

## 閉曲線を利用した音色の操作法

岩淵勇樹 秋田 純一 北川 章夫

金沢大学大学院

## Tone Manipulation Method Using Closed Curve

Yuuki Iwabuchi Junichi Akita Akio Kitagawa

Graduate School of Natural Science & Technology, Kanazawa University

butchi@merl.jp, {akita, kitagawa}@is.t.kanazawa-u.ac.jp

### 概要

電子楽器の発明以降、音色を生成する方法も数多く考案されている。しかしそれらの多くは音色生成のための多くの制御パラメータを必要とし、また各パラメータと音色との対応が複雑であり、直感的な音色の操作が困難である。またそれらのパラメータ操作は一次元的であり、近年普及が著しいタッチパッドなどの二次元操作デバイスを有効に利用できていない。本稿では、解析信号と呼ばれる複素平面上の閉曲線図形と音声信号との対応に着目し、閉曲線に対する形状操作等の直接操作によって周期音声信号を変化させる方式による音色の操作方法を提案する。本手法は、既存の音に対する加工によって音色の発展させる音色生成には有効である。また図形と音を対応付けることにより、視覚表現と融合した音楽パフォーマンスへの応用も考えられる。

### Abstract

A lot of studies on tone generation methods are proposed, however, tone generation requires numbers of parameters, and it is difficult to understand the relation between the parameters and the generated tone. Their parameters are operated in one-dimensional interface, which is not effective for two-dimensional interface, such as touch pad. In this paper, we propose the tone manipulation method using a kind of closed curves called the analytic signal. The waveform of the tone is related to the corresponding analytic signal, and the manipulation for the analytic signal can generate the modified tone. This method is adequate for tone modification from the existing instrument's tone. It is also expected to extend the application of the analytic signal to visual fusion performance.

## 1 はじめに

電子楽器の発明以降、それまでの物理的な振動現象を用いてきた楽器の音色は格段に生成の自由度が高くなり、今までにない新たな音色を作ることが可能となった。それに伴ってテクノ音楽等の新たな音楽分野が生まれ、それが再び新たな電子楽器の発展を促している。

電子楽器に向けた、楽器を演奏するための入力インタフェースに関する研究は、ジェスチャ入力を用いるもの [1] やユーザの表情を用いるもの [4, 5], 口の形を用いるもの [6] など多くあるが、それと並んで、電子楽器に適した音色の入力・生成方法、特にマウス操作やタッチパッド操作など GUI に適した音色入力・生成方法を探ることは、電子音楽全体の発展のためにも重要な課題といえる。

電子楽器の特性を生かした音色の生成方法は数多く研究されており、また実用化されているものも多いが、それらの多くは正弦波や矩形波などの単純な波形を組み合わせる加算合成方式や FM 音源方式のように、多数のパラメータを必要とする。そのため、意図した音色を生成するためには多くの経験を要する。また正弦波や三角波などの波形や PCM 録音されたサンプリング音源に対して、演算やフィルタリングによって音色を生成する減算合成方式も、同様にパラメータ制御が必要である。またこれらのパラメータは一次元量であり、その操作はスライダーやツマミ等のインタフェースによって操作されるが、これらのインタフェースは、マウスやタッチパッドなどの近年一般的となっている平面入力・操作デバイスを有効に活用できていないといえない。

我々はこれまで、マウスやタッチパッド等の平面入力・操作デバイスによる音色入力インタフェースを構築するために、シルエット画像などの図形を、解析信号と呼ばれる信号に変換して周期信号を生成する手法を提案してきた [10][11]。この方式では、平面入力デバイスによって描画した閉曲線図形を解析信号によって近似し、それに音色を生成するものであるが、解析信号に相当する閉曲線には幾何学的制約があるので、任意の閉曲線図形を解析信号で精度よく近似するには限界があり、ユーザインタフェースにより解決する必要がある。

以上をふまえ、本稿では、既存の音声信号をベースとし、それに対してマウスやタッチパッドなどの平面操作デバイスによって波形を操作することで、新たな音色の音声信号を作成する手法の提案と実装を行う。具体的には、既存の音声信号から生成された解析信号を複素平面上の閉曲線図形とみなし、これに対して平面操作デバイスによる図形操作によって新たな周期音声信号を生成・変更する手法の提案と実装を行う。

## 2 電子楽器と音色生成の歴史

まず電子楽器と音色生成に関する技術の歴史について概観する。

電子楽器そのものの起源は、20 世紀前半のサディウス・ケイヒルによるテルハーモニウム (1906 年) や

レフ・テルミンによるテルミン (1917 年) までさかのぼることができる。これらからはじまる電子楽器の進化は、電子楽器を活用する楽曲である電子音楽を誕生させ、その電子音楽の進化が新たな演奏手法や電子楽器の進化を促す、という相互発展の歴史をたどっており、21 世紀の現在になっても、TENORI-ON[8] 等の新しいコンセプトの電子楽器へと引き継がれている。

その後、1930 年代に生まれたフィルタ回路、エンベロープ生成等の音色生成システムとしてのシンセサイザーの基本要素が、1960 年代に入って統合されてモーグ・シンセサイザー (1964 年) 等につながり、各要素を部品として統合するモジュラー・システムとして完成され、その後の 1967 年ごろの FM 音源を採用する FM シンセサイザーの登場を経て電子楽器の普及が進んだ。1970 年代になると、これらのシンセサイザーの構成要素・演算処理をデジタル化したディジタル・シンセサイザーが現れ、その後の計算機の高性能化・小型化に伴って DAW (Digital Audio Workstation) へと進化する。

また 1972 年には、イアニス・クセナキスによってタブレットボードに描いた線画図形の縦軸を音の高さ、横軸を時間とみなして音声信号に変換する装置 UPIC が考案され、図形から音声信号への変換という分野が開拓された。その後も KORG 社による Kaossilator[3] のように、平面タッチパッドをシンセサイザーの 2 つの独立した音色パラメータの入力に用いる装置も現れた。

1980 年代に入り、計算機の更なる高性能化・普及にともない、計算機の処理能力・表現能力も活用した映像表現や、音声合成技術と融合したボーカロイド [9] 等の音楽表現分野も現れ、更なる進化発展をみせている。

その他 GUI の特性を活かした例として、一部の効果音作成ソフトウェア等では波形をマウスで描画して音色を作る機能を備えているものもあり [7]、パラメータ入力よりは直感的に操作できるが、生の音声波形は視覚的に音色を想起させるに優れているとも一概には言い難い。また、この手法は信号の端点が不連続になったり波形が急峻になったりし易く、歪んだ音となり易いため、一般的な作曲にはあまり適さない。

一方、メディアアートにおいては、図形を基にした音色生成の先行研究のひとつとして Levin らの作品 [2] が挙げられる。この作品では図形と音色の調和を意識して構成されているため直感的ではあるが、面積や周囲長などの画像の特徴量をパラメータ化しているに過ぎないため、形状情報が音色に寄与する割合は低く、表現力にも限界がある。

## 3 音色操作のための二次元操作インタフェース

現在利用されている多くの音色操作インタフェースは、各種パラメータをツマミやスライダー等で操作するものであるが、これは 1 次元的なインタフェースであるといえる。

一方、計算機への入力デバイスとしては、従来からのマウスやトラックボールのほか、近年普及してきたタッチパッドなどがあるが、これらは二次元平面上でのポインタ移動や図形描画が可能である。これらの平面入力インタフェースに適した音色の操作方法を探ることは、より豊かな音色生成のために有用であると考えられる。これらの入力デバイスを活用する音色操作インタフェースとして最適なのは、一定領域内の2次元平面上に配置された操作点を、操作するポインタによりクリックやドラッグなどの操作ができることであると考えられる。このような音色操作を実現したインタフェースの例として Kaossilator[3] が挙げられるが、これは音程とエフェクトの強さの2つのパラメータを  $x$  軸と  $y$  軸に割り当てたものであり、2つのパラメータを同時に操作可能であるものの、平面上の操作と生成される音色との関係を直感的に関連付けることは容易ではない。

