

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760332

研究課題名(和文)量子化制御に基づく電子制御用ソフトウェアの安定化アルゴリズム

研究課題名(英文)Stabilization algorithm for software of electronic control system via quantized control

研究代表者

澤田 賢治 (SAWADA, KENJI)

電気通信大学・学内共同利用施設等・准教授

研究者番号：80550946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、電子制御用ソフトウェアにおける安全検証問題に対して、量子化制御からアプローチした安全解析・安定化アルゴリズムを構築することにある。特に、ソフトウェア単体の安全性ではなく、電子制御対象の動作特性も考慮したソフトウェアの安全性に着目する。本研究により、対策急務である複雑化する電子制御用ソフトウェアの安全性・安定性を保証する分野横断的な基礎理論を構築する。さらに、現実の電子制御系のモデルベース開発で使用されるソフトウェアに適用可能な安定化アルゴリズムを提案する。

研究成果の概要(英文)：Focusing on safety verification problems of electronic control system software, the objective of the research is to construct new stability analysis and stabilization algorithms in terms of quantized control. In particular, this research concentrates on not only software stability but also software safety considering the control system dynamics. This research enables us to construct a cross-sectional basic theory that guarantees stability, safety, integrity and availability of the electronic control system software. Also, the research discusses an implementation method of the proposed algorithm.

研究分野：制御工学

キーワード：量子化制御 数値最適化 ソフトウェア 安定化アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

研究目的 (概要)

自動車業界における近年の電子制御技術は、電気自動車やハイブリッド車の開発効率化を促す一方、ソフトウェアの急速な複雑化とその対応が緊急課題となっている。

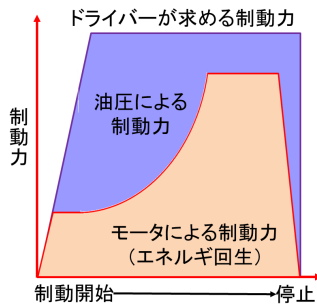


図1. 回生ブレーキ

有名な問題にプリウスのブレーキシステムがある。図1のように、同システムの物理系は回生ブレーキと油圧ブレーキ、電子制御用ソフトウェアは各ブレーキ用下位系とモード切替管理用の上位系からなる。各要素技術は非常に高い水準を有しているが、統合化時の安全性を第3者に納得させる所に下記のような課題があった。

- (1) **物理系を含めたソフトウェアの安全性:** 電子制御用ソフトウェアの開発・安全検証は、状態が瞬時に切り替わる離散事象系の扱いとなる。一方、被制御側の物理系は微分方程式で記述される連続事象系である。ソフトウェア開発とシステム開発の隔たりにより、ソフトウェア単体の安全性と物理系を含む電子制御系の安全性に隔りが存在する。
- (2) **制御用ソフト統合時の安全性:** モード切替管理用ソフトは離散事象を、物理系制御用ソフトは連続事象を扱う。システム全体のシミュレーション時には、異なる事象を扱うソフトウェアを接続する必要がある。取り扱う事象の隔りは、シミュレーション時と現実の電子制御系の挙動間に隔りを生み、制御用ソフト統合時の安全検証を困難にする。

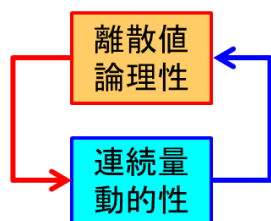


図2. 離散と連続

自動車に加え、情報家電も含めた電子制御用ソフトウェアは図2のように離散値と連続量を統合的に取り扱う必要がある。本課題への制御工学の観点からの研究として、サイバ

ー物理システム (CPS) 理論と混合論理的 (MLD) システム理論が代表的である。前者は情報空間上のシステムに、フィードバック制御等の物理系の操作を取り入れた制御理論である。後者は動的システムに、離散的な論理切替条件を加えた制御理論である。ただし、これらはシステム表現が離散時間に限定されていたり、システム解析に留まっていたりする。すなわち、制御用ソフトウェアと電子制御系全体の安全性を考慮した設計理論がまだ十分に研究されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子制御用ソフトウェアにおける安全検証問題に対して、量子化制御からアプローチした安全解析・安定化アルゴリズムを構築することにある。特に、ソフトウェア単体の安全性ではなく、電子制御対象の動作特性も考慮したソフトウェアの安全性に着目する。本研究により、対策急務である複雑化する電子制御用ソフトウェアの安全性・安定性を保証する分野横断的な基礎理論を構築する。さらに、現実の電子制御系のモデルベース開発で使用されるソフトウェアに適用可能な安定化アルゴリズムを提案する。

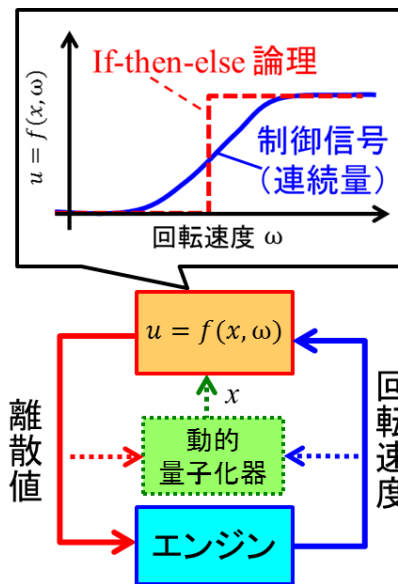


図3. 制御論理の If-then-else 論理近似

以下、量子化制御に着目した経緯を示す。量子化制御では、連続事象系の入力側に量子化要素により離散値化された制御信号が印加される。これは、図3のエンジン制御ソフトウェア内の制御プログラムにおける、制御論理の If-then-else 論理近似に対応する。このとき、制御性能 (エンジン性能) が劣化しないように制御信号を量子化 (離散値近似) する必要がある。研究代表者は既に、量子化による性能劣化の解析アルゴリズムを数値最適化手法で与えている。さらに、離散値と連続量を繋げるインターフェースとしての

動的量子化器（図3点線部）の数値最適化設計手法も与えている．動的量子化器は，論理に物理系情報を加える意味で CPS 理論の延長にある．

上記成果を踏まえると，電子制御用ソフトウェアの安定化アルゴリズムに対して動的量子化器は有用な礎を与えている．すなわち，量子化制御から電子制御用ソフトウェアの

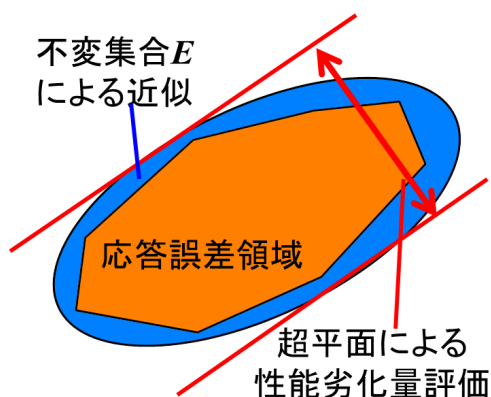


図4．不変集合による近似

安全性検証にアプローチすることで，新たなソフトウェアの安定化アルゴリズムの発展が期待できる．

3．研究の方法

理論面の研究計画・方法は，申請者の現在までの研究により明らかになった以下を踏まえたものである．

量子化制御では，連続事象系の入力側に量子化要素により離散値化された制御信号が印加される．文献[1]は，制御信号の量子化（離散値近似）により劣化する制御性能を不変集合解析を用いて，下記のように定量的に与えることができる．

- (1) 「量子化要素を含まない通常の制御系」と「量子化要素が組み込まれた制御系」の応答誤差集合を不変集合により上界近似する．
- (2) 劣化性能量を超平面の幅により定量的にシステム解析できる．また，システム解析結果は，劣化性能を抑える制御器（動的量子化器）が存在することも保証する．

