

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32657
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24360166
研究課題名(和文) 離散スライディングモードに基づく非線形システムの適応制御とエンジン制御への応用

研究課題名(英文) Adaptive control of nonlinear systems based on discrete sliding mode and its application to engine control

研究代表者
古田 勝久(Furuta, Katsuhisa)
東京電機大学・大学・教授

研究者番号：10016454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：特性が変化する複雑な非線形システムに対して、モデルベースでコンピュータ制御する方法を確立するため、セルフチューニング型適応制御理論のエンジン制御問題への適用を検討した。具体的には、制御器のパラメータを直接チューニングしながら、出力を目標値に追従させる直接型の非線形離散適応制御系の設計法を非線形多入出力システムに拡張した。また、実環境での適用を考慮し、突発的なノイズである外れ値ノイズを推定・除去して制御系を構築する方法を構築した。さらに、エンジン制御のための簡易的な検証用実機シミュレータとして、ハードウェアとソフトウェアを組み合わせた統合エンジンシミュレータ環境のプロトタイプモデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：To realize a model-based computer-control for complex nonlinear systems with characteristics variation, a control theory of self-tuning type adaptive controllers and its applications to engine control problems were investigated. The control design method of the implicit-type nonlinear discrete adaptive control system, which can track output values to reference values with tuning the controller's parameters directly, was extended to the multi-input multi-output systems. In consideration of practical application, a robust controller design method with estimating and removing unexpected outliers noise is constructed. Furthermore, as a simulator system for verification experiment of engine control, prototype models of the integrated engine simulators were constructed, which combine hardware and software partially.

研究分野：制御理論

キーワード：非線形制御 適応制御 スライディングモード制御 エンジン制御 エンジンシミュレータ 離散システム セルフチューニング制御

1. 研究開始当初の背景

(1) エンジン制御では、典型的なガソリンエンジンでも制御の複雑化に伴い、実験で調整(適合)するパラメータ数が 15000 もある。その数は制御の複雑化に伴い指数関数的に増大している。また、エンジン制御の開発では様々な要求と制約をバランスさせる必要があり、多くのトレードオフが存在する。これらの干渉を避けるために、部品ばらつき、経時変化を考慮したマージンが設けられるが、制御の精密化と複雑化のために、マージンを十分取ることが難しくなっている。部品ばらつきや経時変化の影響を適応的に調整できれば、適合工数を大幅に低減できる可能性がある。さらに、量産製品は部品ばらつきや経時変化の影響で、市場の車の性能がノミナルな設計性能から劣化してしまうため、適応性能向上で、燃費、動力性能などより本来の設計性能に近い性能が確保できると期待される。

(2) 制御対象の特性やモデルのパラメータが大きく変化する場合、制御対象の変化に対するロバスト性を持つと共に、変化するパラメータを推定する機能を持つ適応制御が有効である。特に重量が大きく異なる操作対象を取り扱うロボットなどを制御するためには、J. J. Slotine により提案されたスライディングモード適応制御が有効であり、多くのメカトロニクスシステムに適用されてきた。通常、この適応制御は、連続システムを対象とした連続時間制御であるが、コンピュータを利用して制御する場合には、制御対象を離散系として取り扱わなければならない。古田らは、離散系に対する安定性の補償されたスライディングモード制御を提案してきた。離散スライディングモード制御を適応制御と切り替え関数を用いて組み合わせる設計法や、不安定ゼロを持つ制御対象に対して離散スライディングモードと最小自乗法に基づく制御則の推定アルゴリズムを持つ安定なセルフチューニング型の適応制御などを開発してきた。

