

## LMS 形フーリエアナライザを用いた採譜システムの検討

### A musical transcription system using an LMS Fourier Analyzer

石輪 洋平

工藤 憲昌\*

田所 嘉昭\*\*

Yohei Ishiwa

Norimasa Kudoh\*

Yoshiaki Tadokoro

八戸高専 機械・電気システム専攻

\*八戸高専

\*\*豊橋技科大 工学部

\*Hachinohe National College of Tech.

\*\*Toyohashi University of Tech.

キーワード：非定常信号(Non-stationary Signal), ダウンサンプリング(Down Sampling),

採譜システム(Musical Transcription System)

連絡先：〒039-1192 八戸市田面木上野平 16-1 八戸高専 電気工学科

tel:0178-27-7281, e-mail:kudohk-e@hachinohe-ct.ac.jp

#### あらまし

分析対象のサイン信号の周波数配置を調和関係に限定せず、かつ時変な波高値に対して追従性を改善した LMS 形フーリエアナライザが提案されている[2]。この適応アルゴリズムは狭帯域の BPF 特性を持つ。しかし、低音域の採譜に応用した場合、低音域では周波数値が非常に近接するため近接音の振幅も推定し、採譜の精度が低下する。そこで、近接音からの漏れこみを防ぎ十分な精度の採譜システムを実現すべく、ダウンサンプリングを行い、かつ同一オクターブ上の音高を同時に推定する構成とした。その結果、正規化した周波数間隔が広がり、かつ分析対象以外の周波数にはノッチ特性を持つフーリエアナライザが実現され、漏れこみを軽減することができた。最後に、オクターブ 3 から 6 までの音域を対象にした採譜システムを構成し、採譜が可能であることを示す。

#### 1. はじめに

近年、ネットワークの発展によりメディアの可能性が高まっており、自動採譜システムは有用なアプリケーションの一つである。くし形フィルタ

を用い、該当する音高の電力の有無を判定することで採譜システムを構成する方法もある[1]。しかし、楽音の音程、長さ、音色などの要素はその複雑な波形の振る舞いによって特徴付けられており、その波形を正確に解析することは信号処理の側面からも有用であると考えられる。楽音は基本波とその多くの高調波から構成され、各音高の基本波の振幅を推定することで採譜が可能である。しかし、周波数配置が非調和関係にあり、また急激な時間変化を伴うため、離散的フーリエ変換(DFT)では正確に分析できない。そこで、分析対象のサイン信号の周波数配置を調和関係に限定せず、かつ時変な波高値に対して追従性を改善した LMS 形フーリエアナライザ(F.A.)が提案されている[2]。この適応アルゴリズムは狭帯域の BPF 特性を持つため、分析対象の周波数だけを抽出し振幅を推定することが可能である。

ここで楽音の音階とその周波数配置について考えると、隣り合う音高の周波数比は $\sqrt[12]{2}$ であり、低音域では周波数値が非常に近接する。そのため、

文献[2]の方法を直接用いて、低音域の採譜に応用した場合、近接音の振幅の影響により採譜の精度が著しく低下する。

そこで本稿では、正規化した周波数間隔を広げる目的でダウンサンプリングを行い、かつ同一オクターブ上の音高を同時に推定することにより、周波数が近接した音高からの影響を軽減すると共に採譜システムとしての単純化を図った。

以下に本稿の構成を示す。2.ではLMS形F.A.について概説し、3.ではダウンサンプリング時のLMS形F.A.の周波数特性を示す。4.では同一オクターブ上の音高を同時に推定するLMS形F.A.について述べ、5.でその振幅推定例を示す。6.では採譜システムを構成し、その採譜例を示す。7.はむすびである。

## 2. LMS形F.A.

LMS形F.A.は以下のアルゴリズムで表される。

楽音信号は式(1)に示すように  $p$  個の正弦波と、平均零で分散  $\sigma_\phi^2$  のガウス性白色雑音  $\phi(n)$  で表すことができる。

$$x(n) = \sum_{i=1}^p a_i(n) \cos \omega_i n + b_i(n) \sin \omega_i n + \phi(n) \quad (1)$$

また、cosine, sine 成分の振幅  $a_i(n), b_i(n)$  は時変で、式(2),(3)のように時間変数を  $n$  とする  $1, n, n^2, \dots, n^{q-1}$  の線形結合で表されるものとする。

$$a_i(n) = \alpha_{0i} + \alpha_{1i}n + \alpha_{2i}n^2 + \dots + \alpha_{(q-1)i}n^{q-1} \quad (2)$$

$$b_i(n) = \beta_{0i} + \beta_{1i}n + \beta_{2i}n^2 + \dots + \beta_{(q-1)i}n^{q-1} \quad (3)$$

