

# 凸射影法に基づく Specmurt 分析の共通調波構造推定

齊藤 翔一郎<sup>†</sup> 亀岡 弘和<sup>†</sup>  
小野 順貴<sup>†</sup> 嵯峨山 茂樹<sup>†</sup>

本稿では、音楽音響信号から倍音を抑圧し基本周波数を強調する Specmurt 分析で用いる共通調波構造パターンを、凸射影法を用いて推定する手法について述べる。これまで我々は、非線型写像を用いて共通調波構造パターンを準最適に求めるアルゴリズムを提案してきたが、推定した分布が稀に激しく振動した値になってしまう欠点があった。そこで、本手法では推定が常に安定した値に収束するよう、我々は制約条件を満たす空間上の 1 点への収束が保証される凸射影法を導入して共通調波構造パターンを推定する。従来法と提案法の性能を実験によって比較し、倍音抑圧性能では従来法にやや劣るものの、推定の安定性や収束速度で従来法を上回る結果を得た。

## POCS-based Common Harmonic Structure Estimation for Specmurt Analysis

SHOICHIRO SAITO,<sup>†</sup> HIROKAZU KAMEOKA,<sup>†</sup> NOBUTAKA ONO<sup>†</sup>  
and SHIGEKI SAGAYAMA <sup>†</sup>

This paper describes a new common harmonic structure estimation method based on “Projection Onto Convex Sets (POCS)” for Specmurt Analysis, that suppresses only harmonic components in order to visualize concurrent melody lines in music audio signals. Up to now, we proposed a common harmonic structure estimation method using a non-linear mapping function, but this algorithm occasionally results in generating a noisy distribution, due to the unstability of the Specmurt system. To guarantee its stability, we introduce a new algorithm based on POCS, that necessarily makes the output distribution converge to one of the elements within the common set of several empirical conditions that we want the result of the distribution to satisfy. We confirmed through the experimental evaluation that the harmonics-suppression capacity of the conventional algorithm was still higher but the proposed method worked more stably and the convergence speed was faster.

### 1. はじめに

本稿では、音楽音響信号から音高情報を推定および可視化するための技術である Specmurt 分析と、その分析において主要な役割を担う共通調波構造を凸射影法を用いて推定する手法について報告する。例えば、携帯電話の着信メロディやカラオケ楽曲などはその多くが人手で作成されているが、経験や労力を必要とすることもあり、これらが元楽曲の音響信号から簡単に生成することができれば非常に有用である。また近年のインターネットの急速な普及に伴い、Web 上の楽曲から所望の曲を検索エンジンで探すということが近い将来可能になると考えられ、データベース上の膨大な楽曲に対して検索をかけることが出来れば望ましい。

そのためには例えば音響信号同士のマッチングの探索自体を高速化するというアプローチ<sup>1)</sup> や検索に適したメタデータを付与するというアプローチが考えられる。

しかし、多重音の音響信号からの音高情報の抽出は、楽音の調波成分の影響や短時間解析におけるスペクトルの広がりなどが原因で、困難であることが多い。そこでさまざまな打開策が図られているが、たとえば後藤らは、多重音のスペクトルを複数の正規分布によって構成される調波構造モデルの重みつき和としてモデル化し、重みパラメータを EM アルゴリズムによって推定する手法を提案している<sup>2),3)</sup>。また我々は、多重音のスペクトログラム全体を調波-構造をもった複数の音響オブジェクトの和によってモデル化し、時間周波数平面-での分布距離最小の観点から各音響オブジェクトの調波構造およびパワーエンベロープのパラメータを最適推定する手法を提案している<sup>4)</sup>。これらの手法は最適パラメータを反復推定によって求めるもので

<sup>†</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
The University of Tokyo.

