

並列構成くし形フィルタによる広音域ピアノ楽音の音高推定法

松 下 史 也 夏 井 雅 典 田 所 嘉 昭
(豊橋技術科学大学)

本稿では、広い音域を持つピアノ楽音信号を対象とした音高推定法を提案する。これまでは、限定された音域の楽音信号に対し、楽音信号を除去するくし形フィルタを並列接続し、各フィルタの出力から音高を推定した。本研究では従来手法を広音域に対応させる為、推定対象音域を帯域通過フィルタを用いて3分割し、それぞれの帯域に対応した並列構成くし形フィルタを用いて音高を推定する。このとき、低音の非調和な倍音成分が存在する中での音高を推定する際、周波数スペクトルのピークの情報とくし形フィルタの出力を利用して音高を推定する。実際にピアノ楽音を対象とした評価実験を行い、65.9%の推定率を得た。

Pitch Estimation Method of Piano Sounds in Wide Range Using Parallel-Connected Comb Filters

Fuminari MATSUSHITA Masanori NATSUI Yoshiaki TADOKORO
(Toyohashi University of Technology)

This paper presents a new pitch estimation method of piano sounds in wide range. We have proposed a pitch estimation method for the musical tones in octave 3 to 5 using parallel connected comb filters (PCF). In the proposed method for the wide musical range, we divide the frequency range into three parts (low, middle and high) and we use the PCF corresponding to each ranges. In the middle and high ranges where there are the inharmonic components of the low range, we also use the frequency spectrum of the musical sound.

The performance evaluation of the proposed method was investigated using piano sounds. As a result, the pitch estimation precision is about 65.9% for two chords.

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)}。くし形フィルタ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#, ..., B)に対応した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、これらの手法は推定対象音域をオクターブ3から5としており、現実的な楽曲の音域を網羅していなかった。このため、推定対象音域を拡大し、広音域な楽音に対応した手法を検討する必要があった。

本稿では、推定対象をピアノの楽音信号とし、その全

音域(A₀(オクターブ0のA音)~C₈)88音を対象とした音高推定法の検討を行う。そして、推定対象音域を拡大した際の問題点を考慮し、実際に広音域楽音に対応した音高推定システムを構築する。評価実験では、サンプリング周波数f_s=44.1kHzのRWC研究用音楽データ⁹⁾を用いて実際に音高推定を行い、本システムの性能評価を行う。

2. くし形フィルタを用いた音高推定の原理

2.1 くし形フィルタの原理

音楽信号は基本周波数成分と、その整数倍の周波数にピークを持つ高調波成分から構成される。この楽音信号に対応するくし形フィルタの伝達関数は式(1)で表現され、時間領域においては式(2)に示す簡単な減算で実現される。ここで、pは1から12の値をとり、1オクターブ中の12音名と順番に対応しており、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(3)で求められる。

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

$$y_{i,p}(n) = x(n) - x(n - N_{i,p}) \quad (2)$$

$$N_{i,p} = \left\lfloor \frac{f_s}{f_{i,p}} \right\rfloor \quad [] : \text{integer by rounding} \quad (3)$$

例として、ピアノの音高C₄の楽音の周波数特性と、対応するくし形フィルタH_{4,1}(z)の周波数特性を図1にそ

それぞれ示す。くし形フィルタ $H_{4,1}(z)$ 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。

また、 $H_{i,p}(z)$ は、オクターブ $i, i+1, i+2, \dots$ の p 音の全調波成分を除去可能であるため、このくし形フィルタの出力 $y_{i,p}(n) = 0$ (零出力) を検出することにより、音名の推定が可能となる。さらに、除去する音名のオクターブ番号を変更し、その出力を比較することでオクターブ番号の推定が可能となる。

