

平成30年6月29日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06141

研究課題名(和文) 不定期レート標本化による状態推定とフィルタバンク補間型実時間システム同定

研究課題名(英文) State estimation by irregular rate sampling and real-time system identification of filter-bank-interpolation type

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：制御系設計理論における連続量の離散化に伴う2つの課題、a) 不定期レート標本化によるモデルベース状態推定法の開発と、b) フィードフォワード学習制御におけるフィルタバンク補間型の実時間システム同定に取り組んだ。まずa)については過去の研究で用いていた共通Lyapunov関数でなく、それを発展させた切替えLyapunov関数による設計法の開発に成功した。この手法の有効性を小型マルチコプター(ドローン)によるホバリング飛行実験により検証した。一方、b)についてはフィルタバンク補間における計算量増加の問題が解決できず進展していないが、種々のフィードフォワード制御系設計手法を提案することができた。

研究成果の概要(英文)：We conducted two research themes related to discretization of continuous quantity in control system design theory, namely a) developing a model-based state estimation method by irregular rate sampling; and b) real time system identification of filter-bank interpolation type in feedforward learning control. As for a), we succeeded in developing design methods via switched Lyapunov function, which generalizes a common Lyapunov function approach by our past research. We further verified effectiveness of the methods experimentally by hovering flight of multi-copter (drone). As for b), on the other hand, we have developed various feedforward control design methods, but have not yet progressed so much in filter-bank interpolation because of computational load issues.

研究分野：制御工学

キーワード：制御理論 状態推定 サンプル値 フィードフォワード オンライン同定 適応学習制御

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 不定期レート標本化による状態推定について:

計算機は一定のクロック周期で動作するため、制御信号をサンプル(標本化)する際にも周期を固定した上で系を設計するのが普通である。このような一定周期サンプリングの下、サンプル点間応答やロバスト性を考慮した合理的な状態推定や制御系の設計法(サンプル値制御理論と呼ばれる)が開発され、IoT時代の制御技術として広く普及している。この分野では我が国の研究者が世界的な貢献を成し遂げてきた。

ところが実環境では観測値が定期的を得られるとは限らず、計算機の処理時間や通信周期も必ずしも一定ではない。そのため標本化周期を保守的(長め)に設定することがよくあり、この制約を取り除いた不定期レート標本化への拡張が望まれる。

例えばインターネットのように共有資源を用いたネットワークを介して計測値を送る際、通信環境によっては伝送遅延や損失が発生する。さらに、カメラを利用して座標を読み取ったり深度を測ったりする非接触センサーでは障害物による遮蔽や照度変化などにより計測誤りが生じることもある。このように昨今は開かれた環境において制御技術が用いられるようになり、そのため実用上の様々な問題が顕在化してきたのである。

そこで申請者らは以前に 1) 通信遅延の変動をタイムスタンプによって補正し、2) 伝送損失・計測誤りによる外れ値の影響を除外し、正しい状態推定を続ける切替え型オブザーバの設計法を提案したが、まだ萌芽的段階に留まり、さらなる理論的および実験的検証が待たれていた。

### (2) 可調整フィードフォワード制御のためのフィルタバンク補間型実時間システム同定について:

2 自由度制御系の構成において、フィードバックによる安定化とは独立にフィードフォワード制御器のパラメータのみ調整して優れた目標値応答特性を達成するという手法が知られている。これはフィードバック誤差学習と呼ばれる生体の随意運動の学習モデルを線形の設計理論に取り入れたものであり、制御系を智能化する試みの一つとして今後の発展が期待される。

申請者らも、この制御手法の多入出力系への拡張や調整則の改良などに精力的に取り組んできたが、実用化までは至らず、また非最小位相系には適用できないこと、多入出力系では零点の構造との関係が明らかでなく最小次元で実現できないことなど、理論的にも不十分な点が見受けられた。

さらに、非線形の制御対象にも適用可能とするため、各動作点の近傍に対応するフィルタをバンク状に配列し、これを切替えて各点で局所モデルを実時間同定する手法も知ら

れている。しかし並べるフィルタは有限個なので、連続的に変化する動作点を離散化する必要があり、そのため精度は決して十分ではなかった。逆に離散化を細かくするとフィルタバンクが過大となってメモリ容量や計算速度の面で問題が生じる。

