

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24360152

研究課題名(和文) 統計力学的手法による適応信号処理の解析的研究

研究課題名(英文) Analytical study on adaptive signal processing by statistical-mechanical method

研究代表者

三好 誠司 (Miyoshi, Seiji)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：10270307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,400,000円

研究成果の概要(和文)：適応信号処理の挙動を統計力学的手法を用いて理論的に明らかにした。特に、音を音で消す技術であるアクティブノイズコントロールについて、一次経路が時間的に変化するモデルの解析、一次経路に実データを用いる場合の解析、二次経路の推定誤差の影響、固有値解析に基づく定常二乗平均誤差の解析、ステップサイズの上限に関する解析、マルチチャンネル型に関する予備的解析などについて網羅的かつ系統的に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically analyzed the behaviors of adaptive signal processing based on statistical-mechanical method. Especially, we have analyzed the active noise control that is a technique to remove acoustic noise by sound. Some models have been analyzed that include the time-varying primary path, the actual primary path, the effect of the estimation error of the secondary path, the steady-state squared error, the upper bound of step size, multi-channel active noise control, and so on.

研究分野：情報数理工学

キーワード：信号処理 適応信号処理 能動騒音制御 情報統計力学 統計力学的手法 自己平均性 熱力学極限  
アクティブノイズコントロール

## 1. 研究開始当初の背景

信号の処理において、入力信号の統計的性質が未知であったり時間的に変化する場合、あらかじめ最適な信号処理装置(フィルタ)を設計することはできない。このような場合はある意味で「**自己設計する装置**」を扱う信号処理、すなわち適応信号処理が必要となる。適応信号処理においてはフィルタを自己設計するアルゴリズム、すなわち適応アルゴリズムが必要となる。1960年に Widrow らによって提案された LMS アルゴリズム[1]は現在でももっとも一般的な適応アルゴリズムである。

近年のハードウェア面でのデジタル信号処理技術の進歩によって適応信号処理はその応用範囲を急速に拡大している。それらの中で特に注目されている技術にアクティブノイズコントロール(ANC)[2]がある。ANCは振幅が等しく位相が逆の音を生成することにより雑音を消去する、いわば**音で音を消す技術**である(図1)。ANCの応用には、自動車車室内におけるエンジン音の消去、高速道路の騒音低減、個人用音楽プレーヤの雑音低減、医療用診断装置の一種であるMRIの騒音消去などがある。ANCの代表的なアルゴリズムである Filtered-X LMS アルゴリズム[2]は二次経路(二次音源スピーカからエラーマイクロホンまでの伝搬系)のインパルス応答を考慮して LMS アルゴリズムを一般化したアルゴリズムである。

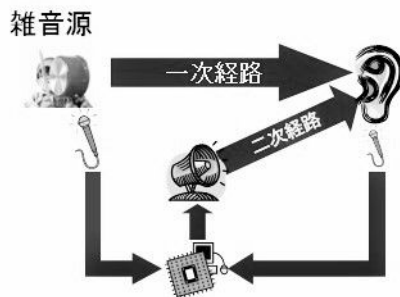


図1 アクティブノイズコントロール

このように LMS アルゴリズムや Filtered-X LMS アルゴリズムは世の中で広く使われているが、その理論解析に関する先行研究はそれほど多くない。既存の理論としては、独立仮定に基づく解析、ステップサイズが小さい場合の解析、入力信号が周期的である場合の解析、適応フィルタのタップ長が短い場合の解析などがあるが、いずれもかなり強い仮定や条件のもとでの限定的な解析である。このように、LMS アルゴリズムや Filtered-X LMS アルゴリズムは**半世紀にわたって広く使われてきたにも関わらず、驚くべきことに、その一般的な理論はこれまでのところ存在しない。**

一方、物理学の一分野である統計力学で開発された種々の理論解析手法、数値計算手法を用いて情報に関するいろいろな問題にアプローチする枠組みは**情報統計力学**と呼ばれ、連想記憶モデル、誤り訂正符号、無線通信、画像処理、統計的学習など多くの分野で成果をあげており、注目されている。申請者も平成 13-14、15-17、18-20、21-23 年度の科研費で情報統計力学の枠組みで、特に学習機械がパーセプトロンであるモデルを対象にオンライン学習の解析を行い、教師が動くモデル、教師が複数存在するモデルなど時間的・空間的な観点で興味深いモデルを対象に統計力学的手法を用いた解析を行った。その結果、これらが比較的シンプルなモデルであるにもかかわらず非自明なふるまいを示すこと、人間社会とのアナロジーの点でも興味深い性質を有することを明らかにすることができた。

