

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：14603

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01462

研究課題名（和文）計測や通信の品質が保証されない環境下での事象トリガ調整型2自由度制御系

研究課題名（英文）Event-trigger-type two-degree-of-freedom control system without quality assurance of measurement/communication

研究代表者

杉本 謙二（Sugimoto, Kenji）

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：20179154

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,400,000円

研究成果の概要（和文）：あらゆるモノがネットワークでつながり自在に制御できる時代が到来しようとしている現在、通信・計測と制御技術の融合研究は極めて重要である。実験室の整った環境では専用の回線につながった接触型センサで制御のための情報が得られたとしても、実世界の開かれた環境ではインターネットに特有のパケットロス（信号の損失）やカメラ画像に生じるオクルージョン（見失うこと）など、通信や計測の品質劣化が避けられない。本研究では、このような困難な環境下で制御系をどのように設計するかについて一定の知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はネットワーク化制御系の実用化に直ちに役立つものではないが、通信や計測の品質が保証されない環境下において、フィードフォワード制御をオンライン調整する手法や状態推定器のゲインを切り替えて誤差系の安定性を保証する手法などについて様々な理論的結果が得られ、また実用化に至る基礎的検討を深めることができたので、学術へ一定の貢献をなしたと考える。

研究成果の概要（英文）：The era of IoT is approaching, where everything is connected through network and can be controlled autonomously. Now research integration of communication/measurement and control technology seems most important. In well-regulated environment such as experimental rooms, we are able to obtain high-quality control information by contact-type sensors connected with dedicated channels. In open environments, however, quality degradation is unavoidable in communication/measurement, such as packet loss in the Internet, occlusion in camera images, and so forth. In this study, we have gained a new insight as to how we can design control systems under such challenging environment.

研究分野：制御工学

キーワード：2自由度制御 ネットワーク制御 切替えシステム 安定性

1. 研究開始当初の背景

IoT (Internet of Things) 時代の到来により、実世界の開かれた環境にカメラや深度センサなどの非接触センサを展開し、計測信号を汎用のネットワーク経由で伝送して制御システムを構築する技術が求められている。しかし実世界は実験室や工場のように環境が整ってはおらず、計測や通信の品質が保証されるとは限らない。例えば自動運転において、自車の位置情報を外界センサから路車間通信を経て取得する場合、時には障害物によって視界が一時的に遮られたり (occlusion)、伝送損失 (packet loss) や不規則な遅延 (jitter) が発生したりする (図 1、このとき制御器は車載なので制御対象への操作入力信号 (actuation) の品質は保証される)。これらは恒久的な故障ではなく、たかだか数十ミリ秒ないし百ミリ秒の時間スケールなので、ヒトの感覚ではあまり問題にならない。しかしモノにつながる制御システムでは影響が大きく、性能の低下や、最悪の場合には不安定化を生じかねない。かといって加法的ノイズとも異なり、通常の信号処理では除去できない。

このような品質保証のない計測・通信環境では、制御システムの挙動は時間的に均質な滑らかな変化をするのではなく、信号の一時的な途絶や遅延という事象にも支配される。そこでこのような事象の発生をトリガ (引き金) として認識し、オンラインで対処できる機構を構築することは重要な課題と考えられる。

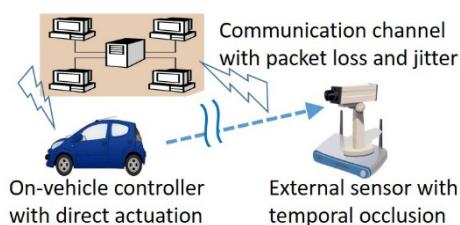


図 1: 計測と通信の障害 (イメージ)

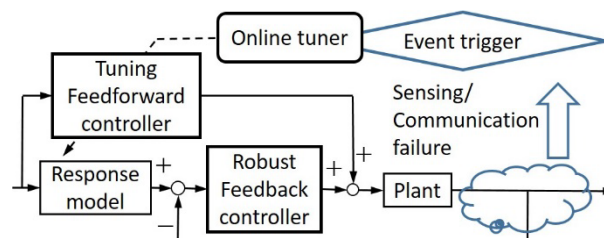


図 2: 提案する事象トリガ調整型 2 自由度制御系

2. 研究の目的

本研究では 2 自由度構成 (図 2) による制御システムにおいて、計測や通信の失敗をトリガとして、安定性を保証し、制御性能を良好に保つための設計法を開発することを目的とする。これまで研究代表者らは、2 自由度構成のなかでもフィードフォワードブロックをオンラインで調整し、制御対象の不確かさに対処するというフィードバック誤差学習 (FEL; Feedback error learning) と呼ばれる設計法について研究を進めてきた。これは元々、生体の運動学習モデルとして提案され、ロボットなどの制御手法としても有効であるとされている¹⁾。しかし本研究のような事象トリガ型の FEL 設計法はまだ確立されておらず、オンライン調整則に特有の工夫を要する。次に、フィードバックブロックの安定性保証については、信号の損失に応じてゲインを切り替えて状態推定を継続するオブザーバ機構を開発し、制御器の一部とする。さらにこれを切り替え型フィードバック制御器にまで拡張し、閉ループ系の安定性を保証する。