本稿では、以上で述べた平面操作デバイスの有効活用が可能なインタフェースを提案する。

## 4 音声信号の閉曲線表現と操作

3の必要要件をふまえ、本稿では、音色の操作加工を行う手法として、音色を平面上の閉曲線図形として取り扱い、その図形に対する変形等の操作によって音色の操作を行う手法の提案と実装を行う。具体的には、音色のうちの振幅の過渡的な変化を除いた、定常状態での時間軸の周期波形を平面的操作によって操作できるインタフェースとして、以下で述べる「解析信号シンセサイザ」を提案する。

### 4.1 解析信号

$$\tilde{S}(\omega) = \begin{cases} 0 & (\omega < 0) \\ S(\omega) & (\omega = 0) \\ 2S(\omega) & (\omega > 0) \end{cases} \quad (1)$$

音声信号  $s(t)$  に対して、そのフーリエ変換を  $S(\omega)$  とおく。式 (1) のように、 $S(\omega)$  の正周波数成分の振幅を2倍、負周波数成分の振幅を0倍とし、 $\tilde{S}(\omega)$  とおく。それを逆フーリエ変換した複素信号を一般に「解析信号」と呼び、 $\tilde{s}(t)$  と表す。

$\tilde{s}(t)$  の実部  $\Re[\tilde{s}(t)]$  は  $s(t)$  のままであるという性質をもち、 $s(t)$  が区分的に滑らかで常に有限値をもつ周期信号であれば、 $\tilde{s}(t)$  は複素平面  $x + iy$  上の閉曲線を描くことが導かれる。(ただし  $i$  は虚数単位)。図1に解析信号の例を示す。

$F(\omega)$  を以下のように定める。

$$F(\omega) = \begin{cases} i & (\omega < 0) \\ 0 & (\omega = 0) \\ -i & (\omega > 0) \end{cases} \quad (2)$$

このとき、

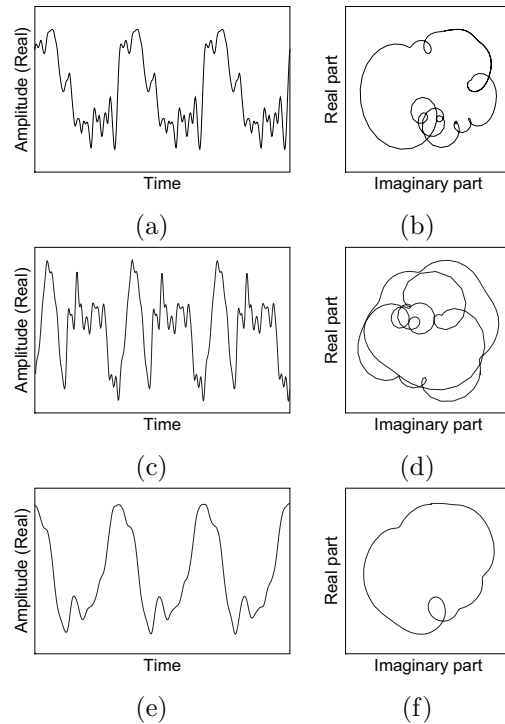


図 1: バイオリンの音色  $s(t)$ (a) と対応する解析信号  $\tilde{s}(t)$ (b), ハーモニカの音色  $s(t)$ (c) と対応する解析信号  $\tilde{s}(t)$ (d), ピアノの音色  $s(t)$ (e) と対応する解析信号  $\tilde{s}(t)$ (f)

$$H(\omega) = F(\omega) \cdot S(\omega) \quad (3)$$

とすると,  $H(\omega)$  の逆フーリエ変換  $h(t)$  は  $s(t)$  のヒルベルト変換であるという. なお,  $s(t)$  は  $h(t)$  の逆ヒルベルト変換であるといい,  $F(\omega)$  の代わりに  $-F(\omega)$  を用いた時の  $s(t)$  と  $h(t)$  の関係に等しい.

$h(t)$  は解析信号  $\tilde{s}(t)$  の虚部  $\Im[\tilde{s}(t)]$  に等しくなる. 式 (3) は畳み込みの関係を用いて以下のように表すことができる.

$$h(t) = \frac{1}{\pi t} * s(t) \quad (4)$$

## 4.2 解析信号と音色の関係

周期的な解析信号を複素平面上の閉曲線図形として見ると, 音声信号の振幅が時間とともに変化するのであわせて, それに対応する解析信号の閉曲線上を対応点が移動し, 音声信号の 1 周期が閉曲線上の 1 周に対応する. すなわちこの閉曲線の形状は, 音声信号の周波数情報を除いた表現であると言うことができる.

閉曲線の大きさが音声信号の振幅に対応し, 閉曲線の平行移動は, 時間変化しない定数成分に対応するため音色は変化しない. また位相回転 (定数  $e^{i\theta}$  倍) は閉曲線の回転に対応するが, 一般に音色は基音の位相に依存しない. そのため, 相似な閉曲線はすべて同じ音色に対応することになる.

以上のことから, 閉曲線図形としての解析信号は音色と密接な関わりをもっているといえる.

## 5 周期解析信号に対するインタラクティブ操作

### 5.1 解析信号の離散化と操作の定義

まず音声信号  $s$  を,  $s_0$  から  $s_{n-1}$  までの  $n$  個のサンプル点によって離散化する.  $s$  はこれら  $n$  個のサンプル点列を周期とすると周期信号であると仮定し,  $s_{k+mn} = s_k$  ( $m$  は任意の整数) とする. そして, これらの各サンプル点に対して解析信号  $\tilde{s}_0 \sim \tilde{s}_{n-1}$  を求めて複素平面上に表示し, 各点を制御点として滑らかに結んだ閉曲線を生成する. この閉曲線は, 元の音声信号の解析信号  $\tilde{s}$  の近似とみなすことができる.

このうちの 1 つの制御点  $\tilde{s}_k$  をマウス等でドラッグすることで移動させる際に,  $\tilde{s}$  には  $\tilde{s}_k$  を中心とした解析信号  $\tilde{p}$  を印加するとする. ここで  $\tilde{p}$  も  $\tilde{s}$  と同様に  $n$  個のサンプル点から成る複素平面上の信号である. この制御点の移動先を  $z$  とおき, 新たに生成される  $\tilde{s}'$  を以下のように定める.

$$\tilde{s}'_j = \tilde{s}_j + (z - \tilde{s}_j)\tilde{p}_{j-k} \quad (5)$$

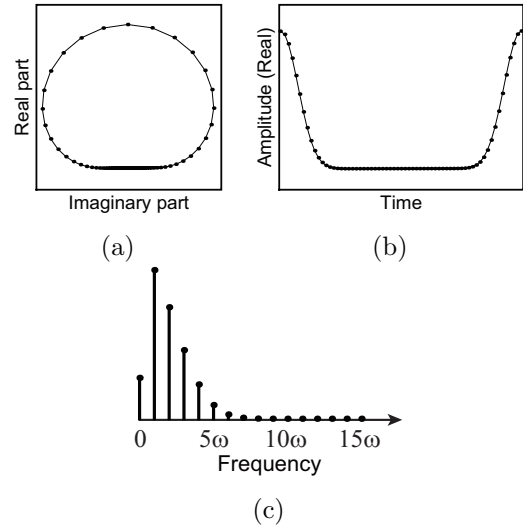


図 2:  $n = 64, d = 10$  の時の印加信号の解析信号 (a) と, それに対応する音声信号 (b) とそのスペクトル (c)

なおこの制御点の移動中は, その移動に従って新たな音声信号  $s' (= \Re[\tilde{s}'])$  が適当な周波数の周期音声信号となるよう合成する.