時間変数  $n$  の 1 次の時変性までに対応できれば、採譜システムとして十分な精度が得られると考え、本稿では  $n$  までの時変性を考慮する。

$$a(n) = \alpha_0 + \alpha_1 n \quad (2')$$

$$b(n) = \beta_0 + \beta_1 n \quad (3')$$

LMS形F.A.の構成を図1に示す。

$a(n), b(n)$  の推定値  $\hat{a}(n), \hat{b}(n)$  は式(4),(5)により更新される。ここで  $\mu$  はステップサイズパラメータ、 $\gamma$  は追従性を制御するパラメータで  $\gamma < 1$

である。また、 $x(n)$  の推定誤差  $e(n)$  は式(6)により算出される。

$$\hat{a}_i(n+1) = \hat{a}_i(n) + \frac{\mu}{(1-\gamma z^{-1})^m} e(n) \cos \omega_i n \quad (4)$$

$$\hat{b}_i(n+1) = \hat{b}_i(n) + \frac{\mu}{(1-\gamma z^{-1})^m} e(n) \sin \omega_i n \quad (5)$$

$$e(n) = x(n) - \sum_{i=1}^p \hat{a}_i(n) \cos \omega_i n + \hat{b}_i(n) \sin \omega_i n \quad (6)$$

$$\frac{(1-\gamma)^2}{1+\gamma} \geq \mu \quad (7)$$

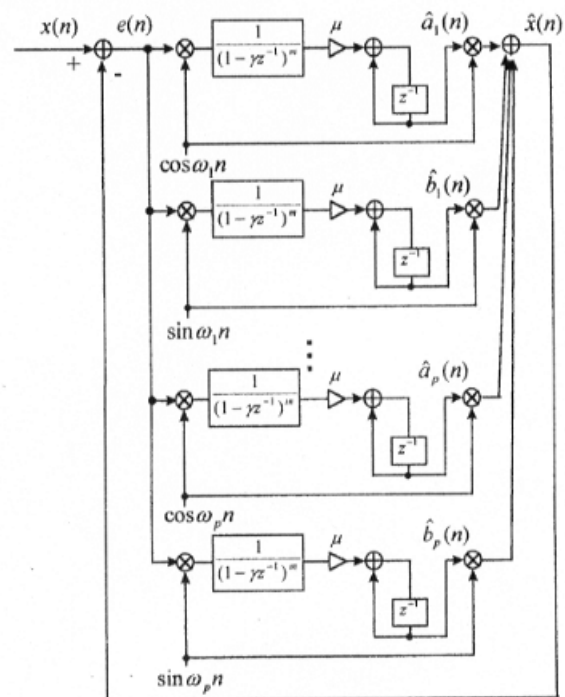


図1. LMS形F.A.の構成

定常状態では、図1の  $x(n)$  から  $e(n)$  の経路は図2のようなシステムで記述できる。

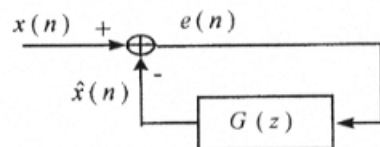


図2. LMS形F.A.のブロック図

簡単のため  $p=1$  とし、図2より  $x(n)$  から  $e(n)$  までの経路の伝達関数  $G(z)$  を求めると、

$$G(z) = \mu \frac{\cos \omega_1 z^{-1} - (1+\gamma)z^{-2} + \gamma \cos \omega_1 z^{-3}}{G_D(z)} \quad (8)$$

$$G_D(z) = 1 - 2(1+\gamma)\cos \omega_1 z^{-1} + \{4\gamma \cos^2 \omega_1 + (1+\gamma^2)\}z^{-2} - 2\gamma(1+\gamma)\cos \omega_1 z^{-3} + \gamma^2 z^{-4} \quad (9)$$

また、 $x(n)$  から  $\hat{x}(n)$  までの経路の伝達関数  $F(z)$  を求めると、

$$F(z) = \frac{G(z)}{1+G(z)} = \frac{\mu\{\cos \omega_1 z^{-1} - (1+\gamma)z^{-2} + \gamma \cos \omega_1 z^{-3}\}}{F_D(z)} \quad (10)$$

$$F_D(z) = 1 + \{\mu - 2(1+\gamma)\} \cos \omega_1 z^{-1} + \{4\gamma \cos^2 \omega_1 + (1+\gamma^2) - \mu(1+\gamma)\}z^{-2} + \gamma\{\mu - 2(1+\gamma)\} \cos \omega_1 z^{-3} + \gamma^2 z^{-4} \quad (11)$$

