

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25年 6月 12日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21760327

研究課題名（和文） 統計的アプローチを用いた非線形システムの学習制御

研究課題名（英文） Learning control of nonlinear systems based on a statistical approach

研究代表者

藤本 健治 (KENJI FUJIMOTO)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10293903

研究成果の概要（和文）：本研究では、統計的アプローチと制御理論の融合を目指し、統計的学習手法を用いた制御系の推定・学習と制御に関する以下の成果を得た。変分ベイズ手法を用いた状態空間モデルのシステム同定に関する研究、時変の確率的なパラメータ変動を含む制御系の最適制御手法、時変・時不変の確率的なパラメータ変動を含む制御系の状態推定手法、などの方法を開発した。また数値シミュレーションを用いて、これらの手法の効果を確認した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to provide a novel control theory of system identification, state feedback optimal control and state estimation for systems with stochastic parameters. Furthermore, their effectiveness is evaluated through numerical simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：制御工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：学習制御、統計的学習、最適制御、ベイズ学習

1. 研究開始当初の背景

申請者の専門分野は制御工学のなかでも制御理論と呼ばれる分野であり、この分野の成果の多くは、モデルが正確にわかっている場合に制御系設計・解析手法を与えるものである。しかし現実の制御対象のモデルは正確にはわからないことが多く、運転データからモデルを構築したり、データから直接制御系の解析や設計できることが望まれている。一方システム工学や機械学習の分野では、データからパラメータやモデルを統計的に推定する手法が整備さ

れつつある。このような背景のもとで、制御工学に統計的学習手法を持ち込み、データドリブンな新たな制御系設計・解析手法が望まれていた。

2. 研究の目的

上記のような背景のもとで、本研究の最終的な目標は、制御工学と統計的学習理論を融合し、制御工学を、従来のモデルベースの手法からデータを直接扱える方法へ転換させることにある。そのための具体的な目標として、(i)状態方程式で表されたシステムに対して統計的学習理論に基づくシステム同定手

法の開発、(ii)統計的学習によって得られた統計的モデルをうまく制御するための新しい確率最適制御の枠組みの提案、さらに(iii)同じく得られた統計的モデルのための状態推定手法、の3つを開発することを設定し、研究を行った。

3. 研究の方法

上記の目的(i)~(iii)の達成のために、以下のような方法で取り組んだ。

(i) 変分ベイズ法に基づく状態空間モデルの推定：変分ベイズ法とは、ベイズ学習の近似手法の一つであり、複数の推定パラメータを互いに独立な組に分けて交互に推定してゆくアルゴリズムである。本研究では状態空間モデルの推定にこの手法を適用し、システムパラメータと内部状態の両方を同時にベイズ学習する手法を提案した。

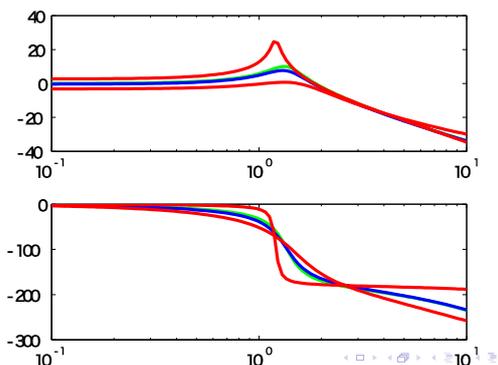
(ii) 確率パラメータを有する系のための確率最適制御：上記のステップにおいて、状態空間モデルのパラメータのベイズ学習が可能になり、システムパラメータが統計的データとして与えられることになる。このようにして得られたシステムパラメータの統計量は、従来の制御法ではうまく利用できないため、このモデルを活用するための確率最適制御(状態フィードバック)を開発した。

(iii) 確率パラメータを有する系のための状態推定：上記(ii)のステップで得られた結果は状態フィードバック制御則であり、より一般的な問題設定である出力フィードバックによる制御を行うためには、状態推定機が必要となる。Moving Horizon 推定と呼ばれる手法を拡張することで、確率パラメータを有する系に対する状態推定手法の開発を行った。

4. 研究成果

上記(i)~(iii)のステップにおいて、所望の成果を達成し、これらを一連の設計手順とすることで、当初の目標であった統計的学習を用いてデータから直接モデルや制御系を設計する手法が確立できた。

図1 変分ベイズによるシステム同定



(i)においては、座標変換によらず、状態空間表現に取って自然な変分ベイズ学習アルゴリズムが得られた。制御対象とその推定モデルの伝達関数を図1に示す。なお図の青線が真の制御対象であり、緑が推定値、赤は分散の幅を表している。

(ii)においては従来の確立最適制御を含む自然な形(ではあるが、従来のRiccati型の制御則とは異なる)の制御則が得られている。この制御則を用いた制御の初期値応答を図2に示す。左図が従来のLQ最適制御、右図が提案法であり、提案法では状態のばらつきを抑制できていることが確認できる。

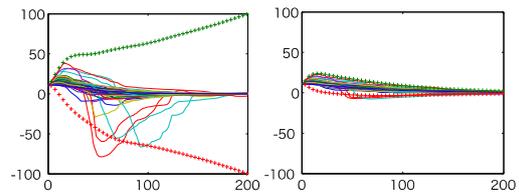
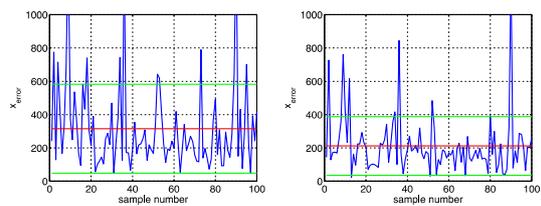


図2 確率最適制御

(iii)に関しては、従来のカルマンフィルタを自然に拡張した形の状態推定器が得られ、ばらつきを含む制御対象に対して、従来よりも精度の高い推定を実現している。この様子を図3に示す。図の横軸は確率パラメータのサンプル番号であり、縦軸は推定誤差のノルムを表している。青線は各サンプルに対する推定誤差を、赤線はその平均値、緑線はその分散の幅を示している。左図が従来のカルマンフィルタ、右図が提案法であり、 μ は誤差の平均、 σ は誤差の標準偏差を表しており、提案法の方が平均的に誤差を抑制しており、誤差のばらつき σ も小さくできており、推定精度が向上していることが確認できる。



$\mu = 314.9, \sigma = 266.7$ $\mu = 211.9, \sigma = 176.0$

図3 確率 Moving Horizon 推定

このように、当初の目的をある程度達成する一連の成果が得られた。これらはデータから制御系の設計・解析を行えるという意味で、従来よりも実用性の高いものであり、重要な成果が得られと考えている。またこれらの枠組みは理論的にも新しいものであり、制御理論の新しい方向性を示唆する成果ともなっている。

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 15 件)

1. 藤本 健治, 渡邊 敏章, 橋本 芳宏, 西田 吉晴, 時変の確率最適制御を用いた板厚制御におけるばらつき抑制, 鉄と鋼, Vol.99, No.1, 2013, pp.12-19, 査読有
2. K. Fujimoto, S. Sakai and T. Sugie, Passivity based control of a class of Hamiltonian systems with nonholonomic constraints, Automatica, Vol.48, 2012, pp.3054-3063, 査読有
3. 藤本 健治, 佐藤 彰記, 福永 修一, 変分ベイズ法に基づいた状態空間モデルのシステム同定, 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.2, 2012, 査読有
4. K. Ozaki, T. Ohtsuka, K. Fujimoto, A. Kitamura and M. Nakayama, Nonlinear receding horizon control of thickness and tension in a tandem cold mill with a variable rolling speed, ISIJ International, Vol.52, No.1, 2012, pp.87-95, 査読有
5. T. C. Ionescu, K. Fujimoto and J. M. A. Scherpen, Singular value analysis of nonlinear symmetric systems, IEEE Trans. Automatic Control, Vol.56, No.9, 2011, pp.2073-2086, 査読有
6. S. Satoh and K. Fujimoto, Repetitive control of Hamiltonian systems based on variational symmetry, Systems and Control Letters, Vol.60, No.9, 2011, pp.763-770, 査読有
7. 藤本 健治, 小川 空記, 太田 祐平, 中山 万希志, 確率パラメータをもつ線形系の分散抑制最適制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.47, No.7, 2011, pp.301-309, 査読有
8. 佐藤 訓志, 藤本 健治, 玄 相晃, 不連続な状態遷移を考慮した学習最適制御による歩行軌道の生成手法, 日本ロボット学会誌, Vol.29, No.2, 2011, pp.212-222, 査読有
9. K. Fujimoto and J. M. A. Scherpen, Balanced realization and model order reduction for nonlinear systems based on singular value analysis, SIAM Journal on Optimization and Control,

Vol.48, No.7, 2010, pp.4591-4623, 査読有

10. 佐藤 訓志, 藤本 健治, オブザーバに基づく機械系の確率的軌道追従制御について, 計測自動制御学会論文集, Vol.46, No.2, 2010, pp.106-113, 査読有
11. T. C. Ionescu, K. Fujimoto and J. M. A. Scherpen, Dissipativity preserving balancing for nonlinear systems: a Hankel operator approach, Systems & Control Letters, Vol.59, Nos.3-4, 2010, pp.180-194, 査読有

[学会発表] (計 24 件)

1. Z. Hao and K. Fujimoto, Optimal trajectory generation for linear systems based on double generating functions, To appear in Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, 2012.12.10-13
2. K. Fujimoto: On subspace balanced realization and model order reduction for nonlinear interconnected systems, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, 2012.12.10-13
3. S. Shimoda, K. Fujimoto, T. Yamamoto, I. Maeda and H. Kimura, Stability analysis of tacit learning based on environmental signal accumulation, Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Algarve, Portugal, 2012.10.7-12
4. T. Watanabe, K. Fujimoto, Y. Hashimoto and Y. Nishida, Variance suppression for gauge control via stochastic optimal control, Proceedings of IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries, Gifu, Japan, pp.274-275, 2012.9.10-12
5. Z. Hao and K. Fujimoto, Approximate solutions to the Hamilton-Jacobi Equations for generating functions with a quadratic cost function with respect to the input, Proceedings of IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, Bertinoro, Italy, pp.194-199, 2012.8.29-31

6. K. Fujimoto, A. Satoh and S. Fukunaga, System identification based on variational Bayes method and the invariance under coordinate transformations, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA, pp. 3882-3888, 2011.12.12-15
 7. K. Fujimoto, Y. Ota and M. Nakayama: Optimal control for linear systems with stochastic parameters for variance suppression, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA, pp.1424-1429, 2011.12.12-15
 8. S. Satoh, K. Fujimoto and S.-H. Hyon, Periodic gait generation via repetitive optimal control of Hamiltonian systems, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp.6912-6917, 2011.8.28-9.2
 9. K. Fujimoto, S. Ogawa, Y. Ota and M. Nakayama, Optimal control of linear systems with stochastic parameters for variance suppression: The finite time horizon case, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp.12605-12610, 2011.8.28-9.2
 10. K. Fujimoto and Y. Hasegawa, On convergence rate of distributed consensus for homogeneous graphs, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, Milan, Italy, pp.10032-10037, 2011.8.28-9.2
 11. S. Satoh and K. Fujimoto, A symmetric structure of variational and adjoint systems of stochastic Hamiltonian systems, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, USA, pp.1423-1428, 2010.12.15-17
 12. K. Fujimoto, S. Ono and Y. Hayakawa, Controller reduction for linear systems based on subspace balanced realization, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Atlanta, USA, pp.5362-5367, 2010.12.15-17
 13. S. Satoh and K. Fujimoto, Stabilization of Time-varying Stochastic Port-Hamiltonian Systems Based on Stochastic Passivity, Proceedings of IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Bologna, Italy, pp.611-616, 2010.9.1-3
 14. S. Satoh, M. Ikeda, K. Fujimoto and Y. Hayakawa, Modification of learning optimal gait generation method in considering discontinuous velocity transitions, Proceedings of SICE Annual Conference, Taipei, Taiwan, pp.2794-2799, 2010.8.18-21
 15. K. Fujimoto and S. Ogawa, Variational symmetry of discrete-time Hamiltonian systems and learning optimal control, Proceedings of Mathematical Theory on Networks and Systems, Budapest, Hungary, pp.1153-1158, 2010.7.5-9
 16. T. C. Ionescu, K. Fujimoto and J. M. A. Scherpen, Positive and bounded real balancing for nonlinear systems: a controllability and observability function approach, Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, R.P. China, pp.4310-4315, 2009.12.16-18
 17. T. C. Ionescu, K. Fujimoto and J. M. A. Scherpen, The cross operator and the singular value analysis for nonlinear symmetric systems, Proceedings of European Control Conference, Budapest, Hungary, pp.1565-1570, 2009.8.23-26
- [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]
- ホームページ等
<http://control.kuaero.kyoto-u.ac.jp/>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 藤本 健治 (FUJIMOTO KENJI)
 京都大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号: 10293903
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者 なし