

解説



音楽情報処理

2. 音素材の生成†

長嶋 洋 一†

1. はじめに

本稿では、コンピュータ音楽の素材として用いられる音を生成する情報処理について概観する。人間が聴取する音に関しては、コンピュータによる音響合成システムから出力された電気的信号を空間音響に変換する音響工学や、音の知覚から音楽の認知に至る音響心理学の領域も重要であるが、これは別の機会に譲ることとする^{1),2)}。

コンピュータ音楽における音楽音響学的なアプローチの歴史のおよび技術的な解説と文献紹介については、中村^{3),4)}の概説をぜひとも参照されたい。本稿では特に最近のアプローチを中心に、

- アルゴリズムによる音響合成
- 物理モデルによる音響合成
- 統計的信号処理による音響合成

というカテゴリに分類して紹介する。コンピュータ音楽の研究では音響合成手法が日々刻々と発展し、明日にはまったく新しいコンセプトの音響が誕生するかもしれない。本稿の分類は筆者の独断による現在の状況紹介であることをあらかじめご理解いただきたい^{5),6)}。また、紙面の関係で具体的なアルゴリズム例や数式表現を省略しているので、興味のある方は本稿末の参考文献を参照されたい。

2. 音素材としての音響合成技術の基礎

コンピュータ音楽で用いられる音響信号処理を技術的に定義すると、対象は人間の聴覚帯域とされる 50 Hz から 15 kHz (一部の研究では超低音 (15 Hz) から超音波 (50 kHz) まで) の周波数帯域である。デジタル信号処理的に言えば、量子

化方向に 16 ビット以上の精度、サンプリング周波数が 50 kHz 程度のタイムスロットで、2 チャンネルから 4 チャンネルの音響信号データを刻々と処理・出力するような演算処理能力が要求される^{7)~9)}。

大型計算機の非実時間処理時代には、それぞれのサンプルポイントの演算データをメモリに記憶してから、最終的に D/A 変換してアナログ音響のテープを作成した。現在ではコンピュータ専用の DSP システムを搭載して、実時間の信号処理を行うのが一般的である。具体的な処理エンジンとしては、

- 汎用 DSP チップ
- RISC チップを信号処理専用並列化
- 音響処理専用 DSP チップ/音源 LSI

などがあり、コンピュータ内蔵、あるいは拡張ボード (マルチ DSP) の形態で各種提供されている。なかでもフランスの研究所 IRCAM が開発した DSP システム "ISPW" は、オブジェクト指向の GUI によってマイクロプログラミングの障壁を解消し、世界中の研究者が使用する標準機となった^{10)~12)}。

なお、上の例は音響の断片である単純な音素材の生成の場合であり、音楽の要素である楽音を発生する楽器としてシステムを考えると、もう少し技術的要求が厳しくなる。サンプリング周波数を 50 kHz とすると、同時に 20 種類の音 (和音も個々に演算する必要あり) を得るために必要な 1 音の処理時間は $1 \mu\text{sec}$ となり、1 音の生成が 50 演算サイクルとしても 1 サイクルのクロックタイムは 20 nsec となる。これは汎用の DSP 乗除算やメモリアクセスの限度であり、音源専用 LSI では演算部分を多重化したパイプライン処理も一般的に行われている。また、数十音のデータを累算しても最終的な 16 ビット精度を確保するため

† Sound Synthesis/Sound Generation by Yoichi NAGASHIMA
(Art & Science Laboratory).

†† アート&サイエンス・ラボラトリー

に、内部演算処理は 24 ビットないし 32 ビット幅のデータ表現が採用されている。

3. PCM とサンプリングの問題点

市販の電子楽器はアナログ音源方式の長い歴史を経て、現在ではほとんどが PCM 方式となった。たとえば電子ピアノ内部の大容量 ROM は、世界的名器とされるアコースティック・コンサートグランドピアノの音響をデジタル記録した PCM データでいっぱいである。この録音データは、演奏された鍵盤の音程と打鍵の強弱(タッチ)データに応じて読み出され、D/A コンバータで変換されて音響出力となる。

