

# 合成音への表現力付与のための擦弦楽器の発想伝達関数の推定\*

小泉悠馬 (法政大学情報科学部), 伊藤克亘 (法政大学情報科学部)

## 1 序論

本研究では、擦弦楽器の合成音に表現力を持たせる手法を提案する。その完遂のため、本研究では物理パラメータと併用できる発想記号に関する伝達関数の導入を提案する。様々な奏法の演奏音声から、擦弦時のスペクトルと楽器の共鳴特性の逆フィルタを用いて、擦弦情報により推定される波形を、表現をつけて演奏した波形に変換するフィルタである、発想伝達関数を推定する。発想伝達関数を用い、図1の流れで音色を生成することにより、発想記号による音色の変化を伴った楽音を生成する。

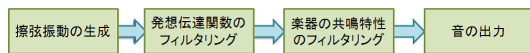


図1. 発想伝達関数を用いる合成音の生成過程

## 2 擦弦楽器の物理

図1における発想伝達関数以外で生成される信号を取り除くために、それらを推定する必要がある。

**弦の振動:** 弦の時間波形は擦弦位置の比率  $\beta$  (= 擦弦位置/弦長) によって頂点位置が決まる鋸波 (ヘルムホルツ波) である [1]。

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{(n+1)}}{n^2} \phi_n(\beta) \sin(\omega_n t) \quad (1)$$

しかし、ヘルムホルツ波は振動の観測位置  $x$  (= 擦弦位置/弦長) と擦弦位置が一致する場合のみに観測される振動である [2]。駒 (端点) での弦の振動は  $x = 1$  で観測される信号である。実際には弦を完全に固定しておらず、駒自体も振動するため  $x \neq 1$  である。本研究では  $x = 0.97$  とする。観測位置を考慮した実際の弦の振動は (2) 式のように書き表すことが出来る。

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) \frac{(-1)^{(n+1)}}{n^2} \phi_n(\beta) e(p_t, f_t, v_t) \sin(\omega_n t) \quad (2)$$

ここで、 $e(p_t, f_t, v_t)$  は擦弦情報 (位置  $p$ , 圧力  $f$ , 速度  $v$ ) により変化する各モードのゲインに関する係数である。

**楽器の共鳴:** 楽器の共鳴特性は直接駆動型スピーカーを用いて TSP 応答を測定し、それに ITSP 信号を畳み込むことによりインパルス応答を取得した。さらにそこからスピーカーの周波数特性を取り除き推定した。

## 3 発想伝達関数の推定

実際の演奏音も図1のような流れで生成されていると仮定すると、周波数領域の生成音  $Y$  は、 $Y = SEI$  と、表現できる。ここで  $S$  は弦の振動、 $E$  は発想伝達関数、 $I$  は楽器の共鳴特性である。 $S$  は弦の振動により

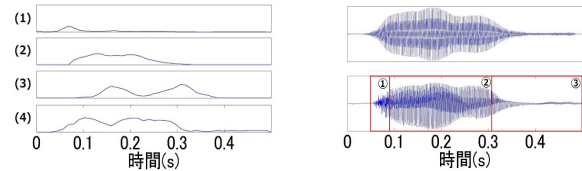


図2. NMFによるバイオリンのmarcato音の解析 (上) と実際の演奏波形 (下)

推定可能であり、 $I$  は観測したインパルス応答を利用できる。よって発想伝達関数  $E$  は、推定した弦の振動波形に楽器の共鳴特性を掛けたものを実際の演奏から取り除くことにより、 $E = Y/SI$  のように計算できる。

**弦の振動の変化の推定:** 実際の演奏では、擦弦情報が一定ではないため、演奏音声から弦の振動波形  $S$  を生成するためには弦の振動の時間変化を推定する必要がある。本研究では、弦の振動を擦弦情報により決定する特徴的な弦の振動のスパースな線形結合で近似できると考え、非負値行列分解 (NMF) を用いて弦の振動を推定する。NMF とは、与えられた非負値行列  $V$  に対し  $V \approx WH$  となるような非負値行列  $W, H$  を決定するアルゴリズムである [3]。基底  $W$  に対して更新規則を実行せずアクティベーション  $H$  のみを計算することにより、 $V$  における  $W$  の強度  $H$  を推定する。本研究では、擦弦の位置と圧力の変化に着目し、2つの擦弦情報を変化させて演奏した演奏音声から (2) 式における  $e(p, f, v)$  を推定し、 $e(p, f, v)$  を変化させた12種類の特徴的な弦の振動に楽器の共鳴特性をかけたスペクトルと、発音時の雑音成分の近似としてのピンクノイズに楽器の共鳴特性をかけたスペクトルを  $W$  の初期値とする。

