

## 物理モデルによるピアノ音とギター音のモーフィングの検討

引地 孝文 小坂 直敏

NTT コミュニケーション科学基礎研究所  
hikichi@brl.ntt.co.jp osaka@brl.ntt.co.jp

**概要:** 我々の目的は、楽音や自然音、及びそれらの内挿/外挿を含む様々な音色を合成、操作できる技術を開発することである。この目的のため、本研究では物理モデルを用いた音色モーフィングを検討する。ここでは、異なる楽器音とその中間音色を合成できるモーフィング合成の考え方を述べる。この考え方をを用いて物理モデルを利用してピアノ音とギター音を模擬し、これらの滑らかな音色変化、すなわち音色補間を検討する。その結果、モーフィングシステムにおける物理モデルの利用可能性が示された。

## Morphing between piano and guitar tones based on physical modeling

Takafumi Hikichi Naotoshi Osaka

NTT Communication Science Laboratories

**Abstract:** Our goal is to develop sound synthesis technology that allows users to synthesize arbitrary sound timbre, including musical instrument sounds, natural sounds, and their interpolation/extrapolation on demand. For this purpose, we investigated sound interpolation based on physical modeling. We propose a morphing framework based on physical modeling that can produce intermediate timbre between different musical instrumental sounds. Piano and guitar sounds are simulated using a physical model, and smooth timbre change, i.e. interpolation is investigated. This results suggest the possibility of developing a morphing system using a physical model.

### 1 はじめに

物理モデルに基づく音合成は、楽器音を模擬する場合、最も有望な手法の一つである。仮想的な楽器は本物と全く同様のパラメータを持つことができるため、他の抽象モデルによる手法と比較し、より直感的な音色のコントロールが可能である。これまで様々な楽音がモデル化され、柔軟なモデル構造の研究や、実時間実装可能な計算効率の良いアルゴリズムの開発が行われている [1] [2] [3]。近年、Csound や MSP 等へも組み込まれる等、今後ますます発展が期待

される方式である [4] [5]。

しかし、物理モデルを用いた異なる楽器音に渡る、あるいはその中間の音色の合成、制御はこれまであまり検討されていない。モーフィングと呼ばれるこれらの問題は、主に信号モデルに基づく方法で検討されてきた。これまで、筆者の一人を含む研究者達がモーフィング、音色補間の問題を検討してきた [6] [7]。音声合成の分野では声質補間の検討が報告されている [8] [9]。これらの手法の利点として、ほとんど任意の音の取扱いが可能であることが挙げられる。

欠点としては再合成に必要なパラメータが膨大である点、分析時に非定常部分の取扱いが難しい点等がある。

我々の目的は、楽音や自然音、及びそれらの内挿／外挿を含む様々な音色を合成、操作できる技術を開発することである。この目的のため、我々は物理モデルを用いた音色モーフィングを検討している [10] [11]。我々は、物理モデルのもつ特徴の一つである制御のしやすさを、様々な音色を対象としたモーフィングシステムに利用したいと意図している。ここで、モーフィング技術は次の手順で行われる。1) 原信号からのモデルパラメータの抽出、2) モデルパラメータの補間、そして、3) 補間されたパラメータを用いた再合成である。音響信号から最適な物理モデルを見つけ出す問題は重要であるが、一般的には難しい。ここではこの問題を扱わず、モーフィングへの第一ステップとして、物理モデルに基づく方法により、連続的な音色制御が可能であるかどうかを検討する。前報告 [11] では、打弦と撥弦の機構を補間するモデルを提案し、合成音の知覚に関する主観評価を行ったが、結果は必ずしも期待されたものではなかった。この一因として、扱っていた合成音の音色の範囲が狭く、かつ既存楽器音でなかった点が考えられる。そこで今回、良く知られた異種楽器音を対象として音色補間を検討する。

