

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 24 年 5 月 26 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760315

研究課題名（和文）拘束システムに対する有限整定制御の構造に関する研究— 一般化セクター条件の活用

研究課題名（英文）Research on deadbeat control structure for constrained systems: Utilization of generalized sector condition

研究代表者

澤田 賢治（SAWADA KENJI）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：80550946

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、拘束条件を考慮した有限整定制御理論を一般化セクター条件により新たに構築することにある。有限整定制御とは、誤差を有限時間内に零に整定する制御であり、一般化セクター条件とは、拘束条件付アクチュエータの高効率稼働を実現する条件である。本研究により、搬送台車等の機械系に対する、高速・高精度稼働、拘束条件の達成、近年問題である CO2 削減のための低エネルギー稼働等の相反する要求を両立する制御方式を構築できる。さらに、実機実験を通して、一般化セクター条件に基づく有限整定制御の実装方式を検討する。

研究成果の概要（英文）：The objective of the research is to construct a new deadbeat control theory for constrained systems via generalized sector condition. The deadbeat control settles the error to zero in finite time and holds it zero for all time after that. The generalized sector condition achieves the highly-efficient drive of constrained actuators. This research enables us to construct a control law that reconciles conflicting conditions such that high speed, high accuracy, hard constraints for mechanical systems such as automatic guided vehicles, and low energy drive for CO2 reductions. In addition, the research discusses an implementation method of the deadbeat control via generalized sector condition.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論，有限整定，一般化セクター，半正定値計画

1. 研究開始当初の背景

近年、工業製品の製造工程では生産性向上のために、大型化・高速化・高精度化等の複数の性能要求を満たす製造機械システムが常に必要とされる。例として、液晶パネル製作工場や半導体製作工場内で使用される搬送台車が挙げられる。要求内容としては、液晶パネルや半導体ウエハのサイズの大型

化による 1 回の工程の生産量増大、搬送台車の動作の高速化・精度向上による工程時間の短縮・処理ミスの低下などである。実際、IC チップに用いられる半導体ウエハのサイズは現行直径の 300mm から、450mm へと拡大される。これに伴い、ウエハ加工装置間の搬送に用いられる天井走行型搬送台車は大型・高性能化、重量化した搬送物の高速搬送技術の確立が求められている。さて、こ

れらを実現するための課題には、大きくわけて2つ存在する。

(1) 過渡応答の調整・指定

半導体製造工場では、数百台の無人搬送台車 (AGV) がリアルタイムで管理される。近年は製造高効率化のために、加工装置間を移動する AGV の台数が益々増加する。これにより、車間距離は狭まっていくため、各 AGV の位置を高精度かつリアルタイムで自由に調整・指定 (過渡応答調整・指定) できる制御が必要である。現在の AGV の多くは PID 制御方式であるが、制御誤差の収束精度は指数関数のオーダーでしか保証できないため、残留振動の発生による制御精度の劣化が発生しやすい。言い換えると、決められた時間内に決められた場所に整定することが求められる AGV の位置決め制御には、PID が必ずしも適当とは言えない状況である。

(2) 拘束条件の対処

近年の CO2 削減対策から、AGV 大型・高速化による消費電力増加を抑える必要がある。また、AGV が走行する搬送路の1周は10数kmであり、この搬送路上を300台から400台のAGVが1日に何周も稼働することになる。1台の消費電力を数%抑えるだけでも、大きな消費電力の削減となる。消費電力を抑えるには、AGV のアクチュエータに供給される電力を抑えれば良い。これは、電気で動く AGV アクチュエータの出力に制限 (拘束条件) を加えることに等しい。また、物理的な制約・安全面から AGV には様々な拘束条件が存在する。拘束条件を全く考慮しない、または過度に考慮した制御は AGV の不安定挙動や低速稼働を発生させるため、拘束条件下での可安定性を考慮できる制御が必要である。また、AGV の搬送制御には、電車で用いられる閉塞区間制御が適用されている。AGV の台数が増えている現状、この閉塞区間制御の仕様条件 (拘束条件) は益々厳しいものとなっている。

これら2つに応えるために、従来研究の多くは、有限整定制御が主軸とされてきている。有限整定制御とは、制御誤差 (指令位置に対する実際の制御対象の出力位置) を有限時間内に零に整定する制御[1]である。当制御では詳細に整定時間を設定でき、その分整定時間を短縮できることから消費電力を抑えるのに適した制御である。これまで、最適レギュレータ手法[2]や入力・状態拘束付きの有限整定制御[3]等、様々な手法が与えられてきた。しかしながら、それら従来結果は、有限整定

可能性と拘束条件下での可安定性を別々に考えているため、実用的な結果・実装方法を得ることができていない。すなわち、近年の産業応用の観点から、項目(1)と項目(2)を統一的に扱えるような、制御理論が必要となってきた。

[1]新誠一：有限時間整定制御と制御理論．計測と制御 1999年第38巻9号 537/540

[2]星島耕太，池田雅夫：2段直動型搬送機のジャークを抑制する制御．システム制御情報学会論文集 2006年第19巻22号 488/495

[3]木村，榎田，西村：状態飽和・拘束を考慮した船舶操舵系の有限時間整定制御．日本機械学会論文集 C編 2005年第71巻709号 2776/2782

2. 研究の目的

これまで申請者は、入力拘束下での可安定性判別の基礎条件となる一般化セクター条件と、入力拘束付システムを制御する Anti-windup 制御系に関する設計論[4]を研究してきた。一般化セクター条件とは、アクチュエータ出力を抑制するのではなく、制御性能が劣化しない範囲まで活用する条件である。消費電力の制約下・物理的制約下で、最大かつ効率的な電力利用に適する。また、Anti-windup 制御系とは、入力拘束系に対して、常に動作するフィードバック補償器と、アクチュエータ飽和時に動作する Anti-windup 補償器から構成される。

近年、申請者は、別々の特性を有する有限整定制御系と Anti-windup 制御系が、実は制御系構造にある種の類似性を有することに注目している。この類似性を出発点とし、申請者は、拘束条件下での可安定性と有限整定可能性を統一的に扱えるような制御系設計法の導出を目的に研究を行っている。

以上を踏まえた上で、本研究の目的は、搬送台車等の機械系に対する、高速・高精度稼働、拘束条件の達成、近年問題である CO2 削減のための低エネルギー稼働等の相反する要求を両立する制御方式を構築することにある。すなわち、一般化セクター条件を利用した、新しい連続時間有限整定制御系の解析・設計理論の礎の構築と実機実験による実装方式の検討を行う。具体的な目的項目は以下の通りである。

(1) 有限整定制御系と Anti-windup 制御系の構造類似性に基づき、入力拘束を有する有限整定制御系に対する一般化セクター条件を導出する。

(2) 上記の一般化セクター条件に基づき、入力拘束条件下での可安定性を考慮した有限整定可能条件を導出する。

- (3) 有限整定制御系の制御則は、制御対象を台車系（積分器+安定系）に限定し導出する。
- (4) 提案制御則の有効性・実装方式を検証するために、台車系を用いた実機検証を行う。

有限整定制御を一般化セクター条件から見直すことにより、既存とは異なる、新たな有限整定可能条件を導くことは、学術的な面からも独創的である。また、有限整定制御系と Anti-windup 制御系も一般化セクター条件を通して統一的に扱う点は本研究の特色となる。その結果、以下のような効果が期待される。

- (5) 有限整定制御のサーボ条件に関する未解決問題の新解法を与えることができる。
- (6) ロバスト性を考慮した有限整定制御の新しい実装方式を与えることができる。
- (7) 内部モデル制御系や 2 自由度制御系といった他の制御系も一般化セクター制御を通して統一的に扱える制御理論の構築の基盤を与えることができる。

[4]澤田賢治, 木山健: 入力飽和を有するサーボ系に対する出力フィードバック補償器の設計方法. システム制御情報学会論文集 2009 年第 22 巻 3 号 107/115

3. 研究の方法

本研究目的を達成するために、理論確立・実機検証の 2 方向から研究を進めた。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。アクチュエータ出力に拘束条件を有するシステムは、可安定や可制御となる領域が平衡点や動作点近傍に制限される。一般化セクター条件とは、システムが可安定となる領域を見積もる条件であり、以下の条件を満足する Anti-windup 制御則等が存在するための（特別な場合は必要）十分条件を与える。(i) 平衡点まわりに 2 次形式リアプノフ関数で与えられる楕円体の可安定領域が存在する。(ii) 一般化セクター条件が成り立つ領域内に可安定領域が存在する。(i), (ii) を満足する制御則は線形行列不等式 (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。

