

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24800022

研究課題名(和文) 頑健なリスク推定量の構成とその最適化問題の信号処理工学への応用

研究課題名(英文) Robust risk estimators and their minimization for signal processing

研究代表者

山岸 昌夫 (Yamagishi, Masao)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：30638870

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：信号処理の諸問題は「推定対象と既知のモデル行列の積に雑音加わった観測値」を用いて対象を推定する問題として定式化され、「推定対象との平均二乗誤差」の最小化が大きな目標となる。しかし、一般に平均二乗誤差の計算は困難であるため、その推定が必要不可欠である。本研究は、平均二乗誤差の頑健な推定量を構成するとともに、「画像復元問題」や「適応アルゴリズムのパラメータ自動決定問題」に応用し、提案推定量の効率的最小化を通して、優れた信号処理アルゴリズムを提案している。

研究成果の概要(英文)：Many signal processing problems can be reduced to estimation problems in linear models: estimating an unknown vector with an observation that is the multiplication of a known model matrix and the unknown vector in the presence of additive noise. In this context, many algorithms attempt to minimize the Mean Squared Error (MSE). However, since evaluation of the MSE requires the exact knowledge of the unknown vector, estimation techniques for the MSE are essential in many practical situations. In this study, we propose robust estimators for the MSE and utilize their efficient minimization techniques in the context of image restoration and parameter tuning of adaptive filtering algorithms.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：信号処理 リスク推定量 画像処理 適応フィルタ 最適化学

### 1. 研究開始当初の背景

信号処理は、適応フィルタや機械学習など、幅広い応用を持つ重要な技術である。信号処理の諸問題は、線形モデルにおける推定問題（「推定対象と既知のモデル行列の積に雑音加わった観測値」を用いて、対象を推定する問題）として定式化される。この問題では「推定対象との平均二乗誤差」を抑圧する推定方法が望ましい。そのため、多くの手法は平均二乗誤差の抑圧を目標として設計されている。しかし、平均二乗誤差の計算には推定対象の情報が必要となるため、その抑圧は困難である。

この困難を解決する方法として、リスク推定量の活用が挙げられる。例えば、Stein's Unbiased Risk Estimator (SURE) [Stein(1981)] は、「平均二乗誤差の不偏推定量」であり、その計算において推定対象の情報を必要としない（観測値、モデル行列、推定に用いる写像の三つ組から計算可能である）ため、SUREの最小化によって、平均二乗誤差の抑圧が期待できる。また、SUREの導出に用いられている強い仮定（「加法雑音はガウス分布に従う」）を緩和し、より一般の場合に適用可能な「一般化 SURE [Eldar 2008]」も提案されている。

しかし、（一般化）SUREにはいくつかの制限がある。(i) SUREを最小にする写像を見つける問題は一般に非凸関数最小化問題や組合せ最適化問題になるため、効率的な解法が知られていない。(ii) さらに、SUREの値を評価するには計算が困難な量（推定に用いる写像の偏微分和）が必要である。(iii) また、悪条件（モデル行列の条件数が非常に大きい）下ではSUREと「推定対象との平均二乗誤差」の乖離が大きくなる性質を有する。特に、信号処理問題に現れるモデル行列は悪条件になることが多いため、(iii)の解消は必要不可欠である。

### 2. 研究の目的

以上を踏まえ、悪条件問題に対して頑健なリスク推定量の構成を実現するとともに、その効率的な最小化アルゴリズムを提案することを目的としている。

### 3. 研究の方法

まず、線形モデルに対して、SUREを拡張し「推定対象との二乗誤差」に対する頑健な推定量を実現する。次に、その推定量の効率的な最小化アルゴリズムを提案する。最後に、以上の成果を信号処理の諸問題に活用する。

### 4. 研究成果

主に画像処理と適応フィルタの文脈で得られた成果を略説する。その他、関連研究の成果が得られているが、ここでは割愛させて頂く。

(1) 悪条件下で頑健なリスク推定量の構成とその効率的な最小化の実現



図1. (左上) 推定対象、(右上) 観測画像、(左下) ランクの全探索によって得られる最適な画像、(右下) 提案法によるランク選択の結果画像

我々は、SUREの計算において現れる「モデル行列の擬似逆行列」が悪条件問題におけるSUREの不安定性の主要因であることを明らかにしている。

この弱点を克服するため、擬似逆行列を必要としないリスク推定量として、「モデル行列と推定対象の積に対する平均二乗誤差の不偏推定量」を提案し、モデル行列が悪条件の場合においても、平均二乗誤差との乖離が小さいことを理論的に明らかにしている。

