

平成21年 5月22日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18760325  
 研究課題名（和文）実時間最適化による機械システムの高機能・高性能制御  
 研究課題名（英文）High Performance Control of Mechanical Systems  
 via On-line Optimization  
 研究代表者  
 和田 信敬（NOBUTAKA WADA）  
 広島大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号： 50335709

## 研究成果の概要：

本研究では、入力拘束を持つ機械システムに対する高性能制御アルゴリズムを構築した。具体的には、状態依存可変ゲイン制御則およびオンライン目標信号修正機構から構成される拘束制御システムに対するサーボ制御アルゴリズムを構築した。さらにこの手法を、外乱およびモデル化誤差が存在する場合に対し拡張した。ロバスト化された制御アルゴリズムを、逐次的に一変数の最適化問題に分解し、高速に解を得るアルゴリズムを構築した。構築した制御アルゴリズムを、ツインロータヘリコプターモデル実験装置に適用し、その有効性を検証した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	210,000	3,410,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

航空機、自動車、FA装置などの機械システムで用いられるアクチュエータのほとんどは、物理的制約のため最大出力に制限がある。機械システムの制御性能（高速応答、外乱抑制など）を極限まで高めるには、アクチュエータを性能限界まで効率的に用いる制御系設計を行うことが必要である。アクチュエータの出力制限の存在下で高い性能を発揮する制御系の設計問題は、その実用上の重要性のため、近年様々な角度から盛んに研究が行

われている。その代表的な方法に、モデル予測制御と呼ばれる方法がある。この方法では、安定性保証のための下位のフィードバック制御器と、目標軌道計画を行う上位の制御器を統合した2自由度制御構造が採られる。この方法では、時々刻々変化するシステムの状態に応じて、システムの振る舞いが最適となるように目標軌道の再計算が逐次実行される。その結果、制御入力等の振幅制限を陽に考慮した高性能な制御システムを構築することが可能となる。モデル予測制御では毎

時刻最適化問題を解くことが要求されるが、近年の最適化アルゴリズムの改良やマイクロプロセッサの高速化に伴い、状態フィードバックなどの理想的な場合には、応答の速いシステムへの適用が可能となりつつある。しかしながら、実用上重要な、I) 出力フィードバックや、モデル化誤差・非線形性に対してロバストな制御アルゴリズムは、その計算量の膨大さのため短いサンプル周期での実装が要求される機械システムへの適用は現在でもなお困難な状況にあり、更なるブレークスルーが望まれている。また、II) 制御入力等を制約領域にとどめる際、過剰に小さな領域にとどめる可能性があり性能が保守的になるといった問題もある。

本研究の目標は、『I), II) の問題を克服することで、アクチュエータの潜在能力を最大限に発揮させる、機械システムに適用可能なモデル予測制御アルゴリズムを構築すること』である。これにより、機械システムの超高速運動制御、軽量・小型アクチュエータの採用による装置重量の低減・省エネルギー化を達成することが可能となる。さらに、提案手法を用いることで、アクチュエータに冗長性が有る場合に、冗長性を積極的に利用した高性能で信頼性の高い制御システムを構築することが可能となる。

## 2. 研究の目的

上記の目標を達成するため、具体的には以下の項目に取り組む。

(1) 下位制御器の設計：複数の楕円体の凸包領域が正不変集合となる Lyapunov 関数に基づく出力フィードバック制御器の設計法を構築する。これにより、従来法（単一の正不変楕円に基づく手法）と比較して大幅に制御性能（漸近安定領域の大きさ、過渡応答の速さ）を向上させることが可能となる。

(2) 上位制御器の設計と下位制御器との統合：出力フィードバック形式で実現可能な上位制御器（軌道計画アルゴリズム）を構築する。ここでは、状態制約の場合と異なり、制御入力  $u$  自体は飽和制限内に保つ必要はない（飽和関数で振幅が制限されるため）点に着目し、制御入力  $u$  の飽和状態を積極的に利用する軌道計画アルゴリズムを導く。さらに、項目（1）の制御器を下位制御器とするモデル予測制御器を構築する。