$F(z)$ より周波数特性は図3のように狭帯域のBPF特性となる。従って、特定の周波数成分を抽出しその振幅を推定することができ、かつ帯域幅を有しているため、ピブラート演奏のように周波数変動を伴う場合でも該当音高を検出できる。

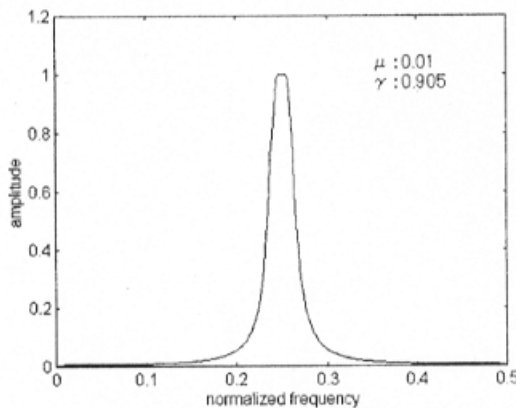


図3. LMS形F.A.の周波数特性

### 3. ダウンサンプリング

$1/M$  ダウンサンプリングは、LPF を用いて  $f_s/2M$  [Hz]に帯域制限して、 $M$  個のサンプルのうち、 $(M-1)$ 個を廃棄することで実現する[3].

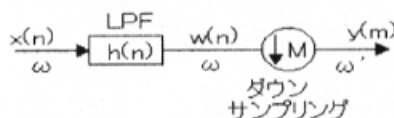


図4. ダウンサンプリングの構成

ダウンサンプリングによって正規化した周波数間隔が広がるため、サンプリング周波数が低い時のLMS形F.A.の周波数特性は、相対的に鋭いBPF特性となる。式(10)、(11)の伝達関数  $F(z)$  からサンプリング周波数 8[kHz], 4[kHz], 2[kHz], 1[kHz]の場合のLMS形F.A.の周波数特性を求めると図5のようになる(中心周波数: 130[Hz])。

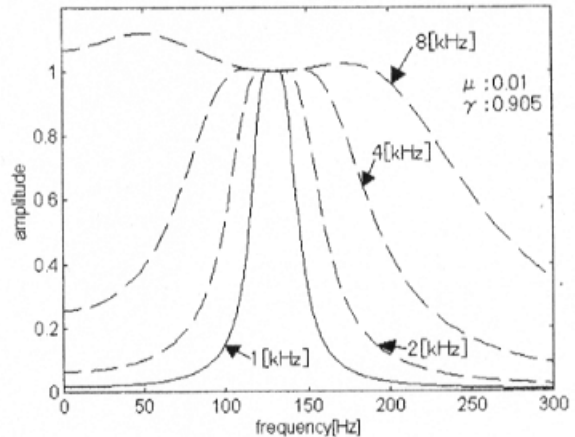


図5. サンプリング周波数と周波数特性

従って、周波数が近接した場合でも中心周波数成分だけを抽出でき、隣り合う音からの漏れ込みを防ぐことができる。

### 4. オクターブを同時に推定するLMS形F.A.

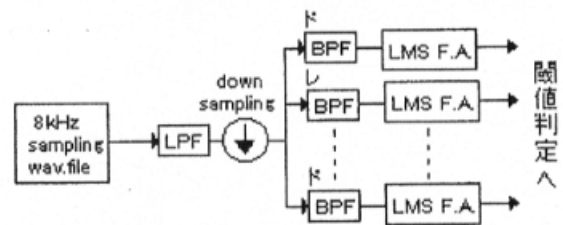


図6. 文献[4]の採譜システム



図7. 提案する採譜システム

LMS形F.A.の採譜への応用として、文献[4]では図6のように各音に設定したBPFを通過後、

それぞれについて LMS 形 F.A. で振幅を推定する構成となっている。なお、この BPF の帯域幅を徐々に狭くする制御も行っている。

本稿では、同一のオクターブ上の音高について同時に推定することにより、周波数が近接した音高からの影響を軽減すると共に採譜システムとしての簡単化を図る(図 7)。この時の LMS 形 F.A. の構成を図 8 に示す。

