

## 物理モデルに基づく音合成システム

後藤祐子† 小坂直敏‡  
東京電機大学

### 1. はじめに

我々は、音楽、映画やゲームなどマルチメディアコンテンツでの応用を目的として、物理モデルに基づく音合成システムを構築している。物理モデルは実在の楽器と同様なパラメータの操作が可能であるため、より直感的で簡便な音色のコントロールや、実際の楽器の特徴を有する合成音の生成が期待できる。また、楽器の長さやリードの固有角周波数なども制御パラメータとして利用できるため、実在の楽器では表現できない音色の合成も期待できる。

本稿では、こうした物理モデルを合成エンジンとした音楽合成のための合成システムの概要と合成エンジンについて報告する。

### 2. システムの概要

本システムは、洋楽器を中心に邦楽器も含んだ楽器を対象とし、ソロ曲、室内楽、オーケストラ曲などを波形合成する音楽システムを目指している。システムの概略図を図1に示す。

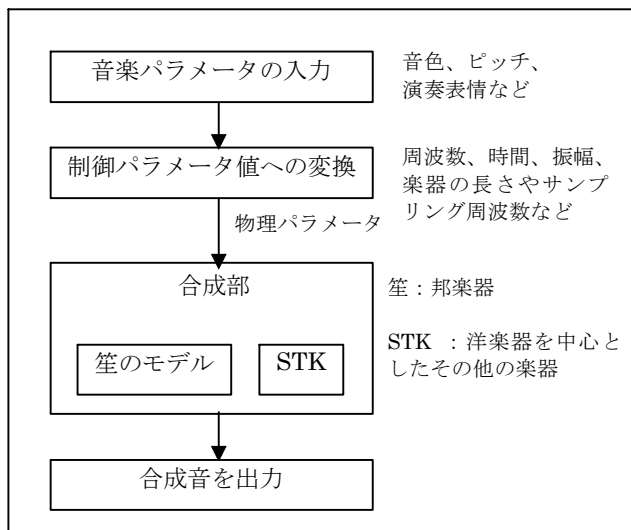


図1 音合成システムの概略図

一般に、音楽合成システムは譜面情報を入力して、MIDI 制御により既存音源を駆動して音を合成する。しかしこの方法では、音源の音色を本質的に制御することは難しい。本システムでは、まず五線紙での表現による入力を入力とする。すなわち、音高と音長の情報を入力とし、これらと物理モデルのパラメ

ータの対応関係があらかじめ定義されている。加えて、音の強弱やスラー、スタッカートなどの演奏表情を反映させた音を合成することができる。さらに、音楽の専門家ユーザに対し、物理モデルパラメータを直接制御することにより豊かな音色を合成する枠組みを提供する。すなわち、譜面情報と物理モデルパラメータの対応関係をユーザが定義できる枠組みを提供する。これにより、柔軟性のある音楽システムが構築できる。

### 3. 合成エンジン

本研究で対象としている楽器を表1に示す。

表1 本研究で対象としている楽器

洋楽器	クラリネット、撥弦、撥弦(堅い弦)、擦弦、サックス、マンドリン、シタール、BlowHole
和楽器	笙
その他	BlowBotl (ピンに息を吹いたときの音) Moog

合成エンジンとして、STK (Synthesis ToolKit)[1]と笙の物理モデルを使用する。

#### 3.1 STK

STK は Cook と Scavone により、C++で書かれた音響信号処理と合成アルゴリズムのクラスのオープンソースである。STK はある特定のプログラムではなく、様々な楽器の物理モデルやサウンドファイルへの出力などのクラス一式が用意されている。出力サウンドファイルのフォーマットとしては、SND、WAV、AIFF や Mat-file がある。

#### 3.2 笙の物理モデル

本節では、邦楽器の一例として笙を挙げ、引地らによる笙の物理モデル[2], [3]を用いた。笙はハーモニカやリードパイプオルガンなどのようなフリーリード楽器に分類されるが、クラリネットやリードパイプオルガンとは異なり外向き発振である。リードは内向き発振、外向き発振、横向き発振の3種類に分類される。リードをバネがついたバルブと考えると、外向き発振型リードは吹鳴圧  $p$  が高まるとバルブを開こうとし、管内圧力  $p_2$  が高まるとバルブを閉