2.2 並列接続くし形フィルタを用いた音高推定

図2に1オクターブ12個のくし形フィルタの並列接続(並列構成くし形フィルタ)による音高推定システムを示す。まず、信号 $x(n)$ を12個並列構成くし形フィルタに入力し、それぞれの出力 $y_{i,p}(n)$ を得る。得られた出力について、フィルタ通過前に対する通過後の信号のパワー比 $R_{i,p}$ を計算する。この $R_{i,p}$ をくし形フィルタの出力値とし、くし形フィルタの出力の大小を表すパラメータとして使用する。この入出力パワー比 $R_{i,p}$ が式(4)を満たすとき、 $R_{i,p}$ を零出力と判定する。

$$R_{i,p} \leq TH \quad (4)$$

ただし、 TH は入力音が除去されたか否かを判断するための適当なしきい値である。入力信号 $x(n)$ が単音である場合、各出力から得た $R_{i,p}$ の中のいずれかは零値を出力するため、その出力値から単音の推定が可能である。また、入力が和音である場合、 $R_{i,p}$ はすべて非零値を出力するが、 $R_{i,p}$ の最小出力に注目することで入力中のいずれか1音を推定できる。

2.3 並列構成くし形フィルタを用いた和音音高の推定手法

並列構成くし形フィルタの各出力から検出した出力値(パワー値)と、その最小値に注目することで、1音が除去された出力が判別可能となる。これにより、入力中の1音を推定することが可能となる。

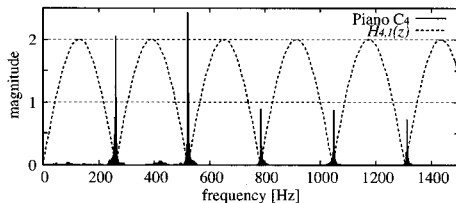


図1 Piano C₄の周波数特性とくし形フィルタ $H_{4,1}(z)$ の振幅特性

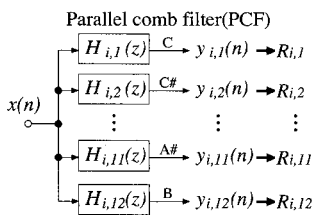


図2 並列接続くし形フィルタ (PCF)

この処理を基本とした多重音に対応した推定アルゴリズムを説明する。このアルゴリズムは、(1)1音の推定、(2)零出力判定、(3)推定した1音に対応する $H_{i,p}(z)$ を縦続接続、の処理を零出力が得られるまで繰り返すことで、多重音の音高推定を行う。具体的な処理の流れを図3に示し、以下で説明を行う。図3は、以下に示す(1)~(5)に沿って行われる。ただし、入力が r 音以下であることを既知として、 $H_{i,p}(z)$ の縦続接続数が r 段に達した段階で、零出力を検出出来なければ推定不能として処理を終了する。

- (1) 信号 $x(n)$ をシステムに入力。
- (2) 並列構成くし形フィルタの各出力 $y_{i,p}(n)$ より出力値 $R_{i,p}$ を算出する。
- (3) $R_{i,p}$ の最小値を検出し、1音を確定する。
- (4) $R_{i,p}$ が閾値を下回ったとき零出力とし処理を終了。零でなければ(1)で検出した $H_{i,p}(z)$ を並列構成の前段に縦続接続し、(1)に戻る。
- (5) 音名に対応した $H_{i,p1}(z), \dots, H_{i,pr}(z)$ を用いて、入力 $x(n)$ を単音 $x'(n)$ に分離し、各音に対してオクターブ推定を行うことで、音高を推定する。

3. ピアノの全音域推定の問題点

推定対象をピアノの全音域とした場合、音域の違いによって生じる楽音性質の変化や、対象範囲の拡大に応じて様々な問題が生じる。以下では、低音域および高音域の楽音を対象とした時、そして実際に推定範囲を広音域化したときの問題点をそれぞれ示す。

3.1 低音域推定の問題点

音高 A_0 のピアノの楽音信号の周波数スペクトルと音高 A_0 を除去するくし形フィルタ $H_{0,10}(z)$ の振幅特性を図4に示す。この両者の特性を比較すると、くし形フィルタが消去する周波数とピアノの信号の高調波成分の周波数が、周波数が高くなるにつれ徐々にずれていくことを確認できる。これは、ピアノなどの弦楽器の特性(非調和性)¹⁰⁾によるものである。特に低音域の音は、高音域の音に比べ多くの倍音成分を持つこと¹¹⁾から、このずれの影響が顕著に現れる。