(1) 平成 22 年度

研究初年度は問題を単純化するため、制御誤差と実装対象のセンサ・アクチュエータ精度の関係を考慮しない。また、制御対象の非最小位相特性への対処も保留する。その上で、離散時間上の設計条件を導出する。

① 基礎理論の構築

時間を固定した有限整定可能条件を一般化セクター条件により導出する。その際、以下の点に留意して研究を進める。

- (i) 差が零に収束する整定時間は固定して考える。(ii) 制御系から内部モデル制御系への変換式に基づき、有限整定制御系の一般化セクター条件を導く。(iii) 制御対象を（積分器+安定系）に限定し、それに伴い制御器構造も制限する。これにより、制御系構造を単純化できるので、制御系設計条件を半正定値計画問題で導く見通しを良くする。

② 実装方式の検討

開発・検証期間短縮を目指すために Model Based Development (MBD) に基づく実験環境の構築を行う。制御対象（搬送台車系のテストベース）は、ZMP 社 e-nuvo WHEEL, 制御目的は位置決め制御、MBD 環境は dSPACE 社の Matlab/Simulink による統合開発環境パッケージ ACE Kit 1104 (DS1104) とする。

半導体搬送台車への実装を考慮して、村田機械株式会社のサポートの元で搬送物の積載量に着目した搬送台車のモデリング方法とトルクコントロールの実装方法についても検討する。

(2) 平成 23 年度

平成 22 年度に保留していた、センサ・アクチュエータ精度と非最小位相特性への対処を行う。

③ 基礎理論の構築

センサ・アクチュエータの解像度・精度に対応するため、制御対象を「連続値ダイナミクス」と「離散値ダイナミクス」としてモデリングする。すなわち、解像度の荒さを離散値ダイナミクスにより表現する。これにより、解像度の荒さによる制御性能への影響を見積もるための解析条件を与える。また、非最小特性と解像度の荒さに対処するために、動的量子化器を導入する。すなわち、有限整定制御器に対して動的量子化器を追加接続することにより、制御誤差を低減させる。また、有限整定制御器と動的量子化器を統合化するために、連続時間型の動的量子化器の設計方法について検討する。

④ 実装方式の検討

半導体搬送台車の積載量に着目した有限整定制御の実装方式に関して検討する。具体的には、有限整定制御器の構造を単純化するため、制御器の構造の自由度を用いたスパースな有限整定制御器の構築方法を検討する。それと同時に、モデル化誤差に対するロバスト性、サーボモータの許容電力量を同時に考慮した設計方法についても検討する。

4. 研究成果

(1)平成 22 年度

離散時間系に対する設計条件の導出と組み込み系の制御対象に対する実装方法を検討した。

① 理論的な成果

整目標値信号の整形と制御器の設計という統合設計問題を半正定値計画問題に帰着することができた。これにより、拘束条件を達成しつつ、従来よりも目標値信号に対する整定時間の短縮を実現することができた

② 実装面での成果

制御器が H8 マイコン上に実装される位置決め実験機に対して、路面状況により稼働状態を自動的に変更するトルクコントロールアルゴリズムを提案した。これにより、有限整定を達成しにくい路面状況において、余計なエネルギーロスを発生させることなく、位置決めが実現できるようになった。

③ 課題と解決法

組み込み系に対する実装時の問題として、当初の想定より制御対象の非最小位相特性とアクチュエータとセンサの解像度荒さに制御誤差が大きく依存することが判明した。この問題に対処するために、制御誤差の最小化と制御系の安定化を同時達成する動的量子化器の設計を新たに与えた。この際、動的量子化器の設計問題も半正定値計画問題に帰着することができた。

(2)平成 23 年度

平成 22 年度の研究成果を踏まえて、平成 23 年度は、実装対象のモデリング精度、センサ・アクチュエータ精度、非最小位相特性に留意しつつ研究を進めた。

④ 理論面での成果

平成 22 年度で与えたセンサ・アクチュエータ精度向上のための動的量子化器の設計条件の拡張を行った。具体的には、分散型制御系への適用、制御が可能な荒い解像度自体の設計等である。これらの結果は、搬送台車の制御だけではなく、ネットワークシステムの制御にも適用可能なものとなっている。

⑤ 実装面での成果

搬送台車の積載量に着目したモデリングとキャリブレーションに関する成果を学術論文として投稿した。さらに、この成果に基づき、搬送台車に対する連続時間型の有限整定制御系の設計手法を提案した。本設計手法は、積載量差に対するロバスト性、サーボモータの許容電力量を同時に考慮した実用性の高いものであ