PCM データ幅を 16 ビット、標準化周波数 50 kHz で単音の音響を 10 秒間ずつ記憶し、それを 88 鍵(ピアノの音色は鍵盤ごとに異なる)とタッチ量ごとに 50 段階ほど用意すると、全体で約 35 Gbits のデータ量となる。実際にはペダルや共鳴・残響を含めた多くの演奏ファクタが関係するために、さらに多量のデータが必要である。そこで、音域を粗く分割して異なる読み出し速度で共通の波形を使用したり、タッチ量を単純に音量(振幅)として乗算してメモリ分割を行わない、などの便宜的手法で大幅な情報圧縮・コストダウンを行っている。

このような PCM 録音による音源方式は、デジタルオーディオと同様に、音響をスピーカから聴く人にとっては本物らしく聞こえる。電子ピアノでは自然楽器の演奏術は徒労に終わり、猫が鍵盤スイッチを踏んでも同じ音響を発生する。つまり、PCM 方式では音色をリアルタイムに制御できないため、実際に鍵盤を演奏する本人だけではどうしても違和感がある。録音されたデータの呼出し(再生)では、メカニカルなピアノでも演奏のニュアンスを反映できないのは当然で、より密接に人間の制御と発音機構が結びつくバイオリンやフルートなどの音響に至っては、まったく論外である。

パソコンのマルチメディア化が話題になり、CD レベルの品質の音響生成が可能になってきたが、これは再生専用のものである。ビーブ音、FM 音、PCM 音と進化してきた音響合成の技術は、警告音や BGM 音、あるいは音響データの切り貼りや済む分野、楽器を弾けない人がパソコン

で楽しむ音楽(リスナとしての参加)などでは今後も健在であろう。しかし、より創造的なコンピュータ音楽(作曲・演奏・芸術)の領域で使えるものではないために、世界中で多くの研究者によって、各種の音響合成方式が検討され続けている。

4. アルゴリズムによる音響合成

音響合成手法で圧倒的に主流となっているのは、音響信号処理の要素をソフトウェア的なアルゴリズムとして記述する手法である。ここではユニットジェネレータ(UG)と呼ばれる基本要素を用いていろいろなアルゴリズムを構成するのが一般的である。まず UG と音素材との関係を整理し、次に加算、減算、非線型変換、の各方式の音響合成手法と現状について紹介していくことにする。

4.1 ユニットジェネレータ(UG)による音要素の生成

UG とは、音響合成アルゴリズムの基本的な単位となる一種の信号発生要素(発振器)である。ソフトウェア的には図-1 のように AND 回路のようなブロックで表す一種の関数であり、内部には一定の長さの特性(波形)テーブル“Table”をもっている。二つの入力のうち、“inc”パラメータはこのテーブルのデータを刻々と参照していくスピードを与え、“amp”パラメータは参照されたデータに乗算されて出力“out”となる。一つの UG で音を作る場合には、これらのパラメータは音の 3 要素に対応して、

- “inc” → ピッチ (Pitch: 音の高さ)
- “amp” → ラウドネス (Loudness: 音量)
- “Table” → ティンバ (Timbre: 音色)

と考えることができる。

また、UG は音響信号そのものだけでなく、音響合成のアルゴリズムに必要な信号発生器として

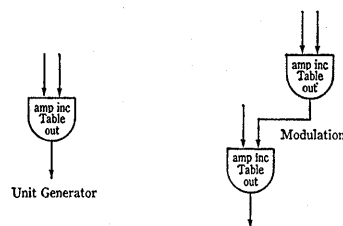


図-1 ユニット・ジェネレータ

も活用できる。たとえば UG の “inc” パラメータ入力に別の UG の出力 “out” を供給することは、後述の周波数変調 (FM, あるいはビブラート) に相当する。

UG は通常のテーブルに従って周期的なデータを読み出す、周期信号発生器である。これをトリガによって一回だけデータを読むように設定すると、そのまま音響の時間的変化特性データ (エンベロープ Envelope) の発生器となる。UG をこのようなワンショット動作に設定し、別の UG の “amp” パラメータ入力に供給すると、音量の時間的な変化特性を実現できる。このエンベロープは音量に限らず、

- 倍音成分の強度変化
- フィルタの Cut off の時間変化
- 変調の強度変化

などによって、音色の時間的変化 (タイムバリエーション) にも活用できる。また、アルゴリズムの構成要素として UG をより一般化した演算子要素としては、加算器・乗算器・単位時間の遅延要素などもよく使われる。

