Síntese Aditiva de Tons Musicais através da Transformada Karhunen-Loève

João Fernando Marar[1]
Edson dos Santos Moreira[2]

[1]UNESP–Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências - Departamento de Computação
Bauru - São Paulo - Brasil
jfm@di.ufpe.br

[2]USP–Universidade de São Paulo
ICMSC–Instituto de Ciências Matemáticas de São Carlos
Departamento de Computação
São Carlos - São Paulo - Brasil
edsmorei@icmsc.sc.usp.br

Abstract:

Signals can be sampled, stored and played back by digital computers. Furthermore, signals can be analized in such a way that compressed forms of their representation can be extracted, reducing the amount of memory needed to store them. The Fourier transform have been traditionally used in this way. This paper deals with the use of the Karhunen-Loève transform as an alternative method of representing a particular and dynamic signal, the musical tones, allowing bigger savings of computing resources, as compared to the Fourier transform.

1 Introdução

Nos últimos anos temos acompanhado uma rápida evolução na tecnologia de construção de computadores. Como consequência, deste desenvolvimento, associado à competitividade, o custo de produção e comercialização dos equipamentos vem barateando dia após dia, forçando a indústria, periódicamente, a substituir seus equipamentos disponíveis no mercado, anexando melhorias ou simplesmente desenvolvendo novos projetos que atraiam usuários (consumidores). Neste contexto inserem-se os sintetizadores, os quais aparecem como parte da evolução do movimento musical, que passa a buscar novos recursos, para produzir formas diferentes de sons, das que já são geradas pelos instrumentos musicais tradicionais.

Instrumentos musicais são fontes geradoras de estímulos sonoros, equivalentemente, geradoras de sinais. Através da amostragem de um sinal sonoro, obtém-se sua representação discreta no domínio do tempo. A análise destes sinais discretos, tem por objetivo extrair características para posterior reprodução. Uma transformação para o domínio da frequência, auxilia a análise do sinal.

A transformação de sinais entre os domínios do tempo e frequência, geralmente, não se configura como um problema de grandes proporções e várias ferramentas estão disponíveis. Para isto utilizamos a transformada de Fourier, transformada de Laplace, transformada Z, entre outras [WIN 78,DeF 88,PRO 88]. Entretanto, para uma determinada classe de sinais, algumas particularidades existem, o que dificulta a reconstrução precisa do sinal através das informações espectrais. Tal é o caso de sinais que apresentam um quadro de componentes que variam com o tempo de duração do sinal. Estas variações podem envolver as componentes de frequência, suas amplitudes e fases. A reconstrução do sinal a partir das suas características espectrais exige o emprego de um tratamento dinâmico, resultando em grande demanda de potência aritmética do processador e/ou na quantidade de memória requerida. É o que se verifica na síntese de tons musicais [MOO 77].

A reprodução fiel de um instrumento musical implica em se levar em consideração todas as variações em amplitude, quantidade e fase dos harmônicos que ocorrem durante o tempo de duração de um tom. Neste sentido, várias técnicas existem e hoje são utilizadas, dentre as quais, destacam-se a distorção de fase (*Casio*), frequência modulada (*Yamaha*), métodos aditivos, subtrativos e métodos *sampling* [MAS 87].

O esforço computacional exigido por métodos de síntese de tons musicais, podem torná-los proibitivos para execução em tempo real, utilizando-se computadores convencionais. Trabalhos têm sido desenvolvidos na tentativa de simplificar a geração de tons musicais, através da utilização de funções não senoidais [HUT 75,STA 88]. Estes métodos exigem uma cuidadosa análise, para que se evite a degradação na qualidade do som produzido, bem como para manter a simplicidade para o controle das funções parâmetros, amplitude e frequência, para construção de novos tons [MOO 77].