さらに、上記の提案推定量を用いて悪条件問題の解法である「低階数最小分散擬似不偏推定法 [Yamada and Elbadraoui(2006)]」のランク選択問題を解決している。低階数最小分散擬似不偏推定法は、推定値と推定対象のバイアスを最小に抑えた上で分散の最小化を図る「最小分散不偏推定法の方針」と小さな特異値の影響回避を目的とした「低ランク推定の方針」を融合した手法である。その性能は、ランクを適切に選択することにより、最小分散不偏推定法を著しく上回ることが知られている。しかし、ランクを適切に選択する方法が未解決であり、その選択には多大な労力が必要であった。本研究では、その解決策として「上記の提案推定量を最小にするランクを選択すること」を提案している。また、画像復元問題のモデル行列が持つ特別な構造を用いて、提案法の極めて効率的な実装も実現している。それらの有効性を画像復元問題への応用において確認している。具体的には、提案法が（推定対象との平均二乗誤差を最小にする）最適なランクの優れた近似を実現することを数値的に明らかにしている（図1を御参照）。

### (2) 適応フィルタへの応用

適応フィルタの学習則の設計に対して、推定対象の先験情報を活用し、性能を向上させる手法が広く用いられている。それらは、一般に「先験情報を活用する度合い」を決定す

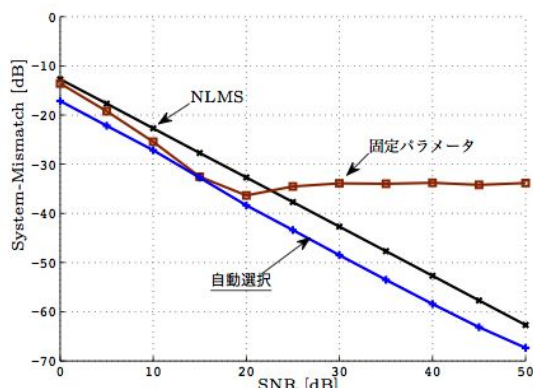


図2. System-Mismatch は推定対象との二乗誤差であり、小さい値が望ましい。SNR を変化させた場合、固定のパラメータでは性能が大きく劣化することがある。一方、提案法では、安定して優れた性能を実現している。

る複数のパラメータを持つため、そのパラメータの選択が優れた性能の実現に不可欠である。

このパラメータ選択問題に対して、(1)の知見を応用し、解決策を提案している。まず、時刻  $k$  において推定対象（即ち、最適なフィルタ）の推定値が得られていると仮定する。次に、パラメータのすべての組み合わせから、「時刻  $k + 1$  のフィルタの候補をすべて集めた集合」を考える。最後に、この集合から最も高い性能が期待できるフィルタを見つけ出し、それに対応するパラメータを選択する（ここで、性能を測る指標の設計に(1)の知見を活用している）。以上の方策により、パラメータ選択問題を解決している。

この方策を用いて、適応前方後方分離型近接点法[村上ら、2010]における、「推定対象のスパース性活用の度合いを決定するパラメータ」の自動選択を実現している。具体的には、フィルタの候補の集合が区分的になることを明らかにし、リスク推定量を導出するとともに、リスク推定量を最小にするパラメータの効率的な算出方法を明らかにしている。最後に、数値実験により、提案手法の有効性を確かめている（図2を御参照）。

## 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 1 件)

Hiroki Kuroda, Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Exploiting Group Sparsity in Nonlinear Acoustic Echo Cancellation by Adaptive Proximal Forward-Backward Splitting, IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E96-A, no. 10, pp. 1918-1927, Oct. 2013 (査読有り).

〔学会発表〕(計 21 件)

Wemer Wee, Masao Yamagishi, Isao

Yamada. Mean-square performance of the hyperslab-based adaptive projected subgradient method, Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Fortezza da Basso:Florence, Italy, May. 9, 2014. Masao Yamagishi, Masahiro Yukawa, Isao Yamada. Shrinkage tuning based on an unbiased MSE estimate for sparsity-aware adaptive filtering, Proceedings of IEEE ICASSP, Fortezza da Basso:Florence, Italy, May. 8, 2014.

Katsuhiro Toyokawa, Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Detecting edges of reflections from a single image via convex optimization, Proceedings of IEEE ICASSP, Fortezza da Basso:Florence, Italy, May. 7, 2014.

Hiroki Kuroda, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Avoiding local trap in nonlinear acoustic echo cancellation with clipping compensation, Proceedings of IEEE ICASSP, Fortezza da Basso:Florence, Italy, May. 6, 2014.

Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Convex optimization for applications to image analysis and processing: With a focus on effective utilization of the nuclear norm, IEICE Technical Workshop on Pattern Recognition and Media Understanding, IEICE Technical Report, vol. 113, no. 431, pp. 147-147, Fukuoka University: Fukuoka, Japan, Feb. 14, 2014 (invited).

Tomida Naoki, Masao Yamagishi, Isao Yamada, Toshihisa Tanaka. A reduced rank estimation of covariance matrices for EEG classification, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Kaikyo Messe Shimonoseki:Yamaguchi, Japan, Nov. 22, 2013.

Hiroki Kuroda, Masao Yamagishi, Isao Yamada. A robust adaptive learning of saturation nonlinearity in acoustic echo cancellation, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Kaikyo Messe Shimonoseki:Yamaguchi, Japan, Nov. 22, 2013.

Masao Yamagishi, Masahiro Yukawa, Isao Yamada. Shrinkage tuning based on an unbiased MSE estimate for the sparsity-aware adaptive proximal forward-backward splitting, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Kaikyo Messe Shimonoseki:Yamaguchi,

Japan, Nov. 22, 2013.  
Katsuhiro Toyokawa, Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Detecting reflection edges from a single image via redundant color information, Proceedings of IEICE SIP Symposium, Kaikyo Messe Shimonoseki:Yamaguchi, Japan, Nov. 20, 2013.

Masao Yamagishi, Shunsuke Ono. 凸然わかる凸最適化, 第 28 回信号処理シンポジウム, 若手研究者のための信号処理ワークショップ, 海峡メッセ下関:山口県, 2013 年 11 月 19 日 (チュートリアル講演).

Masao Yamagishi, Isao Yamada. Exploiting sparsity in feed-forward active noise control with adaptive Douglas-Rachford splitting, Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), 85 Sky Tower Hotel:Kaohsiung, Taiwan, Oct. 30, 2013 (invited).

Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. A sparse system identification by using adaptively-weighted total variation via a primal-dual splitting approach, Proceedings of IEEE ICASSP, pp. 6029-6033, Vancouver Convention & Exhibition Center: Vancouver, Canada, May. 30, 2013.

Masao Yamagishi, Isao Yamada. A rank selection of MV-PURE with an unbiased predicted-MSE criterion and its efficient implementation in image restoration, Proceedings of IEEE ICASSP, Vancouver Convention & Exhibition Center: Vancouver, Canada, May. 28, 2013.

Katsuhiro Toyokawa, Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Detecting reflection from single image based on nuclear norm minimization, IEICE Technical Report, Vol. 113, No. 26, pp. 169-173, Okayama University: Okayama, Japan, May. 17, 2013.

Masao Yamagishi, Isao Yamada. Sparsity-aware feed-forward active noise control with the adaptive Douglas-Rachford splitting, IEICE Technical Report, Vol. 113, No. 27, pp. 151-156, Okayama University: Okayama, Japan, May. 17, 2013.

Masao Yamagishi, Shunsuke Ono, Isao Yamada. Variants of the Alternating Direction Method of Multipliers with Rate of Convergence  $O(1/k)$ , Proceedings of IEICE SIP Symposium, ANA Intercontinental Ishigaki Resort:

Okinawa, Japan, Nov. 29, 2012.  
Takehiko Mizoguchi, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Adaptive projected subgradient method for expanded real systems, Proceedings of IEICE SIP Symposium, ANA Intercontinental Ishigaki Resort:Okinawa, Japan, Nov. 28, 2012.

Masao Yamagishi, Naoto Fukuda, Isao Yamada. 適応射影劣勾配法を用いた能動騒音制御システムに関する一考察, Proceedings of IEICE SIP Symposium, ANA インターコンチネンタル石垣リゾート:沖縄県, 2012 年 11 月 28 日.

Masao Yamagishi, Isao Yamada. An image restoration by the MV-PURE with SURE based rank selection, Proceedings of IEICE SIP Symposium, ANA Intercontinental Ishigaki Resort: Okinawa, Japan, Nov. 28, 2012.

Shunsuke Ono, Masao Yamagishi, Isao Yamada. An adaptive filtering based on a primal-dual splitting characterization, Proceedings of IEICE SIP Symposium, ANA Intercontinental Ishigaki Resort: Okinawa, Japan, Nov. 28, 2012.

- 21 Takayuki Yamamoto, Masao Yamagishi, Isao Yamada. Adaptive proximal forward-backward splitting for sparse system identification under impulsive noise, Proceedings of European Signal Processing Conference (EUSIPCO), The Palace of Parliament: Bucharest, Romania, Aug. 31, 2012.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山岸 昌夫 (Yamagishi Masao)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 30638870

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし