



Title	同時摂動確率近似による制御系設計手法に関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	石塚, 真一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12303号
Issue Date	2016-03-24
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/61664
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Shinichi_Ishizuka_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 石塚 真一

学 位 論 文 題 名

同時摂動確率近似による制御系設計手法に関する研究

(A Study of Control Design Method Using Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation)

制御理論は、1960 年に Kalman が発表した最適制御に関する論文以降、目覚ましい発展をし、線形システムに対しては体系が整備された。これらは制御対象の数理モデルを状態方程式で記述し制御器を求める、いわゆる「モデルベース (制御) 設計」と呼ばれ、近年のコンピュータ技術とツールの進化により、今日、誰にでも簡単に利用できる環境が整っている。しかしながら、産業界で十分に活用されているかと言うと、必ずしもそうではない。産業界の実システムは、

- ・大規模かつ複雑で数理モデルの導出が困難である。
- ・数理モデルが導出できたとしても、制御理論を直接適用できない。
- ・多くの場合、非線形システムとなる。
- ・量産での実装に適した簡潔な構造のコントローラが望まれる。

といった課題および要求がある。非線形システムに対する制御に関しては、現在、研究段階ではあるが、1980 年代に微分幾何学を用いたアプローチが成功を収め、一部が体系化されている。これらの手法は取り扱えるシステムが限定的で、実システムへの適用例は少ないが、今後の発展が期待される。また、実システムへの適用という面で、近年、非線形モデル予測制御 (Nonlinear Model Predictive Control: NMPC) が注目されている。特に 2004 年に大塚が、C/GMRES 法と呼ばれる NMPC の解を効率良く探索、追跡する方法を発表すると、自動車のエンジン制御や車両制御など、産業界での応用研究が数多く見られるようになった。しかしながらモデル予測制御は、コントローラ内部にモデルを含むため、モデル導出が困難である課題は解決できない。

制御対象のモデル情報を積極的に利用することができない場合、実験データを直接用いて、モデルを介することなく制御系を設計するデータ駆動制御、あるいはモデルフリー制御と呼ばれるアプローチが近年、活発に研究されるようになってきた。実験データを基に制御系を設計する方法として、数理計画法による制御パラメータの最適化が考えられる。しかし最適化は、一般に、多くの繰り返し計算を必要とするため、オンラインでの実時間最適化は困難である。この傾向は、最適化するパラメータの数が増えるほどに顕著になる。

1987 年に Spall は、確率近似法の枠組みで計算効率を飛躍的に向上させる、同時摂動確率近似 (Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation: SPSA) と呼ばれるアルゴリズムを提唱した。SPSA は、パラメータの数に依存せず、評価関数に相当する損失関数を、僅か 2 回計算しただけで、全てのパラメータを更新するアルゴリズムである。SPSA は、状態空間モデルや大規模なニューラルネットワークなど、システムのパラメータ推定問題へ応用されている。制御系においては、定常システムに対し、コントローラのパラメータ調製問題へ適用した研究が報告されている。

本研究は、産業界の実システムに適用可能な制御系構築を目的に、SPSA を用いた、モデルフリーで、かつオンラインで非定常システムに追従する適応制御系の構成法を提案し、実際のシステムに適用してその効果を検証する。具体的な制御対象は、ディーゼルエンジンの低排出化を目的とするエアパス制御である。近年の環境問題に対する関心の高まりと規制の厳格化により、NOx やディーゼル排気微粒子である Diesel Particulate Matter (DPM) を低減する必要がある、その発生に影響を与える吸気および排気の流れをコントロールするのがエアパス制御と呼ばれるものである。本制御対象は、

- ・NOx や DPM の発生メカニズムが複雑で第一原理に基づくモデル導出が困難

- ・運転状況により特性が大きく変動する非定常システム
- ・バルブなど非線形な特性をもつ要素を多く含む
- ・吸気系と排気系が干渉する 2 入力 2 出力系

といった特徴を持ち、従来のモデルベース設計が困難な制御系である。本問題に対して、モデルフリーで適応する制御系を構成することを具体的目標としている。研究手順は、はじめに標準的な SPSA を、エアパス制御を想定して、その特徴である、

- ・ 2 入力 2 出力干渉系
- ・ 非定常

を持つ制御対象を振動モデルとして構築し、その基本的性質を確認する。SPSA は確率近似法の枠組みに入る手法であるが、同手法として広く知られている、Finite Difference Stochastic Approximation (FDSA) と比較することにより、計算効率や大局的解の探索能力など、SPSA の特徴を明確化する。その後、標準的な SPSA を、オンラインで適応可能となるように改良する手法を提示する。さらに、時変システムに対する解の収束特性および安定性についてもモンテカルロシミュレーションで検証し、実用性の確認をする。

シミュレーションで検証した提案手法を、実際のエアパス制御に対して適用し、エンジンベンチテストで性能を検証する。エアパス制御の制御量は、MAF と呼ばれる新規空気流入量と、MAP と呼ばれる吸入マニホールド内の圧力であり、これらを吸入側に戻す排気量を調整する EGR バルブの開閉量と、ターボチャージャの働きを調整する VNT ペーンの開閉量で制御する。検証の結果、定常運転に相当する負荷ステップテストにおいては従来手法と同程度、過渡運転に相当するモードテストにおいては従来手法より優れた性能を示すことを確認し、提案手法が有効に機能することを確認した。

MAF および MAP の制御は、NOx や DPM に影響を与える要因であると考えられるため、制御量とした。本来、直接の目的である NOx や DPM を制御量にすれば、より適切な制御が期待できる。しかし、現存する NOx センサ (以降 NOx ハードセンサと称す) は応答性が低く、過渡運転に対してフィードバック制御をすることができない。そこで、エンジンの各状態量から NOx 値を推定する、NOx ソフトセンサが検討されている。しかし、NOx ソフトセンサは、NOx ハードセンサと準定常状態で偏差があり、推定精度に問題があった。また、厳格化するディーゼルエンジンの排出規制に対応するため、排出したガスをさらに浄化する後処理が必要になってきているが、この際にも正確な NOx 値の推定が望まれている。そこで、エアパス制御で有効であった提案手法を応用し、NOx ソフトセンサの準定常特性を NOx ハードセンサの値と比較し調整する、適応 NOx ソフトセンサを提案し、定常試験、およびモード試験の両方において、良好な結果を得た。

制御系設計において、制御対象のモデル化が可能な場合もあり、その場合は積極的にモデル情報を用いた方が、見通しの良い設計ができて望ましい。そこで、代表的なモデルベース制御である、 H_∞ コントローラの極を SPSA で効率良くセルフチューニングする方法を提案し、片持ち平板の制振問題に適用し、シミュレーションでその効果を確認した。制御対象の固有振動数を時間と共に変動させた時変システムに対し、ノミナルのコントローラは途中で発散してしまうが、提案手法では発散することなく、制御対象の固有振動数の変化にコントローラが適応し、セルフチューニング可能なことを示した。

以上のように、本研究では、SPSA による適応制御系設計法を、モデルフリー制御、モデルベース制御、およびソフトセンサに対し体系的に提案し、ディーゼルエンジンのベンチテストによる実証実験により、その有効性を確認した。