4.2 加算方式による音響合成

アルゴリズムによる音響合成の最も代表的なものが加算方式であるが、最近では分析・再合成 (Analysis/Resynthesis) 方式とも呼ばれている。この手法に共通の考え方は、

1. 分析によるパラメータ抽出
2. パラメータの処理 (クロス・シンセシス)
3. パラメータによる再合成

というステップを行うことである。具体的に特徴となるパラメータの視点から列記してみると、

- サイン合成 (倍音成分)
- バンドパスフィルタ群 (Vocoder)
- 線型予測 (LPC)
- 調和成分とノイズ成分を分離

などがある。このようにわざわざ各種のパラメータをいったん介在させる目的と理由は、音楽的に有効な音響生成の制御と、システム実現の面で効果的な情報圧縮にある¹³⁾。

4.2.1 サイン合成

人間の聴覚は音色を高調波スペクトルの組合せとして知覚することから、サイン合成は最もポピュラーな音響合成方式である。ここでは発生する楽音の基音から整数倍音のそれぞれに相当する

ピッチ “inc” の UG を用意して、個々の “amp” に別個のエンベロープ発生 UG からの出力 (Harmonic Envelope) を供給し、これらの倍音成分をすべて加算して最終的な音響信号を得る。

最近の研究では、定常的な音色でなく非常に短時間の離散フーリエ変換: Discrete Short-Time Fourier Transform によって、音声のような非定常的な音響や、自然楽器においてある音から別の音に移る瞬間の複雑な変化を発生する手法が注目されている¹⁴⁾。また、オーバラップさせたサイン関数表現によって、ピッチによらずに自動的に分析・再合成する手法¹⁵⁾もある。

4.2.2 ボコーダ (Phase Vocoder)

聴覚の周波数帯域を細分したバンドパスフィルタ群によってフォルマントフィルタを構成するための強度パラメータを抽出し、これを再びバンドパスフィルタ群のゲイン特性として再現したボコーダの独特の音色は音楽に広く使われている。

ボコーダとは、基本周波数を整数倍音系列にとらず、基本波形を正弦波と限定しない、という拡張を行った一種の分析合成方式である。そこでボコーダ自体の研究というよりも、実際の音楽制作の現場での適用として、マルチプロセッサのネットワーク環境でボコーダ処理を分散させる手法¹⁶⁾など、応用的な研究対象となっている。

4.2.3 線型予測 (LPC)

線型予測 LPC (Linear Predictive Coding) による情報圧縮 (特徴抽出) がコンピュータ音楽の世界で音響・楽音・音声の分析/合成に適用されるのは、情報理論的な意味で楽音情報の冗長性をうまく利用しているからである。そこで、LPC 方式の音響合成では、定常的な楽器音よりも劇的に変化する、声や歌の合成を目標とした研究も多い。

LPC によって抽出された各種の音響パラメータにもとづいて音響合成を行う方法としては、

- スペクトルモデルに適用
- 全ポールフィルタに適用
- ウェーブガイドのループフィルタに適用

などの方法がある。つまり見方を変えると、LPC 合成方式というのは、音響的に良好な短時間パワースペクトルを、非線型にスムージング (なめらかに接続) する方式、ということができる。

最近の研究としては、音声分析の手法である

McAulay-Quatieru 法を適用して、複雑に変化する音響・楽音を分析/合成¹⁷⁾した例がある。

4.3 減算方式による音響合成

アルゴリズムによる音響合成の次のタイプとして、ここでは減算型と呼ばれる中から

- デジタルフィルタ方式
- フォルマント方式

の二つをとりあげる。減算型の原理としては、アナログシンセサイザの VCF (カットオフ周波数を時間的に可変できる LPF) がその源流にあり、実際の電子楽器としてはサイン合成方式よりも古い。

また、人間の声は声帯からの音響素材を咽喉・咽頭のフィルタで調整する、という一種の減算方式である。つまり人間の感覚に親しい音響合成方式であり、ここでのキーワードはフィルタということになる。

4.3.1 デジタルフィルタ

アナログシンセサイザの VCF は一般に LPF であり、これを単純にコンピュータ上に置き換えて実現したのが、デジタルフィルタ方式である。具体的には、サンプリングに対応した演算周期ごとに

