

Resonator 型くし形フィルタによる 打楽器音を含む楽音の音高推定法の検討

寺井 優† 田所 嘉昭†

本稿では、打楽器音を含む楽音の音高推定法を提案し、その方法を検討する。我々はこれまでに Notch 型くし形フィルタを用いた零出力の検出に基づいた音高推定法を提案した。しかし、楽音に打楽器音が含まれる場合、Notch 型くし形フィルタの零出力の検出が困難になるため、従来の手法をそのまま適用することは困難であった。この問題を解決するため、Resonator 型くし形フィルタを用いて、楽音の調波成分を抽出することに基づいた音高推定法を検討する。実際に、ピアノとバスドラムなどの打楽器音を用いて評価実験を行い、93%の音高推定率を得た。

Pitch Estimation for Musical Sounds Including Percussion Sound by Resonator-Type Comb Filters

Masaru Terai† and Yoshiaki Tadokoro†

We have proposed a pitch estimation method for musical instrument sounds based on notch type comb filters which eliminate the pitch and its harmonic frequencies. However, it was difficult to estimate the pitch of musical sounds that include a percussion sound by the previous method. This paper presents a pitch estimation method for musical sounds including a percussion sound. We propose an estimation method using resonator-type comb filters.

The performance evaluation of the proposed method was investigated using piano sounds and 20 kinds of percussion sounds. As a result, the pitch estimation precision was about 93%.

1. ま え が き

計算機により音楽信号から楽譜を作成する自動採譜の実現において、楽音の音高を推定する処理は最も重要な研究課題であり、盛んに研究が行われている^{1)~4)}。楽音信号は基本周波数成分と多数の高調波成分から構成され、音高推定とは基本周波数（ピッチ）を推定する処理のことを指す。

自動採譜システムの実現を目的として、本研究室ではくし形フィルタを利用した音高推定法を提案している^{5)~8)}。Notch 型くし形フィルタ $H(z) = 1 - z^{-N}$ は周波数軸上に等間隔の零点を有しており、単音の楽音信号に含まれる全調波成分を除去する性質を有する。この性質を利用して、各音高に対応するくし形フィルタの出力から零出力を検出することで音高の推定が可能である。また、信号のフィルタリングが時間領域における減算のみで簡単に実現できるという利点がある。

本研究室では、これまでに 1 オクターブ 12 音名 ($C, C\sharp, \dots, B$) に対応した Notch 型くし形フィルタを並列に接続したシステム（並列構成くし形フィルタ）を利用した音高推定法を検討してきた⁸⁾。しかしながら、実際に採譜対象となる楽音にはドラムなどの打楽器音が含まれることがある。打楽器音は音階を持つ楽音に比べ、時

間的変化が複雑であり、一時的に他の楽音に比べて混合音中に占める割合が大きくなる。このような場合、本研究室で検討してきた零出力の検出による推定法を適用することは困難である。

本稿では、打楽器音を含む楽音の高精度な音高推定を行うシステムを実現することを目的とする。提案法では、並列接続した Resonator 型くし形フィルタ $H(z) = \frac{1}{1-z^{-N}}$ により楽音信号の信号成分を抽出することで音高を推定する。評価実験では、サンプリング周波数 $f_s = 44.1\text{kHz}$ の RWC 研究用音楽データ⁹⁾ を用いて、オクターブ 3 から 5 の音高の音高推定を行い、本システムの性能評価を行う。

2. 楽音と打楽器音の特徴

2.1 楽音の特徴

楽音は周波数軸上において、音高を決定する基本周波数とその整数倍の周波数の高調波（倍音）から構成される特徴を持つ。この基本周波数と倍音からなる楽音の構造を調波構造という。音高推定を行うためには音楽信号の周波数を解析することで基本周波数を推定し、音名及びオクターブ番号を判別する必要がある。基本周波数と音名の関係を表す音階として、本研究では、一般によく用いられる平均律音階に基づいて音名の判別を行う。平均律音階では、 A_4 (基本周波数: $440[\text{Hz}]$) を周波数の基準とし、1 オクターブを対数的に 12 等分することで他

