

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 10 日現在

機関番号：13101
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008年度～2011年度
 課題番号：20760252
 研究課題名（和文）不動点理論に基づく機械学習アルゴリズムの構築とその無線通信システムへの応用
 研究課題名（英文）Construction of Machine Learning Algorithm Based on Fixed Point Theory and Its Application to Wireless Communication Systems
 研究代表者
 湯川 正裕（YUKAWA MASAHIRO）
 新潟大学・自然科学系・准教授
 研究者番号：60462743

研究成果の概要（和文）：不動点理論に基づいて、以下の成果を得た。(1) 低ランク適応アルゴリズムを導出し、その収束解析を与えると同時に、少ない計算量で収束速度を大幅に向上できることを示した。(2) 「時間変化する計量」という新しい概念を提案し、数多くの適応アルゴリズムの収束性を統一的に解析するための一般的枠組みを構築した。(3) 「Feasibility Splitting」という既存の概念を適応信号処理に新たに導入することで、複数の領域で表現された情報を効率的に利用できる適応学習アルゴリズムを導出し、その収束解析を与え、SIMO/MIMO 無線通信システムにおける有効性を実証した。

研究成果の概要（英文）：Based on fixed point theory, we have obtained the following outcomes. (1) We have derived a reduced-rank adaptive algorithm, analyzed its convergence properties, and shown that it ameliorates the convergence rate considerably with low computational complexity. (2) We have introduced the new concept of time-varying metric producing a general framework to analyze the convergence properties of a number of adaptive algorithms in a unified fashion. (3) We have imported the concept of feasibility splitting to adaptive signal processing, derived an efficient adaptive algorithm to exploit a variety of information that is expressed in multiple domains, analyzed its convergence properties, and shown its efficacy in SIMO/MIMO wireless communication systems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、通信・ネットワーク工学

キーワード：信号処理

1. 研究開始当初の背景
 機械学習は、自然科学・工学の広範な研究分野において、（環境雑音や受信機器の不完全性等により）不確かな情報しか得ることの

来ない状況に対しても有効なアプローチであることが証明されてきた。機械学習の適用できる応用技術を進展させるために、より優れた性能を持つ機械学習方式の開発に大き

な注目が集まっていた。特に、無線通信システムへの応用では、システムの集積化・小型化・低消費電力化に対する要請に加え、周波数利用効率（単位帯域あたりに送ることができる最大情報量）の大幅な向上が余儀なく求められる。このため、(i) 情報の曖昧さに対するロバスト性に加えて、(ii) 高速で安定した収束性を、(iii) 少ない計算コストで実現する高性能な学習アルゴリズムが待望されていた。これまで数多くの手法が提案されたが、上記 (i)~(iii) の要求を同時に満足する方法は見つかっていなかった。また、これらを統一的に解析しようとする試みもあったが、問題が非線形で複雑なため、全体を矛盾なく覆う理論は確立されていなかった。これらのことが強い動機となり、本研究を実施した。

2. 研究の目的

無線通信システムでは、システムの集積化・小型化・低消費電力化に対する要請に加え、周波数利用効率（単位帯域あたりに送ることができる最大情報量）の大幅な向上が余儀なく求められる。このため、本研究では、(i)情報の曖昧さに対するロバスト性に加えて、(ii)高速で安定した収束性を、(iii)少ない計算コストで実現する高性能な機械学習アルゴリズムを構築することを目的とする。さらに、構築する機械学習アルゴリズムの収束メカニズムの解明も行なう。

3. 研究の方法

(1) 計算量と性能向上を同時に達成するために、低ランク型適応フィルタに着目し、これまでに確立した不動点理論に基づく学習アルゴリズムを低ランク適応フィルタに拡張し、その収束解析と性能評価を行なった。

(2) これまでに提案された優れた適応学習アルゴリズムの中で解析が困難であったものを包括する理論的枠組みを構築するため、計量が時間変化する時変計量適応射影劣勾配法を提案し、その収束解析を行なった。

(3) 研究の目的で述べた(i) - (iii) の性質を同時に満たしたアルゴリズムを構築するためには、利用できる情報を効率的にアルゴリズムへ取り込む必要があることに着目し、複数の領域で表現される先験情報を並列射影によって同時に効率よく利用できる適応学習アルゴリズムを構築し、その収束解析と性能評価を行なった。

(4) 方法(3)のアルゴリズムをSIMO無線通信システムにおける多ユーザ干渉抑圧問題へ応用し、その性能をシミュレーションにより評価した。

(5) 方法(4)の手法をMIMO(Multiple Input Multiple Output)システムへ拡張し、MIMO多重アクセス通信路(MIMO-MAC)における性能をシミュレーションにより評価した。