- システムクロック単位の遅延要素
- 係数のための乗算要素
- 累算のための加算要素

という UG を用意して多段結合すれば、IIR タイプないし FIR タイプのフィルタを構成できる。

最近の研究としては、デジタルフィルタを理論どおりに構築した場合の不自然さを検討し、あえて特性に歪をもたせた“暖かい”デジタルフィルタを実現する、という報告¹⁸⁾があった。このタイトルの「デジタルフィルタをアナログのように聴かせる」という考え方自体、デジタルはアナログよりも優秀である、という一般的な概念が音楽の世界では否定されうる事実を示しており、人間の聴覚(心理)に回帰するコンピュータ音楽の重要な視点として興味深い。

4.3.2 フォルマント (Vowel)

フォルマント方式とは、共鳴体の音響に固有の特性をフォルマントフィルタとして実現するものであり、アルゴリズムによる音響合成方式と物理モデル方式との橋渡しをする役割りにある。

コンピュータ音楽におけるフォルマント方式の

適用は、おもに声の合成を最大の目標としており、線型予測・ボコーダなどととも、フォルマント・トラッキングによってコンピュータに歌わせることを目指した研究¹⁹⁾が続けられている。

音声の再生でなく歌唱を生成するためには、複数のフォルマントフィルタを用意するだけでなく、たとえば母音ごとに各フィルタの中心周波数が変わり、さらに女性の声と男性の声でもパラメータが変わるなど、アルゴリズムはかなり複雑になる。IRCAM で研究・開発された CHANT²⁰⁾、あるいは FOF²¹⁾ というボイス・シンセサイザ方式も、フォルマント方式の一種のバリエーションである。

4.4 非線型変換による音響合成

アルゴリズムによる音響合成の最後のタイプとして、ここでは非線型変換という視点から、振幅変調方式・周波数変調方式・ウェーブシェーピング方式の3種を紹介する。つまりこれらの方式は、音響を生成する UG に対して、順に

- UG の振幅“amp”を変調するもの
- UG のピッチ“inc”を変調するもの
- UG の波形“Table”を変換するもの

と考えることができる。

4.4.1 振幅変調 (AM)

低周波信号による定常的な振幅変調がトレモロ効果と知覚されるのは数 Hz までであり、AM 変調周波数を 100 Hz オーダに上げると、むしろ音色を変化させる変調と知覚されるようになる。さらに楽音のピッチに対応させて、ピッチと同じ周波数レンジの UG によって多段の AM をかけると、ほかにないユニークな音色の楽音を発生することができる。

また、通常 AM は 0-1 の変調度をもっているが、これをバイポーラ (両極: -1-+1) の変調度としたものがリング変調 (平衡変調) である。通信分野でよく知られているように、搬送波成分が打ち消し合って、元の楽音信号のピッチ成分や倍音成分とはまったく異なった、独特の音色が得られる。

4.4.2 周波数変調 (FM)

民生のシンセサイザと簡易型パソコン内蔵音源として普及した FM 方式²²⁾は、コンピュータ音楽の研究者の興味の対象としてはすでに過去のものとなった。もともとサイン合成では作りにくい

非整数次倍音を容易に発生できるのが FM 方式の最大のメリットだったが、PCM 方式のリアリティに負け、音素材としての新鮮さも激減してしまった。

最近の論文では、もっぱら FM 方式は他の音響合成アルゴリズムと比較する引合いとして登場するばかりである²³⁾。たいてい、その役回りは過去の方式の代表としての位置づけである。

4.4.3 ウェーブシェーピング (Waveshaping)

ウェーブシェーピング方式は、基本的には波形を歪ませることであり、デジタル的に具体化する場合には、変換テーブルを参照することに尽きる。ただし、音響合成に利用する動機としては、

- FM 方式のように変わった音を作りたい
 - パラメータの補間手段として活用する
 - システムへのインプリメントが容易だから
- などいろいろで、実現の形態もさまざまである。

最近の研究例²⁴⁾では、楽音の各パーシャル（ここでは定常的成分と瞬間的成分など、特性の異なる複数の音響成分の意味）ごとに時間・音量・音域などのパラメータに対応してなめらかに歪が増加／減少するテーブルを用意することで、従来よりも少ないパーシャル数で、効果的に現実感のある音響合成（自然楽器の模倣）を実現している。