このピアノの低音域信号に対し、くし形フィルタの出力は零にはならず、音高の推定が困難となる。そこで、この低音域のピアノの信号に対して、図4の破線で示され

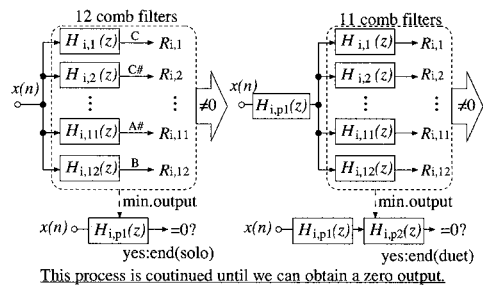


図3 並列構成くし形フィルタによる多重音の音高推定アルゴリズム

るような低域通過フィルタを用いて帯域制限を行う手法を考える。この方法は、くし形フィルタで除去できない高調波成分をくし形フィルタを使用する前に除去する。この処理により、くし形フィルタの零出力を検出でき、音高の推定が可能となる。

3.2 高音域推定の問題点

高音域の楽音をくし形フィルタで推定する際の問題点として、信号1周期に対するサンプル数の減少が問題となる。くし形フィルタの遅延数 $N_{i,p}$ は式(3)により求めるが、消去する信号の基本周波数 $f_{i,p}$ が高くなるにつれ、対応するくし形フィルタの遅延数 $N_{i,p}$ が減少し、各音高での遅延数との差が小さくなる。また、遅延数 $N_{i,p}$ の算出において整数化(小数点以下四捨五入)を行っているため、音高に対応するくし形フィルタの零点周波数と、消去する楽音信号の基本周波数とのずれの影響が大きくなり、零出力が得られない問題が生じる。

この問題に対して、データのサンプル値の間を線形補間することで、擬似的にサンプリング周波数を増加させる方法を考える。線形補間を行うことで、推定信号のサンプル数(サンプリング周波数)が増加し、音高に対応するくし形フィルタの遅延数は大きな値となる。遅延数が増加すると、各音高間でのくし形フィルタの遅延数の区別がつくようになり、遅延数の整数化による誤差の影響も小さくなる。

3.3 推定範囲の拡大による問題点

くし形フィルタ $H_{i,p}(z)$ は、音名 p でオクターブ $i, i+1, i+2, \dots$ の楽音信号を除去可能であり、従来手法では、この性質を利用して音名推定とオクターブ推定を行っていた。しかし、周波数変動や遅延数の整数化による除去点の誤差の影響から、低い音高のくし形フィルタで高い音高を除去できない。その結果、低い音高のくし形フィルタを用いた高音の音名推定が困難となる。例として、図5(a)のスペクトルを持つ音高 A_5 の楽音信号 $x(n)$ を、図5(b)に示す振幅特性となるくし形フィルタ $H_{0,10}(z)$ (A_0 に対応)を適用した時、出力信号 $y_{0,10}(n)$ の振幅スペクトルは図5(c)となり、くし形フィルタの除去点のずれから信号が除去されていないことを確認出来る。

また、平均率の関係から周波数の重複関係が複雑となり、結果的にオクターブ推定などの処理が複雑化する問題も生じる。

この広域化の問題に対し、推定対象音域を3分割し、それぞれの音域に対して音高推定を行う。これにより、ピ

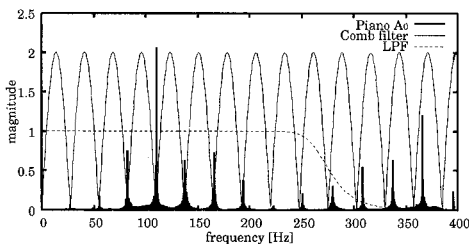


図4 くし形フィルタの振幅特性と A_0 のピアノの信号の周波数スペクトル

アノの全音(88音)が推定可能となる。しかし、処理を分割することでシステムが複雑化する問題も生じる。

4. 提案する音高推定法

4.1 提案法の基本推定法(1法)

本研究で提案する推定手法の処理の概要を図6に示す。ここで、LPFは207.65Hz($G\sharp_3$)以下まで通過する11次の低域通過フィルタ、BPFは220Hz(A_3)~1661.2Hz($G\sharp_6$)まで通過する20次帯域通過フィルタ、HPFは1760Hz(A_6)以上を通過させる10次高域通過フィルタであり、IIR型の楕円フィルタである。また、"Linear interp."では信号のサンプル値間を9点線形補間している。