† 豊橋技術科学大学
Toyohashi University of Technology

音の基本周波数を決定する。オクターブ番号を i 、音名を p ($p = 1, 2, \dots, 12 : C, C\sharp, \dots, B$ に対応) とすると、その基本周波数 $f_{i,p}$ は式 (1) で求められる。

$$f_{i,p} = f_{4,10} \cdot 2^{i-4} \cdot 2^{(p-10)/12} \quad (1)$$

したがって、半音も含め、隣り合う音高の周波数比は $2^{1/12}$ となる。

2.2 打楽器音の特徴

打楽器は、「木や金属、張られた膜などを打って音を鳴らす楽器」と定義される。打楽器には、ティンパニやマリリンバなどの音階があるものとバスドラムやシンバルなどの音階がないものに分類される。本稿では、後者の音階がないものを打楽器音として扱う。図 1 にピアノ C_3 と 3 つの打楽器音の周波数スペクトルを示す。図 1 から明らかなように、ピアノ C_3 と比べると打楽器音はいずれも調波構造を持たないことがわかる。また、各打楽器は特定の周波数成分を持つ。クラッシュシンバルはかなり高域にも周波数成分を有していることがわかる。

3. くし形フィルタを用いた音高推定の原理

3.1 Notch 型くし形フィルタの原理

Notch 型くし形フィルタの伝達関数は式 (2) で表現され、時間領域においては式 (3) のように表される。オクターブ番号 i 、音名 p の基本周波数を $f_{i,p}$ と表す。基本周波数 $f_{i,p}$ に対応したくし形フィルタの遅延数は $N_{i,p}$ であり、 f_s をサンプリング周波数とすると式 (4) で求められる。

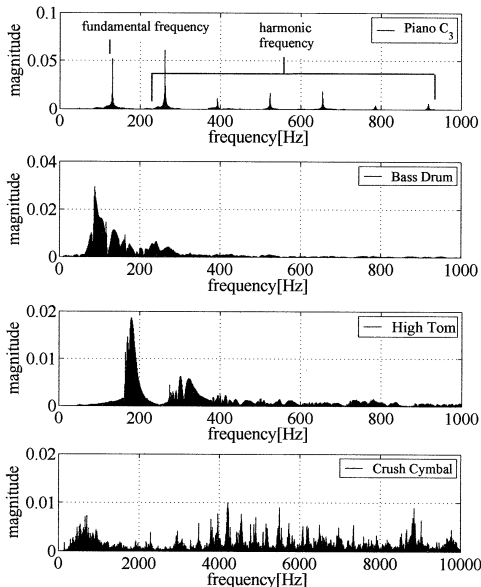


図 1 Piano C_3 と打楽器音の周波数特性

$$H_{i,p}^n(z) = 1 - z^{-N_{i,p}} \quad (2)$$

$$y_{i,p}^n(n) = x(n) - x(n - N_{i,p}) \quad (3)$$

$$N_{i,p} = \left\lfloor \frac{f_s}{f_{i,p}} \right\rfloor \quad [] : \text{integer by rounding} \quad (4)$$

式 (3) に示したように、Notch 型くし形フィルタは現在の入力とその $N_{i,p}$ サンプル前の入力 (つまり $1/f_{i,p}$ 周期前の入力) との減算を行うフィルタである。例として、ピアノの音高 C_3 の楽音の周波数スペクトルと対応する Notch 型くし形フィルタ $H_{3,1}^n(z)$ の周波数特性を図 2 にそれぞれ示す。Notch 型くし形フィルタ $H_{3,1}^n(z)$ は周波数領域において等間隔に零点を持つため、楽音信号の全調波成分を除去可能である。

この性質を利用し、本研究室では異種複数楽器音の音高推定を提案したが、いずれも打楽器音を含まない楽器音や歌唱音を対象にした手法である。打楽器を含んだ場合、図 3 のように打楽器音の成分は Notch 型くし形フィルタでは除去されない。また、打楽器音の成分はフィルタの利得の影響を受けてさまざまに変化し、出力に影響を与える。このため、本研究室で提案した手法をそのまま適用することは困難であるという問題が生じた。