(3) 不確かさに対するロバスト性の確保：項目（2）で構築したモデル予測制御アルゴリズムを、不確かさが存在する場合に対してロバストとなるよう拡張する。

(4) 高速最適化アルゴリズムの構築：項目（2）、（3）で構築した制御アルゴリズムを実装するための高速最適化アルゴリズムを構築する。本研究では制御性能向上のため、上位制御器と下位制御器の統合最適化を逐次

行う。この場合、線形行列不等式（LMI）問題を実時間で解くことが必要となる。ここでは、内点法で得た初期解を連続的に変形することで、高速に求解するアルゴリズムを構築する。

(5) アクチュエータ冗長システムにおける制御入力最適分配制御問題への応用：項目（3）の制御法のアプリケーションとして、アクチュエータ冗長システムに対する制御入力最適分配法を構築する。

(6) リアルタイム実装環境の構築および実験的検証：アクチュエータに冗長性を有する移動ロボットシステム実験装置を構築し、検証実験を実施する。

## 3. 研究の方法

(1) 凸包型 Lyapunov 関数に基づく安定・性能解析：正不変集合が複数の楕円体の凸包領域となる離散時間システムのための安定・性能解析条件を導出する。この条件は、正不変集合が単一の楕円体、あるいは、複数の楕円体の共通集合となる従来法と比較して、漸近安定領域の推定、性能評価に関する保守性が大幅に小さくなるものと期待できる。

(2) 凸包型 Lyapunov 関数に基づく状態フィードバック設計：出力フィードバック制御器設計法構築の準備として、(1) の安定・性能解析条件に基づく状態フィードバック制御器の設計法を構築する。

(3) 凸包型 Lyapunov 関数に基づく出力フィードバック型設計：(2) の結果を拡張し、出力フィードバック制御器の構成法を導出する。なお、ここで得られる制御器は、開ループ計画の下位制御器として用いることになるが、それ自体従来の円板条件等に基づく制御器と比較して保守性が少なく、高性能な制御器となる。

(4) 出力フィードバック型軌道計画法の構築：状態量について「観測出来ない状態量についてはその初期値の属する集合の上界が既知である」を仮定し、軌道計画アルゴリズムを構築する。この仮定により、Set-valued オブザーバを用いる場合と比較して一般性は失われるが、計算量の少ない出力フィードバック型軌道計画アルゴリズムを導くことが可能となる。

(5) 時不変フィードバック制御器との統合：(4) の軌道計画法と、(3) の時不変出力フィードバック制御器を統合し、出力フィードバック型モデル予測型制御アルゴリズムを構築する。最終的なモデル予測制御アルゴリズムは LMI 問題に帰着される。

(6) モデル化誤差が存在する場合への拡張：(5) の制御器をモデル化誤差が存在する場合に対し拡張する。

(7) リアルタイム最適化環境の構築：(5)

および(6)の制御則を実装するための、実時間最適化アルゴリズムの開発を行う。(5)および(6)の制御則を実行するには、実時間でLMI問題を解くことが必要である。LMI問題自体は凸最適化問題であり、多項式時間で解くことが可能である。しかし、問題の規模が大きくなると高速に解くことは困難となる。そこで、内点法で得た初期解を連続的に変形することで高速に求解するアルゴリズムを構築する。

(8)実験装置の製作・検証実験：実験装置を製作し、検証実験を行う。この移動ロボットには操舵用アクチュエータに冗長性を有する。なお移動ロボットの軌道追従問題は非線形制御問題ではあるが、非線形性を不確かさと捉えることとし、(6)の手法を適用する。

#### 4. 研究成果

研究成果を以下に列挙する。

(1)状態依存可変ゲイン制御則およびオンライン目標信号修正機構から構成される拘束制御システムに対するサーボ制御アルゴリズムを提案した。さらに、この手法を、外乱およびモデル化誤差が存在する場合にも、アルゴリズムの可解性が確保されるように拡張を行った。

