

LMS 型フーリエアナライザを用いた神楽音の分析

Analyses of Kagura musical signals using an LMS-based Fourier analyzer

○石橋 諭*, 工藤憲昌*, 田所嘉昭**,

○Satoru Ishibashi*, Norimasa Kudoh*, Yoshiaki Tadokoro**

*八戸工業高等専門学校, **豊橋技術科学大学

*NIT, Hachinohe College, **Toyohashi University of Technology,

キーワード: LMS アルゴリズム (LMS algorithm), 採譜システム (musical transcription system)

連絡先: 〒 039-1192 青森県八戸市田面木上野平 16 番 1 号
八戸高専 産業システム工学専攻 電気情報システム工学コース
Tel.: 0178-27-7281, E-mail: kudohk-e@hachinohe-ct.ac.jp

1. はじめに

日本の民俗芸能には「神楽」があり、神楽は代々弾き語りや口伝によって後世へと伝承されてきた。しかし、時代の変遷とともに後継者が減少しつつあり、やがて神楽が途絶えてしまう可能性がある。この問題への対処法として、神楽を楽譜として残すことが有効であると考えられる。しかし採譜は音楽に精通したもので膨大な時間を要するため、コンピュータによる自動採譜システムが研究されてきている^{1, 2, 3)}。しかし、既存の自動採譜システムは西洋の音階に従ったものである。神楽は独特の音階を用いており、これを分析するには専用の自動採譜システムが必要である。

急峻に時間変化する楽音信号に適応するために、これまで LMS (Least Mean Square) 型の学習アルゴリズムを検討してきた^{4, 5)}。この方法は正弦波の振幅を学習パラメータとするものである。本稿では LMS フーリエアナライザを用いて、神楽音を分析し採譜した結果を報告する。

以下に本稿の構成を示す。2. では従来の LMS フーリエアナライザの適応制御ループ内にリーク付き積

分操作を導入することにより、時変の振幅を推定する方法を説明する。3. では採譜システムについて記述する。はじめに神楽の各音階の周波数を推定する方法について記述する。次に、合成音と神楽の実際の演奏を本システムにより採譜した結果を示す。4. はまとめである。

2. LMS フーリエアナライザ

まず、時変の振幅を推定するための LMS フーリエアナライザについて概説し、次に振幅推定において隣接する音階からの干渉を除去する方法を提案する。

入力信号が式 (1) のように表されているとする。ここで $a_i(n)$, $b_i(n)$ は時変の振幅, $\phi(n)$ は加法性白色雑音であり, p 個の角周波数 ω_i ($i = 1 \sim p$) を持つとする。 $x(n)$ の推定 $\hat{x}(n)$ が式 (2) のように表され, $a_i(n), b_i(n)$ の推定値をそれぞれ $\hat{a}_i(n), \hat{b}_i(n)$ とすると, 誤差 $e(n)$ は式 (3) のように表される。また, $\hat{a}_i(n)$ の更新式は式 (4) のようになり, $\hat{b}_i(n)$ も同様に更新される。ここで μ はステップサイズパラメータである。

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

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p \{\hat{a}_i(n) \cos \omega_i n + \hat{b}_i(n) \sin \omega_i n\} \quad (2)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (3)$$

$$\hat{a}_i(n+1) = \hat{a}_i(n) + \mu e(n) \cos \omega_i n \quad (4)$$

楽音信号に現れるような時変の振幅に追従するために、リーク付き積分操作 $(1 - \gamma z^{-1})^{-1}$ を適応制御ループ内に導入する。Fig. 1 に LMS フーリエアナライザのブロック図を示す。この場合、 $\hat{a}_i(n), \hat{b}_i(n)$ はそれぞれ式 (5), 式 (6) によって更新される。

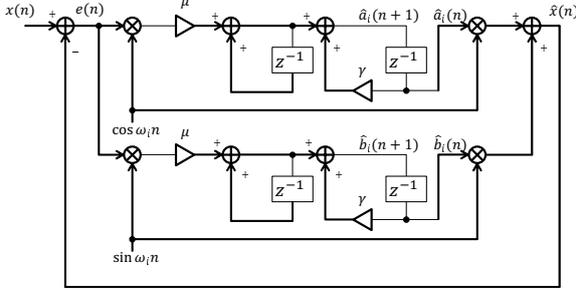


Fig. 1. Block diagram of the LMS-based Fourier analyzer

$$\hat{a}_i(n+1) = (1 + \gamma)\hat{a}_i(n) - \gamma\hat{a}_i(n-1) + \mu e(n) \cos \omega_i n \quad (5)$$

$$\hat{b}_i(n+1) = (1 + \gamma)\hat{b}_i(n) - \gamma\hat{b}_i(n-1) + \mu e(n) \sin \omega_i n \quad (6)$$