3.2 Resonator 型くし形フィルタの原理

Resonator 型くし形フィルタの伝達関数は式 (5) で表現され、時間領域においては式 (6) のように表される。

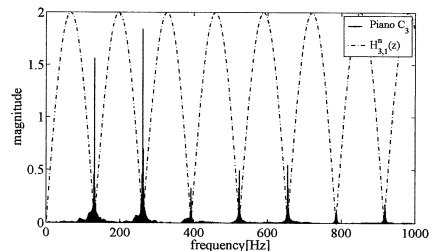


図 2 Piano C_3 の周波数スペクトルと Notch 型くし形フィルタ $H_{3,1}^n(z)$ の振幅特性

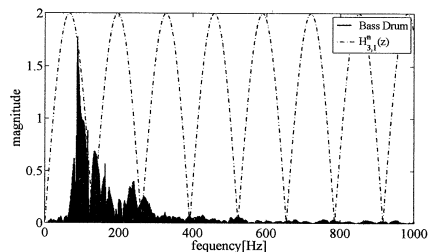


図 3 Bass Drum の周波数スペクトルと Notch 型くし形フィルタ $H_{3,1}^n(z)$ の振幅特性

$$H_{i,p}^r(z) = \frac{1}{1 - z^{-N_{i,p}}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} y_{i,p}^r(n) &= x(n) + y_{i,p}^r(n - N_{i,p}) \\ &= \sum_k x(n - kN_{i,p}) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)に示したように Resonator 型くし形フィルタは現在の入力とその $N_{i,p}, 2N_{i,p} \dots kN_{i,p}$ サンプル前の入力(つまり $1/f_{i,p}$ 周期ごとの入力)で加算を行うフィルタである。図4に音高 C_3 の楽音に対応する $H_{3,1}^r(z)$ の振幅特性を示す。 $H_{i,p}^r(z)$ は周波数領域において等間隔に極を持つため、楽音信号の全調波成分を共振させる性質を持つ。このため、Notch 型くし形フィルタよりも楽音の調波成分以外の周波数成分の影響を受けにくいと考えられる。ただし、音高推定に使用するサンプル点数には制限がある。サンプル数を L とするとき、 $H_{i,p}^r(z)$ は式(8)に示す $M_{i,p}$ 回の加算を行う。 $M_{i,p}$ 回の加算を行うとき、式(5)、(6)は式(8)、(9)のようになる。

$$M_{i,p} = \lfloor L/N_{i,p} \rfloor \quad (7)$$

$\lfloor \cdot \rfloor$: integer by rounding down

$$H_{i,p}^r(z) = 1 + z^{-N_{i,p}} + z^{-2N_{i,p}} + \dots + z^{-(M_{i,p}-1)N_{i,p}} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} y_{i,p}^r(n) &= x(n) + x(n - N_{i,p}) + x(n - 2N_{i,p}) \\ &\quad + \dots + x(n - (M_{i,p} - 1)N_{i,p}) \\ &= \sum_{k=0}^{M_{i,p}-1} x(n - kN_{i,p}) \end{aligned} \quad (9)$$