## 2. 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、不定期レート標本化による状態推定法、および可調整フィードフォワード制御のための実時間システム同定を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 不定期レート標本化:

標本化周期  $T$  を固定したときのサンプル値制御系における状態推定器の設計法はよく知られている。 $T$  は任意でよいことに注意すると、これを次のようにして不定期レート標本化の場合に拡張できると考えた。正しい(遅延も損失もない)観測値が得られても次にいつ来るかは分からない状況なので、この値を0次ホールドしておき、それに時変ゲイン  $L(t)$  を掛けることでオブザーバを構成する。ここでのオブザーバは、通常のサンプル値制御のような離散時間でなく連続時間で動作するが、その一方で  $L(t)$  が時変係数となり、これを標本化周期  $T$  が未知のときにモデルベースで設計する必要がある。そこで先行研究(遅延や外れ値への対処法)と同様に、共通 Lyapunov 関数や切替え Lyapunov 関数を用いて安定性を保証することを検討する。

次に、移動体の位置と速度をネットワーク通信によって状態推定する実験により不定期レート標本化に対する提案手法の有効性を検証する。センサー信号が途絶えても誤りなく状態推定が続けられるかどうかを評価し、従来のロバスト制御や機械学習による推定法と比較することを目標とする。そのために小型飛行体(ドローン)を自由に飛行させ、その様子をカメラによって計測し状態を推定する。

### (2) 実時間システム同定:

まず、可調整フィードフォワード制御器を完全な形で多入出力系へ拡張するため、多項式行列の既約分解を用いることを検討した。2 自由度構造では制御対象の零点を消去することが多いため、分子多項式行列の構造(行ごとの次数や最高次係数をどのように設定するか)が問題となる。まず、これを明らかにすることを目指した。

また、非最小位相系に対処するには上記と対照的に、零点を(フィードフォワードで消去するのではなく)プレフィルタに再現し、これも調整する必要が生じる。このためフィードフォワードとプレフィルタを同時に調整する手法を導出することを目指した。

## 4. 研究成果

まず不定期レート標本化に関しては、通信

遅延が変動する場合や観測信号に損失がある場合への対策としてゲイン切替え型状態推定器を開発し、この誤差系に切替え Lyapunov 関数を適用することで、切替えの下でも安定であることを証明（つまり誤差が 0 に収束することを保証）した。このような切替え Lyapunov 関数のアイデアは研究室の同僚や学生の示唆・協力による所が多であり、この状態推定法をドローンの飛行実験によって有効性を検証し、学界でも定評をいただいた。

さらに、本件については研究期間終了後の今年度も継続し、学生の独創的な発想により通信方式（スケジューリング）の一般化まで行うことができ、大いに研究が進展した。研究期間には間に合わなかったものの、全体としては大きな成果が得られたものと評価している。

また、実時間システム同定では多入出力系のパラメータ表示に大きな進展が見られた。これは逆系を構成する際に分子多項式行列の次数構造をうまく設定できず、過去にも部分的な結果しか得られなかったものであるが、このたび左・右既約分解という着想に至り、オンライン調整型フィードフォワード制御器の設計に大いに役立てることができた。この表現は 50 年ほど以前に Rosenbrock が扱って以来あまり顧みられることがなかったものであるが、このたびの研究によって新たな利用の方向性が見えてきた。ただし調整則は従来の逐次最小二乗型のままであった。

ところが、不定期レート標本化の下で実時間システム同定を行うことによりフィードフォワード制御器の調整に用いる手法の開発を続けた結果、通常の最小二乗法ではなく勾配型の調整則によって不定期標本化の問題も解消できることが判明し、このときにも誤差が 0 に収束することを強正実性の理論を元に証明できた。

この成果は本研究課題で提唱した 2 つの問題を結びつけるものであるとともに、過去 10 年以上にわたり明らかにできなかったフィードフォワード学習理論を整備できたことを意味し、大きな成果と評価できる。

