

機関番号：14603  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20760279  
 研究課題名（和文） 不変集合を用いたインデックスフィードバック制御システムの数理解析と設計法の開発  
 研究課題名（英文） Development of Analysis and Design of Index Feedback Control System using Invariant Sets.  
 研究代表者  
 小木曾 公尚 (KOGISO KIMINAO)  
 奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教  
 研究者番号：30379549

研究成果の概要（和文）：不変集合を用いたインデックスフィードバック制御システムの数理解析と設計法を開発するために、拘束条件を有する線形離散時間系のクラスを対象にした、オンライン計算により構成可能な不変集合の近似計算法、インデックスフィードバック制御システムを構成するスイッチング制御の最悪性能解析法、そして、追従性能の改善が可能なインデックスフィードバック制御システムの設計法に関する成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：For development of analysis and design of the index feedback control systems using invariant sets, I have obtained some results and findings for a class of discrete-time linear system with a state and/or control constraint. These include an approximate method for calculating a maximal output admissible set for an online use, an evaluation method of the worst-case control performance for switched systems, and an index feedback control method that allows to improve a control performance in a transit response.

#### 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	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学

キーワード：制御工学，制御理論，システム制御，不変集合，解析，設計

#### 1. 研究開始当初の背景

制御工学の分野で、ダイナミクスの挙動を状態変数（システムの入出力を仲介する変数）という数理的な概念で捉えた現代制御理論の貢献は非常に大きく、ダイナミクスを抽象的に扱えるという利点ゆえに、ここ10年で、線形制御理論の枠組みを超えて、様々な制御問題が定式化されるようになってきた。

たとえば、切替えが存在するシステムに対するハイブリッド制御法、飽和要素が存在する拘束系に対する制御法、移動体の協調作業を目的とした協調制御、より複雑なダイナミクスを有するシステムに対する非線形制御法、制御対象のダイナミクスに加えてネットワークの特徴（データの伝送遅延・ロス・通信容量制約など）も考慮したネットワーク化制御や遠隔制御などが挙げられる。しかしなが

ら、このように、問題設定が多様化する一方で、状態や出力情報をフィードバックする従来の制御法に基づいた対処法が多い。

このようななか、私は、平成 18-19 年度の科研費若手研究 (B) (課題名 ネットワーク型拘束システムに対するロバスト遠隔制御法の確立) において、システムの不変性に着眼することで、インデックスフィードバック (Index Feedback: IFB) 制御法を発見し、ネットワーク通信路が永遠に切断されない限り、拘束条件を遵守しながら制御系を安定に保てるという、非常に画期的な成果を得ることができた(図 1 参照)。さらに、約 500 [km] 離れた場所からモータの遠隔位置決め制御実験を通して、提案法の有効性や実用性を確認した。このことから、ネットワーク型拘束系に対しては、状態や出力情報をフィードバックする従来手法よりも、状態の存在領域(インデックス)をフィードバックした方が妥当であることがわかった。

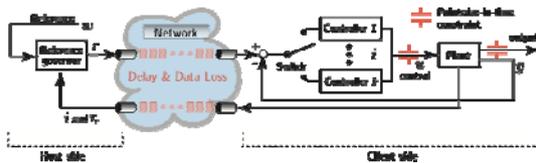


図 1 IFB 制御システムのブロック線図

IFB制御構造に応用できそうな、不変性を有する集合(不変集合)には、現在のところ、上述の遠隔制御法で採用したもの以外にいくつか報告されている。このような不変集合に対してIFB制御システムを構築し、そのシステムが有する性質を数理的に明らかにすることで、従来の制御理論では難解であった問題設定が扱えるようになり、また、これまでに得られなかった新規性の高い研究成果が得られる可能性があった。