また、Resonator 型くし形フィルタの出力が共振した

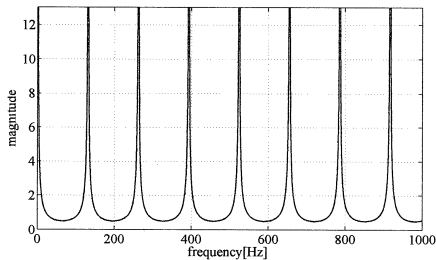


図4 Resonator 型くし形フィルタ $H_{3,1}^r(z)$ の振幅特性

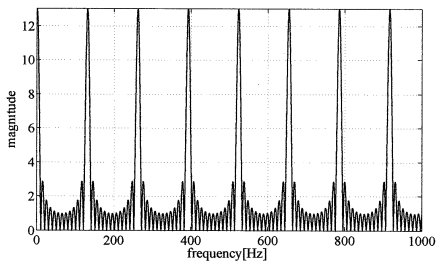


図5 使用するサンプル点数を有限としたときの $H_{3,1}^r(z)$ ($M_{3,1} = 13$) の振幅特性

か否かを表すパラメータとして式(10)を用いる。

$$R_{i,p} = \frac{\max(|y_{i,p}^r(n)|)}{M_{i,p}} \quad (10)$$

$R_{i,p}$ が大きいとフィルタの出力は共振しているとみなす。なお、対応する音高により Resonator 型くし形フィルタが行う加算の回数 $M_{i,p}$ が異なるため、 $\frac{1}{M_{i,p}}$ 倍している。図5に $M_{3,1} = 13$ である $H_{3,1}^r(z)$ の振幅特性を示す。 $M_{i,p}$ が小さいときは隣接する音高間の利得差が小さくなり、 $M_{i,p}$ が大きくなるほど共振される周波数付近の特性が急峻になる。

3.3 Resonator 型くし形フィルタの出力の性質

図6に $H_{3,10}^r(z)$ (A_3 に対応) にピアノの $D_3, G\sharp_3, A_3, A\sharp_3$ を入力したときの出力を示す。図6より、 D_3, A_3 入力時の出力は時間の経過とともに振幅が大きくなり、 $G\sharp_3, A\sharp_3$ 入力時の出力は大きくならないことがわかる。 A_3 は $H_{3,10}^r(z)$ が共振させる調波成分と対応するため、出力が共振する。一方、 D_3 は図7に示すように A_3 の2倍音とその7音下の音高の3倍音が重複関係 ($2f_{3,10} \cong 3f_{3,3}$) にあるため、 $H_{3,10}^r(z)$ が $3f_{3,3}$ により共振している。対応する音高とは別の音高でもフィルタの出力が共振するため、音高推定を行うには出力の共振が対応する音高によるものなのかあるいは重複関係にある他の音高の倍音によるものなのかを判別する必要がある。

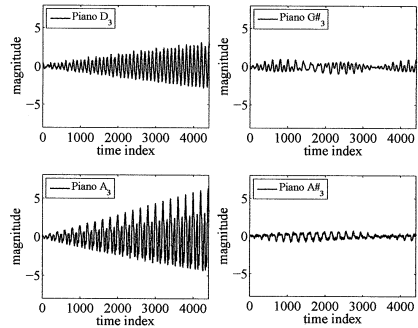


図6 Resonator 型くし形フィルタ $H_{3,10}^r$ の出力例

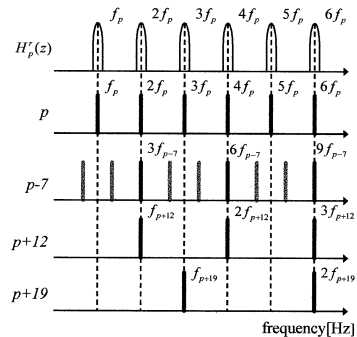


図7 音高 p の楽音入力時に共振するフィルタの振幅特性

本稿ではフィルタから共振出力が得られたとき、式(11)の自己相関関数を計算することで共振出力の判別を行う。ただし、 L は一回の音高推定時に入力するサンプル数である。

$$Rxx_{i,p}(l) = \frac{1}{L} \sum_{n=0}^{L-l-1} y_{i,p}^r(n) y_{i,p}^r(n+l) \quad (11)$$

$y_{i,p}^r(n)$ が周期信号であるとき、 $Rxx_{i,p}(l)$ も周期関数となり、 $y_{i,p}^r(n)$ の周期に対応する l でピーク値をとる。つまり、 $Rxx_{i,p}(l)$ がピーク値をとる l を求めることで $H_{i,p}^r(z)$ が共振した周波数を求めることができる。

図8に $H_{3,10}^r(z)$ にピアノのD₃及びA₃を入力した際の $y_{3,10}^r(n)$ より計算した $Rxx_{3,10}(l)$ を示す。図8より、A₃を入力した際の $Rxx_{3,10}(l)$ は $l = 200 (= N_{3,10})$ にてピーク値をとっており、 $H_{3,10}^r(z)$ は基本周波数に反応して出力を共振させたことがわかる。一方、D₃を入力した際には $l = 100 (= N_{3,10}/2)$ にてピーク値をとっており $H_{3,10}^r(z)$ は2倍音に反応して出力を共振させたことがわかる。このように、共振出力 $y_{i,p}^r(n)$ より自己相関関数 $Rxx_{i,p}(l)$ を計算し、ピーク値をとる l を求めることで出力の共振が対応する音高によるものなのか、あるいは重複関係にある他の音高の倍音によるものなのかを判別できることがわかる。

