

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820183

研究課題名(和文) 最適制御の逆問題を応用したPID型分散制御に基づく真の分散制御実現を目指した研究

研究課題名(英文) Research aimed at realization of true decentralized control based on PID type decentralized control using inverse problem of optimal control

研究代表者

國松 禎明 (KUNIMATSU, Sadaaki)

熊本大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：30379309

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、弱結合のような分散制御系特有の条件を緩和した真の分散制御の実現を目指した研究である。主な研究成果はつぎの通りである。任意の制御器構造を有する分散型PID制御系について安定性とLQ最適性を実現するための必要十分条件を導出した。多くの場合で分散制御系の安定化を実現する具体的な設計アルゴリズムを与えた。上記2つは弱結合の代わりに相対次数に関する制約があったが、並列フィードフォワード補償器を用いてこの相対次数制約を緩和し、一般的な条件下における分散制御系の設計法を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim at the realization of true decentralized control in which weak connection of controlled systems is not assumed. The main results are as follows. It was derived that necessary and sufficient conditions to guarantee the stability and the LQ optimality for decentralized PID control systems with any controller structure. It was provided that concrete design algorithms achieving the stability of the decentralized control systems. Although a condition with respect to relative degree was assumed in the above two cases, the condition was relaxed by using parallel feedforward compensators. A design method of decentralized control was proposed under general conditions.

研究分野：制御工学

キーワード：分散制御 PID制御 最適制御 ロバスト性

1. 研究開始当初の背景

周知のように、PID (比例・積分・微分) 制御は現在最も普及している制御手法であり、様々なところで幅広く使用されている。一方、システムの分散化は大規模で複雑化する現代社会において、必要不可欠なものとして認識されており、制御系も分散化が要求されてきている。

これまで提案されてきた分散制御系の設計手法は、サブシステム間の結合を無視して、各々のサブシステムに対して個々に安定化制御器を構成し、それらを用いてシステム全体の安定化を図るといった手法が取られていた。この手法は基本的にサブシステム間の結合が弱く、他のサブシステムにあまり影響を与えないことが前提であった。しかし、この前提では各サブシステムがほぼ独立状態にある状況と変わりがないため、意図的な分散制御とは必ずしも言えない面があった。

2. 研究の目的

著者らはサブシステム間が弱結合ではない場合でも、サブシステム間の結合度合いとは関係のない別の制約のもと、PID 型分散制御によって安定化が可能であるための必要十分条件を導出している。これは最適制御の逆問題を応用して条件が導かれているため、最適制御となるための十分条件も同時に導出しており、意図的な分散制御が行える可能性を示した結果である。本研究では、適用可能なシステムの拡張やロバスト安定化の実現を目指すとともに、新たな制約も緩和した真の分散制御系構築を目指す。

3. 研究の方法

主に3つに分けて研究を行った。

(1) 分散構造の一般化と LQ 最適性について
これまで分散型 PID 制御器の構造として、対角形のみを対象として研究を行ってきたが、任意の制御器構造に拡張を目指して研究を行った。つぎに、これまで十分条件のみ得られていた LQ 最適性について、任意の制御器構造にも対応した形で LQ 最適性の必要十分条件について考察を行った。また、これまで分散型 PID 制御系が実現できるための条件の導出は行ってきたが、具体的に制御器を求める方法が必ずしも十分ではなかったため、分散制御系の安定化を実現する設計アルゴリズムの開発を行った。LQ 最適性を実現するための方法の開発も行い、特定の条件下における考察を行った。

(2) 並列フィードフォワード補償器を用いた適用対象の拡張

これまで分散型 PID 制御が適用可能な制御対象には、相対次数が 2 以下で、かつ最小位

相系であることが条件とされていた。これらの条件について、適応制御系などで実績のある並列フィードフォワード補償器を用いることで緩和することを試みた。なお、並列フィードフォワード補償器も分散型制御器の制約を有するため、これまで提案されていた方法は用いることは難しい。よって、新たな方法が必要であるため、分散型 PID 制御器の結果を使うことで分散型に適した並列フィードフォワード補償器を得る方法を考察した。

(3) ロバスト性やその他について

分散制御はノミナル安定性の保証も容易ではないため、ロバスト性に関する研究はさらに難しい課題であるが、ノルム有界型の不確かさについて、分散型制御器がロバスト安定となるための方法を考察した。また、我々の提案する分散型制御系の結果から導き出される性質を利用する研究も行い、耐故障制御などに関する考察も行った。

4. 研究成果

本研究では、以下の結果を得た。

(1) 分散構造の一般化と LQ 最適性について

これまで対角形制御器を持つ分散型 PID 制御系のみを扱ってきたが、任意の制御器構造を持つ分散型 PID 制御系にも対応できるように拡張した。これによって様々な構造の分散型 PID 制御器を設計することが可能となった。

これまで分散型 PID 制御系において十分条件のみ与えられていた LQ 最適性について、任意の制御器構造を持つ分散型 PID 制御系に対して、最適制御の逆問題の結果を用いて必要十分条件を導出した。

三角構造を持つ制御器については LU 分解にもとづく手法によって、LQ 最適性の実現が容易であることを示した。

分散型 PID 制御系の安定化を実現する設計法は特定の条件を満たす場合においてのみ与えられていたが、制約のない一般的な場合でも分散型 PID 制御系の安定化を実現し得る設計アルゴリズムを与えた。