4. 研究成果

(1) これまでに確立した不動点理論に基づく学習アルゴリズムを低ランク適応フィルタに拡張し、それによって計算量削減と性能向上が同時に達成されることを示すとともに、収束解析を行なった。この手法は、一般に最適フィルタがパラメータ数より少数の信号に基づいて決定されることに着目し、パラメータ空間の入力ベクトルを低次元空間に射影する。この拡張により、学習に必要な訓練データ数を大幅に削減できるため、周波数利用効率が格段に向上する。提案法は、共役勾配法に基づく適応アルゴリズムの拡張として位置付けられ、従来法に新たな知見を与えている(雑誌論文[4])。

(2) 変換領域アルゴリズムや準ニュートンアルゴリズム、Proportionate 適応アルゴリズム、クリロフ比例法を含む数多くの適応アルゴリズムに対して、不動点理論に基づく統一的な解析法(時変計量適応射影劣勾配法)を提案した。これまで解析が困難視されていた上記アルゴリズムに対して、「計量の微変動」という仮定のもとで厳密な収束解析を与えた。また、数値例と解析を照らし合わせることにより、「計量の変動量」と「ステップサイズ」がアルゴリズムの性能に及ぼす影響について考察を与え、その関連性を明らかにした。本成果は、機械学習や隣接分野における多数の学習アルゴリズムに対して理論的枠組みを与え、新しいアルゴリズムを構築する際の有効な指針を提供するものである(雑誌論文[3])。

(3) 「Feasibility Splitting」という概念に基づいて、複数領域(例えば、時間・周波数・空間領域など)における制約を同時に考慮した適応学習問題を提示した。また、不動点理論に基づく「適応射影劣勾配法」において射影勾配作用素と呼ばれる非拡大写像を用いることで、当問題に対する反復解法を導出し、開写像定理を用いて提案法の厳密な収束解析を与えると同時に、提案法の有効性を数値例により検証した。本研究で示した解析は、従来の統計的アプローチとは異なり決定論的なものであるため、観測情報の統計的性質に依存しない(非定常環境も含んだ)解析になっている。本成果は、従来の適応学習パラダイムを、より柔軟に先験情報を取り扱えるよう拡張するものであり、今後の応用の広がりに大きく貢献するものと期待される(雑誌

論文[2])。

(4) 成果(3)で得られたアルゴリズムを SIMO 無線通信システムにおける多ユーザ干渉抑圧問題へ応用し、その有効性を検証した。具体的には、全てのユーザの到来方向推定値が得られている状況を想定し、そのステアリングベクトルから構成される行列を用いて線形変換を定義し、変換領域でのエネルギーに関する制約条件を付加的に導入した。これは付加情報を利用することで受信機設計における情報の欠落を補っていることになり、したがって少ない観測データから高精度な干渉抑圧を実現することができる。更に収束速度を向上させるため、並列射影に基づくオンライン学習アルゴリズムを導出した。今回取り扱った問題は複素空間で定義されるが、 N 次元複素空間(N は受信アンテナ数)から $2N$ 次元実空間への全単射写像を適切に定義することにより、実空間で得られた上述の収束解析を適用できることを明らかにした。数値シミュレーションにより、以下のことを確認した(学会発表論文[3])。

1. 全てのユーザの到来方向推定値が正確なとき、既存アルゴリズムの5%以下の観測データから高精度な干渉抑圧を実現する受信機が設計できる。

2. 全てのユーザの到来方向推定値が正確でないときであっても、変換領域でのエネルギーに関する制約条件を適切に設計することで利得の損失を最小限に抑えることができる。

(5) 成果(4)の手法を MIMO (Multiple Input Multiple Output) システムへ拡張し、MIMO 多重アクセス通信路 (MIMO-MAC) における有効性を実証した。これにより、(i)情報の曖昧さに対するロバスト性に加えて、(ii)高速で安定した収束性を、(iii)少ない計算コストで実現する高性能な機械学習アルゴリズムを構築することができる(学会発表論文[5], 学術雑誌に投稿中)。更に、近年、信号処理・情報理論などの分野で注目を集めている圧縮センシングのアイディアを利用したスパース適応アルゴリズムを提案し、スパースな未知系に対して収束速度を著しく改善できることを実証した(国際会議「IEEE International Symposium on Circuits and Systems: 2012年5月、ソウル」にて発表予定)。

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8件: 全て査読有)

① Masahiro Yukawa and Wolfgang

Utschick, "A fast stochastic gradient algorithm: Maximal use of sparsification benefits under computational constraints," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E93-A, no. 2, pp. 467-475, February 2010.

