

打弦、撥弦、および弾性体振動のモルフィングの検討

引地 孝文 小坂 直敏

NTT基礎研究所

〒243-01 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

0462-40-3514 0462-40-3655

hikichi@idea.brl.ntt.co.jp osaka@siva.brl.ntt.co.jp

あらまし 本研究では、コンピュータ音楽およびマルチメディアコンテンツ作成のための技術として、音色の自由な制御方式を提案することを目的とする。音合成のモデルとして物理モデルを用い、パラメータ補間によるモルフィングを検討する。ここで、モルフィングとは、二つの異なる音色の間を知覚的になめらかに補間するよう音合成することである。まず、採用したモデルのパラメータを変化させ、各パラメータの合成音への影響を調べる。そして、異なるパラメータセットに対し弦、弾性体振動の模擬およびこれらのモルフィングを試みる。さらに撥弦モデルを提案し、打弦と撥弦とのモルフィングを試みた結果を示す。

キーワード 音色制御、モルフィング、物理モデル、打弦、撥弦、弾性体

Morphing of Sounds of the Struck Strings, Plucked Strings, and Elastic Media

Takafumi Hikichi Naotoshi Osaka

NTT Basic Research Laboratories

3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-01 Japan

+81-462-40-3514 +81-462-40-3655

hikichi@idea.brl.ntt.co.jp osaka@siva.brl.ntt.co.jp

Abstract The purpose of this study is to implement a controllable sound synthesis system, which will be used for composing computer music and multimedia contents. The sound synthesis method based on physical modeling is applied, and morphing (sound interpolation) by parameter interpolation is investigated. Morphing is defined as synthesizing sounds which interpolate between two different timbre. First, synthesis parameters of the model adapted are varied, and the effect of each parameter on the synthesized sound is examined. Then, sounds of the strings and elastic media within some parameters, are simulated and then morphing is done. Further, a plucked string model is proposed and the result of the morphing between sounds of struck and plucked string is shown.

key words sound control, morphing, physical models, struck strings, plucked strings, elastic media

1 はじめに

筆者らは、新しいアートとしてのコンピュータ音楽、およびマルチメディアコンテンツの作成支援の技術として、柔軟で自由な音色制御、合成方式について研究を行なっている。この一環として、これまで物理モデルによる音色モルフィングの検討を進めている [1]。

音色モルフィングとは、二つの異なる音色の間を知覚的に滑らかに補間するよう音合成することである。モルフィングは元々 CG の分野で発展した技術であるが、近年、音においても様々な検討が行なわれている。例えば、Tellman ら [2]、小坂 [3] による、正弦波重畳モデルに基づく楽音補間、阿部による文音声の声質変換 [4] などの報告がある。この他に、音色以外にも譜面情報のモルフィング研究例も見られる [5]。

従来の音色モルフィング研究では、原信号の波形、スペクトルをモデル表現し、モデルパラメータを再利用、あるいは操作して音合成、補間を実現している。この方式では基本的に任意の音を扱うことができるが、制御すべきパラメータが多いという欠点をもつ。その結果、多くの方式では補間音の品質向上、パラメータ制御の自動化などが課題となっている。

一方、音合成のもう一つのアプローチとして、楽器のシミュレーションより発した流れがある。楽器音響の分野では、これまで様々な楽器を対象とし、発音機構解明の一手段として、楽器シミュレーションが行なわれてきた。これが物理モデルによる音合成であり、その成果の一部は電子楽器として商品化されている。また音色モルフィングの観点から、物理モデルによる音合成方式は、物理パラメータ補間による合成音の補間が精度良く実現できることが期待される。

本稿では、1次元の剛性をもつ弦の打弦モデルを用い、パラメータ補間によるモルフィングを検討する。打弦モデルを用いて弾性体振動の模擬も行う。また、撥弦モデルを提案し、打弦と撥弦のモルフィングを試みた結果を示す。