図2は、バイオリンのmarcato(はっきりと)で演奏した図3下図のGの音(390Hz)をNMFで解析したものである。図2において、(1)がピンクノイズ、(2)が( $\beta=1/13$ ,  $f$  = 強い)の弦の振動、(3)が( $\beta=1/9$ ,  $f$  = 強い)の弦の振動、(4)が( $\beta=1/9$ ,  $f$  = 普通)の弦の振動である。他のアクティベーションは存在する値が極めて小さいため省略した。ここで発音、持続、余韻部分とは、図3下図における①, ②, ③とする。発音の部分でピンクノイズは、発音時の弦の非線形の運動による雑音成分が発生するためである。また、後半の余韻の部分で高調波の少ない(3)が立ち上がった理由は、弓を弦から離れた時の弦の余韻は、弦の固有モードへと収束し、高調波成分から減衰するためである。擦弦方法による弦の振動の変化を近似できているため、NMFによる弦の振動の推定は有効であると考えられる。

弦の振動波形の生成にはWavetable方式を用いる[4]。図3上図は、推定したアクティベーションから合成した弦の振動波形である。

**発想伝達関数の推定:** 楽器の共鳴特性フィルタと弦の振動のスペクトルを用いて発想伝達関数を推定する。本研究では、波形が異なる区間を手動で切り取った  $n$  個

\* Synthesis of Performance Expression of Bowed String Instruments Using "Expression Mark Functions" by Yuma Koizumi. (Faculty of Computer and Information Science, Hosei University) et. al.

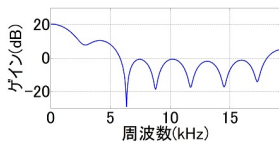


図 4. feroce

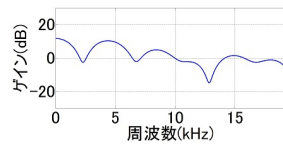


図 5. dolce

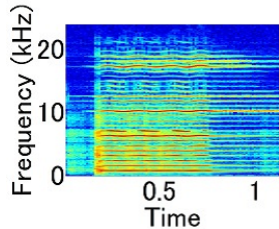


図 6. 生成音 (feroce)

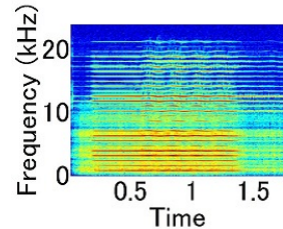


図 7. 生成音 (dolce)

の区間 (3 区間程度) において,  $E_n = Y_n / (S_n I)$  で, 発想伝達関数を推定する. 調波構造を除去するために発想伝達関数の線形予測係数フィルタを求め, 包絡のみを取得した. 図 4 はヴァイオリンの G 音 (786Hz) の feroce (荒々しく), 図 5 は dolce (甘く, やわらかく) 音の発音部の発想伝達関数である. 4kHz 以下の振幅応答に, 15dB ほどの変化が見られる. これは feroce は音の立ち上がりから大きな圧力と速い弓速で, 基本波の強い力強い発音をするのに対し, dolce は少ない圧力で, やわらかく基本波の少ない発音をする差が表れている.

#### 4 発想伝達関数を用いた楽音の合成

**合成音の周波数変調:** 発想記号によりかけるビブラートの速さや幅は変化する. より表現力豊かな楽音の合成するためには, ビブラートも変化させる必要がある. そこで瞬時周波数を用いて, 発想記号により演奏される実際の演奏音からビブラートの特徴を抽出する [5]. 本研究では, 入力された発想記号から推定されたビブラートを元に周波数変調を決定し, 楽音合成を行う.