3.4 Resonator 型くし形フィルタを用いた楽音と打楽器音の判別

図9にSnare Drumの周波数スペクトルと $H_{3,10}^r(z)$ の

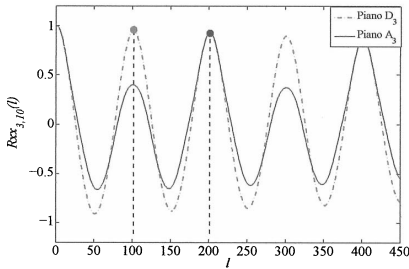


図8 自己相関関数 $Rxx_{3,10}(l)$ のピーク値

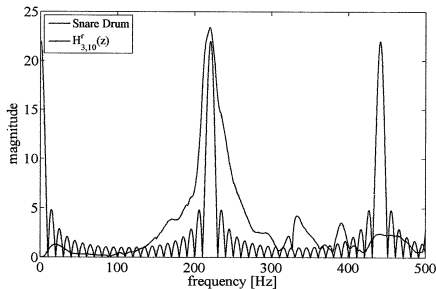


図9 Snare Drumの周波数スペクトルと $H_{3,10}^r(z)$ の振幅特性

振幅特性を示す。図9より、Snare DrumはA₃の基本周波数 $f_{3,10}$ 周辺に主な周波数成分を持つことがわかる。打楽器音には楽音の基本周波数周辺に主な周波数成分を持つものがあり、Resonator型くし形フィルタに入力すると出力は共振する。図9のような打楽器音と楽音の混合音を入力すると、両音により得られる共振した出力から入力した楽音の音高とは別の音高に誤って推定する場合がある。推定誤り为了避免するには、Resonator型くし形フィルタが混合音中の楽音により共振したのか、または打楽器音により共振したのかを判別する必要がある。

混合音中の楽音と打楽器音の共振を判別するために、式(16)、(17)に示すResonator型くし形フィルタ $H_{i,p}^r(z)$ 、 $H_{i,p}^{rH}(z)$ を用いる。

$$f_{i,p}^L = A_p f_{i,p}, f_{i,p}^H = B_p f_{i,p} \quad (12)$$

$$N_{i,p}^L = \lceil f_s / f_{i,p}^L \rceil, N_{i,p}^H = \lceil f_s / f_{i,p}^H \rceil \quad (13)$$

$$M_{i,p}^L = \lfloor L / N_{i,p}^L \rfloor, M_{i,p}^H = \lfloor L / N_{i,p}^H \rfloor \quad (14)$$

$$H_{i,p}^{rL}(z) = 1 + z^{-N_{i,p}^L} + z^{-2N_{i,p}^L} + \dots + z^{-(M_{i,p}^L-1)N_{i,p}^L} \quad (15)$$

$$H_{i,p}^{rH}(z) = 1 + z^{-N_{i,p}^H} + z^{-2N_{i,p}^H} + \dots + z^{-(M_{i,p}^H-1)N_{i,p}^H} \quad (16)$$