ここで γ は 1 未満の値で、アルゴリズムの安定のために用いられる。 γ の最大値は与えられたステップサイズ μ によって式 (7) で決められる。

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

この方法は定常状態において鋭いバンドパス特性を持っているが、Fig. 2 に示すように、隣接音高の周波数において完全なヌル特性ではない。したがって、推定値が隣接音高から干渉を受ける。この干渉を除去するために、推定対象と隣接音高の両方の振幅を推定し、隣接音高の振幅を破棄する。Fig. 3a と 3b はそれぞれ、干渉を起こす可能性がある従来

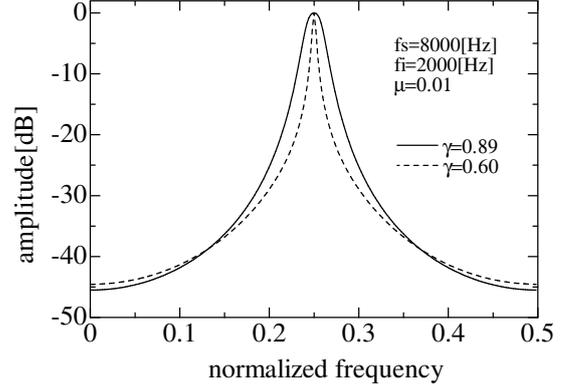


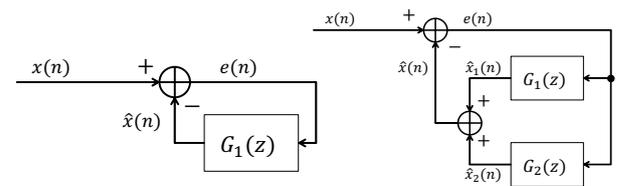
Fig. 2. Frequency characteristics of Fig. 1

法と、干渉を除去する方法⁶⁾のブロック図を示している。ここで、 $G_i(z)$ (推定対象は $i = 1$, 隣接音高は $i = 2$) は、音高番号 i に対する LMS 法のアルゴリズムの定常状態における伝達関数である。 $G_i(z)$ は式 (8) によって与えられる。

$$G_i(z) = \frac{\cos \omega_i z^{-1} - (1 + \gamma)z^{-2} + \gamma \cos \omega_i z^{-3}}{G_D(z)}, \quad (8)$$

ここで $G_D(z)$ は式 (9) によって与えられる。

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



(a) A plain LMS method (b) A proposed method to remove interference

Fig. 3. Amplitude estimation

Fig. 4 に、干渉を除去する方法の周波数特性の例を示す。ここで、推定対象の周波数 $f_1 = 2000\text{Hz}$ (正規化周波数 0.25), 隣接音高の周波数 $f_2 = 2343.75\text{Hz}$ (正規化周波数 0.29) とした。Fig. 4 より、推定対象の周波数成分は通過し、隣接音高の成分は完全に除去されていることが分かる。

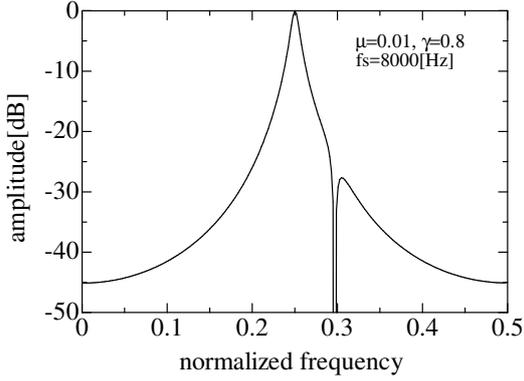


Fig. 4. Frequency characteristics to remove interference

3. 採譜システム

採譜システムでは、様々な編集や楽譜への変換を容易に行うために、MIDI (Musical Instrument Digital Interface) を用いる。採譜は以下の通りに行われる。

- 1) 8kHz, 16 bits/sample でサンプリングされた神楽音の周波数推定
- 2) LMS フーリエアナライザを用いた振幅推定
- 3) 振幅推定結果から MIDI ファイルへの変換
- 4) 市販のソフトウェアによる MIDI ファイルから楽譜への変換