Este artigo aborda a síntese aditiva, bem como salienta alguns conceitos básicos, fundamentais para a aplicação de computadores em síntese de tons musicais e, finalmente, descreve um método de síntese aditiva, utilizando um conjunto de funções básicas não senoidais. Neste artigo, utilizaremos as funções básicas provenientes da transformada Karhunen-Loève (K-L). O método K-L, também conhecido por análise das principais componentes do sinal [CHE 91] é baseado na criação da matriz de covariância dos dados de entrada (sinais). Os auto-vetores, principais componentes, são extraídos desta matriz e ordenados de acordo com a magnitude dos auto-valores. O primeiro auto-vetor está associado com o maior auto-valor, e assim sucessivamente. Resultados práticos demonstram os ganhos computacionais através de comparação com outros métodos [CAM 71,STA 88], possibilitando sua aplicação em tempo real.

2 Características Físicas do Som

O movimento vibratório de uma massa em contato com o ar produz som. Isto corresponde a variações na densidade e na pressão do ar ao redor da massa.

Em termos de tons musicais, os movimentos vibratórios podem ser causados por instrumentos acústicos ou por meio de ondas eletricamente excitadas através de um alto falante. Todo som possui três propriedades características:

- **Volume:**

É descrito pela amplitude do som. Um fato bastante interessante, analisando tons musicais, é que a amplitude, bem como os outros dois parâmetros, varia com o tempo. A maneira pela qual a amplitude varia é descrita pelo envelope do tom musical. Usualmente, o envelope pode ser dividido em três fases distintas : ataque, sustentação e decaimento.

Na figura 1, a direita, podemos observar que nem todos os instrumentos musicais possuem estas três fases. Por exemplo, os instrumentos de percussão geram tons totalmente não periódicos, de modo a não possibilitarem uma estimativa de sua frequência fundamental; a esquerda, ilustra o comportamento de um tom de clarinete que apresenta nitidamente seu envelope.

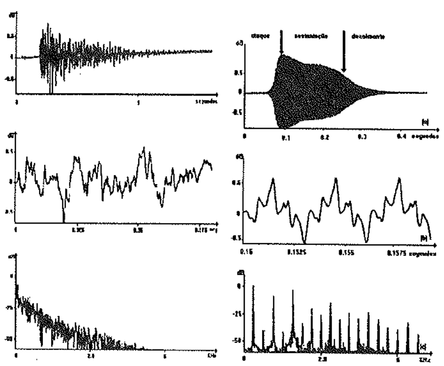

Figura 1: Características de um bumbo de bateria (direita) e características de uma clarinete (esquerda), a figura (a) representa a amostragem do sinal inteiro, (b) representa um pequeno segmento do sinal ampliado no eixo do tempo, (c) representa o espectro do sinal [MOO 77].

- **Altura Tonal:**

É descrita pela frequência fundamental. Na realidade, o som é formado por uma mistura de frequências, sendo que a menor delas é chamada de fundamental e uma combinação de outras frequências maiores chamadas de harmônicos, sobretons ou parciais.

- **Timbre:**

É descrito como a qualidade distintiva de sons de mesma altura e intensidade, e que resulta da quantidade maior ou menor dos harmônicos coexistentes com a frequência fundamental.

3 Síntese Aditiva de Tons Musicais

A principal característica de síntese aditiva, em tons musicais, é a representação do sinal através de um conjunto de funções ortogonais. Esta técnica quando baseada na representação truncada de Fourier, é um dos métodos mais conhecidos em geração de tons, devido à sua fidelidade. Entretanto, esta representação não é utilizada em aplicações de tempo real, devido à grande demanda de potência aritmética exigida do processador. Este método tem sua performance ainda mais degradada, principalmente se for esperado que um mesmo sintetizador gere tons de diversos instrumentos. Em geral, um tom musical, $x(\bullet)$, é

aproximado pela equação 1:

$$x(n) \cong \sum_{i=1}^{K} A_i(n)\phi_i(\theta_i(n)) \qquad (1)$$

onde $\{\phi_i\}$ representa o conjunto de funções periódicas e ortogonais (*funções básicas*), $A_i(\bullet)$ representa a função amplitude (*envelope*) e $\theta_i(\bullet)$ representa a função fase. A função frequência $,F(\bullet)_i$, é determinada através da derivada de $\theta_i(\bullet)$ no tempo.

O processo de análise, extrairá os parâmetros necessários para o cálculo da equação 1,que representa a síntese. A figura 2 ilustra a extração dos parâmetros e a composição destes para representação de um tom musical.