(3) 実システムには、複雑な非線形ダイナミクスを有するシステムが多く存在する。例えば、内燃エンジンなどの回転系を有するシステムはその一つで、観測できる状態量が限られるとともに、回転角度においても、ある一定の角度ごとにしか観測できないという制限も存在する。古田らはそのようなシステムの制御のために、入出力信号によってサンプリングを行うループサンプリングによる非線形系のモデル同定手法を提案してきた。通常システム同定では、時間順序で並べた入出力データから、システムのパラメータを同定するが、これに対し、非線形系を状態や出力により区間を区切り、複数の線形モデルで近似して表現する非線形 ARX (Auto-Regressive eXogenous) モデルの同定手法

を提案し、非線形系の同定において有用な結果を得ている。

2. 研究の目的

現在、環境に対する配慮からハイブリッドやアイドリングリダクションが採用されている内燃エンジンは、再起動時の燃費とエンジン回転速度過渡特性の向上を必要としている。内燃エンジンは、状態により特性変化する非線形系であり、本研究は、これをモデルベースでコンピュータ制御する方法、すなわち、離散的に適応制御する方法を確立することを目的とする。

具体的には、入出力に依存した ARX モデルで表現された多変数系に対して、制御則のパラメータを推定しながら、出力を目標値に追従させる直接型の非線形適応制御系の設計法を、離散スライディングモード制御に基づき確立し、エンジン制御問題などへの制理論的な解決手法を提供する。

3. 研究の方法

(1) 離散スライディングモード適応制御の理論拡張

これまで提案してきた離散スライディングモード制御とセルフチューニング型適応制御の理論を拡張し、複雑で非線形性を有するシステムへの適用を検討する。とくに、多変数系へ理論拡張するとともに、パラメータの設計法について検討する。また、エンジンモデルへの適用を視野に入れ、数値シミュレーションにより有効性の検証を行う。

(2) 実環境を想定した制御系構築

通常、実環境においてはセンサからの観測データにノイズが混入する。エンジンのような劣悪な環境では、ガウスノイズだけでなく、外れ値ノイズ(アウトライヤー)のような非ガウスノイズが含まれることもある。そのように外れ値を含むセンサ情報を用いて、フィードバック制御系を構築した場合、制御性能に悪影響を及ぼすことが考えられる。

実環境を想定した制御系構築のため、外れ値ノイズを陽に推定する方法を導入する。そして、提案してきたセルフチューニング制御系と組み合わせた制御系構築方法を検討する。外れ値ノイズを含む状況下を想定した数値シミュレーションにより、制御性能を評価し、有効性を検証する。

(3) 検証用簡易実機モデルの設計・製作

理論検証のための簡易実機モデルとして、スライダ・クランクシステムを構築する。多入力(多気筒)モデルへの拡張を考慮して、実機の設計・製作を行う。また、機械系のハードウェアモデルと、吸気・圧縮・燃焼・排気のダイナミクスを計算機上でリアルタイムに算出ソフトウェアモデルを組み合わせ、エンジンの動作を模擬できる統合シミュレータ環境を構築する。

4. 研究成果

(1) 離散スライディングモード適応制御の理論拡張(多変数系への拡張)

本研究課題のベースになっている、スライディングモード制御とセルフチューニング型適応制御の設計法について、実システムへの適用を前提に、多変数系や非線形系への拡張を検討した。

具体的には、まず多入出力系に対する理論の拡張を行った。入出力の数が同じ多入出系に対して、リアプノフ関数に基づき制御系の安定性を示した。また、V6 エンジンモデルのシミュレータ環境(SICE ベンチマークエンジンモデル)を用いて、エンジン始動問題へ適用し、有効な制御性能が得られることを確認した。

さらに、非線形の中で比較的単純なクラスである双線形系へ理論を拡張した。また、シミュレーションにより核分裂モデルに適用し、有効性を検証した。

(2) 実環境を想定した制御系構築(突発的なノイズを含む環境下に対する制御系の構築)

エンジンの動作環境のような劣悪な環境では突発的なノイズである外れ値と呼ばれる観測外乱が混入することがよくある。そのような外乱を効率良く除去し、セルフチューニングコントローラに対する観測ノイズの影響を軽減するためのアルゴリズムを開発した。