る。学術的にも、制御器の構造の自由度とスパース性を結びつける有意義な知見を得ることが出来た。

⑥ 新たな展開

動的量子化器を連続時間型有限整定制御に適用するために、離散時間領域の設計から連続時間領域への拡張も行った。本結果は、離散時間領域においてサンプリング周波数の小さくしていった極限にあるようなものではなく、新たに連続時間領域上で導出された動的量子化器であり、学術面・応用面で非常に有意義な結果となっている。また、一般化セクター条件の新たな理論展開へと繋が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 5 件)

- ① 岡島寛, 澤田賢治, 松永信智, 南裕樹, 通信容量制約に基づく MIMO 系に対する動的量子化器設計, 電気学会論文誌 C 編, 査読有, 131 巻, 2011, 1767-1774
- ② 澤田賢治, 田中香介, 新誠一, 熊谷賢治, 米田尚登, 半導体搬送用台車のモデリングとキャリブレーション—フープ積載量に対するモデル精密化—, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 47 巻, 2011, 412-419
- ③ 岡島寛, 澤田賢治, 松永信智, 通信容量制約に基づく動的量子化器の統合設計, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 47 巻, 2011, 126-133
- ④ 澤田賢治, 新誠一, 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, 査読有, 23 巻, 2010, 249-256
- ⑤ 岡島寛, 松永信智, 澤田賢治, 通信容量制約に基づく動的量子化器の量子化幅設計と性能解析, 計測自動制御学会論文集, 査読有, 46 巻, 2010, 327-335

[学会発表] (計 13 件)

- ① 澤田賢治, AGV に対する連続時間型ロバスト有限整定サーボ系の実装検討, 計測自動制御学会 12 回制御部門大会, 2012 年 3 月 13 日, 奈良県文化会館
- ② Kenji Sawada, Dynamic quantizer design for MIMO systems based on communication rate constraint, IEEE IECON, 2011 年 11 月 8 日, Crown Conference Center, Melbourne, Australia
- ③ 澤田賢治, 数値最適化に基づく量子化制御, 計測自動制御学会北陸支部講演会, 2011 年 10 月 20 日, 北陸先端科学技術大

- 学院大学
- ④ 澤田賢治, むだ時間を有する離散値入力型システムに対する連続時間動的量子化器, 計測自動制御学会第40回制御理論シンポジウム, 2011年9月27日, コスモスクエア国際交流センター
 - ⑤ Kenji Sawada, Synthesis of decentralized dynamic quantizer within invariant set analysis framework, 18th IFAC World Congress, 2011年9月1日, UCSC, Milan, Italy
 - ⑥ Kenji Sawada, Integrated Design of Filter and Interval in Dynamic Quantizer under Communication Rate Constraint, 18th IFAC World Congress, 2011年8月30日, UCSC, Milan, Italy
 - ⑦ Kenji Sawada, Synthesis of Dynamic Quantizers for Quantized Feedback Systems within Invariant Set Analysis Framework, American Control Conference, 2011年6月29日, San Francisco Hilton, California, USA
 - ⑧ 澤田賢治, 連続時間動的量子化器の一設計法, 計測自動制御学会第11回制御部門大会, 2011年3月16日, 琉球大学
 - ⑨ Kenji Sawada, Optimal Quantization Interval Design of Dynamic Quantizers which Satisfy the Communication Rate Constraints, IEEE Conference on Decision and Control, 2010年12月6日, Hilton Atlanta, Atlanta, USA
 - ⑩ Kenji Sawada, Implementation test model of torque control for Automatic Guided Vehicle, International Conference on Control, Automation and Systems, 2010年10月27日, KINTEX, Gyeonggi-do, Korea
 - ⑪ 澤田賢治, 不変集合解析に基づく分散型動的量子化器, 第39回制御理論シンポジウム, 2010年9月28日, ホテルコスモスクエア国際交流センター, 大阪
 - ⑫ Kenji Sawada, A multi-sector analysis for dynamic quantizer synthesis, IEEE Multi-Conference on Systems and Control, 2010年9月9日, A port city on Tokyo Bay, Yokohama, Japan
 - ⑬ Kenji Sawada, A design procedure of discrete-time tracking control systems with actuator saturation, SICE Annual Conference 2010, 2010年8月19日, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤田 賢治 (SAWADA KENJI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・

助教

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