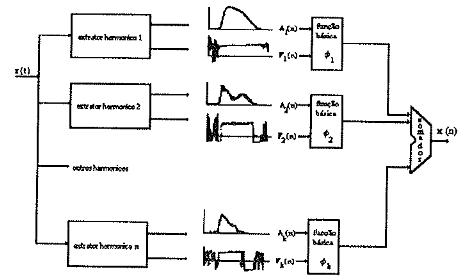

Figura 2: Extração de parâmetros e reconstrução de um tom musical através da síntese aditiva.

A análise não caracteriza um problema de processamento em tempo real, mas a síntese é caracterizada como tal. Em [WAW 89], aborda-se meios para contornar alguns problemas encontrados em síntese de tons musicais em tempo real, sendo que o maior deles reside na grande quantidade de dados envolvidos. Por exemplo, suponhamos que nossa amostragem do sinal seja feita a uma taxa de aquisição de 40 Khz. Neste caso, necessitamos armazenar 40 mil valores por segundo. Pela equação 1, podemos ter uma idéia do "tamanho" das funções amplitude e frequência que são de mesma ordem de $x(\bullet)$, que é a amostra do tom completo. Note que, estas funções são necessárias para cada harmônico extraido.

O esforço computacional baseado em aplicações que utilizam este método de síntese provem de duas origens : *na geração das funções amplitude e frequência para cada harmônico e na multiplicação das funções amplitude com as funções básicas*

Teoricamente, qualquer conjunto de funções periódicas que satisfaça as condições de ortogonalidade [AHM 75], pode ser utilizado para geração de tons musicais, baseado em síntese aditiva. A escolha deste conjunto está intimamente ligada aos objetivos propostos pela síntese. Desejamos sintetizar tons musicais em tempo real. Para isso, a redução do número de funções básicas será uma condição necessária e inevitável. A figura 3 ilustra um diagrama mínimo para a síntese aditiva. Embora seja bastante natural

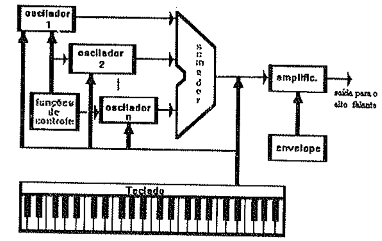

Figura 3: Representação em blocos para um sintetizador baseado em síntese aditiva

a escolha de funções básicas senoidais, deve-se levar em conta a demanda computacional exigida por este conjunto. Dependendo do tom a ser gerado, serão necessárias mais de 30 senóides para minimizar as diferenças perceptiveis entre o tom sintetizado e o natural [GRE 77]. Várias pesquisas utilizando funções básicas não senoidais tem sido realizadas. As funções Walsh [AHM 75] têm apresentado muitas vantagens em relação às funções senoidais, devido à facilidade de geração destas funções básicas em computadores digitais. Infelizmente, são necessárias mais de 16 funções Walsh para minimizar as diferenças perceptuais [HUT 75].

Na seção seguinte, apresentaremos a transformada Karhunen-Lòeve com o objetivo de reduzir o número funções básicas necessárias.

4 Representação de Sinais Utilizando Transformadas Karhunen-Loève

Uma importante aplicação de transformadas ortogonais, em processamento de sinais digitais, é a compressão de dados [AND 70, AHM 75, WOM 77, STA 88, CHE 91], isto é, a representação de um sinal de maneira mais eficiente. As transformadas ortogonais podem ser divididas em duas classes, segundo as funções básicas utilizadas. Desta forma, temos a classe baseada em funções não senoidais e a de funções senoidais, tendo esta última como única representante a transformada de Fourier.

Faremos agora, uma breve introdução a expansão

K-L. Seja $\{X\}$ um conjunto de vetores, obtidos por amostragem, de uma classe de sinais aleatórios; podendo ser tons musicais. Um representante de $\{X\}$ é dado por $x_j = (x_{j,1}, x_{j,2}, ..., x_{j,K})$. A amostra x_j pode ser aproximada por 2:

$$x_j = y_{j,1}\phi_1 + y_{j,2}\phi_2 + \ldots + y_{j,N}\phi_N = \sum_{i=1}^{N} y_{j,i}\phi_i \quad N < K \tag{2}$$

$$y_{j,i} = x_j^t \phi_i \quad i = 1, 2, ..., N \tag{3}$$

onde K é o número total de componentes da amostra e N é o número de componentes utilizadas na aproximação.