その他、学習則の改良や非最小位相系への拡張にも取り組み、部分的には成功したものの、計算負荷が大きすぎて実用化には至っていない。またフィルタバンク補間については計算量の削減を目指したが、当初に期待したような効果はまだ得られていない。補間の方法などについて今後も継続して検討を続ける予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 7 件、査読有国際会議論文も含む）

1) K. Sugimoto, W. Imahayashi, Direct Tuning in Feedback Error Learning Control and Its Generalization to Non-Minimum

Phase Plant, 20th IFAC World Congress, TuM16.3, Toulouse, France, in IFAC-Papers OnLine, Vol. 50, No. 1, pp. 5326-5331 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.989> 査読有

2) W. Imahayashi, K. Sugimoto, Tolerance to Temporal Sensing Failure in Feedforward Learning Control, SICE Annual Conference 2017, pp. 668-673, Kanazawa (2017) DOI: 10.23919/SICE.2017.8105646 査読有

3) L. A. Mateo, K. Sugimoto, Two-degree-of-freedom Control with Tuning of Both Prefilter and Feedforward Controller, International Journal of Advanced Mechatronic Systems, Vol. 6, No. 6, pp. 277-288 (2015) DOI: 10.1504/IJAMECHS.2015.074789 査読有

4) F. Ito, K. Sugimoto, Feedforward Learning Control of Nonlinear Plant: Introduction of Offset Terms to Multi Inverse Models, SICE Annual Conference 2015, pp. 602-607, Hangzhou, China (2015) DOI: 10.1109/SICE.2015.7285407 査読有

5) L. A. Mateo, K. Sugimoto, Further Results on Numerator Polynomial Matrix for Feedforward Learning Control of MIMO Plant with Finite Zeros, SICE Annual Conference 2015, pp. 736-741, Hangzhou, China (2015) DOI: 10.1109/SICE.2015.7285409 査読有

6) S. Yamazaki, K. Sugimoto, Vibration Control for Flexible Arm by Feedback Error Learning, SICE Annual Conference 2015, pp. 742 - 745, Hangzhou, China (2015) DOI: 10.1109/SICE.2015.7285410 査読有

7) K. Sugimoto, L. A. Mateo, A Basis Function Approach to Scheduled Locally Weighted Regression for On-line Modeling of Nonlinear Dynamical Systems, 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015) in BEXCO, Busan, Korea (2015) DOI: 10.1109/ICCAS.2015.7364874 査読有

〔学会発表〕（計 22 件）

1) 蓼沼知秀, 小蔵正輝, 杉本謙二, ゲイン切り替えを用いた不定期サンプリング状態オブザーバの設計, SICE 第 5 回制御部門マルチシンポジウム, Su43-5, 東京 (2018)

2) 蓼沼知秀, 杉本謙二, 不定期サンプリングを伴う状態オブザーバの実験的検証, 平成 29 年度 SICE 関西支部・ISCIE 若手研究発表会, B1-4, pp. 16-20 (USB), 大阪 (2018)

3) K. Sugimoto, W. Imahayashi, Left-right polynomial matrix factorization for MIMO pole/zero cancellation, The 49th ISCIE International Symposium on Stochastics Systems Theory and Its application (SSS17), 03A1-1, Hiroshima (2017) 査読有

4) 蓼沼知秀, 杉本謙二, 不定期サンプリングを伴う状態オブザーバの性能評価, 第

60 回自動制御連合講演会, SuF2-4, 東京 (2017)

5) 今林 亘, 杉本 謙二, センサー信号の損失にロバストな2自由度制御系設計, 計測自動制御学会 産業応用部門 2017 年度大会 J04, 東京 (2017)

6) 杉本謙二, 今林亘, 左・右行列分解による MIMO 極零消去の精密化, 計測自動制御学会 第 4 回 制御部門マルチシンポジウム, 3C2-1 (USB), 岡山 (2017)

7) 能登健太郎, 小林泰介, 杉本謙二, 不定期サンプリングによる状態オブザーバの設計, 計測自動制御学会 第4回 制御部門マルチシンポジウム, 1B2-4 (USB), 岡山 (2017)