$$y_{i,p}^{rL}(n) = \sum_{k=0}^{M_{i,p}^L-1} x(n - kN_{i,p}^L) \quad (17)$$

$$y_{i,p}^{rH}(n) = \sum_{k=0}^{M_{i,p}^H-1} x(n - kN_{i,p}^H) \quad (18)$$

$$R_{i,p}^L = \frac{\max(|y_{i,p}^{rL}(n)|)}{M_{i,p}^L} \quad (19)$$

$$R_{i,p}^H = \frac{\max(|y_{i,p}^{rH}(n)|)}{M_{i,p}^H} \quad (20)$$

$H_{i,p}^{rL}(z)$ 、 $H_{i,p}^{rH}(z)$ は図10に示すような、 $f_{i,p}$ から若干

表1 音高によるA_pとB_p

	C ₃ ~ D# ₃	E ₃ ~ B ₄	C ₅ ~ B ₅
pitch	$i = 3, p = 1 \sim$ $i = 3, p = 4$	$i = 3, p = 5 \sim$ $i = 4, p = 12$	$i = 5, p = 1 \sim$ $i = 5, p = 12$
A _p	$2^{-1/16}$	$2^{-1/24}$	$2^{-1/28}$
B _p	$2^{1/16}$	$2^{1/24}$	$2^{1/28}$

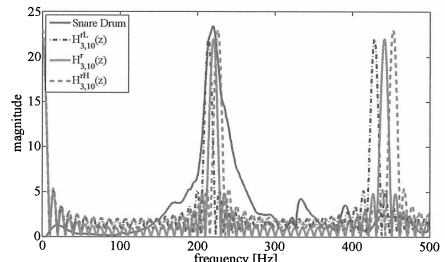


図10 Snare Drumの周波数スペクトルと $H_{3,10}^L(z)$ 、 $H_{3,10}^r(z)$ 、 $H_{3,10}^{rH}(z)$ の振幅特性

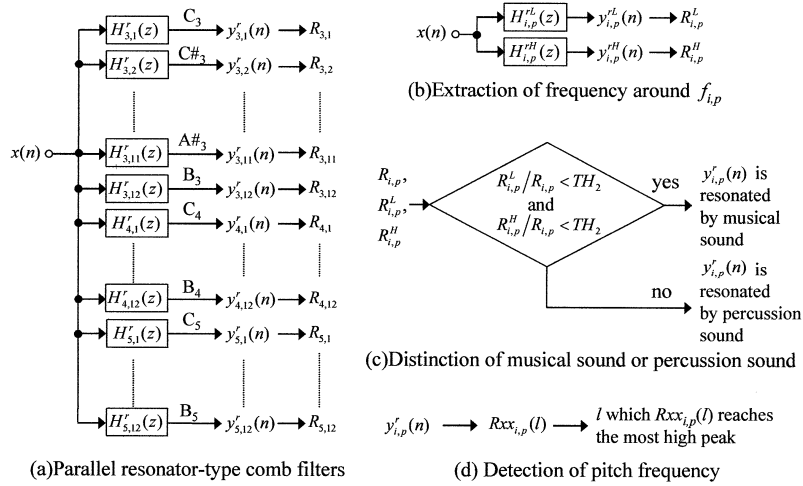


図 11 Resonator 型くし形フィルタを用いた音高推定法

ずれた周波数 $f_{i,p}^L$, $f_{i,p}^H$ とその整数倍の高調波を共振させる性質を持つ。ここで、式 (13) 中の A_p , B_p は表 1 に示す値とし、低い音高ほど $f_{i,p}$ からのずれを大きくしている。これは $M_{i,p}^L$, $M_{i,p}^H$ が小さいと $H_{i,p}^{rL}(z)$, $H_{i,p}^{rH}(z)$ の共振される周波数付近の特性が急峻にならず $H_{i,p}^r(z)$ に近い振幅特性となる。 $f_{i,p}$ からずらす幅を大きくすることで $H_{i,p}^r(z)$ と違う振幅特性とするためである。楽音は基本周波数 $f_{i,p}$ とその倍音成分の周波数しかもたないため、 $H_{i,p}^{rL}(z)$, $H_{i,p}^{rH}(z)$ に入力しても出力は共振しない。一方、基本周波数 $f_{i,p}$ 周辺に主な周波数成分を持つような打楽器音を $H_{i,p}^{rL}(z)$, $H_{i,p}^{rH}(z)$ に入力すると少なくともどちらか一方の出力は $H_{i,p}(z)$ と同様に共振すると考えられる。本稿では、 $y_{i,p}^r(n)$ が共振出力であるとき、 $y_{i,p}^{rL}(n)$, $y_{i,p}^{rH}(n)$ が共振出力であるか否かにより、 $y_{i,p}^r(n)$ が混合音中の楽音と打楽器音どちらの成分により共振したのかを判別する。