図4に示すように，集合の上界近似を利用することにより，量子化制御における解析や設計を線形行列不等式（LMI）を制約条件とする凸最適化により求めることができる．

上記を踏まえた上で，本研究では下記の手順と方法で研究を進めていった．

制御系のダイナミクスを考慮した電子制御用ソフトウェアの安定性を考慮するために，ソフトウェア内の制御プログラムの離散値近似表現を量子化要素として扱う．

ソフトウェア（離散時間駆動）と制御系

のダイナミクス（連続時間駆動）を統一的に扱うため，サンプル値型の量子化制御アルゴリズムを扱う．

対応できる制御系を拡張するために，量子化制御手法として，既存の動的量子化器を含む「ノミナル制御器と動的量子化」の同時設計条件の導出」を扱う．

提案アルゴリズムの実装方式検証のために，複数の制御系開発ソフトウェアを連動させた電子制御系のシミュレーション実験検証を行う．

設計者の意図をダイレクトに反映できるように，「モデル追従型の量子化制御系」の設計方法を扱う．

参考文献

[1]澤田，新：離散値入力型 SISO システムに対する不変集合解析に基づく動的量子化器設計．システム制御情報学会論文集 2010 年第 23 巻 11 号 249/256

4．研究成果

本章では第5章中の主な発表論文等の中から代表的な結果を主軸に，得られた研究成果を説明する．

(1) 平成24年度の成果

本年度は実機検証のための基礎理論構築を中心に進めるたが，同時に実機実験用の環境も構築した．

理論面の成果

まず，制御系の構造の一般化を行った．具体的には，制御対象の挙動を推定するような観測器を内包する量子化器の設計方法を離散時間系で与えた．これにより，電子制御ソフトウェア内の制御プログラム離散値近似の影響推定方法の基礎を与えた（学会発表[21]）．

つぎに，制御対象の連続時間上での挙動を詳細に評価できるように，動的量子化器の連続時間上での設計方法を与えた．具体的には，数値最適化手法に基づく方法と解析表現に基づく方法を与えた（雑誌論文[6]，学会発表[17, 19, 20]）．また，その結果をサンプル値制御へと拡張し，連続時間上の制御対象と離散時間上の制御プログラムが混在するハイブリッド系に対する動的量子化器の設計方法も与えた．これにより，制御系のロバスト化も達成できるようになった．上記の結果は国内学会で発表した（学会発表[18]）．

実験面の成果

制御プログラムの実装を容易にできるような無線通信型の実験装置を構築した．実験器具の性能検証のために，連続時間型の有限時間整定制御の実装研究を本学の学生と行った．内容としては，スパース最適化と有限時間整定制御と無線通信を繋げる内容であり，理論面でも新規性のある結果となった．

本内容については、基礎理論を学術論文としてまとめ、実験内容は国内学会で発表した（雑誌論文[8]、学会発表[16]）。

(2) 平成 25 年度の成果

平成 25 年度は実機実装のための理論の一般化と平成 24 年度に続き実機実験のための環境構築をおこなった。

理論面の成果

平成 24 年度の成果の 1 つである制御系のハイブリッド化手法の一般化を行った。これまでフィードフォワード系に限定されていたものをフィードバック系へ一般化を行った。また、これまで「動的量子化器」という 2 段階設計でしか設計できなかったものを、「ノミナル制御器と動的量子化器」の同時設計に関わる新しい成果を与えた。同設計手法はこれまでの 2 段階設計を含む枠組みであり、制御系構造の簡潔化に繋がるものである。上記の手法は国際学会で発表した（学会発表[15]）。なお、平成 24 年度において構築した連続時間型動的量子化器とハイブリッド型動的量子化器のアルゴリズムを国際学会で発表し、また学術論文としてまとめ上げた（雑誌論文[6, 7]、学会発表[12, 14]）。

また、動的量子化器の性能改善方法として、出力可到達領域に基づいた手法を検討し、学術論文で報告した（雑誌論文[9]）。

実験面の成果

平成 24 年が無線通信制御系の構築だったのに対し、平成 25 年度では制御対象側の組込系の構築を本学の学生と行った。成果の 1 つとして、トランクションコントロールにおける高速滑り検出手法を組込系で実現することができた。

派生研究

半導体生産装置における自律無人搬送台車の搬送スケジュール最適化の研究も行った。同研究では、搬送台車の搬送路を空間的に量子化し、この空間量子化が搬送スケジュールの搬送精度に関わる問題を扱っている。初期研究として、搬送台車の経路計画問題に限定した最適スケジュールリング手法をモデル予測制御により与えた。つぎに、経路計画とタスク割当の同時最適化問題に対する状態空間表現方法を与えた。結果として、1 件の国際学会、1 件の国内学会、2 本の学術論文としてまとめることができた（雑誌論文[4,5]、学会発表[11,13]）。

(3) 平成 26 年度成果

平成 26 年度は制御アルゴリズムの高機能化と高速化、実機実験の高精度化、そして論文として研究成果の執筆をおこなった。

理論面の成果

制御アルゴリズムの高機能化として、「ノ

ミナル制御器と動的量子化」の同時設計条件の導出を行った。導出条件は平成 25 年度までの条件と比較して複雑化しているが、従来結果と比較して幾つかの制御性能を改善することができている。制御対象を離散時間系に限定し、同時設計問題の解析解表現について学術論文 1 本、モデル追従制御系の数値最適化手法を国際学会発表 1 件と学術論文 1 本でまとめた（雑誌論文[1, 2]、学会発表[10]）。

また、制御対象が連続時間系で表現される場合のモデル追従制御系の数値最適化手法を国際学会 1 件で発表した。本研究成果では、量子化信号を生成するサンプリングタイムの影響も陽に考慮した制御系解析手法にも焦点を当てている（学会発表[9]）。

上記の連続時間系と離散時間系の条件を統合し、サンプル値条件を国際学会 1 件と学術論文 1 本として報告した（学術論文[3]、学会発表[7]）。学術論文では、量子化とアズンブル時間に関わる拘束条件を同時に考慮した設計条件を、線形行列不等式（LMI）の手法である伸長型 LMI により与えた。

また、モデル追従型の量子化制御系のクラスを拡張するために、入出力量子化を有するシステムに対する同時設計条件を導出し、国内学会 1 件で報告した（学会発表[5]）。

実験面の成果

実験面では組込系を主軸に、CPU の計算負荷を考慮した制御アルゴリズムの構築に従事した。平成 25 年度で開発したトランクションコントロールにおける高速滑り検出手法を滑り制御に拡張した。同アルゴリズムが滑りやすい路面であってもそうでない路面と同程度の位置制御を達成できることを実機実験により確認した。

派生研究

空間量子化としての派生研究である自律無人搬送台車の搬送スケジュール最適化では、モデル予測制御を用いた高速化アルゴリズムを提案した。本成果を国際学会 1 件と国内学会 1 件で報告し、国際会議において Best Application Paper の Finalist に選ばれた。また、高速化計算のためのモデル簡易化手法を提案し、国際学会 1 件で報告した。本研究は離散事象システムと制御理論を結びつける研究成果であり、高速計算が可能なシステム表現について理論的な裏付けを与える基礎結果となっている（学会発表[1, 2, 3]）。

また、システム表現に関する研究も行った。量子化制御のほとんどは微分型または差分型状態方程式を基礎とするシステム表現を採用しているが、積分型・差分型状態方程式に基づく制御アルゴリズムの検討も行った（学会発表[3, 4]）。従来研究では数値最適化に基づく研究報告が行われているので、本研究ではほとんど研究されていない適応制御に対する基礎研究を行った。

