

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560417

研究課題名(和文) 拘束システムの学習制御とその応用

研究課題名(英文) Learning control for constrained systems and its application

研究代表者

木山 健 (KIYAMA TSUYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・特任准教授

研究者番号：80362656

研究成果の概要(和文)：アクチュエータの飽和を有する線形時不変な制御系の出力フィードバック型のサーボ系の設計問題を線形行列不等式条件と線形行列等式条件に基づいた凸最適化問題に帰着し、サーボ系のシステムティックな設計方法を体系立てています。この成果を受け、本方法を応用するパワー増幅ロボットの制御を行う基礎として、ロボットの力学モデルを導出し、モデルに基づいたロバスト性を考慮したPID制御を行い、この有用性を実証しています。

研究成果の概要(英文)：This study considers the output feedback control synthesis problem for linear time invariant servosystems with actuator saturation. The problem can be recast as a convex optimization problem based on linear matrix inequalities and linear matrix equations. Then, the study develops a systematic design method for the servosystems. As a result, a dynamic model of power assistive machinery with high strength-amplification is derived as the basis of controlling the robot for an application of the design method. It is confirmed that a robust PID control of the robot using the dynamic model is helpful.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：飽和、出力フィードバック制御、アンチwindアップ制御、線形行列不等式サーボ系、積分2次性能、L2/指数安定性能、低次コントローラ、パワーアシスト

1. 研究開始当初の背景

線形ロバスト制御理論がほぼ完成の域に達し、制御理論の次の流れの一つとして、ロバスト制御の実用性をさらに高めるための研究が盛んに行われてきています。

この研究の一つとして、近年拘束条件を有する制御系の解析・設計が脚光を浴び、実用

上魅力的なものとなってきています。制御系のアクチュエータおよびセンサーには物理的な制約のため許容可能な最大の出力や入力に必ず制限が存在します。したがって、もし性能の要求が厳しく非常に大きな制御入力を必要としますと、制御対象への入出力が“飽和”してしまいます。したがって、この

飽和の影響など、すなわち、拘束条件を考慮しつつ制御系を解析・設計する拘束システムの研究は大変重要な課題の一つとなってきました。

この課題への代表的な対処方法として、ロバスト制御に基づく方法があります。この方法は、拘束条件を満たすように飽和要素などを制御系に導入し、この飽和要素を記述する飽和関数をモデル誤差のように扱うことで、制御系の解析・設計問題をロバスト制御に帰着させるものです。

この際、制御対象の状態が計測可能な場合、単一の状態フィードバックゲインを利用する場合と比較し、複数の状態フィードバックゲインを利用するオフライン型の切替制御はよりよい制御性能を達成可能です。したがって、制御対象の状態が計測不可能な出力フィードバック制御の場合も同様に、単一のコントローラを利用する場合と比較し、複数のコントローラを利用するオフライン型の切替制御の方が、よりよい制御性能を達成可能ではないかと考えられます。しかし、現在のところこの制御問題は未解決のままになっています。

2. 研究の目的

(1) 拘束システムに対する出力フィードバック制御タイプによる切替制御の基礎理論構築から学習制御への展開を行うことです。

(2) パワー増幅ロボット、あるいはその一部分の制御による提案手法の応用を行うことです。

3. 研究の方法

既知の拘束システムに対して拘束条件を満たすように飽和要素などを制御系に導入し、制御対象の出力と飽和要素の入出力が計測可能な制御系の構造を利用し、飽和要素の出力から入力への直達項を有する動的コントローラの設計問題の可解条件を線形行列不等式条件に帰着させます。

次に、状態空間上での複数の仮想的な平衡点およびその異なる大きさの近傍に対して、それぞれの制御性能をそれぞれ保証する複数のコントローラを導出した線形行列不等式条件により設計します。

さらに、制御対象の初期状態の集合と出力および、コントローラの状態から制御対象の状態の上界値を求め、これらの情報に基づき複数のコントローラを切り替える制御のアルゴリズムの理論的な構築を試みます。

一方、未知の拘束システムのモデル推定法を開発し、この方法によりモデルを推定しつつ、このシステムに対する一連の切替制御の設計をオンライン化することで学習制御への基礎理論の展開を試みます。

最後に、パワー増幅ロボットやその一部分の制御において提案方法の実機検証を試みます。

4. 研究成果

まず、研究の主な成果の概要を述べます。アクチュエータの飽和を有する線形時不変な制御系の出力フィードバック型のサーボ系の設計問題を線形行列不等式条件と線形行列等式条件に基づいた凸最適化問題に帰着し、この一般的なサーボ系のシステムマティクな設計方法を体系立てた点に研究成果の学術的な意義があります。

この理論的な成果を受け、先端的な本方法を応用するパワー増幅ロボット（パワーローダー）の制御を行う基礎として、このロボットの力学モデルを導出し、このモデルに基づいたロバスト性を考慮した PID 制御を行い、有用性を実証しています。