3.1 周波数推定

振幅推定を行うために、まず神楽の各音階の周波数が必要となる。正確な周波数を推定するために、周波数推定フィルタ⁷⁾が用いられる。Fig. 5に、周波数推定フィルタ⁷⁾のブロック図を示す。ここで、 $H_N(z)$ はノッチフィルタの、 $H_S(z)$ はバンドパスフィルタである。 $x(n), e(n), s(n), \alpha(n)$ をそれぞれ、入力信号、ノッチフィルタの出力、バンドパスフィルタの出力、フィルタ特性の係数とおく。 $x(n)$ が、

$$x(n) = a \cos \omega n + b \sin \omega n, \quad (10)$$

で与えられるとき、 $\alpha(n)$ の推定 $\hat{\alpha}(n)$ は次の式で得られる。

$$\hat{\alpha}(n+1) = \hat{\alpha}(n) - \mu_f e(n)s(n) \quad (11)$$

ここで、 μ_f は周波数推定のステップサイズパラメータである。また、 $\hat{\alpha}$ の真値は $2 \cos \omega$ である。推定周波数 f は、式 (12) で求められる。

$$f = \cos^{-1} \left(\frac{\hat{\alpha}(n)}{2} \right) \times \frac{f_s}{2\pi} \quad (12)$$

ここで、 f_s はサンプリング周波数である。神楽の各音階の推定周波数を Table 1 に示す。対応する MIDI ノートナンバーも、MIDI ファイルを作成する際に必要となるため、10 進数表記で示している。

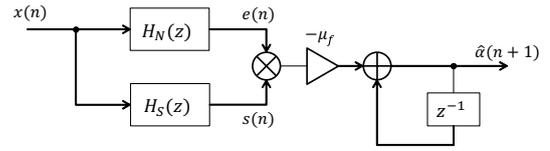


Fig. 5. Block diagram of frequency estimation

Table 1. Frequencies of Kagura scale

note no.	MIDI note no.	frequency [Hz]
0	73	564.658
1	75	632.813
2	77	682.639
3	80	846.389
4	83	991.615
5	85	1061.135
6	87	1237.746
7	89	1364.207
8	92	1666.380
9	95	1968.771

3.2 採譜システム

MIDI は音データを記録するのではなく、曲を演奏するためのテンポや拍子、楽器、発音消音などの演奏情報を記録する。したがって、MIDI ファイルのサイズは wav ファイルと比べると小さくて済む。

その演奏情報として最低限必要なものは、テンポ、拍子、音高 (ノートナンバー)、各音符の長さである。テンポは、1 分間の 4 分音符の数を表す BPM (Beat Per Minute) によって定義される。拍子は曲ごとにそれぞれ決まっており、4/4 がよく用いられる。ただし神楽の場合拍子が不明であることから、今回の

採譜では 4/4 と仮定する。音階と音符の長さについては、振幅推定の結果から得ることができる。

さらに本システムでは、楽音信号とその推定のそれぞれの電力を比較することにより、演奏中のミスを発見することができる。推定信号の電力は推定した振幅から得られ、入力信号との関係は式 (13) で表される。ここで、 $E[\cdot]$ は期待値操作である。LMS フーリエアナライザは、Table 1 にある周波数のみを用いる。したがって、入力信号電力よりも推定電力のほうが小さくなる部分があれば、その部分には推定していない周波数成分が存在することになる。これを演奏ミスと判定する。この機能は、神楽を練習する際に極めて有用となる。

$$E[x^2(n)] \approx E \left[\sum_i \left\{ \hat{a}_i(n) \cos \omega_i n + \hat{b}_i(n) \sin \omega_i n \right\}^2 \right] \\ = \frac{1}{2} \sum_i \left\{ \hat{a}_i^2(n) + \hat{b}_i^2(n) \right\}, \quad (13)$$

3.2.1 システムの検証

はじめに、市販のシンセサイザーで演奏した短いフレーズの採譜を行うことによって、本システムの妥当性を検証する。音階は平均律に従ったものを使用し、テンポは 130 BPM である。また、振幅推定の際に微小なノイズを除去するために、しきい値判定を用いた。しきい値は 0.3 とした。Fig. 6 に、合成音による楽音信号の波形を示す。また、Fig. 7 と 8 にそれぞれ、合成音で演奏した元の楽譜と推定した楽譜を示す。推定した楽譜は、元の楽譜を完全に再現していることが分かる。

