

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560520

研究課題名(和文) 急激なシステム変動と未知外乱に有効な適応ロバスト制御系の提案およびその発展と応用

研究課題名(英文) Development and application of adaptive robust control systems.

研究代表者

楊子江(Yang, Zi-Jiang)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：30243984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)： 課題研究期間を通じて、ロバスト適応制御系について、制御器をロバスト機構、外乱推定機構と適応機構という三つのモジュール構造で構築し、適応制御で重要な有界性や過渡特性を理論的に明らかにした。その上で、ロバスト機構、外乱推定機構および適応機構を備え持つロボットの分散型適応ロバスト制御系を提案した。さらに、ロボット群(マルチエージェント)のうちの一部だけが目標指令値を受けるという状況で、各ロボットが近傍ロボットと情報交換を行いながら、全体の動作が同期して指令値を追従するという分散型ロバスト制御器を提案した。

研究成果の概要(英文)： In this research project, we have constructed a new type of robust adaptive control system composed of a robustifying mechanism, a disturbance estimation mechanism and an adaptive mechanism. And we have analyzed rigorously the control system properties such as the boundedness and transient performance of the signals. Then we have proposed a distributed adaptive robust control system of the robot with an adaptive mechanism robust mechanism, and disturbance estimation mechanism. Furthermore, we have proposed a distributed robust control method for synchronised tracking of networked Euler-Lagrange systems (robots), where the time-varying reference trajectory is sent to only a subset of the agents.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：制御理論

キーワード：制御理論 適応学習

1. 研究開始当初の背景

産業界の各種の機械システムにおいては、未知な非線形特性、外乱や大きな負荷変動などによる不確かさが存在しており、現場でのチューニングは大変労力とコストがかかる。パラメータを適応学習しながら制御系を調整するという適応制御の実用化は強く望まれている。しかし、従来の適応制御の多くは、パラメータ化されない外乱や急激なシステム変動が生じた場合への対処が十分ではない。

一方、機械システムの制御において、運動方程式の誤差をローパスフィルタに通してから制御入力を補償するという外乱オブザーバによる位置決め制御手法は、広く応用されている。従来の手法は、ほとんど線形公称モデルに対して、線形制御理論を適用している。制御対象が非線形で、モデリング誤差が大きい場合、内部信号の有界性が保証されない。また、これから注目されるミクロンあるいはナノレベルの工作機械の位置決め制御において顕著な問題とされる不連続な摩擦外乱や高周波リップル外乱など、変化の速い不確かさについては、十分な制御性能は得られない。

先行研究では、非線形の制御対象に対する外乱オブザーバを用いた制御手法について、非線形減衰項の設計法を独創的に考案し、非線形システムとしての ISS 特性 (input-to-state-stability, 入力状態安定) を厳密に保証したロバスト非線形制御系を初めて提案した。本研究ではまず、これまでの研究を踏まえて、ISS 特性理論の枠組みのもとで、上に挙げた問題点を解決するため、外乱推定機構を備え持つ実用的適応ロバスト非線形制御系を提案する。とくに、外乱推定機構と適応機構の相互影響の解決、および協調的作用の解明などの理論的問題点が、ISS 特性理論の枠組みのもとで解決できるものと確信している。さらに、ロボットマニピュレータなどの多入出力系への発展も可能である。

応用面では、複数の発電装置による電力系統、鉄鋼の圧延システムなど、相互干渉を有するサブシステムからなる大規模相互連結システムの適応制御は古くから注目されてきたが、ほとんど相互干渉を押さえ込むためのハイゲインを適応的に調整する手法であり、過渡特性が悪くなったり、制御ゲインが極端に高くなったりする欠点がある。提案する外乱推定機構を備え持つ分散型適応ロバスト非線形制御系を用いることにより、問題解決の可能性が十分であると予想される。

現実の問題として、大規模発電 (火力や原子力など) や分散型発電 (風力や太陽光、燃料電池など) をはじめとする電力の供給側と、一般家庭などの需要側との間で、情報通信技術を利用した次世代電力ネットワーク (スマートグリッド) が近年注目され、開発が急がれているが、分散型発電システムにおいては、各

分散発電装置の電圧安定化や周波数の同期化に対する有効な制御手法の開発が望まれている。

パラメータ化されない外乱や急なシステム変動に有効に対処するために、外乱推定機構を十分に生かすことのできる分散型適応ロバスト非線形制御系の提案が強く要請される。

2. 研究の目的

パラメータ推定を行いながら、制御系の自動調整を目指す適応制御は、急激なシステム変動やパラメータ化されない外乱に十分対応できないことが実用化の妨げとなっている。本研究では、外乱オブザーバを外乱推定機構として組み込んだ外乱推定機構を備え持つ実用的適応ロバスト非線形制御系を提案する。その際に生じた適応機構と外乱推定機構の相互影響 (不安定になる要因) と協調的かつ補完的制御性能 (過渡特性や終局誤差) を理論的に解明し、制御系の設計方針を明らかにする。

ローパスフィルタを用いた外乱オブザーバを安易に適応制御系に組み込むと、システム全体の次数が高くなり、このままでは、リヤプノフ安定性を重要視とする適応制御系の安定性は保証されない。

先行研究を踏まえて、外乱推定機構と適応機構の相互影響 (外乱推定機構の推定誤差が制御誤差に与える影響、パラメータ推定変動が過渡特性に与える影響などの数式表現) を理論的に解明する。得られた数式表現に基づき、これらの影響を抑制する独特の非線形減衰項を設計することが、理論と応用双方の視点においても、興味深い問題である。

さらに、システム変動や外乱に対する有効性を利用して、ロボットマニピュレータの制御などの問題に対する分散型適応ロバスト制御手法を確立する。

ロボットマニピュレータの適応制御系では、各軸間が複雑に絡み合い、多くのパラメータを推定する必要がある。そこで、軸ごとに局所的情報だけに基づいた適応則を設け、他軸からの干渉を外乱推定機構で推定するという分散型外乱推定機構付き適応ロバスト非線形制御系を提案する。

その際に、各軸の局所的信号だけに基づいて、多軸からの干渉と外乱推定誤差などを抑える込む非線形減衰項の設計法を解明する。システム全体の安定性と各軸における制御性能を明らかにする。さらに、手法の有効性と設計方針を明らかにする。

複数の動的エージェントが相互作用しながら、大域的な目的を達成するというマルチエージェントシステムの制御は近年注目され、その応用範囲は、ロボットの協調制御を中心に、センサネットワーク、移動体のフォーメーション制御、さらにはスマートグリッドの分散制御など、多岐に渡る。制御と通信の理論と技術のおかげで、ネットワーク化さ

れたマルチエージェントシステムは大規模複雑化しており、最近では、リーダーが発する指令値が一部のフォロワー（追従者）エージェントだけに送信され、各エージェントが近隣と交信しながら、協調して指令値に同期追従（合意追従ともいう）制御が活発に研究されている。単体のロボットに対する研究からさらに発展させ、ネットワーク通信を通じて協働するロボット群についても、分散型外乱推定機構をもつ同期追従制御系を構築し、その有効性を検証する。

特色・独創的な点：

従来の適応制御は、パラメータ化されない外乱や急激なシステム変動への対処が十分ではない。発想が全く異なる外乱推定機構と適応機構を統一した理論で設計し、両者の協調的かつ補完的制御性能（過渡特性や終局誤差）を解明した研究は見あたらない。それが適応制御が普及しない原因となっている。

非線形システム解析の分野で培われてきたISS理論のもとで、外乱推定機構を備え持つ適応制御系の理論と技術を確立することによって、適応制御系の制御性能の飛躍的な向上と実用化の促進が期待されるので、特筆すべき独創的貢献である。産業界からの要請に答えられる研究であると思われる。

理論面での結果と意義：

- (1) パラメータ化されない外乱に加えて、急激なシステム変動やパラメータの推定誤差による不確かさも外乱とみなして、外乱推定機構によって推定し、補償するので、従来の適応制御で問題とされる過渡特性が著しく改善される。
- (2) 適応機構は、(外乱推定機構がカバーできる周波数範囲以外の)ハイパス処理された信号を扱うので、時間的変化が緩やかな信号の場合、適応機構が自動的に turn-off する。よって、複雑で計算量の大きい適応学習の必要性は、自動判別される。これは、大規模相互連結システムにおいて、計算量のかかる適応機構を適宜に取捨できる利点をもたらす。

