

平成 2 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560531

研究課題名（和文）フィードバック誤差学習と統計学習によるロボットアームの運動制御と監視

研究課題名（英文）Motion control and monitoring of robot arm via feedback error learning and statistic learning

研究代表者

杉本 謙二（Sugimoto, Kenji）

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：20179154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,200,000 円、（間接経費） 1,260,000 円

研究成果の概要（和文）：フィードバック誤差学習を適応学習制御の手法として発展・深化させること、および近年、大きく進展した統計学習の手法をフィードバック誤差学習の双対的な立場で検討し、両者を相補的に活用してロボットアームの運動制御や監視を達成すること、の二つが研究目的であった。前者については、制御則と学習則の分離によってこれまで未解決だった閉ループ系への影響を遮断することができ、さらに単独でなく多数の線形フィルタを並列させるフィルタバンク構成に拡張することにより非線形性にも対処できる強力な学習制御の手法を開発できた。一方、後者については理論は完成したもののシミュレーションが期待通りの結果を示さない状態に留まっている。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this research are 1) to expand/deepen feedback error learning as a scheme for adaptive learning control, and 2) to examine a statistic learning technique, which has made a lot of progress recently, from a dual viewpoint of feedback error learning, thereby making full use of the both approaches complementary in order to attain motion control/monitoring of robot arms. The former is successful in that separating control/learning laws has enabled to delete the effect to closed-loop and that at generalization to a single filter to a filter bank has lead to a powerful learning control scheme that can treat nonlinearity. On the other hand, concerning the latter, our simulation result has not given what we had expected in advance. We are currently investigating reasons why this does not work well.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論 適応学習制御 フィードフォワード オンライン同定 2自由度構造 マルチモデル 非線形システム ロボットアーム

1. 研究開始当初の背景

フィードバック誤差学習 (Feedback Error Learning; FEL) は生体の運動学習モデルとして川人らが提案して以来、生理学や人間工学など多方面で注目されている。神経の伝達速度は電気信号よりはるかに遅く、フィードバックだけでは精密な運動はできない。そのため、フィードバック誤差に基づいてフィードフォワードを調整することにより高精度な運動を獲得するというのが FEL のモデルである。

川人らはこの機構をニューラルネットによって実装し検証したが、木村のグループは線形時不変の制御対象に対して線形フィルタと可調整パラメータによるフィードフォワード制御器を提案し、制御工学の観点から深い洞察を加えている。彼らは FEL をよく知られた 2 自由度構造の枠組みで捉え、制御対象の相対次数による応答遅れをプレフィルタで補償した上で、フィードバック誤差を減少させる調整則を勾配法によって与えた。さらに、学習の安定性のある種の正実性条件の下で証明した。これらは適応制御において得られた知見を生体モデルとしての FEL に導入するという意味で両分野の融合につながる有意義な研究である。さらに木村のグループは機械学習の分野で知られている Lazy learning の発想を FEL と対比させ、自動車業界で有名な Just-in-time (JIT) 生産方式をヒントにした JIT モデリングによるフィードフォワード制御法を提唱した。この発想は企業の制御技術者にも広く注目され、本来の生産方式に留まらず制御技術の観点からも研究が進められている。ただし研究代表者の知る限り、動的な制御対象への設計理論としては提唱された段階から大きく進展はしていない。

一方、村松らはフィードバック誤差の学習機構を修正し、正実性条件を満たさなくても安定に学習できる FEL の手法を開発した。勾配法に基づく学習則に比べ、線形誤差モデルによってパラメータを調整するため設計理論としても優れており、そのため海外でも幾つかの関連研究が生まれた。

これらの研究に触発され、研究代表者らのグループは数年間にわたって線形制御理論の立場から FEL 設計理論の深化に取り組んできた。多入力多出力系への拡張や PE (Persistent Excitation) 性の問題の検討、簡単なロボットアームによる検証実験、忘却係数付き逐次最小 2 乗法による学習則の改良、およびプレフィルタ統合型 FEL への拡張などである。