## 2. 研究の目的

本研究の最終目標として、不変集合により構成されるIFB制御系を数理的に解析し、その解析結果をもとに新たな制御システムの設計法を開発すること、さらには、IFB制御に適した斬新な問題設定を創出することを掲げる。そして、H20-22 年度科研費若手(B)では、この最終目標を達成するために最も重要な課題『不変集合を用いたIFB制御システ

ムの数理的解析と設計法の開発』の解決を目指す。

## 3. 研究の方法

この課題を解決するために、四つの段階的な目標を設定する。不変集合の調査・整理、IFB制御系の数理的性質の解明と一般化、IFB制御系の解析法、及び、IFB制御系設計法の開発。また、新しく提案する手法が実用性に欠けては工学的に意味がないため、必ず、実機実験を通して制御法の有効性を確認する。実装に不向きな制御法である場合には、方法論の改善策を検討して新たな手法に反映させる。これらは、制御手法の開発と平行して遂行する。

## 4. 研究成果

### (1) 最大出力許容集合(不変集合)の近似計算法

拘束条件を有する線形系(拘束系)に対し、拘束条件の達成を保証するための必要十分条件は、最大出力許容集合を用いて記述される。この最大出力許容集合は、系の状態空間上で定義され、線形系に対しては凸多面体となることが知られている。拘束系の設計論へと展開する際には、この条件が非常に有用であるため、様々な系に対する構成法がこれまでに提案されてきた。しかしながら、オンラインにて最大出力許容集合を求めることが要求されるような場合(未知や時変な参照値が入力される場合)、それが必ずしも実現できるとはかぎらない。このような場合、拘束条件の種類を限定することで、最大出力許容集合を参照値ベクトルに対するパラメトリゼーションをおこない、オンラインでの集合計算を回避してきた。

本研究では、拘束条件の種類を限定することなく、オンラインでも拘束条件の達成を判断できる条件およびその条件に適合した集合の数値計算手順を提案した。具体的には、状態空間に参照入力軸を含めた拡大された空間において、事前にサンプルした有限個の最大出力許容集合に内包される最大体積楕円体を求める。そして、最大体積楕円体に含まない中心点により新たな楕円体を複数個作る。以上の手順により得られた楕円体の和集合

$E_{CH}^*$ は、参照値により(連続的に)パラメトライズされた構造となり、最大出力許容集合の近似としてオンラインで提供が可能となる。なお、得られた近似計算法は、線形な拘束系のクラスに対して適用可能であるため、線形性を有する対象に用いることが可能である。得られた成果は、つぎの定理としてまとめられる。

**定理：** 定常状態で拘束条件を満たすと仮定する。線形の拘束系に対して、初期状態  $x_0$  および参照値  $\bar{w}$  が与えられたとき、

$$(x_0, \bar{w}) \in E_{CH}^*$$

を満たすならば、すべての時刻において拘束条件を満たし、かつ、状態は平衡点へ収束する。

たとえば、DCモータの位置決め制御系において、モータへの入力電圧に拘束条件が存在する例題を考える。このとき、二個の最大出力許容集合を単一楕円体で近似した結果を図2に、また複数の楕円体で近似した結果を図3にそれぞれ示す。図3において最大出力許容集合の(平行四辺形に似た)輪郭が縁取られている。これより、複数の楕円体で近似した方が近似精度の良いことがわかる。

また、本提案法で得られる複数の楕円体の和集合は、最大出力許容集合のある種の近似であるため、既存の制御法(オンライン型のリファレンスガバナやスイッチング制御など)へ適用可能であり、従来考慮できなかった拘束条件を有する系に対しても制御が可能となる。

## (2) 最大出力許容集合を用いたスイッチング制御系の最悪性能解析

拘束系に対する一制御法として、事前に補償器をいくつか設計しておき、制御中に切り替えることで拘束条件の達成を実現するスイッチング制御があり、最大出力許容集合を利用した静的な補償器によるスイッチング制御手法を提案した。また、この手法は、IFB制御法でも用いられるため、最大出力許容集合を用いたスイッチング制御系の解析法は、IFB制御系の性能解析に活用することが可能である。そして、スイッチング制御系の構造および初期状態が与えられたときに、制御系の性能を数値的に評価できることは、制御系を決定するための判断材料として欠かせない。