Por definição, o mínimo erro quadrado, ε, é dado pela expressão 4:

$$\varepsilon = \left(\sum_{i=1}^{K} y_{j,i}\phi_i - \sum_{i=1}^{N} y_{j,i}\phi_i\right)^2 = \sum_{i=N+1}^{K} \phi_i^t R_X \phi_i \tag{4}$$

onde R_X é a matriz de covariância do conjunto $\{X\}$. Dada por $R_x = \frac{1}{V}\sum_{j=1}^{V}(x_j - \bar{X})(x_j - \bar{X})^t$, onde V representa o número total de elementos do conjunto $\{X\}$ e $\bar{X}$ é o vetor médio do referido conjunto. Quando $\{\phi_i\}$ constituem a base ortogonal de Karhunen-Loève, os elementos ϕ_i são determinados a partir dos autovetores de R_X, de acordo com a equação 5:

$$R_X\phi_i = \lambda_i\phi_i \tag{5}$$

O erro de truncamento da equação 4 é dado através da equação 6

$$Min(\varepsilon) = \sum_{i=N+1}^{K} \lambda_i \tag{6}$$

Isto significa que, se utilizarmos apenas N auto-vetores para a representação de funções, o erro de truncamento será mínimo, sendo dado pela equação 6. A equação 2, escrita em termos dos auto-vetores da matriz de covariância, é denominada expansão Karhunen- Loève. A correspondente transformação ortogonal inversa, na equação 3, é chamada transformada Karhunen-Loève (K-L).

5 Aplicação de Transformada Karhunen-Loève em Tons Musicais

Pela maneira que expomos a transformada K-L, pode nos sugerir uma aplicação direta do tom musical completo, conforme ilustra a figura 1. Porém, se observarmos atentamente a equação 5, notaremos que a dimensão da matriz de covariância está associada a duração do tom musical e este, por sua vez, à taxa de amostragem, a qual o tom foi submetido. Em geral, tons musicais são amostrados à 40 KHz. Portanto, uma aplicação direta da transformada K-L seria impossível, devido à dimensão da matriz de covariância. Contudo, esta preocupação está descartada, pois, por definição, a síntese aditiva requer apenas que o conjunto de funções básicas seja periódico, e não de mesmo comprimento do tom original.

Neste instante, faremos algumas adaptações à transformada K- L para tons musicais, mais especificamente na computação da matriz de covariância, para uma grande quantidade e variedade de tons de instrumento musicais.

Para cada tom musical amostrado, selecionamos um conjunto de funções-amostras para o cálculo da matriz de covariância, *i.e.*, seja $\{x_\xi\}$ um conjunto de funções-amostras de $x_\xi(\bullet)$, um membro deste conjunto é dado por $x_\xi^t = (x_1, x_2, ..., x_{kp})$, assumiremos que tais conjuntos de amostras possuem o vetor médio identicamente nulo, facilitando o cálculo da matriz de covariância. Desta forma, podemos expressar a matriz de covariância, através da seguinte equação :

$$R_x = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{k_p} x_\xi x_\xi^t \tag{7}$$

Como já sabemos, as funções básicas K-L são determinadas através da solução dos auto-vetores, pela equação 5.

Um resultado interessante, obtido através do método K-L, é que o espectro de frequências de um auto-vetor pode ser escrito como combinação linear das transformadas de Fourier das funções-amostras, o qual é dado utilizando as equações 5 e 7 :

$$\mathcal{F}(\lambda_i\phi_i) = \mathcal{F}\left(\sum_{\xi} x_\xi x_\xi^t \phi_i\right)$$

$$\mathcal{F}(\lambda_i\phi_i) = \sum_{k}\sum_{\xi} x_\xi(k) x_\xi^t \phi_i e^{-jwkt}$$

$$\mathcal{F}(\lambda_i\phi_i) = \sum_{\xi} x_\xi^t \phi_i \left(\sum_{k} x_\xi(k) e^{-jwkt}\right)$$

$$\mathcal{F}(\lambda_i\phi_i) = \sum_{\xi} x_\xi^t \phi_i \mathcal{F}(x_\xi) \tag{8}$$

Baseado no resultado obtido pela equação 8, impomos as seguintes restrições para a aplicação desta técnica :

- 1. As funções-amostras devem ter um período fundamental, por exemplo k_p amostras. Isto determinará o período fundamental dos auto-vetores.