一方、統計学習の手法をプラント制御系の監視に応用する試みは、加納らを初めとして各地で活発に行われている。研究代表者らも、信号処理の分野で大きな進展を遂げた独立成分分析 (Independent Component Analysis; ICA) を外乱抑制や変化検出に適用する研究を進めてきた。これまで主に音声や

生体信号処理の分野で定評を得ていたブラインド信号分離の手法を機械振動の同定に適用することを目指し、様々な研究を進めてきた。

2. 研究の目的

FEL と ICA はともに制御工学とは別の分野における必要性から始まった手法であるが、逆システムを学習によって構築 (つまりパラメータを調整) するという点では共通している。特に多入力多出力系ではシステムの結合は可換でない (順序を交換できない) ため、これらは双対的な位置にあり、まったく等価ではないが相互に深い関連がある。そこで、これらの分野で得られた知見を活かし、さらに新たな工夫を加えることによって両手法を統合し、制御と計測の新しい技術として確立できれば望ましいと考えた。具体的には次のような課題に取り組む計画を立案した。

(1) プレフィルタ統合型 JIT 制御への拡張
汎用の (大域的な) モデルを得た上で制御系を設計する通常的手法とは異なり、動作中の状況に応じて臨時に (Lazy に) モデルを作るのが JIT のアプローチであり、FEL とも整合性は良い。そこで、我々がこれまで明らかにしてきたプレフィルタ統合型の 2 自由度構成に Lazy 化された学習則を適用することにより JIT 制御の新しい手法として提案する。

(2) モデル予測制御・離散値制御への拡張
モデル予測制御は既に多方面で活用されている。また、離散値制御はアクチュエータの能力が限られ、連続値が操作できない場合 (例えば操作量がオン・オフのみ) の手法であり、今後は需要が増すものと考えられるが、理論的にはまだ発展の余地が多々ある。そこで FEL の知見を活かしてこれらの手法に独自の切り口で挑むことを計画した。

(3) 統計学習を用いたアーム異常検出とプロセス監視技術の提案

ICA による振動解析をロボットアームに適用し、異常を検出する機構に発展させることを計画した。

3. 研究の方法

プレフィルタ統合型 JIT 制御への拡張については、既存の JIT 制御では入出力信号をそのまま記憶し、オンラインで類似のパターンを query として探索する。これに対し本研究では予め多数のフィルタを並列に用意しておき、現在の動作点をスケジューリング変数として使い、対応するフィルタを選んで入出力の挙動から回帰計算のためのデータを蓄積しておく。一方、フィードフォワード信号を生成するためには蓄積されたデータから現在の動作点における逆モデルをオンラインで計算するという手法を考案し、この学習法を Scheduled Locally Weighted Regression

(S-LWR)と名付けた。そして、SICE DD arm と呼ばれる 2 リンクロボットアームでは物理パラメータが公開されているので、これを利用したモデルによって提案手法をシミュレーション評価する。タスクとしては、かつて我々が実験で試みた一筆書きを想定し、アームの先端に の文字を描かせる。

モデル予測制御・離散値制御については後回しとし、ICA による異常検出に取り組むため、理論を整備する。動的な混合に対する ICA としては幾つかの手法が信号処理の分野で開発されているが、制御工学、特に機械振動系で扱う周波数は音声より低いことが多く、一方で同定の実験期間があまり長いのは望ましくないため、少ないサンプル数でも十分に精度良く推定ができる手法が必要である。例えば FIR (Finite Impulse Response) による近似解法では推定パラメータがかなり多くなり、その結果少なくとも数万のサンプル数が必要とされる。また、制御では対象の物理的考察からモデル次数を先験情報として与えることも多いため、この点からも推定パラメータの数をある程度限定した学習則が望まれる。

そこで、分離系(Mixer)にもフィードバック構造を導入し、フィードフォワードとともに独立性の評価規範が逐次的に最適化されるよう調整する手法を考案した。理論上これで目的を達成することができると考えたが、シミュレーションでは収束に至らず、この問題の解明に期間と労力の多くを費やすという事態になった。