5. 物理モデルによる音響合成

音響合成手法のカテゴリの第二として紹介するのは、自然楽器などの音響振動を数学的／物理的な物理モデルとして構築し、そのままりアルタイムにシミュレーションして音響を生成する方法である。ここには音響信号の合成だけでなく、演奏者モデルやマンマシン・インタフェースの問題、さらに空間音響や演奏情報のフィードバックといった広大な研究領域があり、とても本章だけで扱えるものではない。このような視点での物理モデル方式に関する詳しい技術的解説・文献紹介としては、藤森²⁵⁾の報告をぜひとも参照されたい。

なお、これまで研究者が細々とプライベートに実現してきた物理モデル方式の音響合成システムが、ついに 1993 年の末にヤマハから実際に電子楽器の製品として発表された。サンプリング方式に続く新勢力となるかどうか注目されている。

5.1 Karplus-Strong アルゴリズム

物理的振動を微分方程式としてシミュレーションする方法の延長として、撥弦音とドラム音の合成方法として提案された Karplus-Strong アルゴリズム²⁶⁾は、物理モデル方式の代表格である。

最近の研究²⁷⁾では、弦楽器と管楽器の物理モデルを汎用 DSP (TMS 320 C 30) で実現し、可変長遅延回路としてオールパスフィルタの代りにラグランジュ (Lagrange) 補間を参照している。ここでは双方向の遅延回路も採用しており、次の Waveguide に近い実装方法とみることもできる。

5.2 Waveguide フィルタ

物理モデル方式でよく使われる Waveguide フィルタは、もともと無損失の構成ブロックによって残響装置を作る目的で導かれ²⁸⁾、やがて楽器のシミュレーションに応用された。1次元の波の成分として、右向きと左向きの進行波を明示的に表現した遅延ループモデルは、質量とバネの系を記述する差分方程式を数値的に積分する従来の有限要素法のアプローチに比べて、非常に効率的である。

5.3 モーダル合成

モーダル・モデルとは、質点・バネ・摩擦力を組にした要素によって構成される²⁹⁾。モーダル合成方式の物理モデルを基にした楽音合成用プログラムの MOSAIC (Modal Synthesis and Analysis with Interactive Control) は Scheme 言語のインタプリタを基に作成された。

6. 統計的信号処理による音響合成

音響合成手法のカテゴリの最後は、数学的・統計的な処理による音響合成方式として、グラニューラーシンセシス (Granular Synthesis) とアトラクタシンセシス (Attractor Synthesis) について紹介する。いずれも主流となる音響合成手法とは言えそうもないが、音楽の原理的構造との関係において興味深い点を筆者は注目している³⁰⁾。

6.1 グラニューラーシンセシス

Granular Synthesis とは、アイデアとしてはかなり古い音響合成方式³¹⁾で、音を量子化して扱うという視点がユニークである。すなわち、音と知覚できない(周期振動のない)、微小でなめらかな音圧変化パルス粒子 (Grain) を非常に多数個用いて、ある種のランダム性をもって時間的・空間的に

配置する, という手法である. それぞれの Grain の形状や幅, 時間的平均密度, 空間的定位, 音量分布などによって, 発生して知覚される音響はさまざまに変化する.

最近の研究では, WS の GUI を活用したパラメータ制御³²⁾や, ニューラルネットワークを利用したリアルタイムのパラメータ補間³³⁾など, 原理としてはすでに完結した Granular Synthesis を音楽にどう利用するか, という段階に移っている.

6.2 グラニューラーサンプリング

伝統的な Granular Synthesis の音響は, 音素材である Grain が幾何学的に単純な形状をしているために, 楽音としてはピッチ感も音色感も漠然としている特徴があった. これに対して, Grain として日常的な音響・楽器音・音声などになめらかな窓をかけて切り出した数十 msec 程度の音響断片を用いる, という発想の Granular Sampling が登場した.

WS の GUI を活用したパラメータ制御と DSP によるリアルタイム音響合成によって³⁴⁾, このアイデアはまたたくまに多くの研究者・作曲家によって取り込まれ, 実際の作品に適用されている. この方式は音響を新たに生成するというよりも, もととの音響断片のもつキャラクターが色濃く残った, 一種のエフェクタとして活用されている.