2 音合成モデル

今回の対象とモデル構成を図1に示す。また、合成パラメータとして用いる定数記号を、後に用いる基準値とともに表1に示す。

2.1 1次元励起・振動体モデル

本研究では、音合成方式として1次元励起・振動体モデルを用いる。ここで励起・振動体モデル

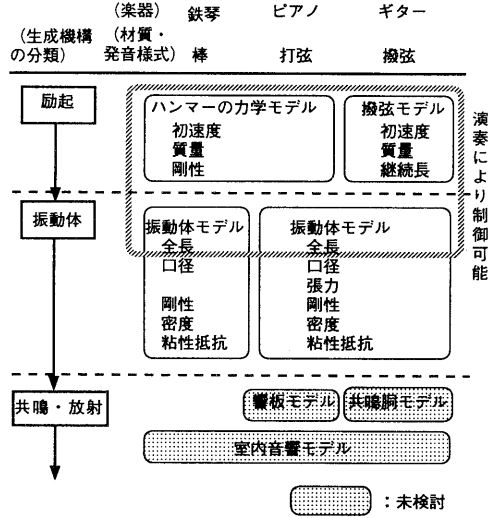


図 1: 研究対象とモデル構成

とは、発音体が振動し音圧波形が我々の耳に達するまでの過程を、図1に示すように、機構から励起、振動体、共鳴、放射の部分に分けた時の、励起および振動体をモデル化したものを指す。ここでは、微分方程式による表現に基づきモデルを構成し、計算機上へ実現する。この方法の利点として、数値解法を利用し近似解を得ることができ、パラメータとして物理定数が直接利用できる点が挙げられる。微分方程式の数値解法による弦楽器などのシミュレーションはこれまで盛んに試みられており、ここではピアノ弦を対象とした [6] の枠組を利用する。用いた微分方程式を簡潔に示す。剛性をもつ弦の1次元振動の方程式を示す。

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

ここで、 y : 弦の変位、 μ : 線密度、 T : 張力、 E : ヤング率 (剛性を表す)、 κ : ジャイレーション半径、 S : 弦断面積、 $f(x, x_0, t)$: 外力密度、 x_0 : 打弦位置である。第三、第四項は減衰項であり、この定式化により次式で与えられる周波数に依存した減衰率 d を表現している。

$$d(\omega) = b_1 + b_3 \omega^2$$

ω : 角周波数である。

外力項 (励起) に関して、ピアノハンマーによ

表 1: 用いたパラメータと基準値

パラメータ	パラメータ基準値		
	弦 (C2)	弦 (C4)	弾性体 (A2)
長さ L [m]	1.9	0.62	1.9
半径 a [m]	6.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	6.0×10^{-4}
密度 ρ [kg/m ³]	1.63×10^4	8.07×10^3	1.63×10^4
張力 T [N]	750	670	0
ヤング率 E [N/m ²]	2.0×10^{11}	2.0×10^{11}	1.2×10^{16}
減衰係数 b_1	0.5	0.5	0.7
減衰係数 b_3	6.25×10^{-9}	6.25×10^{-9}	1.0×10^{-11}
アタック位置 h	0.12	0.12	0.12
ハンマー質量 M_H [kg]	4.9×10^{-3}	2.97×10^{-3}	2.97×10^{-3}
指数係数 p	2.3	2.5	2.5
スチフネス 係数 K	4.0×10^8	4.5×10^9	4.5×10^9
初速度 V_H [m/s]	10.0	10.0	5.0
分割数 N	100	50	20
サンプリング	48	48	480
周波数 f_e [kHz]			

る打弦を次式の様にモデル化する。

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

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

ここで、 η : ハンマーの変位、 $F_H(t)$: 弦に加わる力、 M_H : ハンマーの質量であり、 K, p は実験的に決められる定数である。また、 $f(x, x_0, t)$ と $F_H(t)$ の関係は次式で与えられる。

$$f(x, x_0, t) = \frac{F_H(t)g(x, x_0)}{\mu \int_{x_0 - \delta x}^{x_0 + \delta x} g(x, x_0) dx} \quad (4)$$