あるが、初期値によっては予測不能な誤り解におちいる可能性も持つ。

そこで我々は、スペクトログラムから楽音の調波成分を抑圧することで基本周波数成分をノンパラメトリックに「強調」というアプローチを提案してきた。このアプローチの利点はピッチを一意的に「推定」しないので、ピッチを確定的に決めない代わりに予測不能な誤りを大幅に低減することが出来ることである。その上、もちろん多くの手法に見られるような解を一意的に「推定」することも閾値処理などによって可能である。この強調された結果は時間周波数平面で濃淡表示が可能であるため、推定が困難な部分であっても濃淡の具合から人間がある程度の候補のうちから推定することが出来るのである。

このようなアプローチは、ユーザー介入型のインタラクティブツールとの親和性が高いとも言える。ユーザーはこのツールを用いてまず分析を行い、大筋で正しい推定結果を得た後、自分の感覚や知識から推定が誤っている部分だけを手直すことで、正確な音高推定を完成させることが出来る。

我々はこの「強調」ないしは「可視化」のアプローチとして、これまで Specmurt 分析という手法を提案し<sup>5)</sup>、またその分析に用いる共通調波構造パターンの反復推定アルゴリズムを考案した<sup>6)</sup>。この反復推定アルゴリズムは基本周波数分布や調波構造に対する先見情報を用いて共通調波構造パターンを準最適に求めるものであるが、収束性が保証されたものではなく、稀に基本周波数分布が発散し元のものとは大きく異なる結果を出力してしまうことがあった。そこで、この問題を解決する手段の一つとして、凸射影法と呼ばれる収束が保証された原理を調波構造推定に応用し、安定な基本周波数分布推定を行うことを試みた。

本稿の構成は以下のようなものである。まず、2章で Specmurt 分析の概要について述べ、多重ピッチ推定の問題を具体的に定式化する。また、ここで従来の反復推定アルゴリズムについても述べる。そして3章で凸射影法を用いた推定法の原理を述べ従来法との対比を行う。4章で実際に実験によって従来法との性能比較を行い、5章でまとめと今後の課題について述べる。

## 2. 問題の定式化と従来法

### 2.1 Specmurt 分析の概要

一般に楽音は、音高に相当する基本周波数以外に倍音を多く含んでおり、それが音色を構成している。この調波構造の倍音パワー比が基本周波数に依らず共通であると仮定すると、調波構造を持つ音の基本周波数がシフトした場合、線形周波数領域では倍音の位置関係は線形伸縮となる。一方、対数周波数領域で考えれ

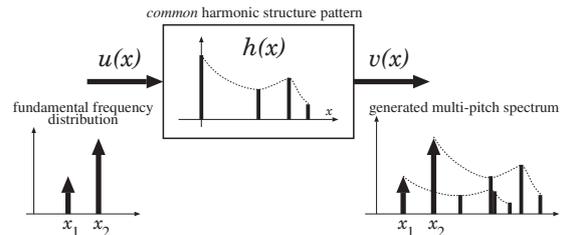


図1 基本周波数分布と共通調波構造の畳み込みによる多重音スペクトルの生成モデル

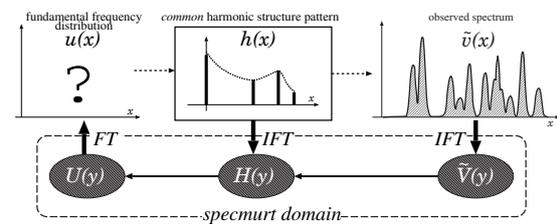


図2 specmurt 分析の概要

ば、倍音の位置関係も一定で調波構造全体がシフトする。ここで、基本周波数分布を  $u(x)$ 、対数周波数軸上の倍音位置に (のみ) 倍音強度比の成分を持つ分布 (以後、共通調波構造パターンと呼ぶ) を  $h(x)$  とすると、多重音のスペクトル  $v(x)$  を

$$v(x) = u(x) * h(x) \quad (1)$$

と畳み込みによってモデル化することができる (Fig. 1,  $x$  は対数周波数)。  $h(x)$ 、  $v(x)$  の逆フーリエ変換をそれぞれ  $H(y)$ 、  $V(y)$  と定義すると、フーリエ変換の畳み込み定理から、基本周波数分布  $u(x)$  のフーリエ逆変換  $U(y)$  ( $y$  は対数周波数の逆フーリエ変換領域) は

$$U(y) = \frac{V(y)}{H(y)} \quad (2)$$

と表されるため、求めたい基本周波数分布  $u(x)$  は  $U(y)$  をフーリエ変換することによって得られる。このようにして基本周波数分布を求める手法を specmurt 分析<sup>5)</sup> という。概要を図2に示す。

### 2.2 共通調波構造の自動推定問題

前節で述べた Specmurt 分析では、共通調波構造パターンは楽音の倍音構造としてある程度一般的なものをユーザーが事前に決定していたが、楽器の違いや時間の経過による調波構造パターンの変化に応じて逐一適切なパターンを手手で調べることに限界がある。これを解決する一つの方法は、観測スペクトル  $v(x)$  から共通調波構造パターン  $h(x)$  を自動的に推定することであるが、式 (1) のモデルにおいては基本周波数分布  $u(x)$  も未知であるから、これは不良設定問題であり、何らかの先見情報や制約条件が必要となる。

この問題に対して仮定できる先見情報としては、例

えば以下のようなものが考えられる.