## 2 基本的考え方

異なる楽器音とその中間音色を合成できるモーフィング合成の考え方を述べる。このアプローチは物理モデルベースの合成方法の利点を保ちつつ、かつ異なる楽器音の音色補間が可能であるという点で一般性を持つ。ここで、音源の補間を考える。二つの同じ発音機構を持つ音源を対象とする場合、音色補間は単に物理パラメータの補間により行われる。異なる発音機構を持つ音源の場合は、これらを含む統合モデル、あるいはより一般的なモデルを考案する。このアプローチにより、全ての中間音は同じ発音モデルを持つことになり、その結果、自然で均質な音が期待できる。さらに、一般的に、信号モデルベースの手法に比べてパラメータ数が少なく済む。主な欠点としては、モデル（及びアルゴリズム）をまず構築しなければならない点、

モデルが合成できる音色の範囲をある程度限定してしまう点が挙げられる。

本報告では、ある音から他の音への滑らかな音色変化、すなわち音色補間が可能な合成アルゴリズムを提案する。補間のアプローチは次の二つに分けられる。一方は「構造的補間」であり、他方は「特性上の補間」である。対象としてピアノ音とギター音を取り上げ、これらの音色補間を試みる。これらは類似した生成機構を有する。すなわち、ある物体によって弦振動が励起され、それが共鳴系に伝搬して空気中へ放射されるというものである。我々の期待は、適切にパラメータを調整することにより、二つの異なる楽器音が模擬可能であるという点と、その間の滑らかな遷移が可能であるという点である。

## 3 用いた物理モデル

ここでは本実験で用いられた物理モデルについて簡単に述べる。音合成のための物理モデルとしては、実時間演算向けに単純化、効率化された方式が良く知られているが、ここでは物理パラメータとの対応を明らかにするため、微分方程式の差分法に基づく方法を用いる。このモデルに関して一部は既に報告済 [11] のため、概略だけを述べる。励起体、振動体、共鳴系よりなる簡単なモデルを仮定した (図 1)。

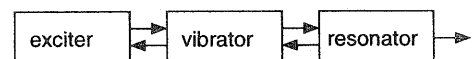


図 1: 用いた物理モデルのブロック図

### 3.1 振動体モデル

ここで用いた振動体モデルは、弦、棒等、1次元振動体の1次元振動を表す次の微分方程式に基づく。

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{T}{\mu} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - \frac{\kappa^2 ES}{\mu} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - 2b_1 \frac{\partial y}{\partial t} + 2b_3 \frac{\partial^3 y}{\partial t^3} + \frac{F_H(t)g(x, x_0)}{\mu \int_{x_0-\delta x}^{x_0+\delta x} g(x, x_0) dx} \quad (1)$$

ここで、 $y$ : 弦の変位、 $\mu$ : 線密度、 $T$ : 張力、 $E$ : ヤング率（剛性を表す）、 $\kappa$ : ジャイレーション

半径、 $S$ : 弦断面積、 $F_H(t)$ : 弦に加わる力、 $b_1, b_3$ : 減衰係数、 $2\delta x$ : ハンマーの幅、 $g(x, x_0)$ : 力の分布を与える関数、 $x_0$ : 打弦位置である。

### 3.2 励起モデル

励起体による打弦、撥弦のモデルは次の方程式に基づく。ここで用いる励起モデルは、パラメータ操作により打弦と撥弦の両方を表現でき、従来のモデルの拡張となっている。

$$M_H \frac{d^2 \eta}{dt^2} = -F_H(t), \quad (2)$$

$$F_H(t) = \begin{cases} K|\eta(t) - y(x_0, t)|^p, & \eta(t) \geq y(x_0, t), \\ & t < t_f, \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\eta$ : ハンマーの変位、 $F_H(t)$ : 弦に加わる力、 $M_H$ : ハンマーの質量、 $t_f$ : 励起体と弦との接触時間(力の時間長)である。 $K, p$  は実験的に決められる定数である。

### 3.3 共鳴系モデル

今回、新たに共鳴系を導入した。共鳴系のモデルは、弦の一端と結合された二次元平板の振動を表す微分方程式に基づく。これは、ピアノの響板の最も単純なモデルである。

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -\frac{\kappa^2 E}{\rho(1-\nu^2)} \nabla^4 z - 2b_1 \frac{\partial z}{\partial t} + 2b_3 \frac{\partial^3 z}{\partial t^3} + \frac{F_s(t)}{\rho h} \delta(x_1, y_1), \quad (4)$$