6.3 アトラクタシンセシス

コンピュータ音楽においては, 自己相似性・フラクタル・カオス・CA (Cellular Automata)・GA (Genetic Algorithm) といった数学的課題は永遠のテーマであり, 音響合成の領域でもいろいろな試みが続いている. その一つアトラクタシンセシスとは, サンプルとなる自然音響信号を一定の周期性をもたせてアトラクタ空間と呼ばれる空間に射影変換し, アトラクタ空間内において別の関数で線型変換してから, 再び音響データの空間に射影して取り出す, という一種の Analysis/Resynthesis 方式である³⁵⁾.

アルゴリズム方式のように物理的イメージをとまわず, 純粋に数学的なデータ処理によって音響合成を行うものであるが, 音響レベルのフラクタル構造から音楽のフラクタル構造までを統一的に構築できるかもしれない可能性が注目される.

7. おわりに

本稿では, コンピュータ音楽の音素材としての音響合成について駆け足で紹介してきたが, ここで予定の紙数が尽きた. いずれの音響合成手法においても膨大なパラメータがあり, 有効なパラメータ制御に関する課題, ヒューマンインタフェースやインタラクティブ性についての議論が重要な領域でもあるのだが, これらについての検討はまた別の機会に譲らざるをえない.

コンピュータ音楽の研究が続く限り, 音素材の研究は続けられる. 新しい音のアイデアは新しいシステム/楽器の登場をもたらす, 新しい音楽の原動力となる. 人間の聴覚という神秘とともに, 音の探求は夢にあふれた世界なのである.

参考文献

- 1) Bowles and Edmund, A.: *Musick's Handmaiden* あるいは芸術に奏仕するテクノロジーについて, コンピュータと音楽, pp. 11-29, カワイ楽譜 (1972).
- 2) Schaeffer, P.: 音楽・言語・情報理論, エピステーマー, pp. 87-101, 朝日出版社 (1976).
- 3) 中村 勲: 音楽・楽音・コンピュータ, コンピュータと音楽 (bit 別冊), pp. 54-64, 共立出版 (1987).
- 4) 中村 勲: 計算機の音楽音響学への応用, 情報処理, Vol. 29, No. 6, pp. 549-556 (1988).
- 5) Smith, J.O.: Viewpoints on the History of Digital Synthesis, Proceedings of 1991 ICMC, pp. 1-10, Montreal (1991).
- 6) 長嶋洋一: 楽音合成技術, 音楽情報処理の技術的基盤, (pp. 12-23, 平成4年度文部省科学研究費総合研究(B)「音楽情報科学に関する総合的研究」調査報告書 (1993).
- 7) Moore, F.R.: *Elements of Computer Music*, pp. 27-61, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1990).
- 8) 梅本亮夫: 音楽心理学, pp. 9-59, 誠信書房 (1966).
- 9) 安藤由典: 楽器の音色を探る, pp. 2-27, 中央公論社 (1978).
- 10) Lindemann, E., Dechelle, F., Smith, B. and Starkier, M.: *The Architecture of the IRCAM Musical Workstation*, Computer Music Journal, Vol. 15, No. 3, pp. 41-49, MIT (1991).
- 11) 平野砂峰旅: MAX・ISPW, 音楽情報処理の技術的基盤, pp. 135-148, 「音楽情報科学に関する総合的研究」調査報告書 (1993).
- 12) 菜 孝之, 松沼康一, 高崎こずえ, 木匠祥子: *Introduction of Computer Music Studio of Sonology Department*, Kunitachi College of Music, Proceedings of 1993 ICMC, pp. 311-313, Tokyo (1993).