$2\delta x$: ハンマーの幅、 $g(x, x_0)$: 力の分布を与える関数である。

境界条件は両端支持とし、初期条件として $g(x_0, x)$, x_0, V_{H0} を与える。

有限差分法を用いてこれらの方程式を解く。そして、合成パラメータとして物理定数を指定し、変位等を再帰的に計算する。本稿では、共鳴、放射特性は無視し、ある一点での振動速度を合成音波形とする。

ここではピアノ弦のモデルを用いたが、振動体パラメータのうち張力を 0 とし、他のパラメータ

値に適当な値を用いることにより弾性体の振動が模擬できる。

2.2 撥弦モデル

撥弦の基本的モデルとしては、初期条件として初期変位および初速度 0 を与えるものがある。もう少し複雑なモデルとして、指の運動として一定の加速度を与えるものや、指の抵抗などを考慮した例 [7] が報告されているが、弦と撥弦体の物理的振る舞いを定式化した報告等は見られない。これは、撥弦は演奏者の奏法に深く関係し、定式化が難しいためと思われる。

ここで、モルフィングなど柔軟な音色制御を実現するため、従来の打弦モデルを拡張し、図 2 に示す撥弦モデルを提案する。まず、撥弦体がある速度で弦と衝突し、弦と接触を保ちつつ平行位置から変位を生じる。接触の際には、打弦モデルと同様の反発力を生じるとする。ある時間経過の後、撥弦体は、弦からの反発力が 0 となる前に弦より離れる。なお、撥弦体と弦が接触しつつ移動する間に生じる摩擦力については無視している。

この撥弦モデルは次式の様に表される。

$$F_H(t) = \begin{cases} K|\eta(t) - y(x_0, t)|^p, & \eta(t) \geq y(x_0, t), t < t_{pl} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 t_{pl} は撥弦体と弦との接触時間 (力の継続長) である。

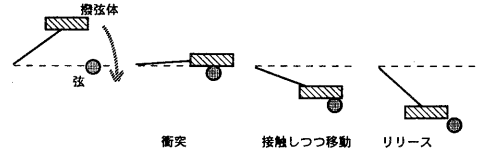


図 2: 撥弦モデル

これは、(3) 式の打弦モデルに力の継続長 t_{pl} を導入したものであり、打弦モデルにおける力の継続長を t_{st} とすると、 $t_{pl} < t_{st}$ である。その結果、弦に加わる外力は、減衰が急で、ステップ関数的に 0 になる。また、 p は撥弦体の材質により異なると考え、打弦における基準値とは異なる値を用いる。今回、撥弦時の指先はピアノハンマーよりも柔らかく、生じる反発力が小さいと考え、 $p = 3.5$ などを撥弦モデルにおける基準値として用いた。また、力の継続長は $t_{pl} = t_{st}/2$ とした。本モデルは、指数係数 p と継続長 t_{pl} を操作することにより、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。

3 各パラメータの合成音への影響

我々は、初期的には、原音の分析合成によりモデルパラメータを推定する、というパラメータ推定問題に立ち入らず、文献を参考にパラメータの基準値(表1参照)を用いる。[6]においては、物理パラメータとブリッジやハンマーに生じる力などの関係が調べられているが、音色への影響については明らかではない。そこで、物理パラメータと、特に聴感と関係が深いと考えられる部分音構成、周波数スペクトルなどとの関係を調べる。また、非公式な主観評価も行なう。