ここで、 $z$ : 板の変位、 $\rho$ : 密度、 $\nu$ : ポアソン比、 $h$ : 厚さ、 $F_s(t)$ : 弦の端点から板へ加わる力、 $\delta(x_1, y_1)$ : クロネッカーのデルタ、そして $(x_1, y_1)$ : 弦と板との結合位置である。力 $F_s(t)$ は次式で求められる。

$$F_s(t) = T \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=L}. \quad (5)$$

### 3.4 数値解法

上記の方程式を有限差分法を利用し再帰的に解く。振動体と共鳴系の結合部分(ブリッジに相当)における速度波形を取り出し、合成音と見なしている。

## 4 実験

### 4.1 パラメータ選定

音響信号からモデル及びパラメータを推定する問題は本研究では扱わない。ここでは文献等を参考に、あるいは実験的にパラメータを決定した。共鳴系の特性は、ピアノ音/ギター音の周波数特性の中で、主に調波以外の部分に表われる。共鳴系のパラメータフィッティングにおいて、ピアノ響板の詳細な模擬は意図しておらず、周波数特性の概形的特徴、すなわち包絡の違いに着目した。ピアノの共鳴系をギターと比較すると次の点が異なることが分かる。ピアノの共鳴系の方が、

- 1) より密な周波数ピークを持つ。
- 2) より高域までパワーを持つ。
- 3) より残響時間が長い。

まず、1本弦を用い、これらの違いを模擬するようパラメータの値を決定し、ピアノ風の打弦音とギター風の撥弦音を合成した。

さらに、ピアノ模擬音は3本のわずかに張力の異なる弦を用いて合成した。これによりピアノ音特有のうなりが生じる。

ここで用いたモデルによるギター胴の精密な模擬は困難である。そこで、最低次の固有周波数成分のみを模擬し、ギター模擬音とした。その際、固有周波数を約100Hzとするためにパラメータ値を変化させたことにより、数値解が発散しないための条件である安定条件を満たすため、より小さな空間分割数 $N$ (これを $N'$ とする)を用いる必要が生じた。この $N'$ を用いてピアノ~ギターまでの一連の音を合成することも可能であるが、この場合ピアノの音質が低下した(数値シミュレーションの観点からも誤差が増加する)。そこで、ギター端点のみ、他の音とは異なる分割数 $N'$ を用いた。

### 4.2 パラメータ補間

励起体については既に報告した通り、パラメータ $p$ と力の時間長 $t_f$ を線形補間した。これにより、打弦と撥弦を機構上補間する「構造的な補間」を行う。また、弦については、予備実験の結果より今回は固定した。共鳴系は減衰係数を線形補間することで、それぞれの特性を補間す

る「特性上の補間」を試みた。

### 4.3 予備検討：減衰係数の線形補間

本稿ではピアノ音とギター音の補間を目的とする。これらの音は様々な点で異なるが、その中に共鳴系の残響の程度の大小という違いがある。これは主に共鳴系の減衰係数により変化させることができる。まず予備検討として、前節で述べたピアノ風打弦音とギター風撥弦音を端点とし、各パラメータを単独に変動させ変化を調べた。その結果、残響特性がこの程度異なる音色の補間においては、弦、共鳴系の他のパラメータよりも減衰係数が重要との知見を得た。そこで、共鳴系の減衰係数を用いて音色補間を試みる。減衰係数に関して線形補間を行った。

用いたパラメータ値を表に示す。補間率  $\alpha = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6$  の場合の合成音の波形を図2に示す。図より  $\alpha = 0.4$  の場合、波形の時間エンベロープは時間と共に緩やかに増加し、他が減衰形である点と異なる。知覚的には、いわゆるアタックのはっきりしない音である。このアタックの知覚が他と大きく異なり、一連の合成音を聴取した時に不連続な変化と感じられる。この原因は、周波数に関する定数は固定しているにも関わらず、パラメータの組み合わせによっては、響板の周波数成分（振動モード）と弦の周波数成分が共鳴を生じるためである。このように、単純な線形補間では不都合が生じる場合がある。