提案法は、各帯域フィルタを適用することで信号音域を分割し、各音域で推定音高に対応したくし形フィルタを適用することで推定を行う。図6のアルゴリズムは、以下に示す(1)~(4)に沿って処理を行う。

- (1) 入力信号をLPFに適用させ、並列構成くし形フィルタによる音高推定法(図3)から低音域の音高 $P_{L,1}, P_{L,2}, \dots$ を推定。
- (2) 推定した低音の音高 $P_{L,1}, P_{L,2}, \dots$ を除去するくし形フィルタを適用し、低音の音高を除去。
- (3) 低音の音高を除去した信号にBPFを適用し、中音域の音高 $P_{M,1}, P_{M,2}, \dots$ も同様に推定。
- (4) 低音・中域で推定した音高の成分をくし形フィルタを用いて除去し、帯域制限、線形補間後に同様に高域の音高 $P_{H,1}, P_{H,2}, \dots$ を推定し、処理を終了。

このように、低い音高から順に推定を行うことで、低音・高域の推定時の問題点を考慮しつつ、広音域の推定に対応することが可能となる。

4.2 提案手法における問題点

図6の手法は、推定した低音の音高 $P_{L,1}, P_{L,2}, \dots$ を除去するくし形フィルタをシステムの前段に接続し、中域・高域の推定を行う。ここで、くし形フィルタで低音の音高を除去する際、ピアノの非調和性の影響から除去しきれない倍音成分が中・高域まで及ぶ。その結果、中・

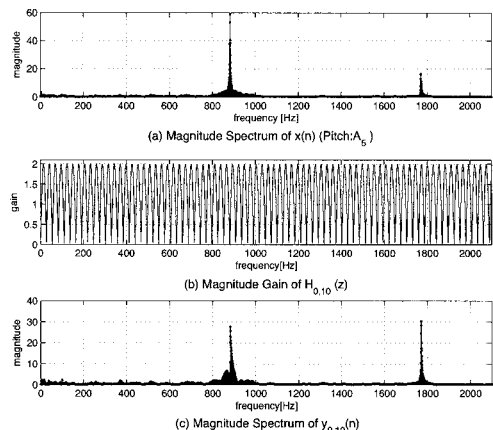


図5 ピアノ A_5 の振幅スペクトルと $H_{0,10}(z)$ の関係

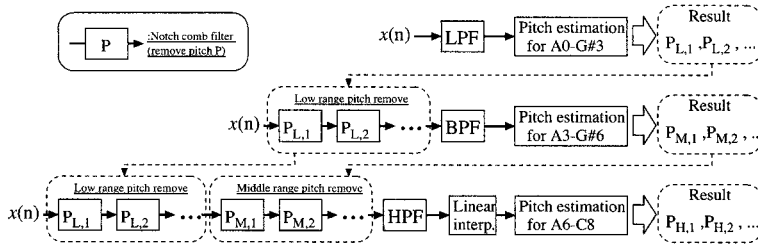


図 6 広域に対応した音高推定法 (I 法)

高域の音高を推定する際 (図 6 の中・下段), 推定を誤る問題が生じる。

このような和音の一例として, 音高 B_0 (30.8Hz) と $D\sharp_4$ (311.13Hz) の和音を挙げ, 実際に図 7(a) にこの和音のスペクトルを示す。このとき, 図 7 に示すスペクトルは, サンプル周波数 $f_s=44.1$ kHz のデータを $2^{12} = 4096$ 点 FFT した結果である。次に, 図 7(b) に, この和音に B_0 を除去するくし形フィルタを適用後のスペクトルを示す。図 7(b) より, くし形フィルタで除去できない B_0 の倍音成分が 300~1500Hz の広い帯域に残存するのが確認出来る。提案手法では, 図 7(b) の信号に対して $D\sharp_4$ を除去するくし形フィルタを適用し, その出力の零出力判定を行うことで音高 $D\sharp_4$ の推定を行う。しかし, 残存する B_0 の倍音成分は除去されないで結果的に零出力を得られず, $D\sharp_4$ を入力中の 1 音として推定しない問題が生じる。