- 2. As funções-amostras devem ser períodicas e terem banda limitada. Assim, os auto-vetores terão estas propriedades.

Com estas restrições, agruparemos as amostras dos tons musicais em classes semelhantes, para a computação das funções básicas. Após esta computação, determinaremos as funções amplitude e frequência, pela técnica de funções lineares por partes.

6 Procedimentos para a utilização da Transformada K-L em Síntese Aditiva de Tons Musicais

Na prática, nosso objetivo será alcançado dividindo-se o problema em 5 procedimentos, os detalhes sobre os procedimentos podem ser encontrados em [MAR 92]. Abaixo, relacionamos apenas os tópicos principais :

Normalização das Funções-amostras : procedimento utilizado para o tratamento dos dados conforme as restrições (1) e (2), de maneira a garantir a validade da equação 8.

Alinhamento de Fase das Funções-amostras : Procedimento utilizado para auxiliar a concentração de energia nos primeiros auto-vetores, consequentemente nas funções básicas K-L, possiblitando uma redução significativa deste conjunto para a síntese [CHR 79]. Por exemplo, se cada função amostra possuir um ponto de máximo, o qual contenha uma grande fração de energia do sinal, estas funções serão alinhadas de maneira a que estes máximos ocorram no mesmo tempo para todas as funções-amostras.

Classificação das Funções-amostras : procedimento utilizado para auxiliar a concentração de energia nas funções básicas K-L, através de classificação dos instrumentos musicais [STA 88].

Determinação das Funções Básicas K-L : procedimento utilizado para a determinação, através da equação 5, das funções básicas para cada uma das classes encontradas.

Determinação das Funções Amplitude e Frequência : procedimento utilizado para a determinação dos parâmetros variantes no tempo. Uma maneira eficiente para a geração das funções amplitude e frequência é dada através de funções lineares por partes (piecewise linear) [MOO 77,GRE 77,STA 88,SER 90].

A figura 4 ilustra a aplicação deste método em síntese de tons musicais.

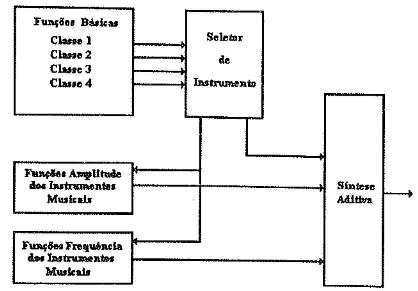

Figura 4: Ilustra o processo de síntese aditiva baseado em transformada Karhunen-Loève para 4 classes de instrumentos musicais. Utilizamos um seletor para enviar apenas as funções básicas necessárias para cada instrumento e suas respectivas funções amplitude e frequência

7 Conclusões

Todos os sinais sonoros existentes na natureza são complexos, analógicos e contínuos no tempo. Através de uma cuidadosa mostragem, podemos obter uma sequência de valores discretos no tempo para a representação fiel destes sinais. Desta forma, os computadores podem ser utilizados para processar ou reproduzir este tipo de informação.

Sons de alta qualidade tem sido gerados por técnicas de síntese aditiva. Uma das vantagens desta técnica é a flexibilidade fornecida no controle das funções básicas que são somadas para a reconstrução do tom. Entretanto, a carga computacional exigida na implementação desta técnica, quando baseada na representação truncada de Fourier, limita seu uso em aplicações de tempo real, devido a grande quantidade de funções básicas necessárias. Este quadro se complica ainda mais, quando se deseja que um mesmo sintetizador reproduza tons de vários instrumentos.

Dentro deste contexto, estudamos maneiras alternativas de representação de sinais utilizando transformadas ortogonais baseadas em funções não senoidais, dentre as quais destacamos a transformada Karhunen-Loève. Esta transformada possibilita a representação de sinais sonoros a partir de um número reduzido de funções básicas. A redução das funções básicas é conseguida através de uma análise conjunta de amostras de todos os instrumentos desejados.