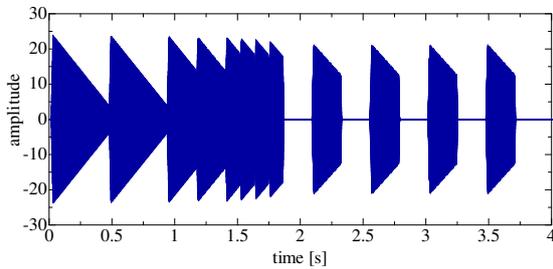


Fig. 6. Synthesized musical signals



Fig. 7. Original musical score generated by a synthesizer



Fig. 8. Musical score estimated from synthesized musical signals

3.2.2 神楽音の分析

次に、神楽の演奏の一部分を分析した。Fig. 9 に推定した神楽の楽譜を示す。神楽の演奏では、テンポが不明である上に一定でない。そこで手動でテンポを測定したところ、多くの部分で約 120 BPM であると判断したため、120 BPM で固定した。また振幅推定の際のしきい値は 3.2.1 と同様に 0.3 を用いた。この楽譜を合成音によって演奏したものを視聴したところ、ほぼ神楽の演奏を再現できているというを確認できた。

Fig. 10 に、神楽の最初の部分における信号電力の比較結果を示す。0.7s から 1.7s までの間で入力信号電力のほうが大きいため、この区間に推定していない周波数成分が存在していることが分かる。



Fig. 9. Estimated score of a part of Kagura performance

4. まとめ

本稿では神楽の演奏をより良い精度で分析する方法を記述した。まず、適応制御ループ内にリーク付き積分操作を導入することで、楽音信号中の時変の振幅への追従性能を改善した。さらに推定対象と隣

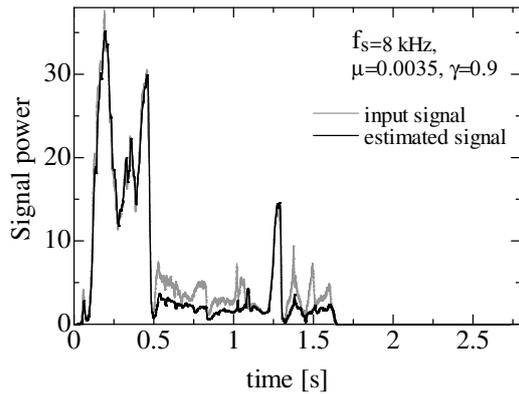


Fig. 10. Power comparison

接音高の振幅を同時に推定して、隣接音高の振幅を破棄することにより干渉除去を行った。これらの改善を行ったLMS フーリエアナライザを用いて楽音信号を分析し、その結果に基づいてMIDI ファイルを作成した。合成音による演奏の分析では、本分析システムは正確な楽譜を作成することに成功した。神楽の演奏の分析においても、演奏の一部をほぼ正確に再現できる楽譜の作成を実現できた。

今後は、利得の自動調整(AGC)の導入、神楽の演奏全体の採譜、信号電力比較によって演奏ミスがあると判断された部分の自動指摘について検討を行う。

謝辞

本研究を進めるにあたり、神楽笛の演奏音を提供してくださった八戸市浜市川神楽保存会の皆様に感

謝いたします。また本研究は、JSPS 科研費 26350352 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 嵯峨山, 亀岡, "自動採譜技術の動向", 日本音響学会誌 64 巻 12 号, pp. 715-720, 2008
- 2) 梅本, 青島, "適応技術を用いた採譜に有効な周波数分析", 計測自動制御学会論文集, Vol. 28, No. 5, pp. 619-625, 1992
- 3) 門藤, 田所, "拡張ノッチフーリエ変換による採譜のための音高検出", 計測自動制御学会論文集, Vol. 32, No. 12, pp. 205-210, 1995
- 4) N. Kudoh and Y. Tadokoro, "Performance Analysis of an LMS Based Fourier Analyzer for Sinusoidal Signals with Time-varying Amplitude", CD-ROM Proc. of IEEE TENCON'03, pp. 1-4, 2003.
- 5) 石橋, 工藤, 田所, "LMS フーリエアナライザを用いた楽音の分析", 計測自動制御学会東北支部 第 295 回研究集会, 295-5, pp. 1-4, 2015
- 6) S. Ishibashi, N. Kudoh and Y. Tadokoro, "Analyses of musical signals using an LMS-based Fourier analyzer", 平成 27 年度電気関係学会東北支部大会講演論文集 2A10, 2015
- 7) J.F. Chicharo, T.S. Ng, "Gradient-based adaptive IIR notch filtering for frequency estimation", IEEE Trans. on Acoust., Speech, Signal Processing, 38(5), pp. 769-777, 1990