じょうとする。すなわち、笙のリードは吹鳴圧  $p$  が高まる時に音が鳴る。また、リードがほぼ左右対称であることから吹いても吸っても同じリードが振動する。主に、マウスピースと匏(ほう、又はかしら)と呼ばれる空洞部分、17本の竹管で構成されている。管はそれぞれ異なる長さでリードを持ち、管の上の指穴を閉じてマウスピースに息を吹き込むとそれぞれ異なる音高で鳴る。指穴が開いたままの管は鳴らない。使用した主なパラメータとその記号を表 2 に示す。

表 2 使用したパラメータ

変数	記号
<b>リード</b>	
長さ	$L[mm]$
幅	$W[mm]$
厚さ	$h[mm]$
先端部の変位	$x[mm]$
リードと板の間隙	$b[mm]$
$Q$ 値	$Q$
固有角周波数	$\omega_r[Hz]$
密度	$\rho_r[kg/m^3]$
付加質量率	$\alpha_m$
質量	$m[kg]$
<b>管</b>	
管内圧力	$p_2[kPa]$
共鳴周波数	$f_p[Hz]$
半径	$r_p[mm]$
特性インピーダンス	$Z_0$
<b>その他</b>	
吹鳴圧	$p[kPa]$
リードを通過する体積速度	$U[m^3/s]$
空気慣性の長さ	$\delta[mm]$
気流収縮係数	$C$
空気密度	$\rho[kg/m^3]$
音速	$c[m/s]$

基本的な笙の物理モデルは、次の方程式により示されている。

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\omega_r}{Q} \frac{dx}{dt} + \omega_r^2 x = \frac{1.5WL}{m} (p(t) - p_2(t)) \quad (1)$$

$$p(t) = p_2(t) + \frac{\rho}{2} \left[ \frac{U(t)}{CF(x)} \right]^2 + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\rho U(t) \delta}{CF(x)} \right] \quad (2)$$

$$F(x) = W \left[ x^2 + b^2 \right]^{\frac{1}{2}} + 2L \left[ 0.16x^2 + b^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$p_2(t) = Z_0 U_m(t) + r(t) * (p_2(t) + Z_0 U_m(t)) \quad (4)$$

$$U_m(t) = U(t) + 0.4WL \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

$$r(t) = -\alpha \exp \left\{ -\beta (t - 2l/c)^2 \right\} \quad (6)$$

方程式(1)は吹鳴圧  $p$  が管内で適用されたときのリードの運動方程式である。リードと管の非線形結合はベルヌーイの定理によって説明されていて、方程式(2),(3)に示されている。方程式(4)-(6)は管内圧力  $p_2$  の計算に用いられている。方程式(4)の\*は畳み込みを示している。

#### 4. 合成音の例

合成した撥弦の音波形とスペクトル信号を図 3 に示す。

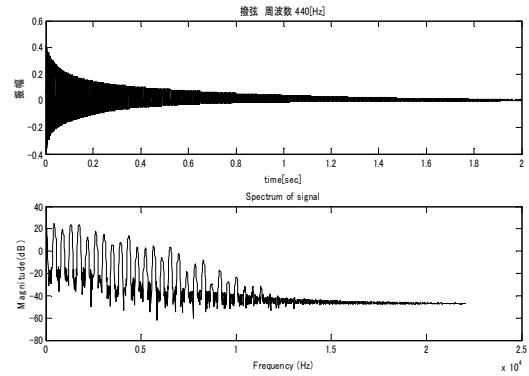


図 3 撥弦の音波形(上)とスペクトル信号(下)

#### 5. おわりに

本稿では、物理モデルに基づく音合成システムの概要とその合成エンジンについて報告した。合成エンジンとして STK と笙の物理モデルを挙げ、STK を用いた合成音の例を紹介した。今後の課題として、合成エンジンに用いる他の楽器の物理モデルの構築や、譜面情報と物理パラメータとの対応関係の実装、和音や旋律での音合成などシステムの拡張を進める。

#### 参考文献

- [1] P. Cook, "Introduction to Physical Modeling," A K Peters Ltd, Audio Anecdotes : Tools, Tips, and Techniques for Digital Audio, pp.179-198, 2003.
- [2] Hikichi, Osaka, and Itakura, "Time-domain simulation of sound production of the sho," Acoustical Society of America, Vol.113, No.2, pp.1092-1101, 2003.
- [3] Hikichi, Osaka, and Itakura, "Sho-So-In," Journal of New Music Research, Vol.33, No.4, pp.355-365, 2004.