingewikkelde en moeilijk te interpreteren golfvorm. Een eenvoudige parametrisatie bekomt men door slechts drie parameters te kiezen: de aanslagplaats, de aanslagsnelheid en –verplaatsing, en de aanslaghoek. Eerst wordt de aanslagfunctie berekend op basis van de plaats, snelheid en verplaatsing, en wordt dan verdeeld over de vertikale en horizontale polarizaties op basis van de aanslaghoek.



Op deze manier is een vrij grote klankvariatie te bekomen zonder veel extra informatie. De traditionele fysische modellen voor de gitaar gebruiken grote gegevensbanken met vooraf bepaalde aanslagen, die tijdens het spelen zelf gekozen moeten worden. Dit beperkt het nut van deze klasse van fysisch modellen, aangezien de compactheid van de fysische beschrijving net een van de meest interessante punten is voor toepassing op mobiele toestellen met beperkte bandbreedte. Uit de praktische toepassing van ons model blijkt dat onze keuze voor de parametrisatie van de aanslag goed bruikbaar is.

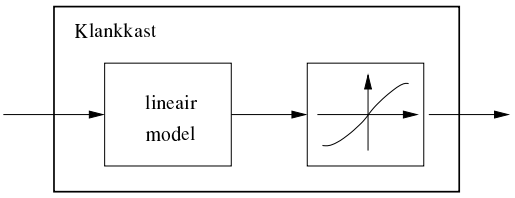
Klankkast

De trillingen van de snaren worden overgedragen aan de klankkast, die voor de uiteindelijke uitstraling zorgt. De klankkast kan met bekijken als een akoestische (mechanische) versterker. Een klankkast heeft welbepaalde resonanties, die afhangen van de vorm en de gebruikte materialen. Afhankelijk van de gewenste toepassing (klassieke muziek, fingerpicking folk, begeleidende "strumming" enz.) zal de fabrikant een andere basisvorm kiezen, die bepaalde frequenties meer of minder zal versterken. Zo zal men bijvoorbeeld voor fingerpicking gitaarspel een redelijk ondiepe klankkast gebruiken, die vrij dicht aanleunt bij de klassieke vorm, omdat de resonaties bij een hogere frequentie liggen, wat een duidelijke, heldere toon tot gevolg heeft. Voor begeleidende strumming zal een grotere klankkast, met lagere resonaties, een luidere bastoon genereren, belangrijk voor akoestisch begeleidend spel.



Modellering van de klankkast kan op veel verschillende manieren, van lange, trage maar eenvoudige *Finite Impulse Response* (FIR) filters, via complexe mengsels van FIR en *Infinite Impulse Response* (IIR) filters, tot hele synthesestrukturen (zoals een modale synthesizer). Al deze modellen hebben voor–en nadelen. De keuze hangt eerder af van de gewenste implementatie, aangezien ze allemaal in staat zijn om een klankkast perfect na te bootsen. Behalve de meest complexe synthesestrukturen zijn al deze filter–gebaseerde modellen lineare systemen: ze zijn niet in staat om vervorming door (mechanische) verzadiging weer te geven. Uit subjectieve beschrijvingen van gitaarklank en uit door ons uitgevoerde metingen blijkt dat er bij grote amplitudes inderdaad verzadiging (compressie) optreedt. Dit kan gemodelleerd worden door een zogenaamd Wiener–Hammerstein

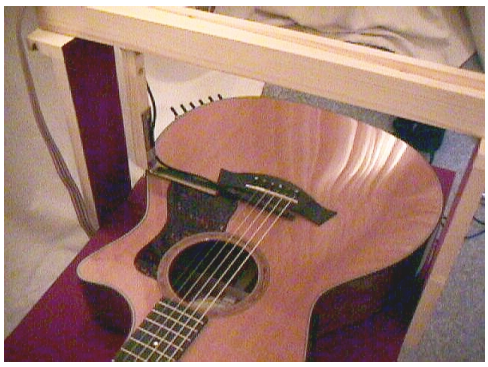
systeem te gebruiken, waar de uitgang van een lineair systeem door een tijds–onafhankelijk niet–lineare verzadiging wordt gestuurd.