ここで, 図 7(a) のスペクトルを見ると, $D\sharp_4$ の信号成分は, B_0 の倍音成分に比べ大きなピークとなることが確認出来る。これは, 楽音は高音になるに従い調波構造を形成する倍音成分の数が小さくなり, 相対的にひとつの成分あたりの振幅値が大きくなる為だと考える。そこで, $D\sharp_4$ を除去するくし形フィルタをかけて, これらの減衰を見ることで $D\sharp_4$ の有無を判断する。この処理を行う事で, 非調和成分による問題を解決することができると考えられる。

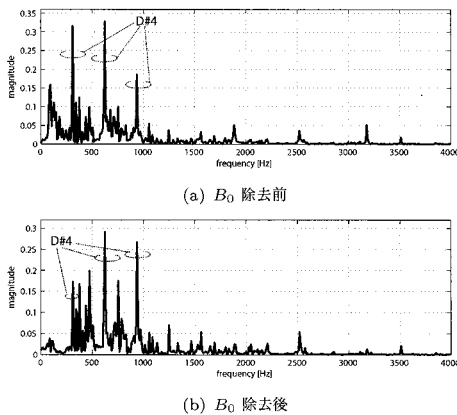


図 7 和音 $B_0 + D\sharp_4$ の周波数パワースペクトル

4.3 最大ピークによる候補の選択

スペクトルを求め, 大きなピークを持つ周波数成分を調べることで, 音高の情報を得ることが可能を検討する。まず, 推定信号 $x(n)$ を N 点 FFT し, 楽音信号のスペクトル $X(k)$, ($k = 0, 1, \dots, N-1$) を求める。次に, $X(k)$ より, 以下の式 (5) でピークを抽出したスペクトル $X'(k)$ を求める。

$$X'(k) = \begin{cases} |X(k)| & \dots (X(k) > X(k-1) \text{ and} \\ & X(k) > X(k+1)) \\ 0 & \dots (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N/2 - 1)$$

そして, スペクトルが大きい順に第 1 候補, 第 2 候補, ..., と選択し, ピークが存在する周波数から音高を求める。このとき, FFT で解析可能な周波数は, N によって決定される周波数分解能 f_s/N の整数倍に制限され, FFT で得られたピークの周波数は音階の平均率の値と一致しない。そこで, 以下の式 (6) を用いた補正処理を行う。観測されたピークのインデックスが k_p とすると, 式 (6) を満たすとき, $X'(k_p)$ の周波数を $f_{i,p}$ とする。

$$f_{i,p-1} \times 2^{1/24} \leq \frac{f_s}{N} \times k_p < f_{i,p} \times 2^{1/24} \quad (6)$$

ここで調査実験として, 低域 ($A_0 \sim G\sharp_3$) の 36 音高と中域 ($A_3 \sim G\sharp_6$) の 36 音高で考えられる全ての組み合わせの和音 (1296 通り) に対して候補の選択を行い, 中域の音高が候補の中に含まれているかを確認する。この実験結果を表 1 に示す。表 1 より, 推定対象の低域と中域の和音に対して, スペクトルが大きい順に上位 4~5 候補を選択すると, その候補の中に求めるべき中域の音高が含まれていると考えることができる。そして, これらの候補の音高が存在するかを調べる処理を行うことで, 中域・高域の推定が可能になると考えられる。

4.4 ピークによる音高候補を用いた推定法 (II 法)

実際に, スペクトルのピークより求めた音高の候補を用いた推定処理法を加えた推定手法を図 8 に示す。図 8 は図 6 に示した処理中に, スペクトルのピークを用いた

表 1 音高候補推定率 [%]