8) 今林亘, 杉本謙二, フィードフォワード学習制御の外れ値対策とモデル誤差, 平成 28 年度 SICE 関西支部・ISCIE 若手研究発表会, D3-5, pp. 157-161 (USB), 大阪 (2017)

9) K. Sugimoto, K. Noto, An Approach to Irregular Sampling State Observer Design, SICE Annual Conference 2016, Tsukuba, pp. 1724-1726 (2016) 査読有

10) K. Sugimoto, K. Noto, Design of Switching State Observer for Irregularly Delayed Measurement, 16th International Conference on Control, Automation, and Systems (ICCAS2016), pp. 675-678 (TC03-1), Hico, Korea (2016) 査読有

11) K. Sugimoto, Alignment of Signals for Switching State Estimation against Irregular Delay, 48th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS16), Fukuoka (1B1-3) (2016) 査読有

12) 杉本謙二, 能登健太郎, モデルベース状態推定におけるセンシングの時変遅れ対策について, 第 33 回センシングフォーラム 計測部門大会, 1B2-2 (CD-ROM), 和歌山 (2016)

13) 今林亘, 杉本謙二, フィードフォワード学習制御におけるセンシング障害について, SICE 第 33 回センシングフォーラム 計測部門大会, 2P1-14 (CD-ROM), 和歌山 (2016)

14) 能登健太郎, 杉本謙二, 未知周期オブザーバによる移動体の状態推定, SICE 第 33 回センシングフォーラム 計測部門大会, 2P1-16 (CD-ROM), 和歌山 (2016)

15) 山崎翔太, 杉本謙二, フィードバック誤差学習制御における学習則の改良, 第 3 回制御部門マルチシンポジウム, 2D2-3, pp. 552-556 (USB), 名古屋 (2016)

16) 山崎翔太, 杉本謙二, フィードバック誤差学習制御の学習則に関する一考察, 平成 27 年度 SICE 関西支部・ISCIE 若手研究発表会, B1-3, pp. 8-11 (USB), 大阪 (2016)

17) K. Sugimoto, K. Noto, Modified Network Jitter Compensation in State Estimation with Switching, 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, pp. 51-52, Hawaii, USA, pp. 30-35, WA02-7 (2015) 査読有

18) 能登健太郎, 杉本謙二, ゲイン切替え型オブザーバによるジッタ補償法の拡張, 第 58 回自動制御連合講演会, 1G2-5 (CD-ROM), 神戸大学, 兵庫 (2015)

19) 山崎翔太, 杉本謙二, フィードバック誤差学習の制御応用に関する実験的検討, SICE 第 32 回センシングフォーラム 計測部門大会, 2P1-21 (CD-ROM), 大阪電気通信大学, 大阪 (2015)

20) マテオローリン, 杉本謙二, 非線形動的システムのオンライン同定 - 基底関数による局所重み付き帰帰, SICE 第 32 回センシングフォーラム 計測部門大会, 2P1-24 (CD-ROM), 大阪電気通信大学, 大阪 (2015)

21) 山崎翔太, 杉本謙二, フィードバック誤差学習による柔軟アームの振動制御, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 15), 114-1 (CD-ROM), 中央電気倶楽部, 大阪 (2015)

22) マテオローリン, 杉本謙二, 零点を持つ多入出力系のオンライン逆モデル同定---分子多項式行列のパラメータ表示について, 第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 15), 324-2 (CD-ROM), 中央電気倶楽部, 大阪 (2015)

〔図書〕 (計 1 件)

杉本謙二 (分担執筆), シンギュラリティ: 限界突破を目指した最先端研究, NAIST-IS 書籍出版委員会 (編集), 近代科学社 (2016) 324 (pp. 210-214)

〔その他〕

招待講演 (計 2 件)

1) 杉本謙二, 多項式行列と逆系~支部についての雑感とともに, 計測自動制御学会関西支部特別講演会, 中央電気倶楽部, 大阪 (2017)

2) K. Sugimoto, Sensing Failure in State Estimation for Control, Busan National University, Busan, Korea (2016)

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

松原 崇充 (MATSUBARA, Takamitsu)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 20508056

南 裕樹 (MINAMI, Yuki) 2016 年度まで  
奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号: 00548076