応用研究として、情報家電の連携制御ソフ

トウェアの開発も行った(学会発表[7])。

今後の展開

本研究を進めると同時に、多項式型非線形システムに対する動的量子化器の設計手法にも着手している。不変集合解析と入力状態安定性の類似性を利用し、2乗和多項式に基づく数値最適化問題を導出した。本科研費直接的に関わる内容ではないが、2015年6月時点で本成果を国際学会1件で発表している。また、本科研費により得られた研究成果に基づき、平成27年度から採択された基盤研究(C)「事象駆動型量子化制御に基づく通信制御系の縮退運転アルゴリズム」を進めていく予定である。

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] Kenji Sawada, Seiichi Shin, Model following output feedback control for discrete-valued input systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, 7巻, 2014, 246-253, 10.9746/jcmsi.7.246
- [2] Kenji Sawada, Seiichi Shin, On the output feedback control of discrete-valued input systems, ECTI Transactions on Computer and Information Technology, 査読有, 8巻, 2014, 154-166
- [3] Kenji Sawada, Seiichi Shin, Model following control for continuous-time discrete-valued input systems, Artificial Life and Robotics, 査読有, 19巻, 2014, 277-285, 10.1007/s10015-014-0169-6
- [4] 中村亮介, 澤田賢治, 新誠一, 熊谷賢治, 米田尚登, 状態空間表現による自律無人搬送車のタスク割当てと経路計画の同時最適化, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 50巻, 2014, 210 - 218, 10.9746/sicetr.50.210
- [5] Kenji Sawada, Seiichi Shin, Kenji Kumagai, Hisato Yoneda, Optimal scheduling of automatic guided vehicle system via state space realization, International Journal of Automation Technology, 査読有, 7巻, 2013, 571 - 580
- [6] Kenji Sawada, Seiichi Shin, Synthesis of continuous-time dynamic quantizers for LFT type quantized feedback systems, Artificial Life and Robotics, 査読有, 18巻, 2013, 117-126, 10.1007/s10015-013-0108-y
- [7] Kenji Sawada, Seiichi Shin, Numerical Optimization Design of Dynamic

Quantizer via Matrix Uncertainty Approach, Mathematical Problems in Engineering, 査読有, 2013巻, 2013, 10.1155/2013/250683

- [8] 澤田賢治, 井川達也, 新誠一, 熊谷賢治, 米田尚登, 半導体搬送用台車の連続時間口バスト有限時間整定制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 49巻, 2013, 246 - 254, 10.9746/sicetr.49.246
- [9] 岡島寛, 澤田賢治, 海部静, 松永信智, 通信容量制約を満足する動的量子化器の出力可到達領域に基づいた性能改善, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 48巻, 2012, 359-361, 10.9746/sicetr.48.359

[学会発表](計21件)

- [1] 中村亮介, 澤田賢治, 新誠一, 熊谷賢治, 米田尚登, モデル予測制御を用いた半導体の搬送スケジューリングの高速化, 第2回制御部門マルチシンポジウム, 2015年3月4日~7日, 東京, 日本
- [2] Ryosuke Nakamura, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Kenji Kumagai, Hisato Yoneda, On the discrete-time modeling for efficient OHT scheduling, AROB 20th 2015, 2015年1月21日~23日, Beppu, Japan
- [3] Ryosuke Nakamura, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Kenji Kumagai, Hisato Yoneda, Dispatching and Conflict-free Routing based on Model Predictive Control in Semiconductor Fab, The 2014 CACS International Automatic Control Conference, 2014年11月24日~26日, Kaohsiung, Taiwan
- [4] 澤田賢治, 新誠一, 和分型状態方程式に基づく適応オブザーバ構成, 第57回自動制御連合講演会, 2014年11月10日~12日, 群馬, 伊香保
- [5] 澤田賢治, 新誠一, 入出力量子化システムに対するモデル追従型制御, 第57回自動制御連合講演会, 2014年11月10日~12日, 群馬, 伊香保
- [6] Wataru Toriumi, Seiichi Shin and Kenji Sawada, A smartphone centered system for home appliances, IECON2014, 2014年10月29日~11月1日, Dallas, TX, USA
- [7] Kenji Sawada and Seiichi Shin, Model following control for continuous-time discrete-valued input systems via matrix uncertainty approach, SICE Annual Conference, 2014年9月9日~12日, Hokkaido, Japan
- [8] Kenji Sawada, Ryo Yanagawa, Seiichi Shin, On the adaptive observer for summational type state space equations, The 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, 2014年8月10日~12日, Kumamoto, Japan