第 1 候補	第 2 候補	第 3 候補	第 4 候補	第 5 候補
58.2	84.9	94.1	98.8	99.7

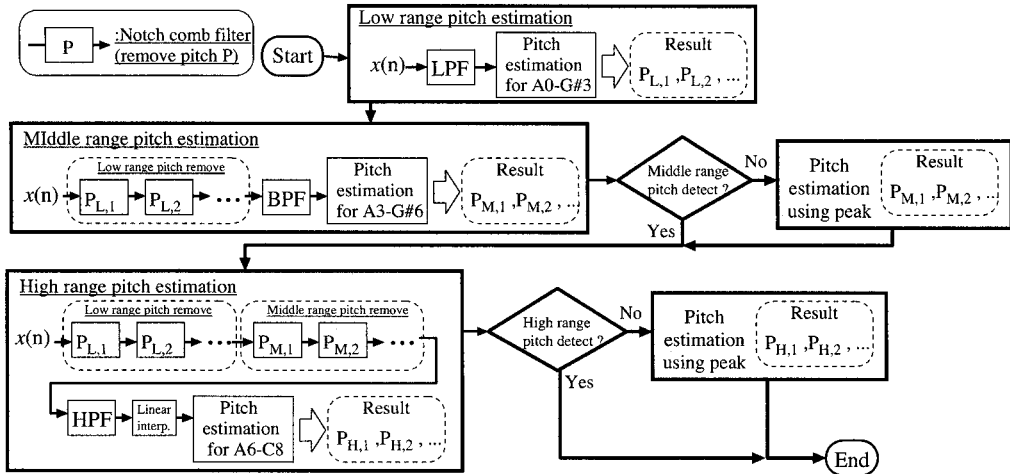


図 8 音高候補を用いた処理を追加した音高推定法 (II 法)

推定処理 (図 8 中の Pitch estimation using peak) を加えたものとなる。ここで、図 8 中の Pitch estimation using peak の処理は、以下に示す (1)~(4) に沿って行われる。この処理は、低域の音高を検出した上で中域・高域の各音域での推定で音高を得られない場合に行う。

- (1) 低域音高を除去する前後の信号それぞれに対して、上位 5 点のピークから音高候補群を得る。
- (2) 低音除去前後の候補と比較し、除去前後で重複する音高を検証する候補とする。
- (3) 候補音高のオクターブに対応した並列構成くし形フィルタに低音除去・帯域制限した信号を入力。
- (4) 候補音高に対応したくし形フィルタの出力が 12 個中最小となる場合、その候補音高を入力音中の 1 音として推定。

以上の処理をから、低音の非調和な倍音成分に埋もれた中・高音域の音高を推定する。

5. 評価実験

5.1 実験条件

構築した音高推定システムでピアノの全音域の単音と 2 和音信号に対して音高推定を行った。このとき、使用するデータは音が鳴り始めてから 20ms~130ms の範囲とする。また、零出力判定時に使用するしきい値 TH は 0.2 としている。また、2 和音信号において、一方の高い音高の基本周波数が低い音高の基本周波数の整数倍となる関係 (協和音) は推定対象から除外している。

5.2 実験結果と考察

ピアノの全音域の単音・2 和音の全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率を求め、各音域に対する結果を表 2, 3 にそれぞれ示す。表 3 より、提案する II 法における全体の推定率は 65.9% となった。ここで、I 法, II 法での結果を比較すると、ピークから得た候補を用いた処理を追加した II 法での低域と中域の推定率は I 法の 60.9% に比べ 76% と精度

の向上がみられた。しかし、低域のみでの推定率は、I 法の 55.0% に比べ 51.7% と推定率は減少した。これは、候補を用いた推定処理により、実際には存在しない誤った音高を推定結果として出力した為である。また、全体的な推定率を比較しても I 法と II 法での大きな精度の向上は見られず、実際の推定結果を観察すると、非調和な倍音成分に埋もれた音高を完全に推定することは出来なかった。

次に、誤推定の原因を検討したところ、以下に示す原因が考えられる。

- オクターブ推定の間違い

提案手法における誤推定の原因としてオクターブ推定の誤推定が挙げられる。オクターブ推定は、くし形フィルタ $H_{i,p}(z)$ を用いた音名推定の後、くし形フィルタの遅延数を変化させ ($p \rightarrow p+1, p+2, \dots$)、その出力を比較することで推定する。しかし、スペクトルの調波構造と帯

表 2 評価実験結果 (I 法)

推定範囲	推定率 [%] (正解数/組み合わせ数)
低域×低域	55.0 (330/600)
低域×中域	60.9 (536/880)
低域×高域	44.7 (159/355)
中域×中域	85.8 (515/600)
中域×高域	62.4 (274/439)
高域×高域	31.1 (41 /132)
全体	61.7 (1855/3006)