Metingen

Experimentele gegevens zijn een absolute noodzaak voor een goede schatting van de modelparameters. Er werden verschillende opnames gemaakt in onze akoestisch afgeschermde en gedempte ruimte. Er werden drie verschillende klassieke gitaren en een folk gitaar onderzocht. Bij de klassieke, nylon snaar gitaren zijn de mogelijk–heden vrij beperkt (en bewust beperkt gehouden): enkel het uitgestraalde geluid kan opgenomen worden. Door de intelligente keuzen van aange–slagen snaar, het al dan niet dempen van de andere snaren, en de keuze van de aan–slagplaats kan veel infor–matie gewonnen worden. Enkel voor de exacte waarden van de koppelingsparameters moet de theoretische waarde gebruikt worden, aangezien het bijzonder moeilijk, zoniet onmogelijk is om de uitgang van de verschillende snaren te scheiden. Bij de folkgitaar is al wat meer mogelijk: de snaren zijn van metaal en hun beweging kan dus door middel van een magnetische pickup bepaald worden. Voor de folkgitaar werd een volledige meerkanaals meetopstelling opgebouwd, die toelaat om simultaan alle nodige data te verzamelen. Het meetsysteem bestaat uit een gitaar met ingebouwde druk–sensor onder het zadel, een elektret condensator microfoon in de klankkast en een zeskanaals magnetische pickup. Deze laatste is een omgebouwde Roland GK–2A synthesiser pickup, met versterkers van eigen ontwerp.





Globaal model

Eens alle onderdelen van de gitaar wiskundig beschreven zijn, kan het uiteindelijke model samengesteld worden. Het globale model moet dan getest worden op stabiliteit: kleine onnauwkeurigheden in de verschillende deelmodellen kunnen een niet–werkend of onstabiel (exponentieel stijgend) model veroorzaken, waardoor kleine aanpassingen nodig zijn. Het model moet dan in een programmeertaal beschreven worden. We hebben implementaties in Matlab (The MathWorks Inc.) en MPEG–4 SAOL gerealiseerd. Enkel deze laatste kan als een echte implementatie beschouwd worden.

IMPLEMENTATIE

MPEG–4

De recentste incarnatie van de MPEG audio– en video compressiestandaard is MPEG–4. De focus van deze internationale standaard ligt op het efficiënt coderen van audio– en video objecten voor zeer hoge compressiefactoren. In het audio–luik van de standaard zitten naast de inmiddels klassieke perceptuele audio coders (zoals MP3 of AAC) en text–to–speech ook nog de zogenaamde parametrische geluids–synthese, omvat in de *Structured Audio Tools*.

De codering gebeurt op basis van de synthesetaal *Structured Audio Orchestra Language* (SAOL). In deze programmeertaal definieert de gebruiker een "orkest", bestaande uit een of meer "instrumenten", dat de binnenkomende data verwerkt. Een instrument is een klein netwerk van primitieve signaalverwerkingsoperatoren dat specifieke geluiden genereert. Een instrument kan zo eenvoudig zijn als een oscil–lator of zo complex als een granulaire synthesizer. Het signaalverwerkend netwerk mag zowel soft– als hardwarematig gerealiseerd worden en omvat zowel de generatie als de manipulatie van geluid. Belangrijk is dat MPEG–4 geen *synthesemethode* definieert maar een taal om de geluidssynthese te beschrijven. Controle van de gedefinieerde instrumenten kan door het orkest een "partituur" toe te zenden. Een partituur is een sequentie van commando's die de instrumenten aansturen of wijzigen. Hiervoor zijn twee talen voorzien: de normale MIDI aansturing en de *Structured Audio Score Language* (SASL). Met SAOL vallen dus eenvoudig fysische modellen van instrumenten te implementeren.

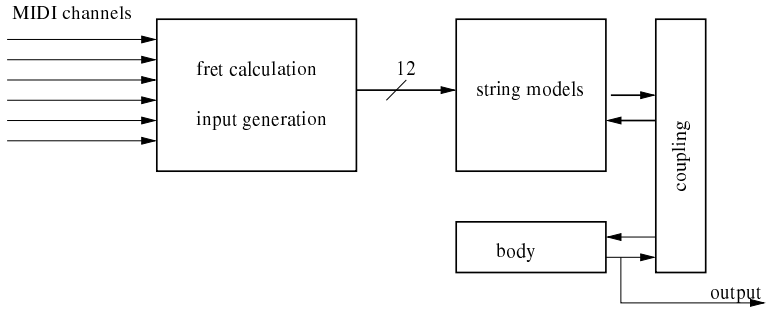
Er bestaan nog geen volwaardige MPEG–4 audio decoders die hardwarematig in staat zijn om de SAOL instructies uit te voeren. Daarom is er een omweg voorzien: het SAOL programma wordt eerst omgezet naar ANSI C code, waarna een compilatie–stap volgt voor de doelarchitectuur. Er zijn enkele pakketten beschikbaar om dit te verwezenlijken. Wij gebruiken *saolc* (ontwikkeld door het MIT en opgenomen in de MPEG–4 ISO standaard als referentiesoftware) en *sfront* (Berkeley). Deze laatste laat geluidssynthese in reële tijd toe, mits de complexiteit van het SAOL algoritme niet te groot wordt.