**楽音の合成:** NMF で推定した弦の振動波形に周波数変調を行った弦の振動波形に発想伝達関数を畳み込み, 楽器の共鳴特性を畳み込む. 今回の試行では, 各弦において 3 区間の発想伝達関数を推定した. 各区間の切り替えは台形窓を用いて行う. 図 (6,7) は生成された楽音である. 発想伝達関数により, 2 次モードまでのゲインと 13kHz 付近のゲインに差が生まれている.

#### 5 評価

本研究では, 5 種類の発想記号 (marcato: はっきりと, leggero: 軽やかに, feroce: 荒々しく, dolce: 甘く, やわらかく, appassionato: 情熱的に) について, 発想伝達関数を用いた合成音と, MIDI で生成した G 音 (786Hz) を用いて聴衆実験を行った. 被験者は擦弦楽器を 3 年以上経験している 20 人である.

実験では, グループを 2 つに分割し, 発想記号に対する合成音の合致度を 5 段階のオピニオン評価法を用い MOS 値を評価した. グループ 1 は合成音のみを評価し, グループ 2 は, MIDI か合成音かを伏せた上で, MIDI と合成音両方を評価する. 最後に, 両グループともに合成音についてコメントをしてもらう.

表 1. MOS 値 (Group1)

| 発想記号         | 合成音 |
|--------------|-----|
| marcato      | 4.0 |
| leggero      | 3.2 |
| feroce       | 3.0 |
| dolce        | 4.0 |
| appassionato | 2.7 |

表 2. MOS 値 (Group2)

| 合成音 | MIDI |
|-----|------|
| 3.8 | 2.2  |
| 3.5 | 2.8  |
| 3.6 | 3.5  |
| 3.5 | 2.2  |
| 3.3 | 3.0  |

表 1,2 にオピニオン試験の結果を示す. オピニオン評価ではグループ 1 では dolce と marcato において MOS 値が 4.0 となった. appassionato のコメントには迫力が感じられないとのコメントが多く, feroce のコメントには荒々しさが認知できないというものが多かった. これらの発想記号では力強さを表現するために (2) 式で表すことが可能な圧力よりも大きな圧力を掛けているためではないかと考えられる. 実際の演奏波形に楽器の共鳴特性の逆フィルタをかけ波形を確認したところ, 本研究では考慮していない double-slip 現象 [2] の波が確認された. グループ 2 ではすべての発想記号において, MIDI よりも合成音の MOS 値が上回った. 特にグループ 1 で評価の高かった dolce と marcato は MIDI の MOS 値よりも 1 以上 MOS 値が上回った.

#### 6 結論

発想伝達関数を用いて楽音を合成することにより, 全ての発想記号において MOS 値が上回り, dolce と marcato において MOS 値が 4.0 となった. 発想伝達関数による音の合成は MIDI による合成よりも変化に富む合成音を生成することが可能であると考えられる. また, 発想伝達関数は, 擦弦情報により決定した弦の振動を実際の奏者が発想記号を元に表現を付与するように擦弦した際に生成される弦の振動に近づける有効なフィルタであると考えられる.

擦弦振動の生成の問題点として, 擦弦の圧力に起因した擦弦振動の変化を実際の演奏音声から推定しており, 物理的な根拠がない. また, 擦弦の速度による音色変化を推定していない. 本研究では NMF を用いて弦の振動を解析するために, 弦の振動を特徴的な弦の振動の線形結合であると仮定して推定を行ったが, 先行研究ではそのような成果は上がっていない. また FFT 演算で得られるスペクトルは複素数であり厳密には線形結合ではなく, また, アクティベーションの連続性とスパース性に関する制約を行っていないため, 擦弦運動解析に対応した改良が必要である.

#### 参考文献

- [1] 近藤 正夫 “バイオリンの発音機構” 日本音響学会誌 49(3), 184-192, 1993-03-01
- [2] 村上, 智之 “擦弦振動の平均法による解析” 日本機械学会論文集. C 編 62(598), 2102-2109, 1996-06-25
- [3] D. D. Lee and H. S. Seung, “Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization” Nature, 788-791, 1999
- [4] Bristow-Johnson, Robert “Wavetable Synthesis 101, A Fundamental Perspective” AUDIO ENGINEERING SOCIETY, Pages: 1-27
- [5] 中野倫靖, 後藤真孝, 平賀 譲, “楽譜情報を用いない歌唱力自動評価手法,” 情報処理学会論文誌 48(1), 227-236, 2007-01-15