表 3 評価実験結果 (II 法)

推定範囲	推定率 [%] (正解数/組み合わせ数)
低域×低域	51.7 (310/600)
低域×中域	76.0 (669/880)
低域×高域	50.1 (178/355)
中域×中域	85.0 (510/600)
中域×高域	62.4 (274/439)
高域×高域	31.1 (41 /132)
全体	65.9 (1982/3006)

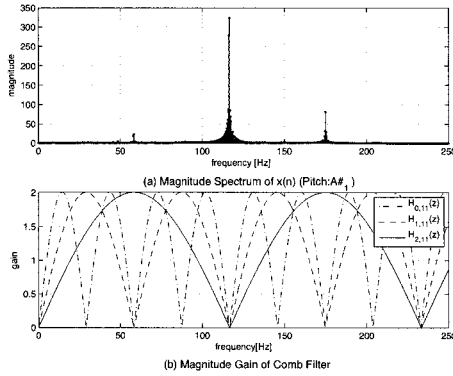


図9 オクターブ推定時の問題点

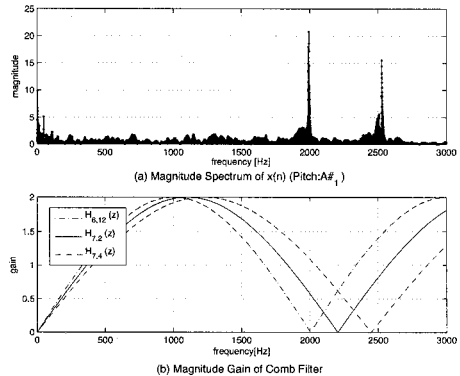


図10 高域推定時の問題点

域制限の影響で、この推定を誤る場合がある。例として、単音 $A\#_1$ の LPF(220Hz 以下を通過) 通過後のスペクトルとオクターブ推定に用いるくし形フィルタの特性を図9に示す。図9(a)のスペクトルに対応したくし形フィルタは $H_{1,11}(z)$ である。しかし、1オクターブ上の $A\#_2$ に対応したくし形フィルタ $H_{2,11}(z)$ (図9(b) 実線) の出力が、基本周波数成分と3倍音成分が小さく、低域推定時の LPF による倍音成分の打ち切りの影響により小さな値となる。この出力値が零出力判定の閾値 TH を下回り、結果的にオクターブの推定を誤ってしまう。そのため、くし形フィルタを用いてオクターブ推定を行う際には、帯域制限後も十分に倍音成分を残す必要がある。

● 高音の誤推定

高音を推定する際、くし形フィルタの除去点付近の利得と高音の倍音成分が小さい特性による問題が生じる。実際に推定を誤った B_6 と $D\#_7$ の和音のスペクトルと問題となるくし形フィルタの特性を図10に示す。図10(a)のスペクトルを持つ信号を(b)に示す各くし形フィルタに適用すると、最小出力となるくし形フィルタは音高に対応しない $H_{7,2}(z)$ となる。これは、対象となる高音の信号は基本周波数成分以外は非常に小さく、くし形フィルタの除去点付近の利得が急峻でないことから、 $H_{7,2}(z)$ の出力が音高に対応した $H_{6,12}(z)$, $H_{7,4}(z)$ に比べ小さくなる。本手法では出力の小さくなるフィルタを選択することから、結果的に音高の推定を誤ってしまう。

● その他の原因

その他に推定を誤っていた原因として、閾値 TH の設定、ピークに推定処理(音高の未検出, 余分な音高の検出)などの問題点が挙げられる。

6. むすび

本稿では、くし形フィルタを用いた広音域に対応した音高推定システムを構築し、実際にピアノの全音域の単音・2和音信号の音高推定を行った。評価実験の結果、全体の推定率は65.9%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、現在問題点となっている誤推定

の問題点を解消すること、スペクトルの情報をより活用した別の手法を再検討する必要がある。また、現状ではある音の基本周波数が他音と重複するような多重音の推定が不可能である。このため、このような多重音に対する解析法¹²⁾の導入について検討する必要がある。

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," 情報研報, 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," 情報研報, 2006-MUS-68-(1), pp.1-6, 2006.