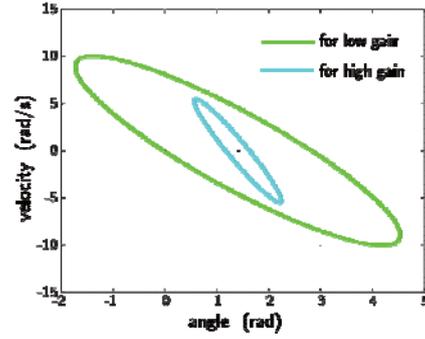


図2 単一楕円体による最大出力許容集合の近似

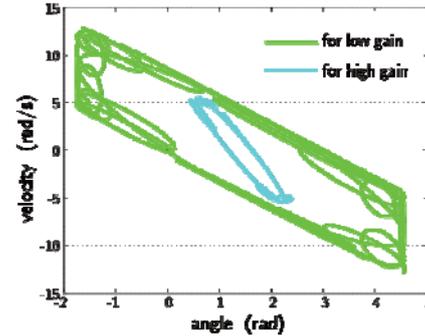


図3 複数楕円体による最大出力許容集合

本研究では、最大出力許容集合を用いて構成されるスイッチング制御系の性能評価法を提案した。提案する評価法では、スイッチング制御系の構造  $O_{\infty}^* \mathcal{A} \mathcal{X}^k := \{r^1 \cdots r^k\}$  (図4 参照  $\mathcal{E} = \mathcal{A}$  の時) および初期状態  $x_0$  が与えられたとき、出力の二次形式で与えられる評価関数  $J(x_0)$  の上界値  $(\gamma^*)r$  が計算される。

$$J(x_0) := \sum_{t=0}^{\infty} \|z_1(t)\|^2 \leq \gamma(x_0)$$

この計算法は、補償器が切り替わるまでの時間(停留時間)を用いて構成される。この成果は、つぎの定理としてまとめられる。

**定理：** もし、 $x_0 \in O_{\infty}^k \setminus O_{\infty}^{k-1}$  を満たすならば、スイッチング制御系の制御性能の上界値  $(\gamma^*)r$  は、つぎの式で与えられる。

$$\gamma(x_0) = \sum_{i \in \mathcal{I}_P \setminus k} \gamma_i + \gamma_k(x_0)$$

ただし、可観測性グラミアン行列  $W_i$  により、 $\gamma_i$  は、つぎの式により計算される。

$$\gamma_k(x_0) = x_0^T W_k x_0 \quad \gamma_i = \max_{x \in O_{\infty}^i} x^T W_i x$$

### (3) 追従性能が改善可能なインデックスフ ィードバック制御法および検証実験

近年、ネットワーク技術の普及・発展に伴い、ネットワーク通信路を介した制御問題が取り上げられるようになった。この種の問題で扱いが困難なのは、データの伝送遅延・損失・順序の入替（ねじれ）などが、ネットワークの負荷や性能に応じて発生することである。さらに、電気機械系を制御対象に考える場合には、制御入力や状態に関する拘束条件の存在を考慮しなければならない。ネットワークの特性や拘束条件を考慮せずに遠隔制御系を構成した場合、システムの不安定化や制御性能の劣化を引き起こすことがある。

このような問題を解決する一手法として、ネットワーク化拘束系に対する安定化手法が提案された。この手法は、データの伝送遅延・損失・ねじれの存在下で、拘束条件を遵守しつつ、目標値への追従を実現する。しかしながら、同手法では、伝送遅延や損失の影響をそのまま時間軸方向に受けてしまうため、特に、過渡応答での追従性能には問題があり、改善の余地があった。