実用面での結果と意義：

- (1) 位置決め制御装置または工作機械などにおいて、パラメータ化できる変化の速い高周波リップル外乱や静摩擦、および急激なシステム変動や未知なパラメータ化されにくい負荷外乱に同時に対処できるので、ナノレベルの精度が要求される種々の精密機械の制御性能の向上につながり、多種少量で生産効率を求める現場でのチューニングに関わる労力とコストが大幅に低減できる。
- (2) 多自由度ロボットや大規模相互連結システムに発展し、体系化できれば、分散型適応制御技術の発展に大きく寄与できる。とくに、スマートグリッドにおける分散型

発電装置の電圧安定化や周波数の同期化という重要な制御目的に対して、外乱推定機構と適応機構を有機的に融合した分散型制御系の有効性が確立できれば、再生可能エネルギー導入や省エネを目指すスマートグリッドの整備と発展に、理論面が先行しがちな制御工学の実用性を強くアピールすることができる。

3. 研究の方法

制御技術の方法論的研究が中心であるので、研究代表者1人を中心に、大学院生2名(修士1年と修士2年一人ずつ)の協力を得て、それぞれ理論、シミュレーションと実験などを分担して、3年間をかけて遂行した。研究のスタイルとして、以下の要領で研究を進めた。

- (1) 文献の検索、新しい手法の提案と理論的性能解析(担当:研究代表者)
- (2) MatlabとSimulinkなどのソフトウェアを用いた計算機上のシミュレーションにより、開発する手法の性能や設計方針の検討(担当:大学院生2名)
- (3) 2軸ロボット実験装置における実験、及びマルチエージェントシミュレータにおけるシミュレーションなどによって、実用性の検証(担当:研究代表者と大学院生2名)
- (4) 研究成果の公表(担当:研究代表者と大学院生2名)

年度別で以下のように遂行した。

(1) 平成23年度

ロボットマニピュレータの分散型外乱推定機構付き適応ロバスト非線形制御系について研究した。具体的には、以下のように行った。

理論解析：

研究代表者が担当した。局所情報だけを用いて、各軸の局所的慣性や摩擦のパラメータを推定する適応機構、軸間の干渉を推定する外乱推定機構を適切に設計し、分散型制御系の構造を明らかにした。軸間干渉、外乱推定誤差、パラメータ推定値変動による制御誤差への影響を導出した上で、それらを抑止する非線形減衰項を設計して、制御誤差の上界や過渡特性の陽な表現を求めた。さらに、制御系パラメータの最適設計、外乱抑制性能を評価するL2ノルムを理論的に導出した。

シミュレーションによる検討：

大学院生2名が担当した。設計パラメータが制御性能に与える影響をシミュレーションによって検討した。実験環境の整備：

研究代表者の指導のもとで大学院生1名が遂行した。申請研究費で2軸ロボット実験装置を購入し、実験環境の整備を

行った。

(2) 平成 24 年度

大学院生 1 名が担当した。まず、前年度に整備した実験装置にて、分散型適応ロバスト制御器の有効性を実機実験によって検証した。

さらに、前年度の研究成果を踏まえて、ネットワークで連結されたロボット群の同期制御に関する研究に着手した。研究代表者が文献調査および理論の導出と証明を担当した。

数値シミュレーションは大学院生 1 名によって行われた。

(3) 平成 25 年度

前年度の結果をさらに発展させ、単方向通信というより厳しい状況におけるロボット群の同期制御に関する研究に着手した。さらに、より有効なロボット群の同期制御系を設計するために、分散型指令値推定器を援用した同期制御系に関する研究にも着手した。

研究代表者が文献調査および理論の導出と証明を担当した。

数値シミュレーションは大学院生 1 名によって行われた。

4. 研究成果

課題研究期間を通じて、ロバスト適応制御系について、制御器をロバスト機構、外乱推定機構と適応機構という三つのモジュール構造で構築し、適応制御で重要な有界性や過渡特性を理論的に明らかにした。

- (1) ロバスト機構：外乱やモデリング誤差、適応機構の推定パラメータ変動、外乱推定機構と適応制御の相互影響などを独特の非線形減衰項によって抑制し、制御系の ISS 特性を保証する。
- (2) 外乱推定機構：不確かさを一括して推定するので、適応機構の負担を低減できる。急激なシステム変動や適応学習途中のパラメータ変動と誤差を外乱として吸収する利点を持つ。
- (3) 適応機構：外乱推定機構で補償しきれない高周波の不確かさを適応学習によって補償する。