② Masahiro Yukawa, Konstantinos Slavakis, and Isao Yamada, "Multi-domain adaptive learning based on feasibility splitting and adaptive projected subgradient method," IEICE Trans. Fundamentals, vol. E93-A, no. 2, pp. 456-466, February 2010.

③ Masahiro Yukawa and Isao Yamada, "A unified view of adaptive variable-metric projection algorithms," EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2009, Article ID 589260, pp. 1-13, 2009.

④ Masahiro Yukawa, Rodrigo C. de Lamare, and Isao Yamada, "Robust reduced rank adaptive algorithm based on parallel subgradient projection and Krylov subspace," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 57, no. 12, pp. 4660-4674, December 2009.

⑤ Masahiro Yukawa, "Krylov-proportionate adaptive filtering techniques not limited to sparse systems," IEEE Trans. Signal Processing, vol. 57, no. 3, pp. 927-943, March 2009.

⑥ Masahiro Yukawa, Rodrigo C. de Lamare, and Raimundo Sampaio-Neto, "Efficient acoustic echo cancellation with reduced-rank adaptive filtering based on selective decimation and adaptive interpolation," IEEE Trans. Audio, Speech and Language Processing, vol. 16, no. 4, pp. 696-710, May 2008.

[学会発表] (計30件)

① Masahiro Yukawa, "Rank-selection criterion for Krylov-subspace-based adaptive filtering techniques", in Proc. International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICSP): Special Session on Adaptive Filtering and Their Applications, Singapore, 2011年12月15日 (INVITED paper).

② Masahiro Yukawa and Shun-ichi Amari, "On extensions of LARS by information geometry: convex objectives and lp-norm",

in Proc. Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2011): Special Session on Recent Advances in Adaptive/Sparse Signal Processing, Xi'an: China, 2011年10月19日.

③ Masahiro Yukawa and Isao Yamada, "Adaptive beamforming by simultaneous projection in dual domains," The 7th International Workshop on Multidimensional (nD) Systems, Special Session: Multidimensional systems and signal processing research in Asia, Mo2.3, Poitiers: France, 2011年9月5日, (INVITED paper).

④ Masahiro Yukawa and Isao Yamada, "A deterministic analysis of linearly constrained adaptive filtering algorithms," European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp.131--135, Barcelona: Spain, 2011年8月30日.

⑤ Masahiro Yukawa, Youngchul Sung, and Gilwon Lee, "Adaptive interference suppression in MIMO multiple access channels based on dual-domain approach," International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC 2011): Special Session on Advanced Communication and Signal Processing in Multiuser Communications under Interference Environment, Gyeongju: Korea, 2011年6月20日.

⑥ Masao Yamagishi, Masahiro Yukawa, and Isao Yamada, "Acceleration of adaptive proximal forward-backward splitting method and its application to sparse system identification," in Proc. 36th IEEE ICASSP, pp.4296--4299, Prague: Czech, 2011年5月27日.

⑦ Masahiro Yukawa and Isao Yamada, "Two product-space formulations for unifying multiple metrics in set-theoretic adaptive filtering," in Proc. 44th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, pp.1010--1014, Pacific Grove: CA, 2010年11月9日.

⑧ Masahiro Yukawa and Isao Yamada, "Minimal antenna-subset selection under capacity constraint for power-efficient MIMO systems: A relaxed L1 minimization

approach," in Proc. 35th IEEE ICASSP, pp.3058--3061, Dallas: Texas U.S.A., 2010年3月18日.

⑨ Masahiro Yukawa and Isao Yamada, "A deterministic analysis of variable-metric adaptive filtering algorithms under small metric-fluctuations," in Proc. 35th IEEE ICASSP, pp.3730--3733, Dallas: Texas U.S.A., 2010年3月16日.

⑩ Masahiro Yukawa, Konstantinos Slavakis, and Isao Yamada, "Multi-domain adaptive filtering by feasibility splitting," in Proc. 35th IEEE ICASSP, pp.3814--3817, Dallas: Texas U.S.A., 2010年3月17日.

⑪ Masahiro Yukawa and Wolfgang Utschick, "Proportionate adaptive algorithm for nonsparse systems based on Krylov subspace and constrained optimization," in Proc. 34th IEEE ICASSP, pp.3121--3124, Taipei: Taiwan, 2009年4月21日.

⑫ Masahiro Yukawa, "Krylov-proportionate NLMS algorithm based on multistage Wiener filter representation," in Proc. 33rd IEEE ICASSP, pp.3801--3804, Las Vegas: NV, 2008年4月1~4日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯川 正裕 (YUKAWA MASAHIRO)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：60462743

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：