### 4.4 滑らかな音色補間のための方策

予備検討より、両端のパラメータを単に線形に補間する方法は必ずしも上手くいかないことが確かめられた。そこで、共鳴の影響を回避する方法を考える。ピアノからギターへの音色補間の実現方法として、次の3つの経路を考える。ピアノ～打弦

- ピアノ模擬音における弦の調律のずれを0へ漸近させる。これにより、うなりが徐々に少なくなる。
- 予備検討より得られた知見から、モード周波数変化による共鳴の影響を小さくするため、板の減衰係数  $b_1$  を徐々に大きくする。

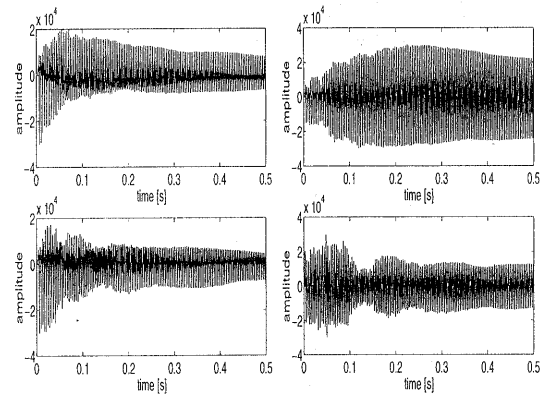


図2: 異なる補間率に対する合成音波形。補間率により時間包絡が異なる点に注意。(左:  $\alpha=0.0, 0.2$ , 右:  $\alpha=0.4, 0.6$ )

減衰係数  $b_1$  を大きくすることにより共鳴の鋭さを抑えることができる。

### 打弦～撥弦

- 励起モデルを補間する。
- 弦、板の減衰係数  $b_3$  を、補間率により対数軸上で線形に補間する。

### 撥弦～ギター

- 共鳴系の固有周波数を操作して100Hz付近のピークを模擬する。

ピアノから打弦音まで3サンプル、撥弦音からギターまで1サンプル（非公式な主観評価の結果、ごくわずかな違いと判断）、そして打弦～撥弦は物理的に等間隔に6サンプル、すなわち0%, 20, 40, 60, 80, 100%を用いた。

上に述べた考え方により、ピアノからギターへ変化する一連の10サンプルの合成音を得た（これを系列Aと呼ぶ）。基本周波数は329.63 Hz (E4, 中央E) に設定し、時間長2秒とした。

### 4.5 主観評価試験

これらの合成音について変化の滑らかさを評価するため、主観評価試験を行った。被験者は、聴力の正常な18才から27才の男女10名である。

10サンプルの中からランダムに取り出した2つの刺激音の対について、その類似性を同じ

(評価値 0) から全く異なる (評価値 6) まで 7 段階でカテゴリ評価をさせた。呈示順序を考慮し、一対の組み合わせについて 4 回繰り返し、全体で 180 回判断を行った。全ての対に対して、評価値の総合計を被験者総数及び繰り返し回数で平均し、これを主観的距離とした。こうして得られた主観的距離と刺激対との関係を図 3 に示す。図より、刺激の物理的距離が大きい程、主観的距離は大きい、すなわち滑らかに変化していく傾向がみられた。しかし、特に物理的距離が大きな部分で主観的距離が飽和し、変則的な山谷も存在した。

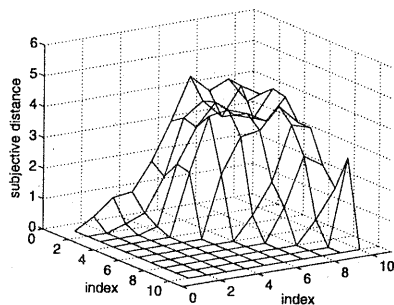


図 3: 音刺激対と主観的距離の関係

主観的距離に多次元尺度法を適用し、刺激音の布置を求めた。二次元解を図 4 に示す。刺激 1-4、及び、9 と 10 では変化は小さく、全体として系列は湾曲しており、中間性は満たされなかった。刺激 6 は両端からほぼ等距離に位置しているが、両端の間には位置しなかった。これは主観的距離が飽和しているためと考えられる。