今後の展望として、上記の一般的なサーボ系のシステムマティクな設計方法を用いて、出力フィードバック制御タイプによる切替制御および学習制御への展開が考えられます。以下では、雑誌論文と整合させて研究成果の詳細を述べます。

(1) 雑誌論文①では、アクチュエータの飽和の非線形性を有する連続時間線形時不変な制御系設計問題を考えています。制御構造は標準的で、アンチwindアップ機構を有するノミナルな線形時不変な出力フィードバック構造です。

古典的な方法はアンチwindアップ設計に焦点が当てられています、これは初めにアクチュエータの線形な駆動範囲内で局所的な性能を達成するようにノミナルなコントローラが設計され、次にアクチュエータが飽和する場合に安定性や性能特性を保証するようにアンチwindアップ補償器が付加される方法です。

対照的に、この論文ではノミナルなコントローラとアンチwindアップ補償器の両方を統合的に設計する方法を提案しています。マルチプライアの設定での一般化セクター手法を用いて、与えられた楕円体が閉ループ系の吸収領域になるように設計される十分条件が線形行列不等式の形式で得られています。この結果は円板条件に基づく統合的設計と一般化セクター手法に基づくアンチwindアップ補償器の設計を特別な場合として包含することを示しています。この論文は、マルチプライアの一般化セクター手法の枠組みでアンチwindアップ補償器の直達項が達成可能な吸収領域を大きくすることに寄与しないことも示しています。

(2) 雑誌論文②は飽和（等価的に不感帯）

要素を有する非線形系に対し、一般化セクター条件に基づき、制御対象の次数より低次のアンチwindアップ機構を備えた動的出力フィードバック補償器による吸収領域の設計問題の可解条件を導出している。

第一の結果として、制御対象の状態の一部が観測できる場合、その状態の観測数だけ制御対象の次数より低次の補償器の設計問題の可解条件が線形行列不等式に帰着可能であることを明らかにしている。この可解条件により、吸収領域の最大化問題を凸最適化問題に帰着可能なことを示している。

第二の結果として、一般化セクター条件に基づく設計では、制御対象の状態の一部が観測できる場合、制御対象と同次の補償器で達成可能な吸収領域は、上記の低次の補償器で必ず達成できることを明らかにしている。この結果は、飽和を有する制御問題において、補償器の次数と制御性能の一つの関係を明らかにしたものであり、重要な知見である。

(3) 雑誌論文③では、飽和や不感帯の非線形性を有する連続時間線形時不変な制御系を考え、一般化セクター手法に基づき、状態空間上の領域的な積分 2 次性能を満たすサーボ系の設計方法を提案している。この方法は動的出力フィードバック補償器と動的アンチwindアップ補償器の統合化設計である。

なお、非線形性の出力が制御に利用可能であることを仮定する。この場合、サーボ補償器を与えた上で、外生入力信号に追従している定常状態からの偏差系を用いて、アンチwindアップ機構を有する動的出力フィードバック補償器の設計問題の可解条件および補償器の初期状態の設定方程式を、線形行列不等式 (LMI) 条件および線形行列方程式 (LME) 条件にそれぞれ帰着可能であることを示している。

最後に、アンチwindアップ機構を備えた制御系を、導出された LMI 条件および LME 条件により設計した数値例を通じて、提案設計方法の有効性を示している。

(4) 雑誌論文④は、飽和 (等価的に不感帯) を有するシステムに対する出力フィードバック型のサーボ系を考えている。

まず飽和を有するシステムに対し、外生入力に追従した場合の定常状態に関する線形行列方程式 (LME) 条件を導出している。この結果は、従来の飽和のない線形システムに対する結果を特別な場合として包含するものである。

つぎに、アンチwindアップ制御系に対しこの条件は、入力飽和を有する制御対象と、アンチwindアップ機構を有した動的出力フィードバック補償器と、サーボ補償器と

の定常状態に関する等価な LME 条件に、システム論的に明確に分離できることを示し、結果として、補償器の定常状態に関する LME 条件を与えている。この結果は、線形行列不等式に基づいた入力飽和を有する出力フィードバック型のサーボ系の設計方法を可能とする定常状態に関する基礎結果である。

(5) 雑誌論文⑤では、飽和や不感帯の非線形性を有する連続時間線形時不変な制御系を考え、一般化セクター手法に基づき、領域的な L2/指数安定性能を満たす二つの制御系設計方法を提案している。この一つの方法は動的出力フィードバック補償器と動的アンチwindアップ補償器の統合化設計であり、他方の方法は静的出力/状態フィードバック補償器と静的アンチwindアップ補償器の統合化設計である。この二つの方法では、非線形性の出力が制御に利用可能であることを仮定する。この場合、この二つの方法に基づく制御系設計問題は、それぞれ線形行列不等式 (LMI) 条件による最適化問題に帰着可能であることを示している。