ここで提案した方法は、 l_1 正則化を用いたロバストカルマンフィルタの考えを応用したものであり、外れ値ノイズを陽に推定し、その影響を除去してロバストセルフチューニング制御を実現するものである。セルフチューニング制御のパラメータ更新則は逐次最小二乗推定の形で与えられるが、これが誤差の二次形式の最小化問題と等価であることから、評価関数に l_1 正則化項を付加することで問題を定式化し、外れ値ノイズを陽に推定する方法を提案した。

数値解析により、外れ値ノイズが存在する場合の定常偏差が、外れ値ノイズが存在しない場合の通常のセルフチューニング制御の結果と同程度であることを確認し、ノイズの推定が有効であることを示した。さらに、非最小位相系を例題として数値シミュレーションにより制御則の有効性を示した。

さらに、応用の1つとして本課題内で開発してきたハードウェア統合型エンジンシミュレータへの応用について検討し、数値シミュレーションによりその有効性を確認した。

(3) 検証用簡易実機モデルの設計・製作(リアルタイムシミュレータの開発)

エンジン制御への適用を視野に入れ、直動モータ(スライダ)とクランクシャフトから構成される簡易的な実験機を設計・製作し、そのリアルタイム制御実験システムを構築した。

さらに、エンジン制御検証用実験環境として、ハードウェアとソフトウェアと融合した統合エンジンシミュレータ環境を構築した。このエンジンシミュレータはピストンクランク機構の機械系(図1)は実際の部品を用い、エンジン内の吸気・圧縮・燃焼・排気のダイナミクスはソフトウェア上の仮想システムで実装するものである。ソフトウェア上で算出されたピストン推力は、リニアモータを用いて実システムであるピストンクランク機構に印加する。Matlab の xPCtarget を用いて、リアルタイム制御環境を実装し、1気筒エンジンモデルと2気筒エンジンモデルのプロトタイプを構築した。

このシステムは、ハードウェアインザループシミュレーション(HILS)の一手法であるが、機械系に実システムを用いることにより、クランクシャフトの弾性効果や複雑な摩擦現象のようなシミュレーションでは再現することが困難な現象を解析することを念頭に置いている。さらに、実際のエンジンには取り付けることができない部分に実験的にセンサ等を加え、挙動の解析や新たな制御方法の検討が可能となると考えている。

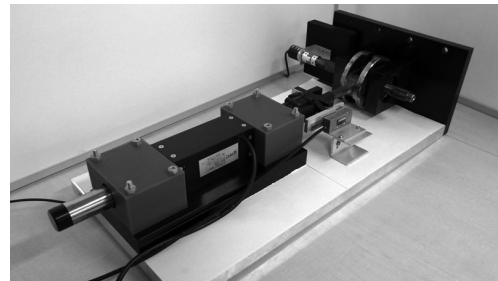


図1 統合エンジンシミュレータのハードウェア部分

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4件)

金田泰昌、入月康晴、山北昌毅、外れ値環境化におけるロバスト Self-Tuning Controller、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 50、No. 12、2014、836-844
DOI: 10.9746/sicetr.50.836

Akira Ohata、Akihiko Sugiki、Katsuhisa Furuta、Self-tuning Control Based on Discrete Sliding Mode、International Journal of Mechanical Engineering and Automation、査読有、Vol. 1、No. 6、2014、367-372

<http://www.ethanpublishing.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=174&id=296>

Ana Karina Patete Salas、Euridices Miguel Rios Bolivar、Claudia Sophya Gomez Quintero、Katsuhisa Furuta、Self-Tuning control for an extended

class of bilinear systems, case of study: nuclear fission mode、査読有、Articulo de Investigacion, Revista Ciencia e Ingenieria, Vol. 35, No. 1, 2014, 13-23