4. 提案する音高推定方法

本稿で提案する推定手法の処理の概要を図 11 に示す。入力には打楽器音と楽音の混合音とし、推定する楽音の音高はオクターブ 3 の C からオクターブ 5 の B までの 36 音とする。また、一回の推定時に入力する信号のサンプル数 L は 4410(100ms 分) とする。

提案法は、Resonator 型フィルタから得られる共振出力を用いて混合音から楽音の成分を抽出することで推定を行う。図 11 のアルゴリズムは、以下に示す (1)~(6) に沿って処理を行う。

- (1) 図 11(a) に示す C_3 から B_5 の 36 音に対応する Resonator 型くし形フィルタを並列接続したシステムに混合音を入力する。
- (2) 各フィルタから得られる出力 $y_{i,p}^r(n)$ より $R_{i,p}$ を計

算し、設定した閾値 TH_1 よりも大きい場合、 $y_{i,p}^r(n)$ を共振出力とする。

- (3) 図 11(b) のように、(2) より共振出力が得られたフィルタの音高に対応する $H_{i,p}^{rL}(z)$, $H_{i,p}^{rH}(z)$ に同じく混合音を入力して $R_{i,p}^L$, $R_{i,p}^H$ を計算する。
- (4) $R_{i,p}^L/R_{i,p}$, $R_{i,p}^H/R_{i,p}$ が設定した閾値 TH_2 よりも小さい場合は出力は混合音中の楽音により共振したとみなし次のステップで用いる。一方、大きい場合は打楽器音により共振したとみなし次のステップでは用いない。(図 11(c))
- (5) 楽音による共振出力 $y_{i,p}^r(n)$ より $Rxx_{i,p}(l)$ を計算し、ピーク値となる l によりフィルタが反応した倍音を求める。(図 11(d))
- (6) 共振したフィルタと反応した倍音より、倍音成分の重複関係から音高を推定する。

ただし、 TH_1 は入力音によりフィルタが共振したか否かを判断するための適切な閾値である。また、 TH_2 は $H_{i,p}^{rL}(z)$, $H_{i,p}^{rH}(z)$ が $H_{i,p}^r(z)$ と同程度あるいはそれ以上に共振したか否かを判断するための適切な閾値である。

5. 評価実験

5.1 実験条件

構築した音高推定システムで性能評価を行った。入力する楽音はピアノの C_3 から B_5 の 36 音を用いる。打楽器音はジャズドラムスとロックドラムスよりチューニングの高め、低めなどの違いからバスドラム (BD)4 種類、クラッシュシンバル (CC)2 種類、フロアタム (FT)2 種類、ハイハット (HH)2 種類、ハイタム (HT)2 種類、ロータム (LT)2 種類、スネアドラム (SD)6 種類の合計 20 種類の単音を用いる。楽音、打楽器ともに音の鳴り始めから 500ms の信号を用いる。打楽器音と楽音の最大振幅比を

2:1 とし、それらの単音同士を計算機上で合成した信号について音高推定を行った。また、500ms 分の信号に対し、100ms の観測窓を 10ms ずらしながら推定を行う。

5.2 実験結果と考察

ピアノ 36 音と打楽器音 20 音すべての組み合わせに対して、推定結果の音高が入力信号の音高と一致した確立を求めた。図 12 に打楽器の種類別、及び時間の経過ごとに推定率をまとめたものを示す。また表 2 に打楽器の種類別の平均推定率を示す。表 2 より全体の平均推定率は約 93%となった。図 12 より、時間の経過とともに推定率が下がってきていることがわかる。推定を誤るものとして G_{#5} や A_{#5} などのオクターブ 5 の高い音高のものが目立った。誤推定となる組み合わせの例としてピアノの G_{#5} とクラッシュシンバルの信号波形を図 13 に示す。図 13 のように、ピアノの G_{#5} の信号は 0.15sec 辺りから振幅の減衰し、クラッシュシンバルの振幅に比べると小さい。このように振幅が小さいと、Resonator 型くし形フィルタの出力値が閾値 TH_1 を上回らず入力楽器音による共振出力を得られないため推定を誤っていた。