年度別に得られた結果は以下のようになる。

(1) 平成 23 年度

ロバスト機構、外乱推定機構および適応機構を備え持つロボットの分散型適応ロバスト制御系を提案した。

ロボットマニピュレータの適応制御系では、各軸間が複雑に絡み合い、多くのパラメータを推定する必要がある。そこで、軸ごとに局所的情報だけに基づいた適応側を設け、他軸からの干渉を外乱推定機構

で推定するという分散型外乱推定機構付適応ロバスト制御系を提案した。

その際に、各軸の局所的信号だけに基づいて、他軸からの干渉と外乱推定などを抑え込むという独特の非線形減衰項の設計法を解明した。さらに、ロバスト機構、外乱推定機構、適応機構を備え持つ分散型適応制御系の制御性能を理論的に厳密に明らかにした。とくに、システム全体の信号の有界性および各軸の制御誤差の終局誤差上界を解析した。

研究成果を雑誌論文、国際会議で発表した。なお、国際会議論文は best paper として受賞した。

上記のほか、制御対象のモデルを求めなくても、その周波数応答から制御器パラメータの調整手法を開発し、研究成果を雑誌論文と国際会議で発表した。

(2) 平成 24 年度

前年度では、ロボット単体の分散型適応ロバスト制御について研究した。

一方では、リーダーが発する指令値が一部のフォロアー（追従者）エージェントだけに送信され、各エージェントが近隣と通信しながら、協調して指令値に同期追従（合意追従ともいう）制御が活発に研究されている。

とくに、非線形のオイラー・ラグランジュ運動方程式で表現されるオイラー・ラグランジュシステムの協調（移動ロボットの編隊、マニピュレータの協調作業、発電機の電圧・周波数同期追従など）制御手法の確立は、実用上重要である。

これまでの研究の大多数は、簡単な質点を表す二重積分器モデルを中心に行われてきた。前述の実システムへの応用は、それほど容易ではない。質点モデルにおいても、リーダーの加速度がすべてのエージェントに受信されていないとすれば、外乱項として全体の誤差システムに現れる。そのため、一定速度追従、近隣エージェントの加速度（または入力）取得、あるいは既定の加速度だけを全エージェントに事前通知などの制限を受けた手法が提案されている。

そこで、前年度の研究経過をさらに発展させ、ネットワークで連結されたロボット群の同期制御に関する研究に着手し、研究成果を上げた。

ロボット群（マルチエージェント）のうちの一部だけが目標指令値を受けるという状況で、各ロボットが近傍ロボットと情報交換を行いながら、全体の動作が同期して指令値を追従するという分散型ロバスト制御系を提案した。

具体的には、ロボットの各軸からの干渉のみならず、ほかのロボットからの、ネットワーク経由の干渉も推定して保証するという手法を提案した。ネットワークで連結された非線形オイラー・ラグランジュ運動方程式で

表現される多数のロボットマニピュレータの信号の有界性をグラフ理論と線形代数の手法を援用して証明した上で、各ロボットの各軸の同期制御誤差の終局的上界を明らかにした。よって、すべてのロボットが指令値を知らなくても、ロボット同士の、ネットワークを経由した協働によって、指令値に対する同期追従制御を達成する手法を確立した。シミュレーションによってその有効性を確認できた。

研究成果を雑誌論文 と国際会議 で発表した。

そのほか、非線形システムモデルのモデル構造決定とパラメータ推定手法についても、より複雑さの低減できるモデルを同定できる手法を開発し、雑誌論文 で発表した。

(3) 平成 25 年度

前年度の研究では、ネットワークで連結されたロボット群間の通信が双方向通信(通信ネットワーク構造を無向グラフという)であると仮定されていた。しかし、単方向通信(有向グラフ)の場合、ネットワークグラフのラプラシアン行列が対称にならず、制御系の構築がより困難であった。そのため、既存の文献では、近隣ロボットのエージェントの加速度情報までも要求する手法が報告された。

平成 25 年度では、まず、前年度の成果をさらに発展させ、全域木(spanning tree)を有する有向グラフで交信するロボット群に対して、一部のロボットだけが指令値受信できる場合における分散型ロバスト同期追従制御系を提案した。研究成果を国際会議論文で発表した。

しかし、ネットワークグラフのラプラシアン行列が対称にならないため、安定性条件がより厳しくなるという欠点があった。

これまでに提案した手法では、通信ネットワークグラフのラプラシアン行列とロボットシステムの非線形慣性行列が複雑に絡み合い、制御器の設計や安定性条件の制限が顕著になっている。とくに、単方向通信(有向グラフ)の場合、ラプラシアン行列が対称にならず、制御系の構築がより困難であった。