(2)ロバスト化された制御アルゴリズムは、厳密には、毎時刻二変数のLMI問題を解くことが必要となるが、この場合、毎時刻の計算時間が長くなる問題が生じた。そこで、この問題を、逐次的に一変数の最適化問題に分解し、高速に準最適解を得るアルゴリズムを構築した。このとき、最適化問題の構造を活用し、保守性が出来るだけ伴わないように工夫を行った。

(3)上記制御アルゴリズムを、デジタル計算機上に実装し、ツインロータヘリコプターモデル実験装置(Fig.1)に適用し、その有効性を検証した。本実験装置は、VTOL航空機やヘリコプターと類似した、不安定で、非線形性の強いダイナミクスを持つ。その結果、ロータ推力を限界付近まで用い、高速に目標値へ追従可能であり、かつ、外乱ロバスト性が極めて高い制御系を構築できることを確認した。なお、1回の最適化は0.5ms程度で解く事が可能であり、十分実用化可能であることを確認した。なお、当初予定の冗長システムに対する検証実験については、残念ながら、経費の面で実現不可能であった。そこで現有設備であったツインロータヘリコプターモデル実験装置を、実時間最適化制御アルゴリズムを実装できるように改造し、用いる事とした。その結果、次数が高く、非線形性や外乱が存在する実機械システムに適用できる事が確認でき、実機検証の目的は十分達成されたと考えている。

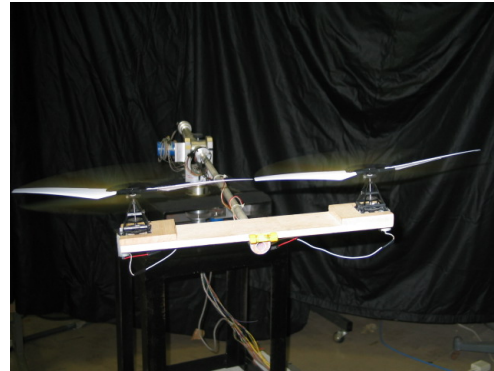


Fig.1 ツインロータヘリコプター実験装置

以上のことから、「実時間最適化を活用した拘束システムに対する高性能な制御アルゴリズムを開発する」という当初目標は達成されたと考えている。これらの成果は、次節記載の査読付き雑誌論文に記載されている。特に、状態依存ゲイン制御手法に関する成果が掲載された雑誌論文②は、システム制御工学の分野における国際的一流誌であり、世界的な評価を受けていると言える。

#### 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14件)

- ① 和田信敬, 南昌行, 松尾祥也, 佐伯正美, ツインロータヘリコプターモデルの目標信号追従制御—ロータの推力制限を考慮した方法—, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.2, pp.199-208 (2009), 査読有
- ② Nobutaka Wada, Masami Saeki, An LMI Based Scheduling Algorithm for Constrained Stabilization Problems, *Systems and Control Letters*, Vol.57, pp.255-261 (2008), 査読有
- ③ Nobutaka Wada, Koji Saito, Masami Saeki, Model Predictive Control for Linear Parameter Varying Systems using Parameter Dependent Lyapunov Function, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vo.II-53, No.12, pp.1446-1450 (2006), 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① Nobutaka Wada, Masayuki Minami, Yoshiya Matsuo, Masami Saeki, Tracking Control of a Twin-rotor Helicopter Model under Thrust Constraints Using State-Dependent Gain-Scheduling and Reference Management, *Proceedings of the IEEE International Conference on*

Mechatronics and Automation, CD-ROM  
(2008, 8, 6), Takamatsu, Japan

- ② Nobutaka Wada, Masami Saeki, Tracking Control with Saturating Actuators: A Method Based on State-Dependent Gain-Scheduling and Reference Management, Proceedings of the IFAC World Congress, pp.15166-15171, (2008, 7, 11), Seoul, Korea
- ③ Nobutaka Wada, Masami Saeki, A Scheduling Algorithm for Constrained Control Systems: An Approach Based on a Parameter Dependent Lyapunov Function, Proceedings of the American Control Conference, pp. 5200-5205, (2007, 7, 13), New York, USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

和田 信敬 (Nobutaka Wada)  
広島大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号 : 50335709

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし