

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06492

研究課題名(和文) 統計的制御手法の開発と航空宇宙への応用

研究課題名(英文) New development of statistical control theory and its application to aerospace engineering

研究代表者

藤本 健治 (Fujimoto, Kenji)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10293903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、制御工学に機械学習や統計的データ学習の方法を導入し、データに基づく制御系設計を行う手法を提案した。さらにその成果を航空宇宙工学の諸問題に応用することを目指した。この目的のために、データや統計量を扱える制御工学の新しいアルゴリズムの開発と、航空宇宙工学の諸問題を解決するための制御理論の開発の2つの方向性の研究を行なった。前者の研究としては変分ベイズやガウス過程回帰を用いたデータ制御手法の開発し、後者の研究としてはばらつきをもつ宇宙機の軌道計画法とロバストな姿勢制御手法を開発した。以上により、統計的学習に基づく制御手法の基盤技術が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年注目を集めているAIやビッグデータを扱う方法を、制御工学の分野にも応用し、さらに航空宇宙の諸問題に適用することにある。これにより、過去に蓄積された多くの制御データを利用して信頼性の高い制御が可能になるほか、従来は計算の難しかった宇宙機の軌道計画においても、コンピュータによる大規模計算を行うことでより短時間で高精度な計算結果が得られる可能性がある。本研究により、このような新しい制御手法の技術的な基盤を作ることができた。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to apply some techniques of machine learning to control engineering and provide a novel useful tools for control problems in aerospace engineering. To this end, we have provided research results in two different directions. One is to find data-driven algorithms of control theory to cope with data and statistics. The other is to develop practical control methods for aerospace engineering to use such data-driven algorithms. Concerning the former objective, we have proposed modeling and control methods based on Gaussian process regression which is an efficient data-driven estimation tool in machine learning. For the latter objective, we have obtained a robust trajectory planning method for spacecraft and a robust feedback control method for the attitude. Combining those results, we can obtain data-driven control methods for spacecraft.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 宇宙機の制御 統計的学習

1. 研究開始当初の背景

大量のデータを用いて推定や最適化を行う統計的学習理論が注目を集めていた。制御工学分野では、これまで数式モデルに基づく演繹的な方法で制御系設計を行うことが多く、大規模データを用いた推定や最適化はそれほど取り扱われていなかった。また航空宇宙工学の制御問題は、遠隔地へのミッションなど必要な計算量は増えており、新しい制御技術が求められていた。

2. 研究の目的

上に述べたような背景のもとで、本研究の目的は以下の2つである。大規模データを扱える統計的学習理論を制御工学分野に応用しデータや統計量を扱える制御手法を開発すること、そしてそれらの技術を用いて宇宙機の制御における諸問題を解決することである。特に制御手法の開発においては、大規模データを扱える制御手法の開発を目指し、宇宙機の制御においては統計量やばらつきの情報を活用した設計法を扱った。

3. 研究の方法

第一の目的である統計的学習を用いた制御手法の開発では、統計的学習手法を用いた制御手法の開発を行なった。この方法は、データから非線形の入出力関係を推定するもので、多様な手法が提案されている。本研究ではまず変分ベイズ法と呼ばれるベイズ推定の一手法を利用うして、非線形の制御対象のシステム同定手法を導いている。本研究ではさらにガウス過程回帰と呼ばれる学習手法を、学習ではなく最適化問題である制御系設計に応用する方法を提案した。制御系設計問題は、本来演繹的に解を探す問題であるが、問題から人工的にデータを生成し、そのデータから真の解を推定するというアイデアを用いることで、上記を可能にした。このアイデアによって学習手法を様々な設計問題に適用することができる。

第二の目的である宇宙機の制御については、その代表的な問題である軌道計画問題と姿勢制御問題に取り組んだ。軌道計画問題については、制御対象の物理パラメータにばらつきやゆらぎを持つ場合に、軌道に与える影響を評価し、パラメータ変動があっても影響を受けにくい軌道の設計法を与えた。この方法を宇宙機のランデブー問題に適用し、制御対象や環境が変化しても常にミッションを成功させることができることを示した。さらに姿勢制御に関しては、環境の変動に強いロバスト制御手法の一種であるスライディングモード制御と、通常の滑らかなフィードバック手法を融合する研究を行い、惑星探査などの未知環境で使える制御方法を発展させた。

4. 研究成果

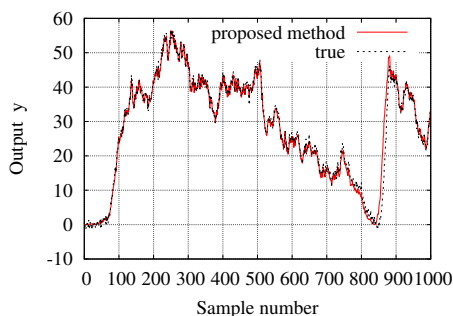
(1) 変分ベイズを用いた非線形システムの推定[1]

変分ベイズ法とは、統計的学習の代表的アルゴリズムであるベイズ推論において多変数の推定を行う際に変分近似を用いて効率的に学習するアルゴリズムである。その際に、ガウス・ガンマ分布やガウス・ウィシャート分布など特定の事前分布を仮定する必要がある代わりに、解析的に事後分布を計算でき、数理モデルを用いる制御工学と親和性が高い。本研究では、非線形システムの同定問題に対して、この変分ベイズ法を利用した手法を提案した。



$$x_{t+1} = f(x_t, u_t, \theta) + w_t,$$

$$y_t = g(x_t, u_t, \phi) + v_t,$$



上にあるような非線形状態空間モデルの未知パラメータ  $\theta$  と  $\phi$  が、関数  $f, g$  に関してアフィンであると仮定することで、変分ベイズ法を非線形システム同定問題に適用できる。得られたアルゴリズムは、非線形カルマンフィルタ・スモータによって状態推定を行いながら、未知パラメータをアップデートする方法となっており、これまでの非線形システムの推定手法とも親和性の高いものとなっている。左のグラフは、非線形の van der Pol 振動子の振舞いを推定した様子であるが、赤線の推定値は、点線の真値をよく推定できている。

(2) ガウス過程回帰を用いた最適制御[2]

統計的学習理論を制御系設計に応用する研究の一つとして、ガウス過程回帰を利用した最適制御設計手法を開発した。ガウス過程回帰とは、静的な非線形関数の入出力データからその関数を推定するノンパラメトリックな方法で、様々な非線形関数を推定できる。左図はガウス過程回帰の推定の様子で、緑のデータ点を補完するように点線の推定値が得られ、ばらつきを表す統計量もオレンジ色の領域として得られる。一方、非線形システムの制御問題は、数式を演繹的に解く問題がほとんどで、特に本研究で扱う最適制御問題の解を得るためには、非線形の偏微分方程式や不等式を解く必要があり、統計的学習手法とはあまり縁のない問題であった。本研究のアイデアは、この最適制御問題に対して、偏微分不等式の条件を満たすサンプルデータを人工的に生成し、そのデータを用いた学習を行うことである。これにより、最適制御問題を学習のツールを用いて解くことが可能となる。

下図は解くべき偏微分不等式  $F(x) < 0$  の  $F(x)$  の値を表しており、左の従来法では不等式を満たしていない濃いピンク色の領域が広いが、右の提案法では、紺色点の場所にある人工データを用いてガウス過程により学習することで、より広い領域で条件を満たしたオレンジ色の解が得られていることがわかる。このようにガウス過程回帰手法を用いて制御問題の最適化が行えるようになった。[2]