(2) 並列フィードフォワード補償器を用いた適用対象の拡張

これまで相対次数 2 以下の制御対象のみ適用可能だった分散型 PID 制御を拡張し、並列フィードフォワード補償器を用いて相対次数制約のない分散制御手法を提案した。これは並列フィードフォワード補償器による拡大系に対して分散型 PI 制御を適用することで、閉ループ系全体の安定化を図った手法であり、不安定零点を持たないシステムに対しては、安

定系・不安定系問わず適用可能な設計法である。特に、並列フィードフォワード補償器を設計する際、これまでの結果を効率的に使用して相対次数制約の緩和を実現した。また、最終的に得られる制御器自体は PID 制御器ではなくなるが、分散構造が保持できる手法を提案した。分散型 PI 制御器と並列フィードフォワード補償器による分散型制御系の安定化を一般の非最小位相系に適用できるように拡張した。さらに同様の手法を使って、むだ時間を有する安定系にも適用し、定置入力に対してオフセットが生じない安定化制御器の構成法を示した。

(3) ロバスト性やその他について

ノルム有界型の不確かさを有するシステムに対して任意の制御器構造を有する分散型 PID 制御を提案し、ロバスト安定化を実現する設計手法を与えた。特に、ノルム有界型の不確かさを有する非干渉化行列が制御系全体のロバスト安定性に大きく関わっていることを示し、非干渉化行列に関する条件を満たした設計を行ったのちに、ゲインを大きくすることで制御系全体をロバスト安定化できることを示した。分散型 PI 制御器と並列フィードフォワード補償器の導入によって得られた高次相対次数に対するこれまでの成果を、1 入出力系に限定して再考察することで、高次相対次数に対する PID 類似型制御として設計法を提案した。特に、閉ループ系が安定となるための制御器のパラメータ数や次数について、相対次数と関係があることを示した。加えて、これまで分散制御系では得られていなかった制御理論的な解釈を得ることができたほか、モデルフリー制御への可能性を示した。これまで得られた分散型 PID 制御系の成果を応用し、特定の条件を満たすシステムに対して、広い意味でのロバスト制御でもあるセンサ故障に対する耐故障性を実現する設計手法を与えた。

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)

國松禎明, 石飛光章, 藤井隆雄: 最適制御の逆問題を応用した分散型 PID 制御系設計法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 5, pp. 521-528, 2013, 査読有 <http://doi.org/10.9746/sicetr.49.521>
Sadaaki Kunimatsu, Mitsuki Ishitobi, Takao Fujii: Optimal Decentralized PID Control with Any Controller Structure Based on Inverse Problem of Optimal Control, SICE Journal of

Control, Measurement, and System Integration, Vol 9, No. 2, pp. 78-85, 2016, 査読有
<http://doi.org/10.9746/jcmsi.9.78>

〔学会発表〕(計 11 件)

國松禎明, 石飛光章, 藤井隆雄: 相対次数を考慮した PID 制御のロバスト性について, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2013 年 5 月, 兵庫県民会館 (兵庫県神戸市)

國松禎明, 石飛光章, 藤井隆雄: 任意の入出力構成に対応した分散型 PID 制御系について, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月, 新潟大学 (新潟県新潟市)

國松禎明, 石飛光章, 藤井隆雄: 相対次数を考慮した分散型 PID 制御のロバスト性について, 第 56 回自動制御連合講演会, 2013 年 11 月, 新潟大学 (新潟県新潟市)

國松禎明, 石飛光章: 相対次数の制約を緩和した PID 型分散制御, 第 1 回制御部門マルチシンポジウム 2014 年 3 月, 電気通信大学 (東京都調布市)

Sadaaki Kunimatsu, Mitsuki Ishitobi: Decentralized control for systems with high relative degrees using decentralized PI control, SICE Annual Conference 2014, 2014 年 9 月, 北海道大学 (北海道札幌市)

國松禎明, 石飛光章: ノルム有界型不確かさに対する分散型 PID 制御系のロバスト安定化, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014 年 11 月, ホテル天坊 (群馬県伊香保町)

國松禎明, 石飛光章: 高次相対次数を有する SISO システムに対する PID 類似型制御, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014 年 11 月, ホテル天坊 (群馬県伊香保町)

國松禎明, 石飛光章: 分散型 PID 制御を用いた不安定零点を有するシステムに対する分散制御, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 2015 年 3 月, 東京電機大学 (東京都足立区)

國松禎明, 石飛光章: 相対次数を考慮した PID 制御系のセンサ故障に対する耐性について, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015 年 11 月, 神戸大学 (兵庫県神戸市)

國松禎明, 石飛光章: 非最小位相系に対する分散型制御器の構成法について, 第 34 回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2015 年 11 月, 福岡工業大学 (福岡県福岡市)

國松禎明, 石飛光章: むだ時間を有する安定な多入出力系に対する分散型制御器の構成法について, 第 3 回制御部門マルチシンポジウム, 2016 年 3 月, 南山大学 (愛知県名古屋市)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

國松 禎明 (KUNIMATSU, Sadaaki)

熊本大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号：30379309