- 13) Rodet, X.: Digital Signal Synthesis in Music: Methods, Means and Applications, Proceedings of ISMIS, pp. 91-95, Tokyo (1989).
- 14) Strawn, J. M.: Analysis and Synthesis of Musical Transitions Using the Discrete Short-Time Fourier Transform, Journal of AES, Vol. 35, No. 1/2, pp. 3-13, AES (1989).
- 15) Byyan, E. and Smith, J. T.: An Analysis-by-Synthesis Approach to Sinusoidal Modeling Applied to the Analysis and Synthesis of Musical Tones, Proceedings of 1991 ICMC, pp. 356-359, Montreal (1991).
- 16) Katrami, A. I., Kirk, R., Orton, R. and Hunt, A.: Deconstructing the Phase Vocoder, Proceedings of 1992 ICMC, p. 392-393, San Jose (1992).
- 17) Holloway, B. and Haken, L.: A Sinusoidal Synthesis Algorithm for Generating Transitions between Notes, Proceedings of 1992 ICMC, pp. 14-17, San Jose (1992).
- 18) Rossum, D.: Making Digital Filters Sound "Analog", Proceedings of 1992 ICMC, pp. 30-33, San Jose (1992).
- 19) Dodge, C.: Synthesized Voices and Musical Fractals: Two Natural Models for Computer Music, Proceedings of ISMIS, pp. 46-50, Tokyo (1989).
- 20) Bennett, G.: Digital Synthesis of the Singing Voice, Proceedings of ISMIS, pp. 32-36, Tokyo (1989).
- 21) Clarke, J. M., Manning, P., Berry, R., Purvis, A.: VOCEL: New Implementations of the FOF Synthesis Method, Proceedings of 1988 ICMC, pp. 357-371, Korn (1988).
- 22) Chowning, J.: The Synthesis of Complex Audio Spectra by means of Frequency Modulation, Journal of AES, Vol. 21, No. 7, pp. 526-534, AES (1973).
- 23) Horner, A., Beauchamp, J. and Haken, L.: Wavetable and FM Matching Synthesis of Musical Instruments Tones, Proceedings of 1992 ICMC, pp. 18-21, San Jose (1992).
- 24) Beauchamp, J. and Horner, A.: Extended Nonlinear Waveshaping Analysis/Synthesis Technique, Proceedings of ICMC, pp. 2-5, San Jose (1992).
- 25) 藤森潤一: 楽音と音場のシミュレーション技術, 音楽情報処理の技術的基盤, pp. 23-37, 「音楽情報科学に関する総合的研究」調査報告書 (1993).
- 26) Karplus, K. and Strong, A.: Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbers, Computer Music Journal, Vol. 7, No. 2, pp. 43-55, MIT (1983).
- 27) Karjakainen, M., Laine, U. K., Kaakso, T. and Valimaki, V.: Transmission-Line Modeling and Real-Time Synthesis of String and Wind Instruments, Proceedings of 1991 ICMC, pp. 293-296, Montreal (1991).
- 28) Smith, J. O.: Waveguide Filter Tutorial, Proceedings of 1987 ICMC, pp. 9-16, USA (1987).
- 29) Cadoz, C. and Florens, J.: Modular Modelisation and Simulation of the Instrument, Proceedings of 1990 ICMC, pp. 75-78, Glasgow (1990).
- 30) 長嶋洋一: コンピュータミュージック最前線, bit, Vol. 25, No. 12, pp. 15-22, 共立出版 (1993).
- 31) Roads, C.: Granular Synthesis of Sound, Computer Music Journal, Vol. 2, No. 2, pp. 61-62, MIT (1978).
- 32) Orton, R., Hunt, A. and Kirk, R.: Graphical Control of Granular Synthesis Using Cellular Automata and Freehand Program, Proceedings of 1991 ICMC, pp. 416-418, Montreal (1991).
- 33) Nagashima, Y.: Real-Time Control System for "Pseudo Granulation", Proceedings of 1992 ICMC, pp. 404-405, San Jose (1992).
- 34) Truax, B.: Time-Shifting and Transposition of Sampled Sound with a Real-Time Granulation Technique, Proceedings of 1993 ICMC, pp. 82-85, Tokyo (1993).
- 35) Monroe, G.: Synthesis from Attractors, Proceedings of 1993 ICMC, pp. 390-392, Tokyo (1993).

(平成6年1月10日受付)



長嶋 洋一 (正会員)

1958年生。1981年京都大学理学部(物理)卒業。河合楽器製作所を経て現在、ASL (Art & Science Laboratory) 長嶋技術士事務所所長、作曲家。イメージ情報科学研究所研究員。京都芸術短期大学・神戸山手女子短期大学・国立長野高専講師。技術士(情報工学部門・電気電子部門)。音楽情報科学(Computer Music)の研究(インタラクティブシステム・アルゴリズム作曲・カオス理論の応用・音響信号処理・感性情報処理等)とともに実験的作曲活動を行う。著書「マイコン技術者スキルアップ事典」, 「プロ電子技術者のコモンセンス」(CQ出版)など。IEEE, ICMA, 人工知能学会, JACOM, 日本技術士会各会員。音楽情報科学研究会連絡委員。