ところで、適応フィルタとして用いられる FIR フィルタと出力関数が線形なパーセプトロンを考えると、両者はいずれも多数の入力と係数の積和を出力するという点でよく似ている。すなわち、両者は多数の入力が毎回生成されるか、ひとつの入力がタップをシフトしていくかの違いを除くと等価である。また、実際の応用において適応フィルタのタップ長は数百に及ぶこともまれではなく、**システムサイズが大きい極限を考える情報統計力学とはもともと非常に相性がよい問題**であると言える。

## 文献

- [1] B. Widrow and M. E. Hoff, Jr., Adaptive switching circuits, IRE WESCON Conv. Rec., Pt.4, 96, 1960.  
 [2] S. M. Kuo and D. R. Morgan, Active noise control: a tutorial review, Proc. of IEEE, 87(6), 943, 1999.

## 2. 研究の目的

適応信号処理の挙動を統計力学的手法を用いて理論的に明らかにすることが本研究課題の目的である。適応信号処理は半世紀の歴史を有し、アクティブノイズコントロールやデータ伝送用等化など現代社会で広く利用されているにも関わらず、驚くべきことにその一般的な理論はこれまで存在しない。本研究の目的は統計力学的手法により適応信号処理の動的・静的性質を一般的に説明する理論を構築することである。また、適応信号処理システムの表面的現象の背後にある本質的なメカニズムを明らかにし、その知見に基づいて新しい高性能な適応アルゴリズムを提案することにより適応信号処理の実応用分野への波及効果を目指す。本研究は信号処理分野に全く新しい理論解析手法をもつ

て挑戦する取り組みであるとともに、情報統計力学に新たなパラダイムを拓く試みである。

適応信号処理において重要な項目のうち、統計力学的手法を用いることにより解析が可能と考えられる以下の内容について網羅的に取り組む。

#### (1) 一次経路に関する解析

一次経路のインパルス応答が適応フィルタのインパルス応答より長い場合の挙動解明

一次経路が時間的に変化する場合の挙動解明

一次経路に実データを用いる場合の解析

#### (2) 二次経路に関する解析

二次経路の推定誤差の影響の検討

二次経路のタップ長が一次経路のタップ長と同じオーダーを持つ場合の解析

#### (3) 定常状態に関する解析

適応フィルタ動作開始後、十分長い時間が経過した時点での二乗平均誤差の解析

二乗平均誤差が収束するためにステップサイズパラメータが満たすべき条件の検討

#### (4) そのほか発展的な解析

マルチチャネル型アクティブノイズコントロールシステムの解析

フィードバック型アクティブノイズコントロールシステムの解析

非線形適応信号処理の解析

アフィン射影アルゴリズムや RLS アルゴリズムを用いる場合の解析

### 3. 研究の方法

適応信号処理により実現されるアクティブノイズコントロールの挙動を統計力学的手法を用いて理論的に明らかにする。Filtered-X LMS アルゴリズムにより更新される適応フィルタの係数ベクトル、それを要素方向にずらしたベクトル、および未知システム係数ベクトルの方向余弦を巨視的変数とし、それらの動的挙動を記述する連立微分方程式を、フィルタのタップ長が十分長いという条件の下で決定論的な形で導き、解析的に解く。その際、独立仮定やステップサイズが小さいという仮定はおかない。理論の検証は計算機実験との比較により行う。

具体的には以下のとおりである。

#### (1) モデルの設定

まず、解析の対象となるモデルを明確にす

る。一次経路  $P_0$  は未知システム  $P$  と二次経路  $C$  の縦続接続であるとする。未知システム  $P$ 、適応フィルタ  $H$ 、二次経路  $C$  はすべて FIR フィルタ（有限インパルス応答フィルタ）でモデル化するものとし、係数ベクトルはそれぞれ  $p, h, c$  とする。また二次経路は一般には未知であるので、適応フィルタの更新の際には、推定値を用いることになる。入力確率的に生成されるとすると、適応フィルタの動的ふるまいも本来は確率的なものになるが、これを決定論的な連立微分方程式で記述するために、係数ベクトルの次元が無大の極限（統計力学では**熱力学的極限**と呼ばれる）を考えるものとする。

#### (2) 巨視的変数のダイナミクスを記述する決定論的な連立微分方程式の導出

FIR フィルタ内のタップ付き遅延線をシフトしていく入力の影響を扱うため、適応フィルタ係数ベクトル  $h$  を要素方向に  $j$  だけずらしたベクトル  $k_j$  を導入する。これが本研究の独創的な点である。すなわち、 $k_j$  を導入することにより、入力がタップ付き遅延線をシフトしていくことによる**時間方向のずれを空間方向のずれに置き換える**ことができる。