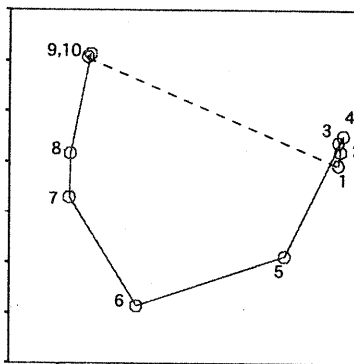


図 4: 多次元尺度法による音色知覚空間 (Kruskal のストレス値: 0.122)。1 はピアノ模擬音を、10 はギター模擬音を表す。

#### 4.6 合成音の物理特徴量の分析

音色知覚に関する過去の研究より、知覚空間における軸の一つと、スペクトルエネルギー分布との関係はしばしば指摘されている [12]。そこで、スペクトル分布の代表値として、次に定義するスペクトルセントロイドを求め、知覚空間との関係を調べる。

##### スペクトルセントロイド

各刺激音に対して、スペクトルセントロイドを以下の手順で求めた。スペクトルセントロイドとは、パワーにより重みづけされた平均周波数である。

1. 合成音を冒頭より  $2N$  点切り出し、FFT スペクトルを求める。
2. FFT スペクトル  $X(k)$ ,  $k = 0, \dots, N-1$  に対し、帯域毎の平均パワー  $A(j)$  を求め

る。

$$A(j) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} |X(i+jL)|^2, j = 0, \dots, M-1$$

3. 対数パワーへ変換し (その際最小値が 0 となるよう調節)、全パワーで正規化し相対値  $B(j)$  とする。

$$B(j) = \frac{10 \log(A(j) + 1)}{\sum_{j=0}^{M-1} 10 \log(A(j) + 1)},$$

スペクトル重心  $C$  は次式で計算される。

$$C = \sum_{j=0}^{M-1} B(j) \frac{2j+1}{2M}$$

ここでは、冒頭より  $2N=32768$  サンプル用い、帯域幅は 1kHz ( $M = 24$ ) とした。周波数で

正規化しているため、分割数1の場合に  $C = 0.5$  となる。

スペクトルセントロイドの変化を図5に示す。ピアノからギターへ遷移するにつれて、一旦増加し、ついで減少する。図4、5を比較すると、両端を結ぶ線分に直交する軸は、スペクトルセントロイドと相関があると解釈できる。

#### 時間包絡

時間包絡は、フレーム長 20ms のフレームパワーの計算により求めた (図6)。刺激 1-4 は調律のずれを変化させたことにより、刺激 10 は共鳴が生じたことにより、それぞれ減衰の仕方に違いが見られる。しかし、刺激 4-9 の包絡はほぼ同じであり、知覚空間上の軸との相関は見られなかった。

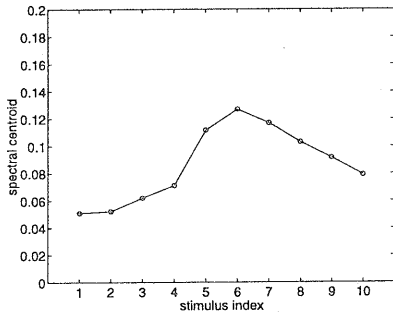


図 5: スペクトルセントロイドの変化

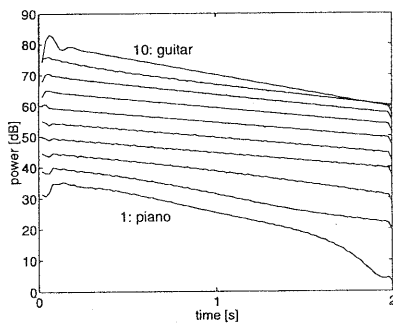


図 6: 各刺激音の時間包絡

#### 4.7 スペクトルセントロイドの利用

前節の実験結果より、全体的な傾向としては滑らかに変化しているが、中間性は満たされな

いことが分かった。また、スペクトルセントロイドと音色空間との間に相関があることが示唆された。そこで、スペクトルセントロイドの値が線形に変化するよう、弦の周波数減衰係数  $b_3$  の値を調整し、一連の補間音を合成する。以下にその方法を説明する。