- [9] Kenji Sawada and Seiichi Shin, Output feedback controller synthesis for continuous-time discrete-valued input systems: Model following control case, European Control Conference, 2014年6月24日~27日, Strasbourg, France
- [10] Kenji Sawada and Seiichi Shin, Model following output feedback controller synthesis for discrete-valued input systems, The IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control, 2014年3月14日~16日, Yokohama, Japan
- [11] 中村亮介, 澤田賢治, 新誠一, 熊谷賢治, 米田尚登, モデル予測制御を用いた自律無人搬送車のタスク割当てと経路計画の動的最適化, 第1回制御部門マルチシンポジウム, 2014年3月4日~7日, 東京, 日本
- [12] Kenji Sawada and Seiichi Shin, Model following control for continuous-time discrete-valued input systems, AROB 19th 2014, 2014年1月22日~24日, Beppu, Japan
- [13] Ryosuke Nakamura, Kenji Sawada, Seiichi Shin, Kenji Kumagai, Hisato Yoneda, Simultaneous Optimization of Dispatching and Routing for OHT Systems via Hybrid System Modeling, IEEE IECON 2013, 2013年11月10日~13日, Vienna, Austria
- [14] Kenji Sawada and Seiichi Shin, On the Numerical Optimization Design of Continuous-Time Quantizer: A Matrix Uncertainty Approach, European Control Conference, 2013年7月17日~19日, Zurich, Switzerland
- [15] Kenji Sawada and Seiichi Shin, On the output feedback control of discrete-valued input systems, ECTI-CON 2013 2013年5月15日~17日, Krabi, Thailand
- [16] 小坂匠平, 澤田賢治, 新誠一, 自律無人搬送台車への連続時間有限整定制御器の実装方法の研究, 第13回制御部門大会, 2013年3月5日~8日, 福岡, 日本
- [17] Kenji Sawada and Seiichi Shin, Synthesis of continuous-time dynamic quantizers for LFT type quantized feedback systems, AROB 18th 2013, 2013年1月31日~2月2日, Daejung, Korean
- [18] 澤田賢治, 新誠一, 数値最適化に基づく連続時間型量子化制御系の一構成法, 第55回自動制御連合講演会, 2012年11月17日~18日, 京都, 日本
- [19] Kenji Sawada and Seiichi Shin, On numerical optimization design of continuous-time feedback type quantizer for networked control systems, The 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2012年8月20日~24日, Seoul, Korean
- [20] Kenji Sawada and Seiichi Shin, Synthesis of continuous-time dynamic quantizer for quantized feedback systems, The 4th IFAC Conference on Analysis and Design of Hybrid Systems, 2012年6月6日~8日, Eindhoven, Netherland
- [21] 澤田賢治, 離散値入力系に対する出力フィードバック制御器の一構成, 第56回システム制御情報講演会, 2012年5月21日~23日, 京都, 日本

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤田 賢治 (SAWADA KENJI)
電気通信大学・i-パワードエネルギー・システム研究センター・准教授
研究者番号: 80 550946

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し