3. 研究の方法

FEL における調整則については最小二乗型のパラメータ調整則がよく知られている。しかしこれは信号損失には有効でないことが分かっているので、閉ループ系の強正実性に基づく調整則が必要となる。この手法は線形制御における FEL 研究の初期²⁾にも用いられたが、ここでは多入出力系への拡張など、幾つかの理論的な整備をまず行う。また信号損失に対処する状態推定器の切り替えゲインの設計は、よく知られた共通 Lyapunov 解を用いる方法の他、切り替え Lyapunov 解による方法も考えられる。さらに、確率的性能の準最適化などに設計法を拡張することも検討する。

提案手法の有効性はシミュレーションだけでなく実機実験によって検証する。空中ドローン (Quad-copter) のホバリング飛行によって信号損失に対する提案法のロバスト性を評価し、また小型移動ロボット (Robo-car 1/10) の隊列走行によって FEL の有効性を確認する。

4. 研究成果

(1) MIMO 極零消去のための左・右多項式行列分解と FEL への応用

多入力多出力 (MIMO; Multi-input multi-output) 系に極零消去型の 2 自由度制御を適用するためには一入出力系における伝達関数の分母・分子という概念を拡張する必要がある。MIMO 系のシステム表現はもちろん従来から既知であり、右分解・左分解の区別があることも認識されていたが、FEL の実装ではオンライン調整可能なパラメータから冗長性を除くため、左・右分解という特殊な多項式行列表現が必要となる。この表現は古くから知られていたものの、本研究によって初めてオンライン調整に適した形での導出に成功した。本研究をシステム制御情報学会の

論文誌に発表した所、幸いにも 2021 年度の学会賞論文賞を受賞した。

(2) 信号損失を考慮したゲイン切り替え型状態オブザーバの設計

ネットワーク制御系において観測信号がランダムに損失するパケットロスの問題に対処するオブザーバ（状態推定器）を設計する。損失の発生に応じて状態推定ゲインを切り替えるという機構によって誤差系の安定性を保証することができる。そのためには損失回数に応じた多数の切り替えゲインを予め設計して用意しておく（スケジューリング）。この設計には連立線形行列不等式を用いるが、従来から知られていた共通 Lyapunov 解ではなく切替解を許すことで保守性の改善を達成した。本研究の予備的な結果をオランダの国際会議において研究室の大学院学生を筆頭著者として発表した所、Young Author Award Finalist（奨励賞最終候補者）に選ばれた。惜しくも受賞には至らなかったが、一定の評価を得ることができた。その後、成果をまとめて計測自動制御学会論文誌に発表した。

(3) 強正実性条件に基づくフィードバック誤差学習制御 (FEL) とセンシング障害への応用

FEL で採用するフィードフォワード構造はセンシング障害（通信パケットロスやカメラ画像の計測ミス）に対して頑健であると期待される。しかし誤差信号によるパラメータ調整には従来の最小二乗型調整則が適用できず、信号の断続に応じて調整を中断・再開できる強正実型の調整則が必要となる。本研究では強正実性に基づく FEL とそのセンシング障害への応用について種々のシミュレーションによって有効性を検証した。この成果はシステム制御情報学会論文誌に発表した。

(4) 強正実性条件に基づくフィードバック誤差学習制御 (FEL) の多入出力化

強正実性条件は回路網や非線形制御などで古くから活発に研究されている重要な性質であるが、多入出力系では記法が複雑になるため、FEL のパラメータ調整にはうまく適用できなかった。本研究では行列演算を工夫することにより、強正実型 FEL の多入出力化に成功した。この成果を電気学会論文誌に発表した。

(5) 観測信号と操作信号の損失にロバストなラウンドロビンスケジューリング (RSS) 切り替え制御系

通信負荷の低減のため RSS と呼ばれるプロトコル（通信規約）が知られているが、本研究ではまず、上記 (2) のゲイン切り替え手法を RSS に拡張した。また、(2) では観測信号のみが損失する場合の状態推定法を開発したが、これをフィードバック制御系にまで拡張し、観測信号と操作信号が損失する環境下でのロバスト安定化を図った。ただし後者の実装には損失が発生したことを制御器側に報告 (acknowledge) する 1 ビット信号の送信機構が必要となる。この成果を計測自動制御学会論文誌に発表した。

(6) フィードバック誤差学習 (FEL) 制御におけるフィルタ設計と強正実性の達成

上記 (3), (4) では強正実性条件の下での FEL のパラメータ調整則について検討したが、本研究ではこの条件をフィルタ設計によって達成することを示した。フィードフォワード制御器に用いるフィルタはパラメータ調整に不可欠であるものの、その自由度は制御性能に直接の影響がないために、これまで活用されて来なかった。しかし本研究によって強正実性とフィルタ設計を結びつけることが可能となり、より広い制御対象に FEL の強正実型調整則が適用できるようになった。ただし相対次数の制約は依然として残されているため、この制約を緩和することが今後の課題となる。この成果を計測自動制御学会論文誌に発表した。

これらの他にも学術雑誌論文 1 件（査読付き）、国際会議論文 12 件（査読付き）、国内口頭発表 15 件などの発表を行ったが、説明は省略する。

1) M. Kawato, et al., A Hierarchical Neuralnetwork Model for Control and Learning of Voluntary Movement, Biol. Cybern., 57, 169/185, 1987

2) A. Miyamura, et al., Stability of Feedback Error Learning Scheme, Syst. & Control Lett., 45, 303/316, 2002

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Chengyan Zhao, Masaki Ogura, Kenji Sugimoto	4. 巻 13
2. 論文標題 Stability Optimization of Positive Semi-Markov Jump Linear Systems via Convex Optimization	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 233 ~ 239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.13.233	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 今林 亘, 杉本 謙二	4. 巻 32
2. 論文標題 強正実性条件に基づくフィードバック誤差学習制御とセンシング障害への応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 177 ~ 184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.32.177	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 杉本 謙二, 今林 亘, 韓 心又	4. 巻 139
2. 論文標題 強正実性条件に基づくフィードバック誤差学習制御の多入出力化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C (電子・情報・システム部門誌)	6. 最初と最後の頁 866 ~ 873
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.139.866	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 蓼沼 知秀, 小蔵 正輝, 杉本 謙二	4. 巻 56
2. 論文標題 観測信号と操作信号の損失にロバストなラウンドロビンスケジューリング切り替え制御系	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 89 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.89	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 今林 亘, 韓 心又, 小蔵 正輝, 杉本 謙二	4. 巻 56
2. 論文標題 フィードバック誤差学習制御におけるフィルタ設計と強正実性の達成	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 141 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.56.141	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 Kenji Sugimoto and Wataru Imahayashi	4. 巻 32-1
2. 論文標題 Left-right Polynomial Matrix Factorization for MIMO Pole/Zero Cancellation with Application to FEL	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 32-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.32.32	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 夢沼知秀, 小蔵正輝, 杉本謙二	4. 巻 55-3
2. 論文標題 信号損失を考慮したゲイン切り替え型状態オブザーバの設計	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 164-171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.164	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 -

[学会発表] 計27件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Yuki Amemiya, Kenta Hanada, and Kenji Sugimoto
2. 発表標題 An Asynchronous Heuristic Algorithm for Generalized Mutual Assignment Problem: Gossip-Based Approach
3. 学会等名 The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Sugimoto, Masaki Ogura, Kenta Hanada, and Toshitaka Aihara
2. 発表標題 Sampled-data Suboptimal State Estimation over Lossy Networks
3. 学会等名 The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (SSS '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Sugimoto, Wataru Imahayashi, and Ryo Arimoto
2. 発表標題 Relaxation of Strictly Positive Real Condition for Tuning Feedforward Control
3. 学会等名 59th IEEE Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花田研太
2. 発表標題 電力システムにおける分散アルゴリズム
3. 学会等名 令和2年電気関係学会関西連合大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有元遼, 今林巨, 杉本謙二
2. 発表標題 フィードバック誤差信号の生成による強正実性条件の達成
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有元 遼, 今林 亘, 杉本 謙二
2. 発表標題 ロバスト制御系設計に基づくフィードフォワード制御の調整
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 折笠 拓海, 今林 亘, 杉本 謙二
2. 発表標題 安定化されたシステムの強正実性と調整型フィードフォワード制御
3. 学会等名 2020年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相原 敏孝, 小蔵 正輝, 花田 研太, 杉本 謙二
2. 発表標題 信号損失に対処するゲイン切替型状態推定とバーストロスへの評価
3. 学会等名 第8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 2021年