1. 両端の合成音のスペクトルセントロイドを計算する。
2. ある補間率に対し、初期値として、弦の減衰係数  $b_3$  を対数軸上で線形補間する。
3. 両端の合成音のスペクトルセントロイドを線形補間し、目標値を計算する。
4. 合成音を作成し、そのスペクトルセントロイドの値と目標値との差がある閾値以下の場合、計算を終了する。閾値を越えた場合、減衰係数の値を修正し、再び合成音を作成する。
5. 指定した全ての補間率に対し上記の処理を繰り返す。

上記の方法を用い、二組の系列を合成した。目標値からのずれの閾値は 0.005、修正する  $b_3$  のステップサイズは  $2.0 \times 10^{-10}$  ( $b_3$  の 5-10% 程度) を用いた。一つは、実験 1 と同様の端点を用い、ギター模擬音への変化を狙ったもの (これを系列 B とする)。他は、別の係数の組を撥弦の端点として用い、ギター模擬音を用いないもの (これを系列 C)。端点としてはより高域が持ち上がった、より鋭さのある音を用いた。

これらの合成音に対して、前の実験と同様に評価試験を行い、主観的距離を求めた。主観的距離に多次元尺度法を適用し、知覚空間上の布置を求めた。系列 B の場合の二次元解を図7に示す。図7において、セントロイドが直線的に変化するよう、調整した刺激音の布置は全体に上の方向へ移動し、特に刺激9を除いては、系列は端点を結ぶ線分に近づいた。刺激4及び9においてはパラメータ調整の結果布置が移動し、かえって系列の滑らかさを減ずる結果となった。また、両端から同程度の距離に位置する刺激はなかった。

系列 C の場合、若干経路は湾曲しているものの、より等間隔に近い、滑らかな布置が得られた (図8)。

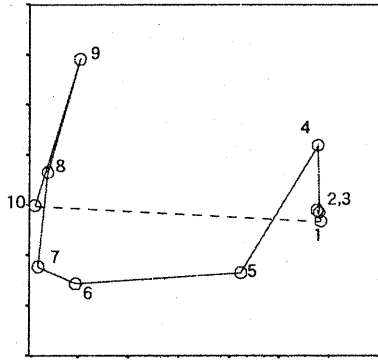


図 7: 多次元尺度法による音色知覚空間 (Kruskal のストレス値: 0.071)。1 はピアノ模擬音を、10 はギター模擬音を表す。

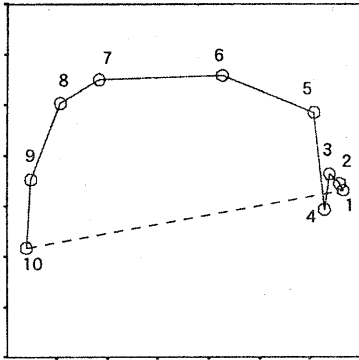


図 8: 多次元尺度法による音色知覚空間 (Kruskal のストレス値: 0.045)

## 5 議論

今回、物理モデルを利用した音色補間の可能性を検討した。評価法として、主観評価に基づき知覚空間を導出し、布置を利用し中間性、連続性の程度を調べた。中間性については、パラメータ調整の指針にスペクトルセントロイドを用いることで、改善が見られた。連続性については今回の結果は十分ではなかった。これはどのように中間音の補間率を決めるかに依存する。現状では評価実験を行って、その結果に基づき補間率の間隔を決定する方法、あるいはもう少し細かい間隔で中間音を作成し、主観的に取捨選択する方法のいずれかが必要である。また、

両端のセントロイドの値がある程度離れている場合には (系列 C)、セントロイドの利用により滑らかな音色補間が達成された。これは音色判断におけるセントロイドの重みが相対的に増加したためと考えられる。

次に評価尺度について議論する。これまで補間性能を評価する客観尺度の検討はあまり行われていない。ここでは前報告 [11] と一部重複するが、評価尺度を再掲する。まず、連続性 (滑らかさ) の指標に関して述べる。

変化が滑らかであるとは、隣り合う刺激音の主観的距離が小さく、かつ等間隔に近いことと考えられる。そこで、主観的距離を用いて、隣り合う刺激音の距離  $d_{i,i+1}$  の平均、標準偏差を考える。

$$C_m = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} d_{i,i+1} \quad (6)$$

$$C_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} d_{i,i+1}^2 - C_m^2} \quad (7)$$

平均が小さいほど隣り合う音の変化が小さく、標準偏差が小さいほど各距離の偏りが小さく連続的であると考えられる。

中間性の指標としては、音色知覚空間上で、中間音の布置と両端を結ぶ線分との平均距離を取る。

$$I = \frac{1}{N-2} \sum_{i=2}^{N-1} \hat{d}_i, \quad (8)$$

ここで、 $\hat{d}_i$  は  $i$  番目の中間音の布置と両端を結ぶ線分との距離である。これらの指標を両端の距離で正規化した値を表 1 に示す。系列 B について、スペクトルセントロイドの考慮により、連続性、中間性が改善された。特に中間性は、3 つの系列の中で最もよい。連続性は系列 C が最もよい。ただしこれらは用いた中間音の数や、縮退した布置の有無にも依存するため、今後さらなる検討が必要である。

## 6 まとめ

本稿では物理モデルを利用した音色補間へのアプローチについて述べ、主観評価実験を行い合成音を評価した結果を示した。スペクトルセ

表 1: 連続性、中間性に関する評価尺度

評価尺度	系列 A	系列 B	系列 C (セントロイド考慮)
連続性 $C_m$	0.41	0.32	0.17
連続性 $C_\sigma$	0.25	0.19	0.12
中間性 $I$	0.082	0.057	0.060

ントロイドを基準としてパラメータを調整する方法により、比較的滑らかな遷移が得られた。

今後の課題として、音響信号からのモデル（及びパラメータ）抽出、音色範囲の拡張、モーフィングシステムへの実装等が挙げられる。

## 謝辞

本研究遂行に当たり御支援頂きました当所メディア情報研究部 萩田紀博部長、及び日頃御討論を頂く平田圭二主任研究員、榊原健一研究主任に感謝します。

## 参考文献

- [1] G. Borin, G. De Poli, and A. Sarti, "Algorithms and structures for synthesis using physical models," *Computer Music J.* **16**, 30-42 (1992).
- [2] J. O. Smith, "Physical modeling synthesis update," *Computer Music J.* **20**, 44-56 (1996).
- [3] O. Calvet, R. Laurens, and J. M. Adrien, "Modal synthesis: Compilation of mechanical sub-structures and acoustical sub-systems," *Proc. Int. Computer Music Conference*, 57-59 (1990).
- [4] R. Dudas, "-NVM- A modular real-time physical modelling synthesis system for MSP," *Proc. Int. Computer Music Conference*, 268-271 (1998).
- [5] R. Boulanger and J. Fitch "Teaching software synthesis through Csound's new modelling opcodes," *Proc. Int. Computer Music Conference*, 121-124 (1998).
- [6] E. Tellman, L. Haken, and B. Holloway, "Timbre morphing of sounds with unequal numbers of features," *J. Audio Eng. Soc.* **43**, 678-689 (1995).
- [7] N. Osaka, "Timbre interpolation of sounds using a sinusoidal model," *Proc. Int. Computer Music Conference*, 408-411 (1995).
- [8] M. Slaney, M. Covell, and B. Lassiter, "Automatic audio morphing," *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process.* **2**, 1001-1004 (1996).
- [9] 坂野秀樹, 武田一哉, 鹿野清宏, 板倉文忠, "包絡と音源の独立操作による音声モーフィング," *信学論 (A)*, vol.J81-A, no.2, 261-268 (1998).
- [10] 引地 孝文, 小坂 直敏, "打弦、撥弦、および弾性体振動のモルフィングの検討", *電子情報通信学会技術報告 SP96-111*, 23-28 (1997).
- [11] 引地 孝文, 小坂 直敏, "物理モデルによるモーフィングにおける音色知覚", *電子情報通信学会技術報告 SP97-109*, 7-14 (1998).
- [12] J. M. Grey, "Multidimensional perceptual scaling of musical timbres," *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 1270-1277 (1975).