ここで,  $\tilde{p}$  を, その実部が以下になるように定める.

$$p_k = \left( \frac{1 + \cos \frac{2\pi k}{n}}{2} \right)^d \quad (6)$$

ここで  $d$  は 1 以上の実数で, 制御点の移動の際に自由に設定できるとする.

$n = 64, d = 10$  の時の印加信号を図 2 に示す. 実信号としては 0 に近い値が半数以上連続しており, 解析信号としては円形が潰れたような形となる.

式 (6) の定義に従えば,  $\tilde{p}_0 = 1$  になり, また同時に  $\tilde{s}'_k = z$  となるため, 移動中の制御点は常に操作指示点 (マウスによるドラッグ操作時のマウスポイント等) と同位置になる. なお解析信号は線型性をもつため, 印加解析信号を加えた後の信号もまた解析信号となる.

音色操作の例として, 正弦波波形に対応する解析信号 (円) を最初に用意し, それにに対して,  $n = 64, d = 10$  として 3 回の制御点移動操作を施したときの解析信号の変化, およびそれらに対応する 1 周期分の時間軸上の音声信号を図 3 に示す.

本手法は, 制御点の操作は特定の信号の加算に対応するため, いわゆる加算合成方式のシンセサイザの一種ともいえる. 基本的には, 制御点を閉曲線の内側に「押し込める」操作によって基本周波数成分が減少・高周波数成分が増加し, 曲線にねじれが生じる. また制御点を閉曲線の外側に「拡げる」操作によって基本周波数成分が増加・高周波数成分が減少し, 曲線のねじれが解消される.