SAOL implementatie

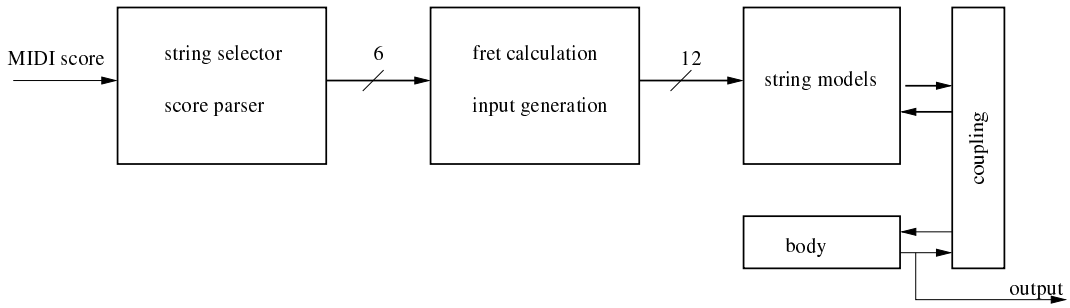
Het gitaarmodel zoals we hier hebben voorgesteld kan niet rechtstreeks in SAOL geïmplementeerd worden aangezien het slechts een beschrijving is van het instrument. Om een partituur te kunnen spelen, is het noodzakelijk om ook een eenvoudig speler–model te ontwikkelen. Deze virtuele speler moet de juiste ingangsfuncties genereren voor de zes snaren, anders gezegd, het moet de virtuele gitaar betokkelen. Daarnaast moet ook de beweging van de linkerhand van een gitarist nagebootst worden (het plaatsen van de vingers op de toets om zo de gewenste noot te bekomen). Dit laatste

is echter geen triviaal probleem, en de optimale oplossing is zelfs onmogelijk in reële tijd. De kern van het probleem is dat dezelfde noot op verschillende snaren van een gitaar gespeeld kan worden, en dat het spelermodel dus moet beslissen welk de beste keuze is. Een menselijke gitarist houdt bij het maken deze keuze rekening met de noten die *na* de te spelen noot volgen (hij kan de hele partituur overzien) – en zelfs dit vraagt dikwijls het herhaaldelijk spelen van het muziekstuk. Dikwijls is dan ook op de partituur meta–informatie te vinden zoals de snaar waarop de noot gespeeld moet worden. De virtuele speler weet dit niet: het weet niet welke en wanneer er andere noten volgen, en het is bijzonder omslachtig om de meta–informatie in de traditionele MIDI informatiestroom te coderen. Dit is een probleem inherent aan de wijze waarop computermuziek wordt doorgegeven aan synthesizers. Om dit op te lossen werden twee verschillende implementaties gerealiseerd.

De eerste versie heeft een volledig gitaarmodel dat voor elke snaar een gescheiden input verwacht, dus zes kanalen in totaal. Nu is er geen probleem: een bepaalde noot kan slechts op een enkele manier bekomen worden op een snaar. De gewenste noot wordt gecodeerd als een MIDI nootnummer indien MIDI als invoer wordt gebruikt, of eventueel als een frequentie als de SASL taal wordt gebruikt. Het fretnummer wordt berekend op basis van de gevraagde noot. Het fretnummer leidt dan uiteinde–lijk tot de lengte van de vertragingslijn en de aanslagfunctie.



De tweede versie heeft een regelgebaseerde beslissingsmethode om een snaar en fret te kiezen. Prioriteit gaat naar de stilstaande (dus niet–aangeslagen of reeds gedempte) snaren met minimaal fretnummer. Is er een snaar die voldoet aan de eis dat de noot erop *kan* gespeeld worden, dan wordt de lengte van de vertragingslijn voor deze naar ingesteld en een aanslag berekend. Voldoet er geen enkele stilstaande snaar, of is er geen stilstaande snaar, dan wordt de snaar gekozen met het kleinste fretnummer voor de gevraagde noot. De snaar wordt eerst gedempt om het effect van het plaatsen van een vinger te simuleren, waarna dezelfde procedure voor vertragingslijn en aanslag wordt gevolgd. Deze versie is echter niet in staat om willekeurige muziekstukken foutloos af te spelen, aangezien vaak de verkeerde snaar wordt gekozen.