3.1 実験方法

打弦モデルにおいて、パラメータを表1に示す基準値に固定し、各パラメータを独立に変化させ、合成音波形に生じる物理的变化、および音色に生じる印象変化を調べる。

3.2 結果

- 長さ、半径、密度
ピッチ感は長さ、半径、および密度の平方根に反比例し、弦の固有周波数に関する理論式より予想される変化が生じることが確かめられた。また、半径を大きくした際に、金属的、非協和的な印象が得られた。これは、剛性をもつ弦の非調和性(inharmonicity)を表す式(例えば[8])が、半径に比例する項をもつことと合致する。
- 張力、ヤング率
張力、およびヤング率を変化させ、FFTスペクトルより部分音周波数を抽出した。この結果より以下のことが分かる。
 - ・張力の増加とともに部分音周波数が全体的に高くなる。
 - ・ヤング率の増加につれ部分音周波数の高域が高い方へシフトする。これらは従来より知られている、剛性を持つ弦の性質と合致する。
- ハンマーの初速度、質量
図3に、ハンマーの初速度を変化させた時のFFTスペクトルを示す。図より、初速度の増加によりスペクトルの高域成分のパワーが増加していることが分かる。また図には示されていないが、最大振幅は50~400%(5~40[m/s])の範囲でほぼ直線的に増加する。また、ハンマーの質量を変化させた時の波形の様子は次の通りである。ハンマーの質量が大きくなる

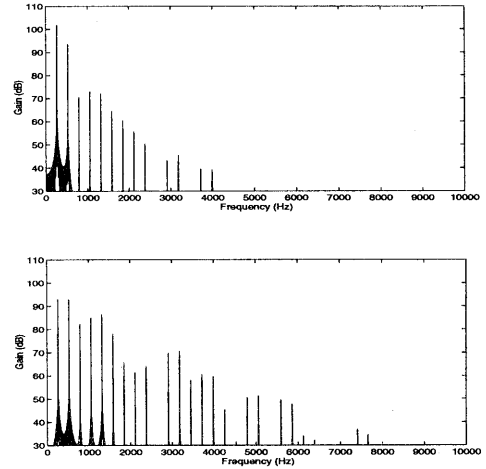


図 3: ハンマー初速度の異なる合成音のFFTスペクトルの比較(C4) (上) 2 m/s (基準値の20%)、(下) 300 m/s (基準値の3000%)

と慣性が大きくなるため、接触後に弦から離れにくくなる。その結果変位の進行波の一周期が長くなり、正弦波的な波形に近づく。スペクトル上では基本音の相対レベルが突出する。質量がさらに大きくなると、アタック直後の振幅減衰が大きくなり、再び第二倍音以上の相対レベルが上昇する。そのため聴感上の変化も単調な変化ではなく、100%から倍率を上げていった時の聞こえは、基本周波数が強調されて一旦重い感じになり(800%)、再び元に戻る(4000%)ような印象である。

- 減衰係数 b_1, b_3
 b_1 を大きくすると時間減衰が大きくなる。
 b_3 を大きくするとスペクトルの傾斜が急になり、結果として高域成分の比率が減少するため、柔らかい音の印象になる。

また、弾性体について、ハンマーに関するパラメータの影響を同様に検討した。パラメータの基準値のうちいくつかは弦の値をそのまま使用し、張力は0とし、他は固有周波数の理論式を利用し基本周波数を目標値に合わせるよう決定した(表1参照)。ここで、サンプリング周波数を弦の場合と比べて大きく取っているのは安定性条件などから、張力が0の場合に N の取り得る値が小さくなってしまふことを補償するためである。指数係数 p を変えた時に、金属的な音から柔らかい音まで、聴感上もっとも大きな変化が生じた。結果を図4に示す。指数係数 p の増加とともに高域部分