- (A)  $u(x)$  もスペクトルを表すから非負であること
- (B)  $u(x)$  は基本周波数分布であるから, ある大きさ以上の鋭いピークから構成されていること
- (C) 共通調波構造  $h(x)$  は各倍音に相当する複数の  $\delta$  関数により以下のように表わされていること

$$h(x) = h(x; \mathbf{a}) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \delta(x - \log n) \quad (3)$$

一般にこのような問題を解く方法としては, 先見情報によりコスト関数を定義し最小化する方法や, 先見情報を満たすような何らかの反復を行なう方法などがある. 前者は最急降下法などによりコスト関数の逐次減少を保証できるが, 多くの場合, 局所最適解を得るまでに多数のステップが必要となる. 一方, 反復法はアルゴリズムがわかりやすく, 高速な場合が多いが, 必ずしも収束性や安定性が保証されるとは限らない. specmurt 分析という簡便な音高情報可視化に用いることを考えれば, 厳密な最適化は必要ではなく, 高速にかつ安定に準最適解が得られればよい. 後者のような反復法が適していると考えられる.

### 2.3 従来の反復推定アルゴリズム

我々はこのような考察から, 非線形写像を用いた反復推定法を以前に提案した<sup>6)</sup>. この手法は大きく分けて3つのステップで構成されており, これらを繰り返すことで  $u(x)$ ,  $h(x)$  が準最適に収まるというものである.

- (i)  $v(x)$  と  $h_n(x)$  に対し, 式 (2) により  $u_n(x)$  を得る
- (ii)  $u_n(x)$  に対し, 非線形写像

$$\bar{u}_n(x) = \frac{u_n(x)}{1 + \exp\{-\alpha(u_n(x) - \beta)\}} \quad (4)$$

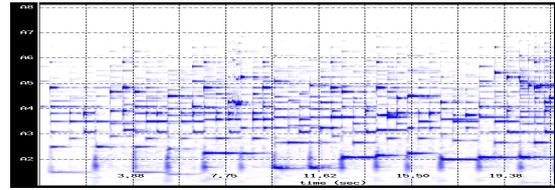
を用い, 負値をとる部分を除き, 不要成分と思われる部分を抑圧する

- (iii) 式 (3) に基づき,

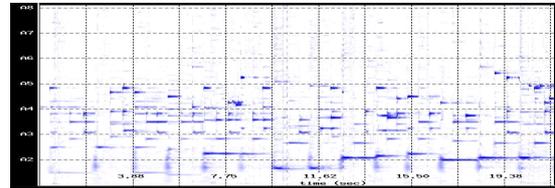
$$\int |v(x) - \bar{u}_n(x) * h(x; \mathbf{a})|^2 dx \quad (5)$$

を最小化するパラメータ  $\mathbf{a} = (a_1 \ a_2 \ \dots \ a_N)^T$  を求め,  $h_{n+1}(x) = h(x; \mathbf{a})$  を得る. ( $N$  は調波成分の数)

ここで, (ii) は A, B の先見情報, (iii) は C の先見情報を分布に反映していることに相当する. この反復推定によって基本周波数の強調性能が向上するとともに出力結果の共通調波構造パターンの初期値に対する依存性が大幅に減少した. RWC 研究用音楽データベース<sup>11)</sup> のクラシック No.30(ノクターン No.2, ショパン)について specmurt 分析を行った結果を Fig. 3 に示す.



(a) スペクトログラム



(b) specmurt 分析結果

図 3 specmurt 分析による倍音抑圧

## 3. 凸射影法による共通調波構造の推定

### 3.1 従来の反復推定法の問題点

前章の反復推定法では, ステップ 1 の式 (2) が  $y$  領域 (対数周波数  $x$  の逆 Fourier 変換領域) での除算を含んでいるため, まれに推定途中の共通調波構造  $h_n(x)$  が  $y$  領域で零点をもつことがあり, 収束しなかったり, 解が不安定になる問題があった. この章ではこの問題に対処するため我々がとったアプローチについて述べる.

### 3.2 specmurt 分析における先見情報の集合表現

解を満たすべき複数の制約条件が全て凸集合であり, かつそれらが共通集合をもつ場合には, ある初期値から各凸集合への射影 (その集合の要素で最も近い点への更新) を繰り返すことで, 共通集合に含まれる 1 点への収束を保証することができる凸射影法 (Projection Onto Convex Sets; POCS) という枠組みが知られており, 画像復元や超解像の分野で応用されている<sup>8)</sup>. そこで我々は凸射影法を specmurt 分析へ適用することを試みることにした. 考える解は  $u(x)$  の空間とし, 要素間の距離を  $\int |u_n(x) - u_m(x)|^2 dx$  で定義し, 前章で述べた A から C の先見情報が凸集合をなすかどうかについて以下検討する.

なお, 集合  $S \subseteq \mathbb{R}^n$  が凸であるとは, 全ての  $x_1, x_2 \in S$ ,  $\theta \in [0, 1]$  に対し,  $\theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \in S$  であることを言う.

まず A の条件について考える. 非負であるものの加重平均はやはり非負であるので, A の条件を満たす  $u(x)$  は明らかに凸集合 ( $S_A$  とする) をなす. また, ある  $u(x)$  から  $S_A$  への射影  $\bar{u}(x)$  は, 要素間の距離を  $\int |u_n(x) - u_m(x)|^2 dx$  で定義しているため  $u(x)$  の各  $x$  成分について正ならそのまま, 0 以下なら 0 としたものが元の  $u(x)$  に一番近いことは自明であり,

$$\bar{u}(x) = \begin{cases} u(x) & (u(x) \geq 0) \\ 0 & (u(x) < 0) \end{cases} \quad (6)$$

という操作によって求めればよい。

B の条件を満たす  $u(x)$  の集合は、例えば閾値処理によって実現することを考えた場合、ある有意な正の値  $u_0$  を用いて  $S_B = \{u(x) | u(x) = 0 \text{ or } u(x) \geq u_0, \text{ for } \forall x\}$  と表わされるが、これは凸集合ではない。

最後に、C の条件を  $u(x)$  の集合としてとらえると、 $S_C = \{u(x) | u(x) = v(x) * h^{-1}(x), h(x) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \delta(x - \log n)\}$  となるが、逆畳み込みが含まれるこの形式のままでは、これが凸集合をなすかどうかは明らかではない。

ここで  $h(x)$  の逆フーリエ変換領域での表現を考えると、

$$H(y) = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} a_n e^{jy \log n} \quad (7)$$

となる (ただし  $a_1 = 1$  とした)。式 (7) において、調波構造における基本周波数の占めるウェイトが大きい、すなわち

$$\left| \sum_{n=2}^{\infty} a_n e^{jy \log n} \right| < 1 \quad (8)$$

が成り立つと仮定すると、無限級数展開により

$$\frac{1}{H(y)} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left( - \sum_{n=2}^{\infty} a_n n^{jy} \right)^k \quad (9)$$

$$= 1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n n^{jy} \quad (10)$$

と表せる。これはすなわち、逆フィルタ  $h^{-1}(x)$  が

$$h^{-1}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \delta(x - \log n) \quad (11)$$

のように  $\delta$  関数列で表せることを意味する。つまり、式 (8) の仮定の元では  $S_C = \{u(x) | u(x) = v(x) * h^{-1}(x), h^{-1}(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \delta(x - \log n)\}$  と表せ、畳み込みの線形性に注意すれば  $S_C$  が凸集合となることがわかる。

なお、調波成分のパワー比が  $a_n = n^{-\gamma}$  ( $\gamma$  は実数) のように周波数の  $\gamma$  乗で減衰するような場合には、 $h^{-1}(x)$  の陽な表現が得られており、数学的にもより詳しい性質が明らかにされている。詳細については文献<sup>7)</sup>を参照されたい。

式 (8) を仮定した上での  $u(x)$  から  $S_C$  への射影  $\bar{u}(x)$  は

$$\int |u(x) - v(x) * h^{-1}(x; \mathbf{b})|^2 dx \quad (12)$$

を最小化するパラメータ  $\mathbf{b} = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N)^T$  を求