また  $d = 1$  のときは基本周波数成分のみの加算と

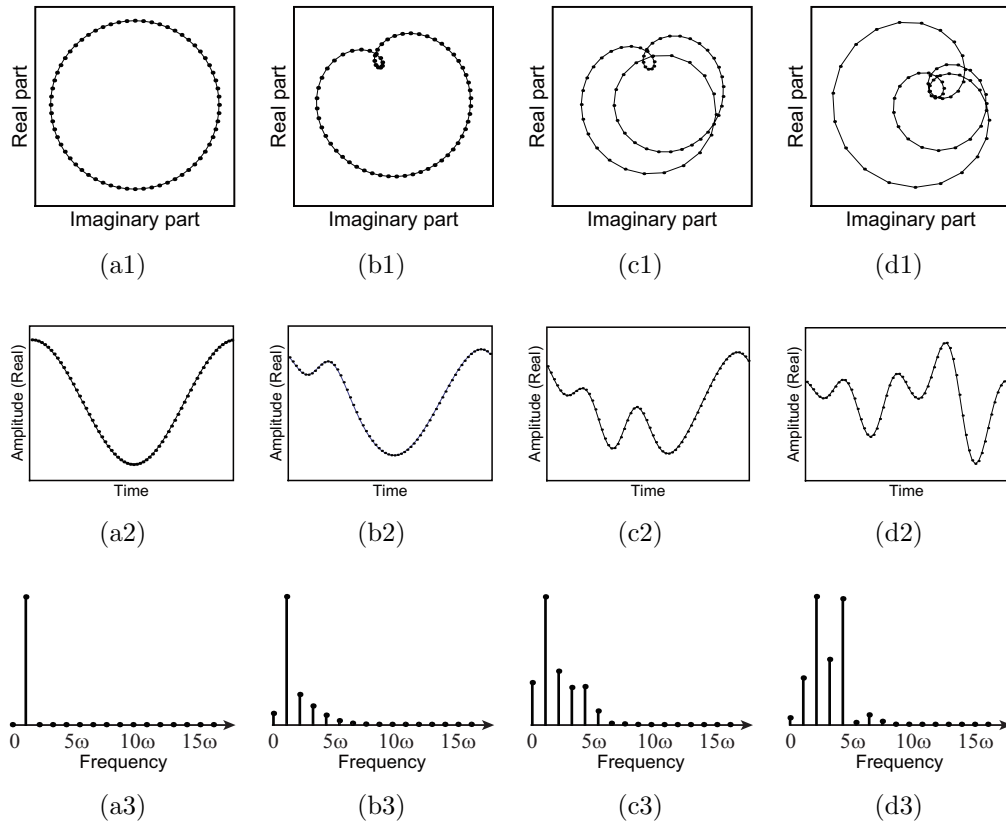


図 3: 正弦波の解析信号 (a1), それに対応する時間軸波形の音声信号 (a2) とそのスペクトル (a3), およびこれに対して  $n = 64, d = 10$  としてドラッグ操作を順に施したときの解析信号 (b1) ~ (d1), それらに対応する時間軸波形の音声信号 (b2) ~ (d2), およびそれらのスペクトル (b3) ~ (d3) .

なり、 $d$ が大きくなるにつれて加算される高周波数成分の割合が大きくなる。閉曲線図形の変化としては、 $d$ が大きいくほど局所的な変化になる。

## 5.2 解析信号シンセサイザ

5.1 節で述べた手法に従って、開発した解析信号を用いる音色操作型のシンセサイザ<sup>1</sup>を図4に示す。開発環境はFlash CS4、開発言語はActionScript 3.0である。図4の例では、実行画面中段の左の閉曲線には64個の制御点があり、制御点をマウス等によるドラッグによって音色の加工が可能である。制御点移動の際の印加信号に対する式(6)の $d$ の値は、10, 20, 50, 100,  $\infty$ から選択できる。なお操作する対象である閉曲線図形としては、あらかじめ楽器音を解析信号化したものがいくつか用意されており、プルダウンメニューから読み込みができる。すなわち、既存の楽器等の音色を元に、それに図形操作によって音色に加工を加える形で音色生成が可能である。

また生成された周期音声信号に対して、時間と共に振幅の変化を加えて音として仕上げるための機能として、ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release) エンベロープジェネレータを搭載した。生成された音色を用いた簡易的な楽器の機能として、ソフトウェアキーボードのクリック、キーボードの入力、MIDI キーボードからの入力によって簡易的な演奏を可能とした。

この解析信号シンセサイザを用いて、音色の操作を行ったところ、操作対象の既存の楽器などの音に対して「とがった音」や「キンキンした音」、「滑らかな音」などのエフェクトを加えることができた。

## 6 議論

本手法による音色の加工生成手法について議論を加える。

解析信号シンセサイザの、音色操作の自由度・可能性について議論する。解析信号の数学的な性質のため、任意の図形を、ある程度形状を保持したまま近似的に解析信号化する手法[10, 11]はあるが、完全に任意の閉曲線図形を解析信号化することはできない。また解析信号である元の閉曲線に対して、解析信号としての性質を保ったまま、原点中心の回転と相似拡大縮小の操作は可能であるが、それ以外の例えば縦横独立の拡大縮小やせん断等の図形変形操作を行うことはできない。これに対して、本手法では、変形操作の元となる解析信号を、実際の音声信号から変換して得て、それに対して解析信号としての性質を保ったまま、制御点移動による変形操作を実現する手法である。実際に操作を行ったところ、与えられた閉曲線図形から、数分の操作練習を経て意図した図形に変形させることができた。この閉曲線図形の操作と、それに対応する音色操作との対応、すなわち音色操作の自由度や、意図した音色をどの程度生成できるかという点の定量的な評価は不十分であるものの、実際に操作をした結果から

は、低周波数成分を多く含む音色と高周波数成分を多く含む音色の違い程度は作り分けることができた。

閉曲線図形とその操作を映像表現とみなすと、図形操作と音色の変化が対応づけられていることになり、新たな映像・音楽の融合の可能性とも考えられる。ただし本手法では、1回の制御点移動の際に印加する信号が限定されるために音色の変化は乏しくなりがちであり、音楽パフォーマンスなどで利用するには面白みに欠けると思われる。この点については、制御点の移動だけでなく、それに伴って周辺にある制御点が操作指示点との距離に応じて移動するような方法等についても検討したい。