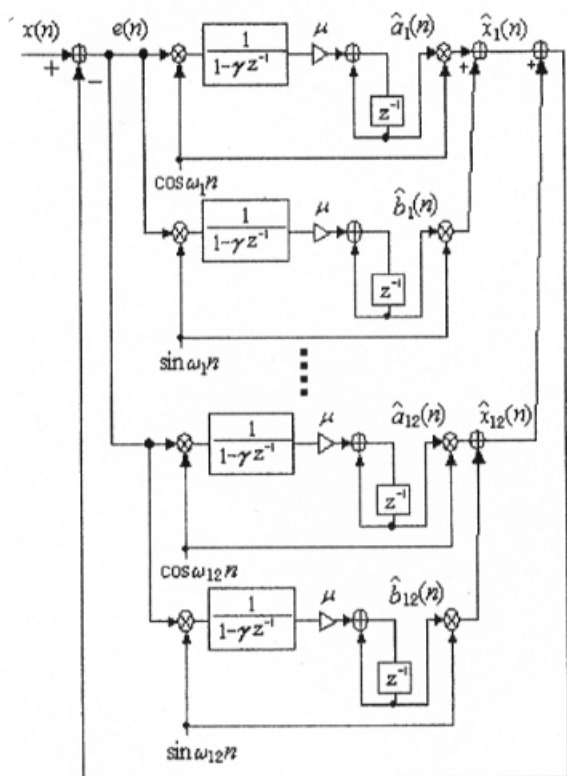


図 8. 提案する LMS 形 F.A. の構成

2. の場合と同様に、図 2 より  $x(n)$  から  $e(n)$  までの経路の伝達関数  $G(z)$  を求めると、以下のようなになる。

$$G(z) = \sum_{i=1}^{12} G_i(z) = \sum_{i=1}^{12} \mu \frac{\cos \omega_i z^{-1} - (1 + \gamma) z^{-2} + \gamma \cos \omega_i z^{-3}}{G_D(z)} \quad (12)$$

また、任意の音に対する  $x(n)$  から  $\hat{x}_i(n)$  までの経路の伝達関数  $F_i(z)$  を求めると、以下のようなになる。

$$F_i(z) = \frac{G_i(z)}{1 + \sum_{i=1}^{12} G(z)} \quad (13)$$

同一オクターブ上の音高について同時に推定するため、分析対象以外の周波数にはノッチ特性を持つ。例として、オクターブ 4 の「ファ」に対する周波数特性を図 9 に示す(サンプリング周波数 1[kHz])。「ファ」以外の音高の周波数値ではノッチ特性を持つことが確認できる。

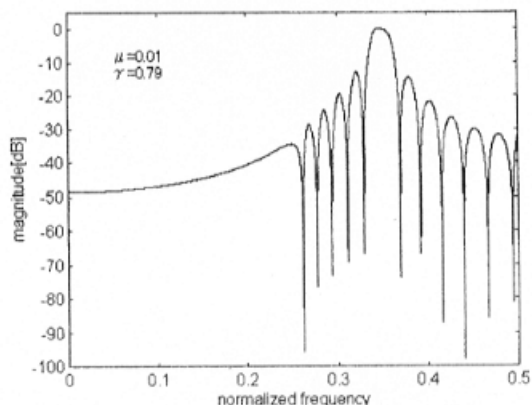


図 9. 提案する LMS 形 F.A. の周波数特性

## 5. 振幅推定例

はじめに、提案する採譜システムがどれだけ近接音からの漏れこみを軽減できるか、文献[4]のシステムと比較する。図 10 の楽譜を MIDI ピアノ音で発生させ 8[kHz] サンプリング wav 形式で録音し、入力信号とする。

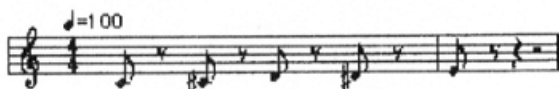


図 10. 振幅推定する楽譜

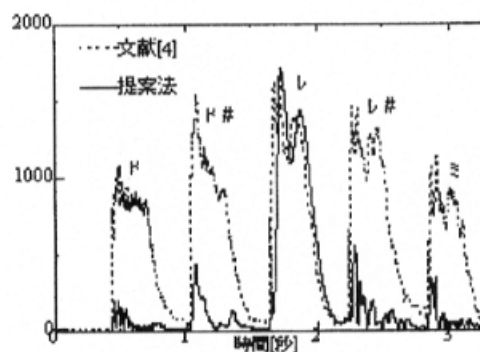


図 11. 「レ」音に対する振幅推定結果の比較

[4]では、4[kHz]までダウンサンプリングし、各音



高に対して BPF を通過させて振幅を推定している。パラメータは  $\mu=0.01$ ,  $\gamma=0.905$  である。これに対し、提案法では 1[kHz]までダウンサンプリングし、オクターブ 4 の音高を同時に推定する。パラメータは  $\mu=0.01$ ,  $\gamma=0.79$  である。