そこで、本研究では、伝送遅延の情報を活用することで、過渡応答の制御性能を改善させる遠隔制御法を提案した。制御性能を改善するためには、遠隔地にある制御対象の状態をより正確に予測することが鍵となり、その仕組みを複数の不変集合を内包する構造を作り、状態を細かな領域で推定させるアルゴリズムを提案した。そして、従来法に取り入れることで、伝送遅延情報を用いて過渡応答の改善が可能なIFB制御法を構築した。その成果は、つぎの定理としてまとめられる。

**定理：** 複数の最大出力許容集合（又は近似最大出力許容集合）が与えられ、それらが内包関係  $O_{\infty}^1 \subset O_{\infty}^2 \subset \dots \subset O_{\infty}^k$  を満たすならば、参照入力の整形と補償器のスイッチングをおこなうアルゴリズムにより、すべての時刻において拘束条件は達成され、出力は目標値へと追従する。

また、本研究では、提案法をカメラ監視システムのパン軸制御に応用した実験結果を示し、従来法との結果とも比較して、過渡特性の応答が改善されているかの確認をおこなった。従来法(図1)を用いた実験結果を図5、そして提案法を用いた実験結果を図6に

それぞれ示す。各図は、DCモータの位置決め制御系の回転角度の応答とモータへの入力電圧の時間応答である。両図より、拘束条件を満たしつつ、過渡応答が改善されて早い時間で目標値へと追従していることが確認された。

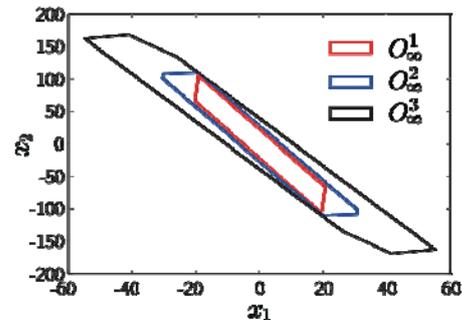


図4 スwitching制御における最大出力許容集合の配置

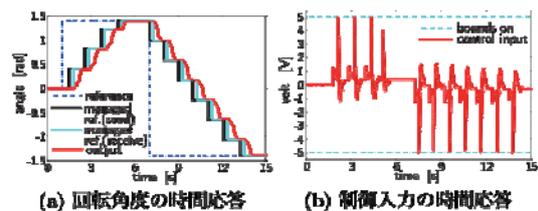


図5 従来法(図1)を用いた遠隔制御実験結果

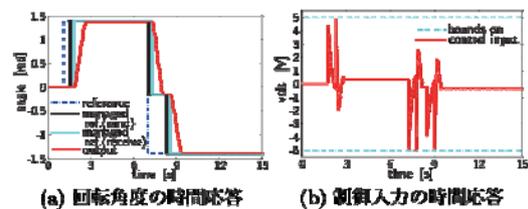


図6 提案法を用いた遠隔制御実験結果

さらに、近似最大出力許容集合を用いた実際の状態の軌跡の変化による、過渡特性の改善も確認されている。それを図7および図8に示す。図7は、単一の楕円体にてIFB制御系を構成した場合、図8は、複数の楕円体にてIFB制御系を構築した場合の状態軌跡を表す。明らかに、切替えを行うポイントが早まっており、結果的に過渡特性の良好な時間応答が得られていることがわかる。