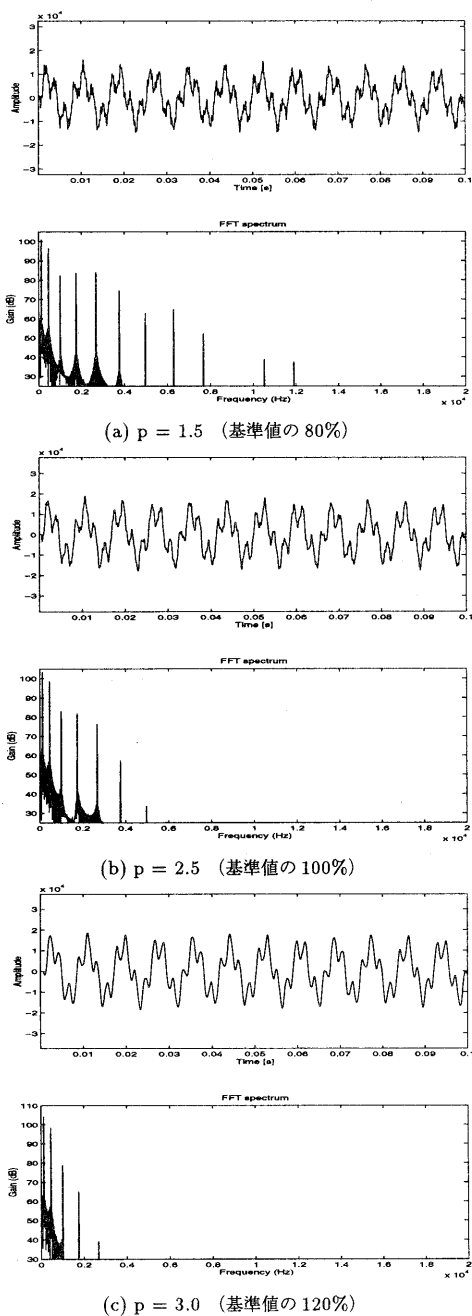


図 4: 指数係数の異なる合成音波形・FFT スペクトルの比較 (弾性体, A2)

音レベルが低下し、消滅することが分かる。これより影響は小さいが、スチフネス係数 K についてもほぼ同様な変化が生じた。

3.3 考察

以上の検討結果より、制御パラメータの影響が定性的に得られた。これらの特徴は以下の 3 つに大別できる。

- ピッチ感に関するもの…張力(弦の場合)、ヤング率(弾性体の場合)、長さ、半径、密度など
- 音の鋭さ、金属的印象、協和性に関するもの…ヤング率、減衰係数 b_3 、指数係数 p など
- 音量に関するもの…初速度

これらの知見を基に、ギター収録音(ナイロン弦、スチール弦)の観測より基本周波数、部分音間隔、周波数スペクトルの傾斜のフィッティングを行い、ナイロン弦、スチール弦に関するパラメータセットを定めた。これらを用いて異なる音色の補間を試みる。

4 モルフィングの実現

振動体として、異なる物理定数をもつ複数の媒質を想定し、この間の補間音色を合成することを試みる。その際、音色を比較するためにはピッチを同一にする必要がある。そこで、合成パラメータのうち張力、ヤング率の値を利用し、合成音のピッチが同一となるよう調節した。以下、それぞれの対象について、合成パラメータの決定方法を示す。

4.1 弦と弾性体の補間

微分方程式 (1) は、振動体の運動を理想的な弦/弾性体の場合の重ね合わせとして記述している。ここで、張力 T の項とヤング率 E の項の寄与する割合を制御することで、弦と弾性体の補間ができると考え、以下の様に補間音の合成パラメータを決定した。

1. 打弦のパラメータ値を基準値に固定
2. 密度、半径、長さ、減衰係数を基準値に固定
3. 基本周波数を指定し、次式を満たすよう張力、ヤング率を決定

$$f_{string1} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T_s}{\mu}}, \quad f_{bar1} = \frac{\pi \kappa}{2L^2} \sqrt{\frac{E_b}{\rho}}$$

4. 補間係数 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ を与え、張力、ヤング率を次式で線形補間

$$E(\alpha) = \alpha E_b, T(\alpha) = (1 - \alpha)T_s$$

4.2 材質の異なる弦の補間

本合成モデルを用い、ギター（ナイロン弦、スチール弦）収録音の観測より求めたパラメータセットの間、およびこれらと基準値（ピアノ弦のパラメータ）との間の補間を行った。

1. 打弦のパラメータ値を基準値に固定
撥弦を対象とする場合には基本モデル（初期変位を与える）に固定

2. ヤング率、密度、半径、長さ、減衰係数をそれぞれ線形に補間（添字 i, j はそれぞれのパラメータを表す）

$$(E(\alpha), \rho(\alpha), \dots) = (\alpha E_i + (1 - \alpha)E_j, \alpha \rho_i + (1 - \alpha)\rho_j, \dots)$$