本手法は、原理的には任意の周期信号を生成することができるが「意図した音色」をゼロから生成するには必ずしも適していないと考えられる。ただし実用的には、既存の音色を、好みの音色へと微調整したい場面は音楽表現上は多く、本手法はそのような場面で有効であると言える。

本手法は、閉曲線を複素平面上に投影しているため、時間軸の情報がなくなっている。これによって、周波数(音高)に依存しない音色作りが可能になっている。ただし、同じスペクトルを持つ音色も、位相が異なると閉曲線図形も変化するため、同じ音色がさまざまな形を持つことになる。閉曲線図形の形状情報と音色との関係については、閉曲線図形の周が自身と交差する回数が多いほど、また周に沿った閉曲線図形の回転数が多いほど、それに対応する時間軸波形が複雑になり、スペクトルの高調波成分が多くなることが予想される。また、偏角の極値数や周長などにも関係が見出されると考えられる。これらの関係については、今後解明を進める予定である。

本手法は、2次元平面上に配置された操作点を、平面操作デバイスによって操作するインタフェースであるが、複雑な音色を扱う場合は交点で操作点が重なるなど、操作インタフェース自体としては操作しづらい場合が考えられるため、この点は、操作インタフェースそのものとして改良・工夫を進めたい。

また本手法は周期信号を作ることはできるが、ADSR エンベロープなどの過渡的な変化については閉曲線の操作だけでは作ることができないため、異なる操作画面を用意するか、VSTのようなプラグイン化をすることが必要である。

## 7 まとめ

本稿では、解析信号と呼ばれる複素平面上の閉曲線図形と音声信号との対応に着目し、閉曲線に対する形状操作等の直接操作によって周期音声信号を変化させる方式による音色の操作方法を提案し、その手法によるシンセサイザと簡易な楽器を実装した。本手法は、意図した新規の音色の作成は困難であるものの、既存の音に対する加工によって音色の発展させる音色生成には有効である。また図形と音を対応付けることにより、視覚表現と融合した音楽パフォーマンスへの応用も考えられる。