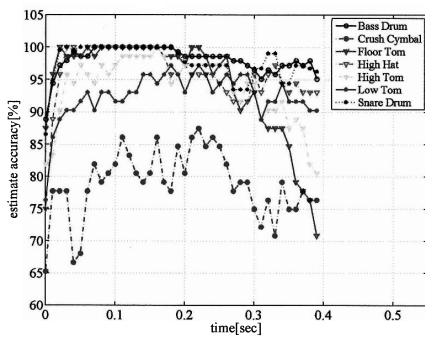


図 12 時間経過による音高推定率の変化

表 2 打楽器別の平均推定 [%](0-500ms)

打楽器音	BD	CC	FT	HH	HT	LT	SD
推定率 [%]	98.1	78.9	94.3	95.9	93.7	92.6	97.7

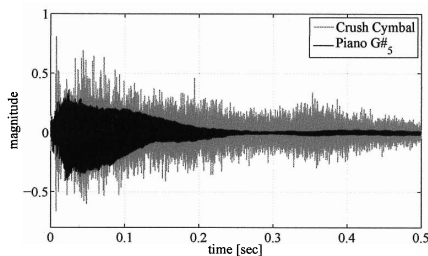


図 13 クラッシュシンバルとピアノ G_{#5} の信号波形

6. む す び

本稿では、打楽器音と楽音の混合音に対しての音高推定の一手法として、Resonator 型くし形フィルタから得られる共振出力を利用した手法を提案した。評価実験の結果、全体の推定率は 93%となり、誤推定の原因について検討を行った。

今後の課題としては、現在問題となっている誤推定の問題点を解消することや、混合音に含まれる打楽器の割合による提案手法の適用限界の調査、及び複数の楽音と打楽器音からなる混合音に対する音高推定法を検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度科学研究補助金（基盤研究 (C)19500082）により行われた

参 考 文 献

- 1) M. Piszczalski and B.A. Galler, "Automatic music transcription," Computer Music Journal, vol.1,no.4,pp.24-31,1977.
- 2) A. Sterian and G.H. Wakefield, "Music transcription systems: From sound to symbol," Proc. AAAI-2000 Workshop on AI and Music,2000.
- 3) 井口征士, "音楽情報の処理-電子計算機を用いた自動採譜,"計測自動制御学会論文集, vol.19,no.3,pp.314-319,1980.
- 4) 高澤嘉光, "計算機による採譜,"情報処理, vol.29,no.6,pp.593-598,1988.
- 5) 三輪多恵子, 田所嘉昭, 斎藤 努, "零出力に注目したくし形フィルタによる音階検出,"電学論 (C), vol.J118-C,no.1,pp.57-64,1998.
- 6) 山口 満, 三輪多恵子, 斎藤 努, 田所嘉昭, "二重くし形フィルタによる独唱・二重唱の音高推定,"電学論 (C), vol.121,no.12,pp.1853-1859,Dec. 2001.
- 7) 山口 満, 三輪多恵子, 田所嘉昭, "並列構成くし形フィルタと特異値分解による多重唱の音高推定,"信学論 (D-II), vol.J87-D-II,no.4,pp.1020-1029, April. 2004.
- 8) 森田健夫, 山口 満, 田所嘉昭, "並列構成くし形フィルタの出力値に注目した採譜のための音高推定法,"信学論 (D-II), vol.J87-D-II,no.12,pp.2271-2279,Dec. 2004.
- 9) 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, "RWC 研究用音楽データベース-音楽ジャンルデータベースと楽器音データベース,"情処研報, 2002-MUS-45, pp.19-26, 2002.
- 10) Neville H. Fletcher, Thomas D. Rossing, "楽器の物理学," pp.361-365, 2004.
- 11) H.F. オルソン, "音楽工学," pp200-201, 1977.
- 12) 瀬戸康裕, 夏井雅典, 田所嘉昭, "くし形フィルタと相関関数による音高推定困難和音の音高推定法,"情処研報, 2006-MUS-68-(1), pp.1-6, 2006.