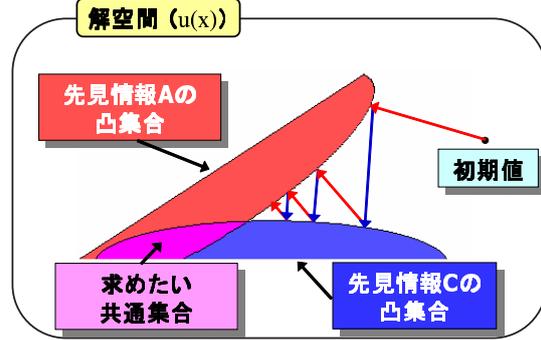


図 4 凸射影法によるアルゴリズム収束の概念図

め、 $\bar{u}(x) = v(x) * h^{-1}(x; \mathbf{b})$  により得られる。具体的には、式 (12) は  $b_i$  の 2 次式であるので、 $b_n$  の個数を有限の値  $N$  で打ち切った場合、 $b_n$  の偏微分が 0 である条件から連立方程式を解くことで得られる。これは従来法ステップ 2 での  $a$  の求め方と同様である (文献<sup>6)</sup> 参照)。

以上より、先見情報 A, C は凸集合であることがわかった。これらは必ず共通集合をもつ (少なくともひとつ  $u(x) = v(x)$  という自明な解が存在する) ので、凸射影法の原理<sup>8)</sup> より、 $S_A, S_C$  への射影を繰り返すことで、 $S_A, S_C$  の共通集合への収束を保証できる。

凸射影法によってアルゴリズムが収束する様子を図 4 に概念的に示す。解空間上である初期値からそれぞれの凸集合に射影することによって次第に共通集合へと近づいていく様子が分かる。また図に示すように、一般には  $S_A, S_C$  の共通集合はある大きさを持つため、収束先はある程度初期値に依存する。初期値の決め方としては、例えば統計的に妥当と考えられる共通調波構造 (例えば  $a_n = 1/n$ ) の仮定のもとで、一度 specmurt 分析を行い、得られる  $u(x)$  を用いる方法が考えられる。

### 3.3 アルゴリズム

以上を踏まえ、凸射影法を用いた共通調波構造の反復推定法の概要を述べる。

- (1) 適当な調波構造の初期値を設定し、基本周波数分布  $u(x)$  を Specmurt 分析によって得る。
- (2) 先見情報 A に従い、 $u(x)$  が負の部分は 0 にし、非負の部分はそのままとする。(凸集合  $S_A$  への射影)
- (3) 先見情報 C に従い、 $v(x) * h^{-1}(x; \mathbf{b})$  と  $u(x)$  の距離が二乗誤差の意味で最小となるようにパラメータ  $\mathbf{b}$  を決定し、 $u(x)$  を  $v(x) * h^{-1}(x; \mathbf{b})$  で更新する。(凸集合  $S_C$  への射影)
- (4) (2), (3) を繰り返し、一回のループでの分布の更新量が一定値を下回った時に反復を停止する。

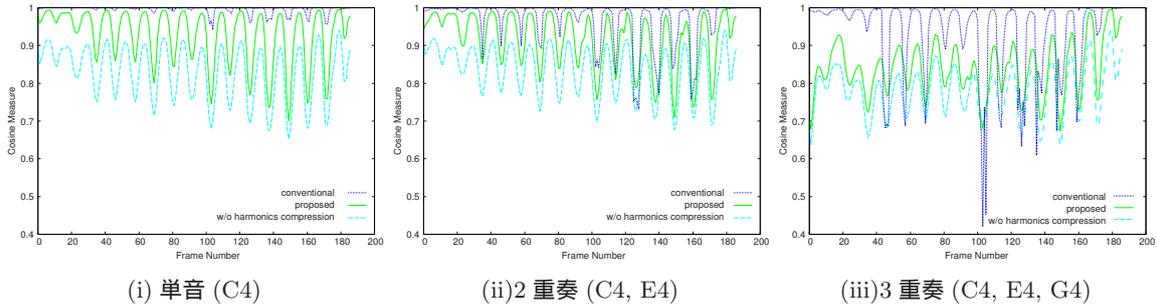


図 5 倍音抑圧の度合を表すコサイン尺度の従来法と提案法の比較

## 4. 比較実験

### 4.1 実験の目的と実験条件

これまで述べた提案手法について、アルゴリズムの収束性と倍音抑圧の効果を調べるため実験を行い、従来手法と比較した。使用したのは RWC 研究用音楽データベース<sup>10)</sup> のバイオリンの楽器音 (151VNNOM.WAV) で、これを基に単音 (C4), 2 重奏 (C4 と E4), 3 重奏 (C4, E4, G4) の実音響信号 (16kHz, モノラルの 3 秒程度) を作成した。

この信号に対し、実験 1 では反復回数 10 回の条件で従来法、提案法のどちらが倍音を抑圧できているかを比較した。比較方法は、観測スペクトルからあらかじめ分かっている基本周波数部分以外を 0 にしたものを「正解」の分布とし、実際に求めた基本周波数分布との内積をとって尺度とした。この意味はふたつの 1 次元配列 (ベクトル) のなす角のコサイン尺度ということであり、値が大きいほどふたつの分布が近い、つまり基本周波数が強調されていることを表し、1 であれば完全に基本周波数のみを強調できたことに相当する。倍音抑圧を行わなかった場合の数値も並記し、「基本周波数の視覚的分かりやすさ」の改善度を比べた。

また、実験 2 では、使用した音響信号の全フレーム (187 フレーム) について、反復回数の上限を 100 回として、一回の反復に対する分布の更新量が観測スペクトルのエネルギーの 0.01% を下回った場合に収束したと見なし、何回の反復でアルゴリズムが収束したかを集計をとった。

従来法においては sigmoid 関数のパラメータとして  $\alpha = 15, \beta = 0.5$  を使用し、従来法、提案法ともに共通調波構造に  $f^{-1.5}$  特性を仮定した場合の specmurt 分析結果を初期値として用いている。

### 4.2 実験結果

#### 4.2.1 実験 1

3 種類の音響信号に対して、基本周波数の強調の度合を表したグラフを図 5 に示す。横軸はフレーム (1

フレーム=16ms)、縦軸はコサイン尺度を表し、値が大きいほど倍音抑圧効果が高い。グラフが波打っているのは、バイオリンの基本周波数と倍音成分の比率が時間によって変動しているためで、評価に直接の影響はない。

倍音抑圧効果に関しては、同時発音数が増えるにしたがって抑圧効果は下がっているものの、全体として提案法より従来法の方が基本周波数強調の性能は高いことが分かる。ふたつのアルゴリズムで決定的に異なるのは非線形写像 (先見情報 B) を導入しているか否かであり、基本周波数分布において「比較的小さなピークは 0 へと近付ける」という効果が反復推定において大きな役割を果たしていることが予想できる。

しかし、特に図 5(iii) に見られるように、従来法では部分的にコサイン尺度が倍音抑圧をしなかった場合に比べて却って悪くなっている箇所がある。このフレームでの推定された基本周波数分布は図 6(a) に示すように unnecessary 成分が全域に渡っている。また、同時に推定された共通調波構造パターン  $h(x)$  (図 6(b)) から逆フィルタ  $h^{-1}(x)$  を計算すると図 6(c) が得られた。推定された共通調波構造が数値的問題で逆フィルタのドメインでは非常に不安定になっていることがあることが分かる。

#### 4.2.2 実験 2

3 種類の音響信号に対して、収束速度を従来法と提案法で比較した結果を表 1 に示す。従来法、提案法とも、楽器音の同時発音数が増えるに従って収束までの回数が多くなっているが、提案法は多くとも 20 回までには収束しているのに対し、従来法では 20 回でも収束しないフレームが少なからず存在するのがわかる。また従来法では 100 回の反復の後にも収束しないフレームがあったが、提案法では収束しないフレームは 1 つもなかった。この実験では収束性の保証された手法である凸射影法を導入したことによる提案法の優位性が認められる。

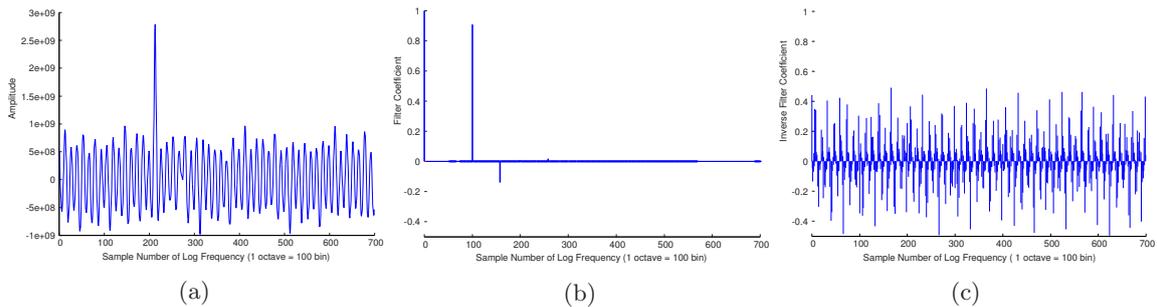


図 6 従来法で推定結果が発散した例. (a) 推定された基本周波数分布 (b) 推定された共通調波構造パターン (c) 推定された共通調波構造を逆フィルタへと変換した分布

収束までの回数	従来法			提案法		
	a	b	c	a	b	c
3 回以下	108	108	100	114	64	20
3~5	56	45	34	73	90	50
5~10	7	10	10	0	33	106
10~20	0	3	9	0	0	11
20~50	16	18	21	0	0	0
50~100	0	0	1	0	0	0
収束せず	0	3	12	0	0	0

表 1 従来法と提案法のアルゴリズムの収束速度の比較. a:単音, b:2 重奏, c:3 重奏

## 5. まとめと展望

今回我々は凸射影法を用いて specmurt 分析の共通調波構造パターンの逆フィルタを推定する方法を提案した. 比較実験により, 従来法に比べ提案法の収束性が高いことが示されたが, 倍音抑圧性能は従来に比べ若干低下してしまうこともわかった. 原因としては, 提案手法では解が満たすべき制約条件が少なく, 凸集合の共通集合が大き過ぎるために局所解へ収束していると考えられる. 今後は従来法の実線形写像に相当するような別の制約を導入するなど, 解の共通集合を小さくしてより適切な点へ収束させる必要があると考える.

## 参考文献

- 1) 柏野邦夫, ガビン スミス, 村瀬洋, “ヒストグラム特徴を用いた音響信号の高速探索法 - 時系列アクティブ探索法 -”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J82-D-II, no.9, pp.1365-1373, 1999.
- 2) 後藤真孝: “音楽音響信号を対象としたメロディーとベースの音高推定,” 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol. J84-D-II, No. 1, pp. 12-22, 2001.
- 3) M. Goto: “A Predominant-F0 Estimation Method for CD Recordings: MAP Estimation Using EM Algorithm for Adaptive Tone Models,” Proc. IEEE 26th International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2001), pp. V-3365-3368, 2001.
- 4) 亀岡弘和, 西本卓也, 嵯峨山茂樹, “調波時間構造

化クラスタリング (HTC) による音楽の音響特徴量同時推定,” 情報処理学会研究報告, 2005-MUS-61-12, pp. 71-78, 2005.

- 5) 高橋佳吾, 西本卓也, 嵯峨山茂樹, “対数周波数逆畳み込みによる多重音の基本周波数解析,” 情報処理学会研究報告, 2003-MUS-53-13, pp. 61-66, 2003.
- 6) 亀岡弘和, 齊藤翔一郎, 西本卓也, 嵯峨山茂樹, “Specmurt における最適共通調波構造パターンの反復推定による多声音楽信号の可視化と MIDI 変換,” 情報処理学会研究報告, 2004-MUS-56-7, pp. 41-48, 2004.
- 7) 小野順貴, 齊藤翔一郎, 亀岡弘和, 嵯峨山茂樹, “Specmurt 分析における共通調波構造の Riemann の関数を用いた逆フィルタ解析,” 日本音響学会 2006 年春季研究発表会講演論文集, 1-5-25, pp. 555-556, 2006.
- 8) D. C. Youla, “Image Restoration by the Method of Convex Projections,” IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol.MI-1, No.2, 81-94, 1982.
- 9) Richard A. Altes, “The Fourier-Mellin transform and mammalian hearing,” Journal of Acoustical Society of America, 63(1), pp. 174-183, 1978.
- 10) 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一, “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,” 情報処理学会研究報告, 2002-MUS-45-4, pp. 19-26, 2002.
- 11) 後藤真孝, 橋口博樹, 西村拓一, 岡隆一, “RWC 研究用音楽データベース: クラシック音楽データベースとジャズ音楽データベース,” 情報処理学会研究報告, 2002-MUS-44-5, pp. 25-32, 2002.