1. 発表者名 小蔵 正輝, 若宮 直紀
2. 発表標題 Reduced Order Model Predictive Control of a Fish Schooling Model
3. 学会等名 第8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 2021年

1. 発表者名 小林泰介, 芳澤健太
2. 発表標題 フィードバック・フィードフォワード方策を内包する強化学習アルゴリズム
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taisuke Kobayashi
2. 発表標題 Hyperbolically-Discounted Reinforcement Learning on Reward-Punishment Framework
3. 学会等名 International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xinyou Han, Wataru Imahayashi, and Kenji Sugimoto
2. 発表標題 Strictly Positive Real Condition Establishment in Feedback Error Learning Control
3. 学会等名 12th Asian Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Xinyou Han, Wataru Imahayashi, and Kenji Sugimoto
2. 発表標題 Feedback Error Learning Control for Plant with Relative Degree Two
3. 学会等名 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧泰宏, 杉本謙二
2. 発表標題 性能を考慮した信号損失下での状態推定
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 牧泰宏, 今林 亘, 杉本 謙二
2. 発表標題 切り替え型状態推定器による2自由度制御
3. 学会等名 自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今林亘, 小蔵正輝, 杉本謙二
2. 発表標題 BMIによるフィードバック誤差学習制御系の強正実化について
3. 学会等名 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 八木聖太, 小蔵正輝, 岸田昌子, 杉本謙二, 林和則
2. 発表標題 構造的不確かさをもつ環境における分散送信電力制御アルゴリズムのロバスト安定化
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八木聖太, 小蔵正輝, 岸田昌子, 杉本謙二, 林和則
2. 発表標題 公平性を担保した送信電力制御アルゴリズムのロバスト安定化
3. 学会等名 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田頭史都, 潮俊光
2. 発表標題 外乱のある線形離散時間システムに対する自己駆動モデル予測制御器の一設計法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告書
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kumazaki, M. Ogura, and T. Tachibana
2. 発表標題 VNF management with model predictive control for multiple service chains
3. 学会等名 IEEE International Conference on Consumer Electronics--- Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 X. Han, W. Imahayashi, K. Sugimoto
2. 発表標題 A Case Study of SISO Feedback Error Learning Control With/without a Strictly Positive Real Condition
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018, pp. 17-22, Nara (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 W. Imahayashi, K. Sugimoto
2 . 発表標題 Feedback Error Learning Control against Temporal Sensing Signal Loss
3 . 学会等名 SICE Annual Conference 2018, pp. 433-436, Nara (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Sugimoto, X. Han, and W. Imahayashi
2 . 発表標題 Stability of MIMO Feedback Error Learning Control under a Strictly Positive Real Condition
3 . 学会等名 5th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, pp. 150-156, Eindhoven, The Netherlands (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Tadenuma, M. Ogura, and K. Sugimoto
2 . 発表標題 Sampled-Data State Observation over Lossy Networks under Round-Robin Scheduling
3 . 学会等名 5th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, pp. 197-202, Eindhoven, The Netherlands (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 熊崎雅哉, 小蔵正輝, 橘拓至
2 . 発表標題 複数サービスチェーンに対するモデル予測制御を用いたVNFインスタンス管理法
3 . 学会等名 電子情報通信学会総合大会, B-6-13
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kumazaki, M. Ogura, and T. Tachibana
2. 発表標題 Service Chain Construction with Efficient VNF Sharing Based on Model Predictive Control
3. 学会等名 ICETC2020, M1-5 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 熊崎雅哉, 小蔵正輝, 橘 拓至
2. 発表標題 複数サービスチェーンにおけるモデル予測制御に基づいた最適VNF制御法
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2020-22, pp. 1-6
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
研究分担者	潮 俊光 (Ushio Toshimitsu) (30184998)	大阪大学・基礎工学研究科・教授 (14401)	
研究分担者	橘 拓至 (Tachibana Takuji) (20415847)	福井大学・学術研究院工学系部門・教授 (13401)	
研究分担者	小林 泰介 (Kobayashi Taisuke) (10796452)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (14603)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	小蔵 正輝 (Ogura Masaki) (10800732)	大阪大学・情報科学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	花田 研太 (Hanada Kenta) (80783703)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (14603)	
研究分担者	橋本 和宗 (Hashimoto Kazumune) (60883361)	大阪大学・基礎工学研究科・特任助教（常勤） (14401)	

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