そこで、ネットワーク構造行列と各ロボットシステムの慣性行列の複雑な相互影響を回避するため、two-time scale アプローチを検討した。

各実非線形エージェントが仮想的二重積分質点モデルをもち、分散型推定器によって、それらの状態が実システムよりはるかに短い時定数でリーダーの状態(指令値)に収束することで、各実エージェントが仮想的に指令値を有することになる。仮想質点モデルは、非線形不確かさの影響がないものの、すべてのエージェントが指令値加速度を受信していなければ、それが外乱項となる。もう一つの問題点として、two-time scale アプローチのため、ネットワークで影響しあう仮想質点の状態が指令値に短時間で収束する保証

である。

これらの問題点を解決するため、仮想質点モデルに対する分散型ハイゲインオブザーバによる指令値推定器という手法を提案した。未知の指令加速度など(すべてのエージェントに送信されていない場合)による外乱をハイゲインフィードバックによって抑止し、非常に短い時定数でリーダーの状態(指令値)を推定できることが特徴である。

よって、すべてのロボットが推定された指令値を有するので、以前の手法のような通信ネットワークグラフのラプラシアン行列とロボットシステムの非線形慣性行列が複雑に絡み合うことが回避できるので、分散型同期追従制御系の構築がしやすくなる。

分散型指令値推定器の収束時間、推定誤差などについても理論的解析を行い、設計パラメータとの関係を明らかにした。

研究成果は国際雑誌と国際会議に投稿した。現在は査読結果待ち中である。

(4) 今後の展望

分散型有限時間非線形オブザーバによる指令値推定

前記の分散型ハイゲインオブザーバの「線形ハイゲイン」を非線形化することによって、中立系(homogeneous system)理論に基づき、有限時間内で仮想質点の状態がゼロ誤差でリーダーに収束させる手法を検討中である。

分散型有限時間非線形オブザーバによる指令値推定機構を援用したロボット群の同期追従制御

前記の分散型有限時間非線形オブザーバによる指令値推定機構では、有限時間で推定誤差がゼロに収束することが保証されるので、収束時間の後に指令値推定と同期制御が完全に分離できるので、同期追従制御系の設計は柔軟性に富み、複雑な適応学習機構の適用がしやすくなり、制御性能の向上も期待できる。具体的な研究は今後の課題となる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

Zi-Jiang Yang, Y. Shibuya and P. Qin: Distributed robust control for synchronised tracking of networked Euler-Lagrange systems, International Journal of Systems Science, (掲載予定, DOI:10.1080/00207721.2013.797036) 査読有

P. Qin, R. Nishii and Zi-Jiang Yang: Selection of NARX models estimated using weighted least squares method via GIC-based method and l1-norm regularization methods, Nonlinear Dynamics, Vol. 70, No. 3, 1831/1846 (2012) 査読有

Zi-Jiang Yang: Linear Multivariable Controller Tuning Using Measured Frequency Response Data, 電気学会論文誌, 132 巻 6 号 C 分冊, 「データ指向型モデリング/予測/制御」特集, 843/850 (2012) 査読有

Zi-Jiang Yang, Y. Fukushima and P. Qin: Decentralized Adaptive Robust Control of Robot Manipulators Using Disturbance Observers, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, No. 5, 1357/1365 (2012) 査読有

無し

〔学会発表〕(計4件)

Zi-Jiang Yang and P. Qin: Distributed Synchronized Tracking Control of Euler-Lagrange Systems on Directed Graphs, Proceedings of the IECON 2013 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vienna, Austria (November, 2013) 査読有

Zi-Jiang Yang, Y. Shibuya and P. Qin: Synchronized tracking control of multiple Euler-Lagrange systems, UKACC International Conference on Control, Cardiff, UK (September, 2012) 査読有

Zi-Jiang Yang: Model-Free Controller Tuning Based on Frequency Response Data, Proceedings of the 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Tokyo, Japan (September, 2012) 査読有

Zi-Jiang Yang, Y. Fukushima and P. Qin: Decentralized Adaptive Robust Control of Robot Manipulators, International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Zhengzhou, China (August, 2011) 査読有

〔図書〕(なし)

〔産業財産権〕(なし)

〔その他〕

ホームページアドレス

<http://yoh.ise.ibaraki.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

楊子江 (Yang Zi-Jiang)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号: 30243984

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者