「レ」音に対する振幅推定の結果を図 11 に示す。提案法は、[3]に比べ「レ」音の振幅だけを抽出し漏れ込みを著しく軽減していることが確認できる。

つづいて、さらに低音域であるオクターブ 3 について振幅推定を行う。図 12 の楽譜を入力信号とし、「ド」音に対する振幅推定の結果が図 13 である。オクターブ 3 に対しても近接音からの漏れこみを軽減できていることが確認できる。

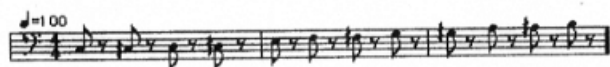


図 12. 振幅推定する楽譜

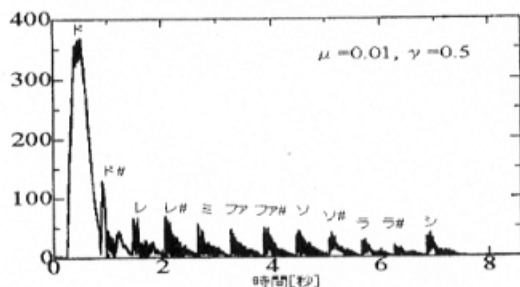


図 13. 「ド」音に対する振幅推定結果の比較

## 6. 採譜例

実際にオクターブ 3 から 6 までの音域を対象にした採譜システムを構成し、その採譜例を示す。図 14 に採譜システムの構成を示す。

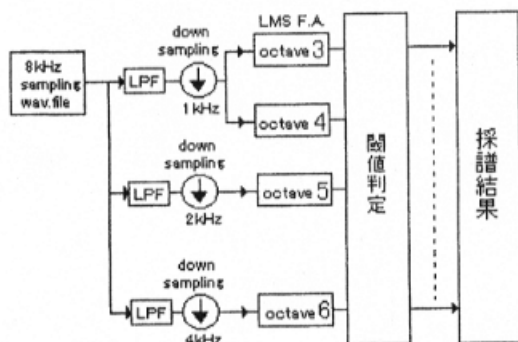


図 14. 採譜システムの構成

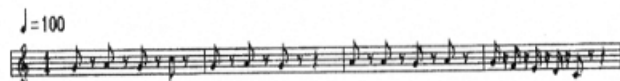


図 15. アマリリスの楽譜

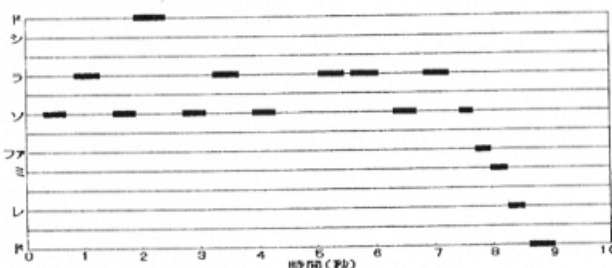


図 16. 採譜結果

各パラメータは  $\mu=0.01$ ,  $\gamma=0.79$ (オクターブ 3 のみ 0.5)である。各周波数の正弦波の振幅が、電力から決定される閾値よりも大きい場合にその音高が検出される。

図 15 の楽譜をピアノ音で MIDI から発生させ、8[kHz]サンプリング wav 形式で録音する。採譜処理を行った結果を図 16 に示す。

## 7. むすび

LMS 形フーリエアナライザを用いた採譜システムについて、精度の高い採譜を実現できるよう、近接音からの漏れこみを軽減するという観点から検討を行い、その構成を示した。

これを自動採譜システムへと発展させるためには、推定した振幅値を比較する閾値の決定方法が課題となる。今後、この閾値の適応的設定について検討を行う予定である。

## 参考文献：

- [1]三輪, 田所, 斉藤, “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. 118-C, No.1, Jan.1998
- [2]N.Kudoh, Y.Tadokoro, “Performance Analysis of a new LMS-typed Fourier Analyzer”, Proceedings. of IEEE TENCON '03, Bangalore, Oct., 2003,
- [3]R.E. Crochiere, L.R.Robiner “Multirate Digital Signal Processing”, Prentice Hall, 1983
- [4]武内, 工藤, 田所, “時変なサイン信号に対する LMS 形フーリエアナライザの採譜への応用”, H14 電気関係学会東北支部連合大会 2H1(2002年8月)