A utilização desta técnica tem mostrado sua eficiência. Na análise realizada por Stapleton [STA 88], foram realizadas, a classificação e a síntese para vários instrumentos. A tabela 1 ilustra o resultado da classificação para 12 instrumentos musicais.

Classe	Instrumento	F. básicas
1	Diapasão	1,2
	Flauta	1,2,3,4
	Guitarra	1,2,3
	Marimba	1,2,3,5
	Violino	1,2,3,4
	Contrabaixo	1,2,3,5
2	Trompete	1,2,3
	Trompa Francesa	1,2
	Trombone	1,2
3	Clarinete	1,2,3
	Sax Tenor	1,2
	Sax Alto	1,2

Tabela 1: Ilustra um exemplo de classificação de instrumentos musicais e as respectivas funções básicas K-L.

Como podemos observar, a tabela 1, apresenta os instrumentos divididos em classes, as funções básicas utilizadas por cada instrumento. Um exemplo da eficiência da técnica é observado quando da síntese do clarinete figura 1: uma representação razoável utilizando Fourier exigiria em torno de 19 funções básicas [MOO 77], enquanto que por Karhunen-Loève, seriam necessárias apenas 3, como visto na tabela 1.

Este método de representação de sinais pode ser utilizado com sucesso em outras aplicações onde as informações componentes dos sinais variam rapidamente. Tal é o caso de tons não harmonicos.

Referências

[AHM 75] N. Ahmed, K.R. Rao, *Ortogonal Transforms for Digital Signal Processing,* Springer-Verlang, New York, 1.975.

[AND 70] H. C. Andrews, J. Kane, *Kronecker Matrices, Computer Implementation, and Generalized Spectra,* Journal of the Association for Computing Machinery, Vol 17, Nro 2, April 1.970, p 260-268.

[CAM 71] S.J. Campanella, G.S. Robinson, *A Comparison of Orthogonal Transformations for Digital Speech Processing,* IEEE Transactions on Communication Technology, Vol.Com-19, Nro 6, December 1.971, p 1045-1049.

[CHE 91] C.S. Chen, K.S. Huo, *Karhunen-Loève Method for Data Compression and Speech Synthesis,* IEE Proceedings-I, Vol. 138, Nro. 5, October 1.991, p 377-380.

[CHR 79] R.A. Christen, A.D. Hirschman, *Automatic Phase Alignment for the Karhunen - Loève Expansion,*IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol.bme-26,Nro 2, February 1.979, p 94-99.

[DeF 88] D.J. DeFatta, J.G. Lucas, W.S. Hodgkiss, *Digital Signal Processing: A System Design Approach,* John Wiley & Sons, New York, 1.988

[GRE 77] J.M. GREY, J.A. Moorer, *Perceptual evaluations of Synthesized Musical Instrument Tones,* J. Acoust. Soc. Am., Vol. 62, Nro 2, August 1.977, p 454-462.

[HUT 75] B.A. Hutchins, *Applications of a real-time Hadamard Transform Network to sound synthesis,* Journal of Audio Engineering Society,Vol 23, Nro 7, September 1975, p 558-562.

[MAR 92] J. F. Marar *Utilização da Transformada Karhunen-Loève em Síntese de Tons Musicais,* Dissertação de Mestrado -USP-São Carlos, 1.992.

[MAS 87] H. Massey, A. Noyes, D. Shklair, *A Synthesist's Guide to Acoustic Instuments,* Amsco Publications, New York, 1.987.

[MOO 77] J.A. Moorer, *Signal Processing Aspects of Computer Music : A Survey,* Proceedings of IEEE, Vol 65,Nro 8, August 1.977, p 1108-1137.

[PRO 88] J.G. Proakis, D.G. Manolakis, *Introduction to Digital Signal Processing,* Macmillan Publishing Company, New York, 1.988.

[SER 90] M.H. Serra, D. Rubine, R. Dannenberg, *Analysis and Synthesis of Tones by Spectral Interpolation,* J. Audio Eng. Soc., Vol. 38, Nro. 3, March 1.990, p 111-128.