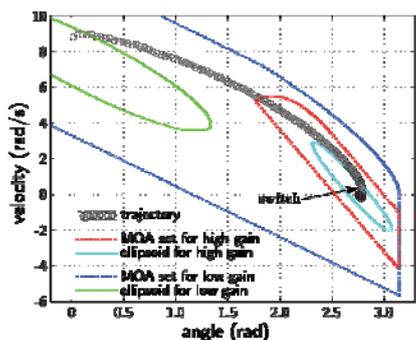


図7 単一楕円で構築したIFB制御系の状態軌跡

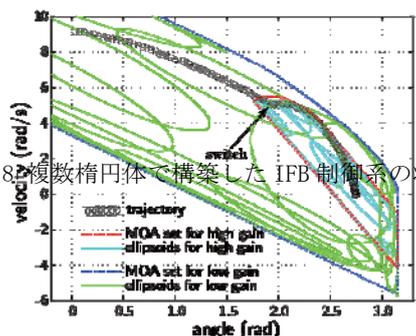


図8 複数楕円で構築したIFB制御系の状態軌跡

## 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2件)

- ① K. KOGISO, K. HIRATA, “Worst-case Performance Analysis of Multi-mode Switching Control Systems with A Strategy Consisting of Maximal Output Admissible Sets,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 2011 (in press), 査読有
- ② K. KOGISO, K. HIRATA, “Reference Governor for Constrained Systems with Time-varying References,” *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 57, No. 3, pp. 289-295, 2009, 査読有

[学会発表] (計8件)

- ① K. KOGISO, Y. DOI, K. HIRATA, N. HIRADE, “Parametric Approximation of Maximal Output Admissible Sets and Its Application to Multi-mode Switching Control under Unknown Constant Reference”, *IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, pp.

2105-2111, September 10, 2010, Yokohama, JAPAN.

- ② 小木曾公尚, 平田研二, “制御系の不変性および伝達情報の変換による遠隔制御法,” 第54回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 679-680, 2010.5.21, 京都.
- ③ Y. DOI, K. KOGISO, “On Less Conservativeness in Approximating Maximal Output Admissible Sets for Online Application: A Case Study,” *ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 4827-4830, August 21, 2009, Fukuoka, JAPAN.
- ④ K. KOGISO, N. HIRADE, M. TATSUMI, “Motorized Pan/Tilt Head Control Over the Internet: Stabilization under Existence of Pointwise-in-time Constraints and Unforeseeable Delays and Losses,” *ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 4384-4387, August 21, 2009, Fukuoka, JAPAN.
- ⑤ Y. DOI, K. KOGISO, “An Approximation of Maximal Output Admissible Sets for Online Application: A Case Study,” *ICROS-SICE International Joint Conference*, pp. 3057-3060, August 20, 2009, Fukuoka, JAPAN.
- ⑥ 土居優太, 小木曾公尚, 平田研二, “楕円対近似による最大出力許容集合のパラメトリゼーション,” 第9回計測自動制御学会制御部門大会, FC3-3, 2009.3.4, 広島.
- ⑦ K. KOGISO, M. TATSUMI, K. SUGIMOTO, “A Remote Control Technique with Compensation for Transmission Delay and Its Application to a Pan Control of a Network Camera”, *2008 IEEE Multiple-conference on System and Control*, pp. 55-60, September 3, 2008, San Antonio, USA.
- ⑧ 辰巳雅則, 小木曾公尚, 杉本謙二, “ネットワーク型拘束システムの伝送遅延による制御性能の改善と実機検証,” 第52回システム制御情報学会研究発表講演会, 2008.5.17, 京都.

[その他]

ホームページ等

<http://genesis.naist.jp/~kogiso/>

招待講演 (計4件)

- ① “フィードバック情報の変換による遠隔制御法,”電子情報通信学会 高信頼制御通信時限研究専門委員会, 2010. 7. 28, 東京.
- ② “制御系の不変性および伝達情報の変換による遠隔制御法,” 計測自動制御学会 中部支部 第2回制御理論ワーキングセミナー, 2010. 6. 8, 名古屋.
- ③ “不変集合に基づいた伝達情報の変換による遠隔制御法,” システム制御情報学会 UFA研究分科会 第12回研究例会, 2010. 6. 4, 大阪.
- ④ “リファレンスガバナを用いた制御系設計 ~基礎から応用・最新動向まで~, ” 日産自動車株式会社, 2010. 1. 21, 神奈川.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小木曾 公尚 (KOGISO KIMINAO)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

研究者番号 : 30379549

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号 :