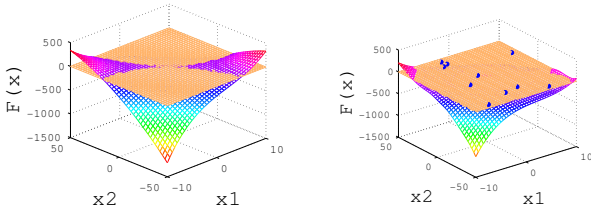
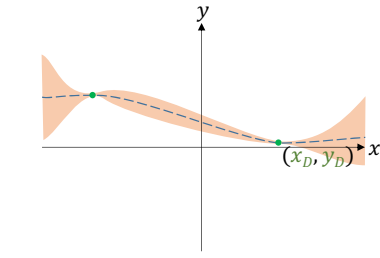
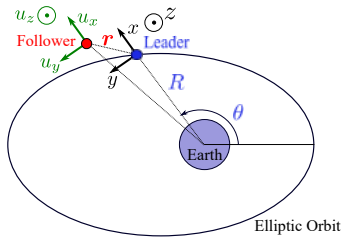
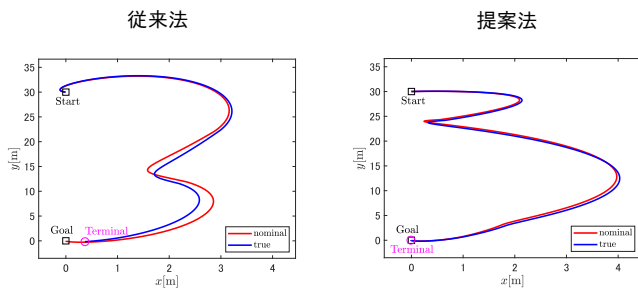


図 : 従来法                      図 : 提案手法 (最適化あり)

(3) ばらつきを考慮した軌道計画法の開発と宇宙機の軌道設計[3]



さらに統計量とともに推定されたばらつきを有するモデルをうまく制御する手法の一つとして、ばらつきを考慮したフィードフォワード軌道の計画法を提案した。制御対象のばらつきや環境の変化により、実際の制御対象がその数理モデルと異なる振る舞いをする可能性があるが、そのような場合、事前にフィードフォワードで計算された最適軌道はうまく追従できなくなる可能性がある。このような変動の可能性を事前に想定できる場合に、その変動による影響のできるだけ少ない軌道を選ぶことで、パラメータ変動にロバストな軌道を計画できる。本研究ではこのような軌道の設計の理論的な枠組みを提案し、さらに宇宙機の軌道計画問題にこのアルゴリズムを応用している。左上図のように、Follower 衛星が Leader 衛星にランデブーする制御問題を考える。



左の図は、数値シミュレーションによって、ランデブー制御を行った様子である。左上の Start 地点から、左下の Goal 地点まで軌道を計画した。赤線がノミナルモデルの挙動、青線が実際のパラメータ変動を有する宇宙機の挙動である。左の従来法では変動の影響で Goal にたどり着けていないが、提案法では変動にかかわらず所期の Goal に到達できている。このように、パラメータ変動に強い軌道

の設計が可能となった。

参考文献

[1] Kenji FUJIMOTO, Akihiro TANIGUCHI, Yoshiharu NISHIDA: System Identification of Nonlinear State-Space Models with Linearly Dependent Unknown Parameters Based on Variational Bayes, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 11, no. 6, pp. 456-462, 2018  
 [2] Kenji FUJIMOTO, Hirofumi BEPPU, Yuji TAKAKI: Numerical Solutions of Hamilton-Jacobi Inequalities by Constrained Gaussian Process Regression, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, vol. 11, no. 5, pp. 419-428, 2018  
 [3] Kenji FUJIMOTO, Tasuku KODAMA, Ichiro MARUTA: On Rendezvous Trajectory Design of Earth Orbiting Satellites with Robust L1-Optimal Control for Parameter Variations, Trans. JSASS, Aerospace Technology Japan, vol. 18, no. 5, pp. 250-257, 2020

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 OKURA Yuki, FUJIMOTO Kenji, MARUTA Ichiro, SAITO Akio, IKEDA Hidetoshi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Bayesian Inference for Path Following Control of Port-Hamiltonian Systems with Training Trajectory Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 40-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.13.40	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 SHIMA Ryotaro, OKURA Yuki, FUJIMOTO Kenji, MARUTA Ichiro	4. 巻 1
2. 論文標題 On Path Following Control of Nonholonomic Port-Hamiltonian Systems via Generalized Canonical Transformations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems	6. 最初と最後の頁 440-445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ifacol.2019.11.795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 KODAMA Tasuku, FUJIMOTO Kenji, MARUTA Ichiro	4. 巻 1
2. 論文標題 On Rendezvous Trajectory Design of Earth Orbiting Satellites with Robust L1-Optimal Control for Parameter Variations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 32nd International Symposium on Space Technology and Science	6. 最初と最後の頁 2019-d-002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HAMADA Kiyoshi, MARUTA Ichiro, FUJIMOTO Kenji, HAMAMOTO Kenniti	4. 巻 1
2. 論文標題 On Circular-Clothoid Trajectory Generation for Front Steering Vehicles Based on L1/L2-Optimal Control	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 1741-1744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FUJIMOTO Kenji, BEPPU Hirofumi, TAKAKI Yuji	4. 巻 11
2. 論文標題 Numerical Solutions of Hamilton-Jacobi Inequalities by Constrained Gaussian Process Regression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 419 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.11.419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FUJIMOTO Kenji, OKURA Yuki	4. 巻 54
2. 論文標題 A New Framework of Robust LQ Optimal Control for Parameter Variation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers	6. 最初と最後の頁 138 ~ 145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.54.138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujimoto Kenji, Beppu Hirofumi, Takaki Yuji	4. 巻 1
2. 論文標題 On Computation of Numerical Solutions to Hamilton-Jacobi Inequalities Using Gaussian Process Regression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of American Control Conference	6. 最初と最後の頁 424-429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ACC.2018.8430806	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Takai and K. Fujimoto	4. 巻 1
2. 論文標題 On output feedback controller design for Gaussian process state space models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 3652-3657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kenji Fujimoto, Naoki Sakata, Ichiro Maruta, Joel Ferguson	4. 巻 5
2. 論文標題 A Passivity Based Sliding Mode Controller for Simple Port-Hamiltonian Systems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 839-844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2020.3005327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計9件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 SHIMA Ryotaro, FUJIMOTO Kenji, MARUTA Ichiro
2. 発表標題 On Path Following Control of Space Robot Attitude via Constructing Error Systems
3. 学会等名 Proceedings of the 56th JSASS Autumn Conference Held by Kansai Branch and Chubu Branch
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KODAMA Tasuku, FUJIMOTO Kenji, MARUTA Ichiro
2. 発表標題 On Rendezvous Trajectory Design of Earth Orbiting Satellites in Elliptic Orbits with Robust Control for Parameter Variations
3. 学会等名 第63回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 KOBAYASHI Hiroyuki, OKURA Yuki, MARUTA Ichiro, FUJIMOTO Kenji, KAWATA Takeyuki, SAITO Akio, IKEDA Hidetoshi
2. 発表標題 On Design of Assist Control System Corresponding to Branch Path
3. 学会等名 Proceedings of the 63rd Annual Conference of the Institute of Systems, Control and Information Engineers
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中川 弘喜, 藤本 健治, 丸田 一郎
2. 発表標題 パラメータ変動の2階の変分を考慮したロバスト軌道設計と最短時間制御問題
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 別府 啓史, 丸田 一郎, 藤本 健治
2. 発表標題 数値ガウス過程による有限時間最適制御問題の解法に関する一考察
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 別府 啓史, 丸田 一郎, 藤本 健治
2. 発表標題 サポートベクターマシンによるデータ選択に基づくガウス過程回帰を用いたHamilton-Jacobi不等式の解法
3. 学会等名 第6回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷拓也, 丸田一郎, 藤本健治
2. 発表標題 ガウス過程状態空間モデルに基づくシステム同定に関する一考察
3. 学会等名 SICE 制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 別府啓史、高木友士、藤本健治
2. 発表標題 ガウス過程回帰を用いた Hamilton-Jacobi 不等式の数値解法
3. 学会等名 システム制御情報学会学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂田 直樹, 藤本 健治, 丸田 一郎, Joel Ferguson
2. 発表標題 エネルギー整形法を用いたポート・ハミルトン系におけるスライディングモード制御について
3. 学会等名 システム制御情報学会学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
オーストラリア	University of New Castle		