$k_j$  を導入したうえで、システムの動的ふるまいを少数の巨視的変数で記述する。具体的には、ベクトル  $p, h, k_j$  の方向余弦が巨視的変数となる。これらのダイナミクスを記述する連立微分方程式を統計力学的手法に基づき導出する。このとき、**二次経路の影響により  $h$  や  $k_j$  の中には過去のタップ入力ベクトルの影響が入っている**ので、**この相関を注意深く取り扱う必要がある**。タップ付き遅延線をシフトしていく入力の影響の取り扱いと、二次経路の影響による相関の取り扱いが、適応信号処理の解析がオンライン学習の解析より困難である本質的な点である。

なお、未知システムや適応フィルタの係数ベクトルのノルムがタップ入力ベクトルのノルムより十分大きいモデルを考えることにしておく。これにより、本来は確率変数である入力の影響をその平均で置き換えることができる（この性質を統計力学では**自己平均性**と呼ぶ）。その結果、**連立微分方程式を決定論的な形で導出できる**ことになる。

#### (3) サンプル平均の計算

導出された決定論的連立微分方程式にはいくつかのサンプル平均、すなわち入力に関する期待値が含まれている。これを解析的に計算する。

#### (4) 微分方程式を解析的、あるいは数値的に解く

解析的に求められたサンプル平均を連立微分方程式に代入し、これを解析的、あるいは数値的に解くことにより、巨視的変数のダイナミクスを理論的に求める。

#### (5) 二乗平均誤差の計算

適応信号処理の理論解析の目的は、二乗平均誤差を理論的に計算することである。解析的、あるいは数値的に求められた巨視的変数を用いて二乗平均誤差を計算する。

#### (6) 計算機実験の実行

以上の理論解析と並行して**計算機実験**を行う。その場合、係数ベクトルやタップ入力ベクトルの次元を無限大とすることはできないので、 $10^2 \sim 10^4$  次元で実行することになる。また、二乗平均誤差の計算のためには  $10 \sim 10^3$  程度のアンサンブル平均を求めることになる。

#### (7) 検証と考察

理論解析の結果と計算機実験の結果を比較検討することにより理論の正当性を検証する。また、計画通り巨視的変数や二乗平均誤差が解析的に得られたならば、二乗平均誤差が発散しない条件や時間が十分経過した後の定常状態、残留二乗平均誤差についても理論的な洞察が行える可能性が高いので、検討・考察を行う。

### 4. 研究成果

- (1) 入力の相関関数を導入することにより、参照信号が白色である場合だけでなく、有色である場合も含む理論を構築することができた。
- (2) 一次経路のタップ入力ベクトルのノルムを表す新たな巨視的変数を導入することにより、一次経路が時間的に変化する場合の解析を実行することができた。
- (3) 固有値解析を適用することにより定常状態の解析を行い、ステップサイズの上限に関する議論を行うことができた。
- (4) 二次経路の推定誤差の影響を定量的に予測できることを検証した。
- (5) アクティブノイズコントロールにおいては一般的には一次経路は時間的に変化する。このような時変な一次経路の場合について検討した。その結果、一次経路の各要素に乱数が重畳されるような単純なモデルの場合、初期においてはステップサイズが存在するものの、時間の経過と

ともに実用的な最適値は消滅することを明らかにした。また、ノルムが一定に保たれるような一時経路のモデルを新たに提案し、解析した。その結果、このようなモデルにおいては誤調整と追従遅れのトレードオフによりステップサイズに最適値が存在することが明らかになった。

- (6) 実験室での測定により得られた現実の一次経路の特性を相関として取り込むことにより理論を拡張することに成功した。
- (7) 二乗平均誤差の初期減少速度と適応速度定数の二種類の評価尺度を導入することにより、適応速度に関する解析と議論を行った。
- (8) 参照マイクロフォン、二次音源スピーカ、エラーマイクロフォンのいずれか、またはすべてが複数存在するアクティブノイズコントロールはマルチチャネル型と呼ばれる。このマルチチャネル型アクティブノイズコントロールのふるまいに関し予備的な検討を行った。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Takashi Fujii, Hidetaka Ito, and Seiji Miyoshi, Statistical-mechanical analysis connecting supervised learning and semi-supervised learning, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, (accepted)

Norihiro Ishibushi, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi, Statistical-mechanical analysis of LMS Algorithm for time-varying unknown system, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.86, No.2, 024803 (5 pages), Feb. 15, 2017.

Takashi Fujii, Hidetaka Ito, and Seiji Miyoshi, Statistical-mechanical analysis of semi-supervised learning and its optimal scheduling, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.85, No.8, 084802 (6 pages), July 14, 2016.

江川暢洋, 梶川嘉延, 三好誠司, 一次経路が時変な能動騒音制御に関する統計力学的解析, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.5, pp.198-204, May 2015.