一方、ICA 以外の学習手法として PCA およびサポートベクターマシンに着目し、センサネットワークで得られる海洋波の状態を監視して異常を知らせるという問題設定に取り組み、ある程度良好な性能が得られた。

4. 研究成果

研究開始時点においては村松らの学習則の問題点を強く認識していたが、これは制御と学習の分離によって解決された。また、非線形性への対処もフィルタバンクによって概ね可能となるなど、FEL の理論研究は大きく進展したものと考えている。非線形システムにおける近似精度をさらに向上させるため、補間によるモデル構築にも取り組み、成果を国際会議へ投稿中である。

一方、多入力多出力系への FEL については、行相対次数が一樣であるなどの大きな仮定が依然として必要であり、課題として残されている。また、統計学習による監視については ICA の手法が現時点で成功していないため研究を継続している。

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 9 件)

1) 松本匡史, 土居昭博, 杉本謙二, スケジュール化された局所重み付き回帰によるフィードフォワード学習制御, システム制御情報学会論文誌, 27 巻, 6 号, 2014 (採録決定), 査読有

2) K. Sugimoto, A. Doi, and T. Matsumoto, Feedforward Learning Control by Scheduled Locally Weighted Regression, IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing (ALCOSP 2013), Caen, France, July 3, pp. 239-244, 2013, 査読有

3) M. Marimon, D. Tanaka, and K. Sugimoto, Improved Blind Deconvolution Scheme for System Identification, SICE Annual Conference, pp. 505-510 in Proceedings, Nagoya, September 15, 2013, 査読有

4) M. Marimon, D. Tanaka, and K. Sugimoto, A Scheme for Independent Component Analysis via Adjoint Polynomial Matrix, The 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Application, Ryukyu University, Okinawa, November 2, SB3-1, pp. 161-162, 2013, 査読有

5) 鈴木新, 杉本謙二, 調理家電における計測と制御, リレー解説: 社会を支え、暮らしに息づく『制御』《第 10 回》, 計測と制御, 51 巻 9 号, pp. 868-873, 2012, 査読無

6) D. Tanaka, T. Hirotani and K. Sugimoto, Blind identification of polynomial matrix fraction for disturbance rejection, 7th IFAC Symposium on Robust Control Design (ROCOND'12), pp. 69-74, June 20, 2012, Aalborg, Denmark, 査読有

7) M. Marimon and K. Sugimoto, Threshold Design for Low Cost Wave Sensors Through Statistical Analysis of Data, IEEE SOSE 2012 7th International Conference on System of Systems Engineering, Genova, Italy, July 16-19, 2012, 査読有

8) 野口慎, 杉本謙二, 逆システムの直列結合による仮想フィードバック誤差学習, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.2, pp. 93-101, 2012, 査読有

9) Y. Matsubara, M. Noguchi, A. Satoh and K. Sugimoto, Virtual Feedback Error Learning Control, SICE Annual Conference 2011, pp. 1715-1720, September 13 - 18, Tokyo, 2011, 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

1) 松本匡史, 杉本謙二, 線形近似が零点を持つ制御対象への Scheduled LWR 学習制御, 第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 7D5-3 (USB), 2014 年 3 月 7 日, 電気通信大学

2) 松本匡史, 杉本謙二, 零点を持つ制御対象へのフィードフォワード学習制御 学習則と制御則の分離, 第 56 回 自動制御連合講

演会, pp. 370-372 in CDROM, 2013 年 11 月 16 日, 新潟大学

3) Maricris Marimon, 田中大介, 杉本謙二, 随伴多項式行列による独立成分分析とセミブラインド同定, 第 56 回 自動制御連合講演会, pp. 1263-1264 in CDROM, 2013 年 11 月 17 日, 新潟大学

4) 杉本謙二, 松本匡史, 土居昭博, Just-in-time フィードフォワード制御のためのオンライン同定, 第 57 回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCT'13), 321-4 (DVD), 2013 年 5 月 17 日, 兵庫県民会館