3. 基本周波数を一定とするよう張力を決定

4.3 打弦と撥弦の補間

今回導入した撥弦モデルを用い、打弦と撥弦との音色補間を試みる。本モデルでは励起のパラメータとして、 M_H, K, p および力の継続長 t_{pl} を持つ。ここでは、 M_H, K は基準値に固定し、 p, t_{pl} に関して、打弦、撥弦の基準値の間を次式により線形に補間した。

$$p(\alpha) = \alpha p_{struck} + (1 - \alpha)p_{plucked},$$

$$t_{pl}(\alpha) = \alpha t_{st} + (1 - \alpha)\frac{t_{st}}{2} = \frac{1 + \alpha}{2}t_{st}$$

4.4 結果

1. 弦と弾性体の補間に関して、異なる振動体を同一の枠組の中で扱えることが示されたが、弾性体の合成音について複数のピッチ感が得られるため、ピッチ感を一定に保つための考慮が必要である。また、2. 材質の異なる弦についてはパラメータ補間により補間音色が得られた。3. 撥弦と打弦に関して、知覚的に補間音の合成が可能であることが示された。図5に補間された外力を示す。発表の際にはこれらのデモ提示を行う予定である。

5 まとめ

我々は、コンピュータ音楽、マルチメディアに資するため、音色の柔軟で自由な制御方式を研究

している。今回、従来の打弦モデルを含んだ撥弦モデルを提案し、打弦音、撥弦音、およびこれらの補間音色の合成の可能性を示した。今後は、音色補間を実現する際の、適切なパラメータの選択方法に関して検討が必要である。他に、聞こえのピッチ感の考慮や、補間音色の聴取実験による評価などは今後の課題である。

謝辞

本研究を進める機会を与えて下さった当所石井健一郎情報科学研究部長、ならびに有益な議論を頂く当研究所所員の皆様に感謝します。

参考文献

- [1] 引地 孝文, 小坂 直敏, “弦振動と弾性体振動のモルフingの検討”, 音楽音響研究会資料 MA96-18, pp69-76 (1996).
- [2] E.Tellman, L.Haken, B.Holloway, “Timber Morphing Using The Lemur Representation”, *ICMC Proceedings*, pp329-330 (1994).
- [3] 小坂 直敏, “Sinusoidal model による音色の補間”, 電子情報通信学会技術報告 SP95-130, pp9-16 (1996).
- [4] 阿部 匡伸, “基本周波数とスペクトルの漸次変形による音声モーフィング”, 日本音響学会平成7年度秋季研究発表会, 2-1-8, pp259-260 (1995).
- [5] D.V.Oppenheim, “Demonstrating MMorph: A System for Morphing Music in Real-Time”, *ICMC Proceedings*, pp479-480 (1995).
- [6] A.Chaigne, A.Askenfelt, “Numerical Simulations of Piano Strings. II. Comparisons with measurements and systematic exploration of some hammer-string parameters”, *Journal of the Acoust. Soc. of America*, 95(3), pp1631-1640 (1994).
- [7] A.Chaigne, “On the use of finite differences for musical synthesis. Application to plucked stringed instruments”, *J'd Acoust.*, 5, pp181-211 (1992).
- [8] N.H.Fletcher, T.D.Rossing, “The physics of musical instruments”, Springer-Verlag, pp315-318 (1991).

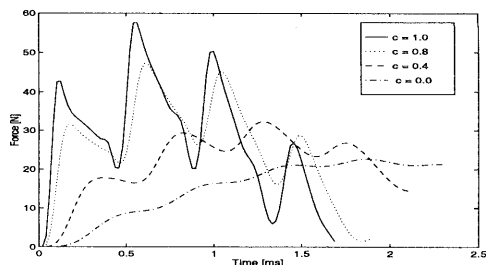


図5: 外力 $F_H(t)$ の補間結果 ($\alpha=1.0$; 打弦の場合, $\alpha=0.0$; 撥弦の場合)