Het blijkt dat het voor componisten interessanter is om het eerste model te gebruiken, aangezien ze dan bewust kunnen kiezen welke snaar de opgegeven noot zal voort–brengen. Nick Collins, een Brits componist verbonden aan de *Lansdown Centre for Electronic Arts* (Middlesex University) heeft specifiek voor het door ons ontwikkelde model enkele composities geschreven. Deze samenwerking heeft de oorspronkelijke beperkingen van de gebruikers–interface van het model aan het licht gebracht en heeft geleid tot het huidige model. Om het realisme te verhogen werd een extra random variatie van de aanslag voorzien: een gitaarspeler is niet in staat om elke aanslag op identieke wijze uit te voeren, en dit blijkt grote invloed te hebben op de perceptie van realisme in het model. Daarom wordt, bij herhaalde aanslag, een kleine variatie toegevoegd aan de aanslaghoek en aanslagsnelheid, waardoor een snelle reeks opeenvolgende noten toch een niet–synthetisch karakter verkrijgt.

BESLUIT

Tijdens dit project werd een volwaardig wiskundig model van de akoestische gitaar opgebouwd. In tegenstelling tot andere bestaande modellen werd een volledig virtueel instrument beschreven, wat ongekende expressieve mogelijkheden toelaat voor componisten. Het probleem werd op een integrale manier aangepakt: vertrekkend van fysico–akoestische beschrijvingen en algemene wiskundige principes werd het algemene model opgesteld. Numerieke technieken en meer geavanceerde wiskundige technieken lieten toe om een aaneensluitend geheel te verkrijgen. De modelparameters werden theoretisch afgeleid en op experimentele wijze gemeten. Het geheel werd geïmplementeerd in de MPEG–4 SAOL taal, wat synthese in reële tijd toelaat.

Verder onderzoek kan zich toespitsen op de analyse van speeltechnieken voor verschillende muziekstijlen, om zo het spelermodel te verbeteren. Daarnaast is onder–zoek naar de automatische klassificatie en kwaliteitsbepaling van verschillende echte gitaren mogelijk, om zo tot een minder subjectief vergelijkingssysteem voor muziekinstrumenten te komen.

REFERENTIES

[1] N.H. Fletcher and T.D. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*, New York, Springer–Verlag, 1991.

[2] Julius O. Smith III, *Physical Modeling using Digital Waveguides*, **Computer Music Journal**, Vol.16, No.4, 1992, pp. 74–91.

[3] Matti Karjalainen, Vesa Välimäki, and Tero Tolonen, *Plucked–String Models: From the Karplus–Strong Algorithm to Digital Waveguides and Beyond*, **Computer Music Journal** Vol. 22, No. 3, pp. 17–32, Fall 1998

[4] J.O. Smith, *Efficient Synthesis of Stringed Musical Instruments*, **Proc. of the International Computer Music Conference**, San Francisco, 1993.

[5] A. Papadopoulos, "*Mathematics and Music Theory: From Pythagoras to Rameau*", **The Mathematical Intelligencer**, Vol. 24, No. 1, pp. 65–73, 2002

[6] M.A. Austin, X.G. Chen, and W.J. Lin, *Aladdin: A Computational Toolkit for Interactive Engineering Matrix and Finite Element Analysis*, **ISR Technical Research Report** TR95–74, University of Maryland, 1995

[7] B. Banc, *Physics–based sound synthesis of the piano*, **M.S. Thesis**, Budapest University of Technology and Economics, May 2000, published as Report 54 of Helsinki University of Technology, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing.

[8] Nackaerts A., De Moor B., Lauwereins R., *Parameter estimation for Dual–Polarization plucked string models*, **Proc. of the International Computer Music Conference** (ICMC 2001), La Havana, Cuba

[9] Nackaerts A., De Moor B., Lauwereins R., "*Coupled string guitar models"*, **Mathematics and Simulation with Biological, Economical and Musicoacoustical Applications**, C.E. D'Attellis, V.V. Kluev, N.E. Mastorakis (ed.), pp 289–294, World Scientific and Engineering Society Press, 2001, ISBN 960–8052–46–7.