5) 土居昭博, 杉本謙二, スケジュール化された局所重み付き回帰によるフィードフォワード制御器の学習, 第 13 回計測自動制御学会制御部門大会, pp. 977 - 982, ポスター発表 2013 年 3 月 6 日, 口頭発表 3 月 8 日, アクロス福岡

6) 松本匡史, 土居昭博, 杉本謙二, 簡易型 2 自由度構成によるフィードフォワード学習制御と 2 リンク柔軟アームへの応用, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, pp.13-16, 2013 年 1 月 18 日, 学校法人常翔学園 大阪センター

7) 土居昭博, 杉本謙二, Scheduled LWR によるフィードフォワード制御器の学習, 第 55 回自動制御連合講演会, pp. 831-834, 2012 年 11 月 17 日, 京都大学

8) M. C. Marimon, 杉本謙二, Designing Threshold Criteria for Low Cost Wave Sensors using Statistical Data Analysis, 第 55 回自動制御連合講演会, pp. 669-672, 2012 年 11 月 18 日, 京都大学

9) 松原大和, 杉本謙二, プレフィルタとフィードフォワード制御による逆ダイナミクスの学習, 第 3 回プラントモデリング・第 12 回適応学習制御合同シンポジウム, pp. 49-52, 2012 年 4 月 12 日, 東京工業大学

10) 片岡荘太, 杉本謙二, 局所重み付き回帰によるフィードフォワード制御の設計と移動ロボット実験, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012 年 3 月 14 日, 奈良県文化会館

11) 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, 半正定値計画問題によるネットワーク仮想化に適した物理ネットワークのトポロジ設計法, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2012 年 3 月 8 日, 宮崎市

12) 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, 仮想ネットワークの構築に適した物理ネットワークの設計技術の検討, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2012 年 1 月 26 日, 那覇市

13) 片岡荘太, 杉本謙二, 逆システムの Lazy Learning による適応制御, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011 年 11 月 19 日~20 日, 豊橋技術科学大学

14) 森美華, 橋拓至, 平田健太郎, 杉本謙二, ロバストな仮想ネットワークを提供するための物理ネットワーク設計法の検討,

2011 年 9 月 26 日, 神戸市

15) 広谷拓也, 齊藤紀彦, 杉本謙二, FIR 近似的学習則を射影した IIR フィルタによるブラインド信号分離, 第 55 回 システム制御情報学会研究発表講演会 (SCT'11), pp. 475-476, 2011 年 5 月 17 日, 大阪大学 吹田キャンパス

〔その他〕

招待講演 (計 2 件)

1) K. Sugimoto, Feedback Error Learning: From Biological Model To Control Engineering: A Multi-model Perspective, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia, 5 May, 2014

2) K. Sugimoto, Blind Signal Deconvolution and Learning Feedforward Control: Two Applications of On-line Inverse Dynamics Learning, Laboratory for Analysis and Architecture of Systems, CNRS, France, 8 July, 2013

アウトリーチ活動 (計 3 件)

1) 杉本謙二, これだけは知っておきたいビッグデータ解析, 第 4 回けいはんな植物工場ネットワーク会議, けいはんなプラザ, 京都府相楽郡精華町光台, 2 月 5 日, 2013

2) 杉本謙二, 計測制御にできること・できないこと, 第 1 回けいはんな植物工場ネットワーク会議, けいはんなプラザ, 京都府相楽郡精華町光台, 7 月 6 日, 2012

3) 杉本謙二, 情報科学から見た植物工場, けいはんなプラザ, 相楽郡精華町光台, アグリバイオ研究会, 9 月 2 日, 2011

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 謙二 (SUGIMOTO KENJI)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・教授

研究者番号: 20179154

(2) 研究分担者 (23 年度のみ)

橋 拓至 (TAKUJI TACHIBANA)

福井大学・工学部・准教授

研究者番号: 20415847

(3) 研究協力者

鈴木 新 (ARATA SUZUKI)

和歌山大学・システム工学部・光メカトロニクス学科・講師 (博士後期課程修了生)

田中 大介 (DAISUKE TANAKA)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・博士後期課程学生

Maricris Marimon

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・博士後期課程学生

このほか、博士前期課程学生数名