<http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/4877>

金田泰昌、入月康晴、山北昌毅、ロバスト UKF とそのパラメータ設計手法、システム制御情報学会論文誌、査読有、Vol. 26, No. 5, 2013, 182-184
DOI: 10.5687/iscie.26.182

[学会発表](計 12 件)

Yasuaki Kaneda, Yasuharu Irizuki, Masaki Yamakita, Robust Self-Tuning Controller under Outliers, IEEE Conference on Decision and Control, 2014 年 12 月 15 日, Los Angeles (USA)
倉科志帆、釜道紀浩、セルフチューニング制御による IPMC アクチュエータの変位制御、第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2014 年 12 月 15 日、東京ビッグサイト(東京都江東区)

高野勇人、浅沼宏紀、柳裕太、木下定洋、釜道紀浩、石川潤、ハードウェア統合型エンジンシミュレータの開発 -リアルタイム制御環境の構築と動作実験-、第 32 回日本ロボット学会学術講演会、2014 年 9 月 4 日、九州産業大学(福岡県福岡市)

張坤、木下定洋、柳裕太、釜道紀浩、石川潤、ハードウェア統合型エンジンシミュレータの開発 -2 気筒試作機の評価-、第 32 回日本ロボット学会学術講演会、2014 年 9 月 4 日、九州産業大学(福岡県福岡市)

Yasuaki Kaneda, Yasuharu Irizuki, Masaki Yamakita, Fast Algorithm of Robust Kalman Filter via l1 Regression by a Closed Form Solution, The 19th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 2014 年 8 月 27 日, Cape Town (South Africa)
Akihiko Sugiki, Katsuhisa Furuta, Akira Ohata, Hiroaki Nita, Nonlinear Variable Structure Adaptive Control, American Control Conference, 2014 年 6 月 4 日, Portland (USA)

金田泰昌、入月康晴、山北昌毅、外れ値環境下におけるロバスト Self-Tuning Controller、第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、2014 年 3 月 7 日、電気通信大学(東京都調布市)
金田泰昌、入月康晴、山北昌毅、l1 正則化を用いたロバストカルマンフィルタの高速アルゴリズム、第 1 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、

2014 年 3 月 5 日、電気通信大学(東京都調布市)

Sadahiro Kinoshita, Daiki Hoshino, Yuta Yanagi, Jun Ishikawa, Norihiro Kamamichi, Masaki Yamakita, Akira Ohata, Katsuhisa Furuta, Advanced Engine Simulator Integrated with Engine Rotational Hardware, The 7th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, 2013 年 9 月 7 日、国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区)

Yasuaki Kaneda, Yasuharu Irizuki, Masaki Yamakita, Robust Unscented Kalman Filter via l1 Regression and Design Method of Its Parameters, The 9th Asian Control Conference, 2013 年 6 月 25 日, Istanbul (Turkey)

木下定洋、星野大貴、柳裕太、釜道紀浩、石川潤、大島明、ハードウェア統合型エンジンシミュレータの開発、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、2013 年 5 月 24 日、つくば国際会議場(茨城県つくば市)

金田泰昌、入月康晴、山北昌毅、l1 正則化を用いたロバスト Unscented Kalman Filter とその設計手法、第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会、2013 年 5 月 17 日、兵庫県民会館(兵庫県神戸市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古田 勝久 (FURUTA, Katsuhisa)
東京電機大学・大学・教授
研究者番号: 10016454

(2) 研究分担者

石川 潤 (ISHIKAWA, Jun)
東京電機大学・未来科学部・教授
研究者番号: 10453797

釜道 紀浩 (KAMAMICHI, Norihiro)
東京電機大学・未来科学部・准教授
研究者番号: 70435642

山北 昌毅 (YAMAKITA, Masaki)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号: 30220247

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

大島 明 (OHATA, Akira)

杉木 明彦 (SUGIKI, Akihiko)

金田 泰昌 (KANEDA, Yasuaki)

アンナ パティエテ (PATETE, Anna)

潘 耀東 (PAN, Yaodong)