今後は、より豊かな音色の加工・生成のために、音声信号の過渡的な変化を効果的に設定する手法の検討

<sup>1</sup><http://butchi.jp/documents/mus85demo/>

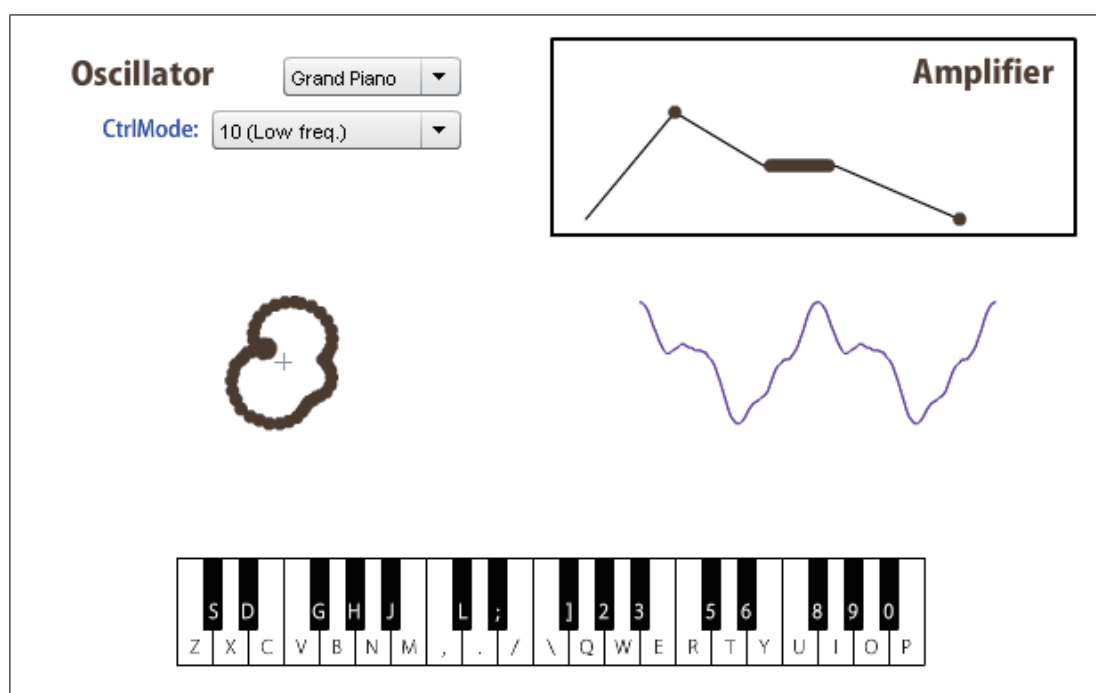


図 4: 開発した解析信号シンセサイザの実行画面

を進め、あわせて、閉曲線図形とその操作を映像表現とみなした、新たな映像・音楽の融合の可能性を検討したい。

## 参考文献

- [1] A.Camurri, M.Ricchetti, and R.Trocca. Eyesweb-toward gesture and affect recognition in dance/music interactive systems. In *IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, volume 1, pages 643–648, 1999.
- [2] G.Levin and Z.Lieberman. Sounds from shapes: Audiovisual performance with hand silhouette contours in the manual input sessions. In *Proceedings of 5th International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, pages 26–28, 2005.
- [3] KORG. Kaossilator. <http://www.korg.co.jp/Product/Dance/kaossilator/>.
- [4] M.Funk, K.Kuwabara, and M.J.Lyons. Sonification of facial actions for musical expression. In *Proceedings of NIME '03*, pages 127–131, 2003.
- [5] M.J.Lyons. Facial gesture interfaces for expression and communication. In *Proceedings IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, volume 1, pages 598–603, 2004.
- [6] M.J.Lyons, M.Haehnel, and N.Tetsutani. Designing, playing, and performing with a vision-based mouth interface. In *Proceedings of NIME '03*, pages 116–121, 2003.
- [7] Shou. Swave. <http://sky.geocities.jp/izeefss/sakurayamaato/>.
- [8] Y.Nishibori and T.Iwai. Tenori-on. In *Proceedings of 6th International Conference on New Interfaces for*, pages 172–175, 2006.
- [9] 剣持 秀紀. 歌声合成システム vocaloid-現状と課題. In *情報処理学会技術報告, 音楽情報科学*, volume 12, pages 51–56, 2008.
- [10] 岩淵 勇樹, 秋田 純一, and 北川章夫. 閉曲線図形に基づいた音色生成方法の検討. In *エンタテインメントコンピューティング 2008 論文集*, pages 143–146, 2008.
- [11] 岩淵 勇樹, 秋田 純一, and 北川章夫. 閉曲線図形の特性に基づいた音色生成の一手法. In *第 16 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS2008) 論文集*, pages 149–150, 2008.



岩淵 勇樹



2007 年 金沢大学工学部情報システム工学科卒業 2009 年金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了．2009 年より金沢大学自然科学研究科博士後期課程．数学モデルの集積回路・インタラクティブシステムなどへの応用に関する研究に従事．電子情報通信学会会員．

秋田 純一



1993 年東京大学工学部電子工学科卒業 1998 年博士(工学)．2007 年より金沢大学工学部情報システム工学科准教授．集積回路，およびその応用システム（特にインタラクティブ・システム）に従事．電子情報通信学会，情報処理学会，映像情報メディア学会，芸術科学会会員

北川 章夫



1987 年名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了．工学博士．2001 年より金沢大学工学部情報システム工学科准教授．アナログ-デジタル集積回路の設計と応用，特に新型不揮発性メモリ，無線ネットワーク，新機能センサ LSI に関する研究に従事．電子情報通信学会，情報処理学会，IEEE 会員