三好誠司, ベイズ推定に基づく超解像技術, 日本医用画像工学会, Medical Imaging Technology, 査読無, Vol.32, No.3,

pp.170-175, 2014.5

Takahiro Nabetani and Seiji Miyoshi, Online learning through moving ensemble teachers -An exact solution of a linear model-, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.83, No.5, 054801 (6 pages), April 15, 2014.

木下俊貴, 三好誠司, 大画像の複層ベイズ超解像と位置ずれ推定に関する検討, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, 査読有, Vol.6, No.2, pp.119-127, Aug. 2013.

Hiroyuki Kato, Masato Okada, and Seiji Miyoshi, Replica analysis of multiuser detection for code division multiple access with M-ary phase-shift keying, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.82, No.7, 074802 (7 pages), June 2013.

Hiroyuki Kato, Masato Okada, and Seiji Miyoshi, Self-consistent signal-to-noise analysis of CDMA multiuser detection with M-ary phase-shift keying, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.82, No.2, 023802 (3 pages), Jan. 2013.

Ryota Hasegawa, Ken Takiyama, Masato Okada, and Seiji Miyoshi, Image segmentation and restoration using switching state-space model and variational Bayesian method, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.81, No.9, 094802 (7 pages), Aug. 2012.

Kazuyuki Hara and Seiji Miyoshi, Statistical mechanics of on-line ensemble teacher learning through a novel perceptron learning rule, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, Vol.81, No.6, 064002 (6 pages), May 2012.

[学会発表](計49件)

Kiyonori Terauchi, Kimiko Motonaka, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi, Analysis of adaptation rate of the FXLMS algorithm, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2016 (APSIPA ASC 2016), 134 (4 pages) Jeju, Korea, Dec. 15, 2016.

Norihiro Ishibushi, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi, Analytical Study on the Optimal Step Size of the LMS Algorithm,

Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2016 (APSIPA ASC 2016), 52 (4 pages) Jeju, Korea, Dec. 14, 2016.

Takashi FUJII, Hidetaka ITO, and Seiji MIYOSHI, A Theoretical Analysis of Semi-Supervised Learning, The 23rd International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2016), Kyoto, Japan, Oct. 18, 2016. LNCS 9948, pp. 28-36, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-46672-9\_4 [Excellent Paper Award]

Norihiro Ishibushi, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi, Statistical mechanics of feedforward active noise control, STATPHYS26, Poster presentation P-8-61, Palais des Congres - Lyon, France, July 18-22, 2016.

Norihiro Ishibushi, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi, Analysis of the FXLMS algorithm with norm-constant time-varying primary path, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2015 (APSIPA ASC 2015), pp.165-168, Hong Kong, Dec. 18, 2015.

Seiji Miyoshi and Yoshinobu Kajikawa, Statistical-Mechanical Analysis of the FXLMS Algorithm with Actual Primary Path, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2015), pp.3502-3506, Brisbane, Australia, Apr. 21, 2015.

Nobuhiro Egawa, Yoshinobu Kajikawa, and Seiji Miyoshi, Statistical-mechanical analysis of the FXLMS algorithm with time-varying primary path, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference 2014 (APSIPA ASC 2014), 1088 (5 pages), Siem Reap, city of Angkor Wat, Cambodia, Dec. 11, 2014.

Seiji Miyoshi and Yoshinobu Kajikawa, A theory of the FXLMS algorithm based on statistical-mechanical method, International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA2013), pp.638-643, Trieste, Italy, Sep. 5, 2013.

Seiji Miyoshi and Yoshinobu Kajikawa, Statistical-mechanical analysis of the FXLMS algorithm with nonwhite reference signals, IEEE International Conference on

Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP2013) , pp.5652-5656, Vancouver, Canada, May 28, 2013.

Kazushi Ikeda, Hiroaki Hanzawa, and Seiji Miyoshi, Convergence properties of perceptron learning with noisy teacher, Sino-foreign-interchange Workshop on Intelligence Science & Intelligent Data Engineering (IScIDE2012), Nanjing, China, Oct. 15, 2012. Intelligent Science and Intelligent Data Engineering, Lecture Notes in Computer Science, Volume 7751, 2013, pp.417-424

Seiji Miyoshi and Yoshinobu Kajikawa, Theoretical discussion of the Filtered-X LMS algorithm based on statistical mechanical analysis, IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP2012), Ann Arbor, USA, pp.341-344, Aug. 6, 2012.

〔その他〕

<http://www2.itc.kansai-u.ac.jp/~miyoshi/cnt/gyoseki.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三好 誠司 (MIYOSHI, Seiji)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：10270307

### (3) 連携研究者

梶川 嘉延 (KAJIKAWA, Yoshinobu)

関西大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30268312