さらに、前者の動的補償器に基づく設計条件は、対応する後者の静的補償器に基づく設計条件の十分条件になっていることを証明している。特に、この動的補償器の設計条件は、飽和や不感帯の非線形性を有する制御系の状態フィードバックゲインの設計条件および、この非線形性のない線形な制御系のオブザーバゲインの設計条件により構成されることを明らかにしている。

最後に、アンチwindアップ機構を備えた制御系を、導出された LMI 条件により設計した数値例を通じて、提案設計方法の有効性を示している。

(6) 雑誌論文⑥では、飽和や不感帯の非線形性を有する連続時間線形時不変システムを考え、マルチプライア (S-procedure) およびポリトープ的方法を用いて、2 次形式のリアプノフ関数に基づき、このシステムの領域的な L2/指数安定性能の解析方法を提案している。特に、この性能を保証するシステムの初期状態の領域を新しく L2/指数安定性能保証領域として定義している。この解析のため、雑誌論文⑥では初期状態は有界な集合に所属し、また外乱は有界な L_2 ノルムを持つ集合に所属することを仮定する。結論として、2 つの方法による解析問題は、それぞれ線形行列不等式による最適化問題に帰着される。

一般的に、マルチプライアに基づく解析条件は、対応するポリトープ的方法に基づく解析条件の十分条件になっていることを証明している。飽和あるいは不感帯の非線形性が単数の特別な場合、マルチプライアによ

る解析条件は、ポリトープ的方法による解析条件と厳密に等しいことを指摘している。したがって、この単数の非線形性を有するシステムの安定解析のこれまでの結果より、マルチプライアによる解析条件は、2次形式のリアプノフ関数を用いた吸収領域に基づく安定解析の必要十分条件を与えることを明らかにしている。

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6件)

- ① 澤田賢治、木山健、岩崎徹也、Generalized Sector Synthesis of Output Feedback Control with Anti-windup Structure、Systems & Control Letters、査読有、Vol. 58、No. 6、2009、pp. 421-428
- ② 澤田賢治、木山健、低次出力Feedback/Anti-windup補償器による安定化設計—補償器の次数と制御性能の関係性、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol. 22、No. 4、2009、pp. 161-167
- ③ 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誌、査読有、Vol. 22、No. 3、2009、pp. 107-115
- ④ 澤田賢治、木山健、入力飽和を有するサーボ系の定常状態に関する条件の等価性、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol. 21、No. 10、2008、pp. 339-341
- ⑤ 木山健、飽和を有する制御系の解析条件の関係性について—マルチプライア/ポリトープ的方法に基づくL2/指数安定性能解析、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 44、No. 9、2008、pp. 705-713
- ⑥ 木山健、飽和を有する制御系の解析条件の関係性について—マルチプライア/ポリトープ的方法に基づくL2/指数安定性能解析、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 44、No. 5、2008、pp. 425-433

[学会発表] (計6件)

- ① 大久保厚志、木山健、大須賀公一、城垣内剛、相宅玲志、藤本弘道、A dynamic model of power-assistive machinery with high strength-amplification、SICE Annual Conference 2010 in Taipei、査読有、2010年8月20日、台湾台北、ザグランドホテル、pp. 2026-2029
- ② 石田和之、木山健、大須賀公一、城垣内剛、相宅玲志、藤本弘道、Movement analysis of power-assistive machinery with high strength-amplification、

SICE Annual Conference 2010 in Taipei、査読有、2010年8月20日、台湾台北、ザグランドホテル、pp. 2022-2025

- ③ 澤田賢治、木山健、A design procedure of discrete-time tracking control systems with actuator saturation、SICE Annual Conference 2010 in Taipei、査読有、2010年8月18日、台湾台北、ザグランドホテル、pp. 637-641
- ④ 木山健、大須賀公一、Generalized Sector Synthesis of Reduced-Order Output Feedback Controllers for Discrete-time Servosystems with Control Input Saturation、Proceedings of American Control Conference、査読有、2010年7月2日、アメリカボルチモア、ボルチモアマリOTTウォーターフロント、pp. 6775-6780
- ⑤ 相宅玲志、城垣内剛、藤本弘道、木山健、大須賀公一、全身型パワー増幅ロボット(パワーローダー)の開発、平成21年度計測自動制御学会関西支部若手研究発表会、2010年1月15日、大阪、常翔学園大阪センター、pp. 105-106
- ⑥ 中西穂、大須賀公一、木山健、酒井悟、パワーショベル型油圧レスキューシステムの協調移動制御、計測自動制御学会第10回システムインテグレーション部門大会、2009年12月26日、東京、芝浦工業大学豊洲キャンパス

[図書] (計1件)

- ① 木山健、(社)計測自動制御学会、SICEセミナー「ポストロバスト制御」—ロバスト制御の基礎から、拘束系の制御、モデル予測制御の最前線—テキスト、拘束系の局所的解析・設計、2008年、pp. 23-62

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木山 健 (KIYAMA TSUYOSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・特任准教授
研究者番号：80362656

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

奥 宏史 (OKU HIROSHI)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号：20351455