[STA 88] J.C. Stapleton, S.C. Bass, *Synthesis of Musical Tones Based on the Karhunen-Loéve Transform,* IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 36, Nro. 3, March 1.988, p 305-319.

[WAW 89] J. Wawrzynek, *VLSI Models for Sound Synthesis* , Current Directions in Computer Music Research, The MIT Press, Massachusetts, 1.989, p 113-148

[WIN 78] S. Winograd, *On Computing the Discrete Fourier Transform,* Math. Comp. 32, 1.978.

[WOM 77] M.E. Womble, J.S. Halliday, S.K. Mitter, M.C. Lancaster, J.H. Triebwasser, *Data Compression for Storing and Transmitting,* Proceedings of the IEEE, Vol 65, Nro 5, May 1.977, p 702-706.

Agradecimentos

Ao Departamento de Computação da UNESP-Bauru, pelo afastamento concedido para a realização do programa de doutoramento no DI/UFPE.

À Capes-PICD e CNPq pelo apoio financeiro.

Ao Departamento de Informática da UFPE pela utilização dos recursos computacionais.

Ao Dr. Edson Costa de Barros Carvalho Filho (D.I./UFPE) pelo grande incentivo para realização deste artigo.

The Synthesis of Complex Sonic Events by Functional Iterations

Agostino Di Scipio & Ignazio Prignano

Laboratorio Musica & Sonologia
Dipartimento di Matematica Pura ed Applicata, Univ. di L'Aquila (Italy)
e-mail *lms@vxscaq.aquila.infn.it*

Abstract

This paper introduces a non-standard sound synthesis method that the authors, with terminology drawn from the literature on chaos theory, call *synthesis by functional iterations.* It describes the general formalism and the application of a difference equation model - the "sin map". Sounds generated with this method can show dynamical properties ranging from very "active" behavior (spectrally rich transient phenomena, turbulence and noise) to relatively "inactive" behavior (smooth, if not almost flat curves), and unpredictable transitions in between.

Motivations

In computer music research, sound synthesis is a major topic. In short, one can easily recognize two distinct approaches to the design and implementation of sound synthesis methods; here, we refer to them as the "standard" and the "non-standard" approach.

Most research work is usually undertaken in the first kind of approach. It entails the study of one or more acoustic models of some theoretical coherence and the implementation of algorithms capable of reproducing them on the computer. In general, this is the case with most well-known synthesis methods, whether based on linear strategies - additive and subtractive synthesis, plus the related analysis-resynthesis methods - or non-linear transformations of one or more signals - like waveshaping, FM, RM, AM (De Poli, 1981). This is the case for physical modelling, too - an area of major concern in current research (De Poli et al., 1991).

Less has been done in the non-standard approach, although many composers have developed and utilized a variety of methods (e.g. G.M.Koenig, I.Xenakis, and H.Brün). In this perspective, there is no pre-existing acoustic model, while the synthesis process is of the composer's own invention, aiming at the deepest integration between sound synthesis and the compositional process.

If appropriately understood, non-standard methods represent an approach of *microstructural time modelling of sound,* a perspective of sonic design also proper to instances of asynchronous granular synthesis/processing and other techniques based on microstructural representation of sound in the discrete-time domain. There is a bias towards the blurring of the neat distiction between *sound* and *structure* (Truax, 1990a), between the composer's *models of sonic materials* and his/her *models of large scale musical design* (Di Scipio, 1993).

A fresh perspective of non-standard synthesis

Any particular instance of microstructural time modelling can be seen as the operationalization of a definite music-theoretical problem: how the local organization of myriads of low-level elementary units may bring forth higher-level, global properties of sonic and musical structure, according to a personal strategy of the composer's own invention.

This point, however, has been largely underhestimated in previous work in non-standard synthesis. Indeed, the challenge lies precisely here: much like musical form can be understood as the epiphenomenon of a dynamical process captured in a model of musical design (i.e.: at some macro-temporal scale), in computer music the properties of the sonic structure - whose local Gestalt is usually called *timbre* - should themselves be understood as epiphenomena of micro-temporal *compositional* processes, unrelated to acoustic models but capable of modelling a phenomenon of morphological