

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420859

研究課題名(和文) 先進的制御理論による宇宙用ロバスト制御の研究

研究課題名(英文) Research on Advanced Robust Control in Space Applications

研究代表者

森田 泰弘 (Morita, Yasuhiro)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：80230134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：パーティクル・フィルタを宇宙システムのロバスト制御に応用しようという研究であり、ロバスト制御の分野を発展させる極めて独創的な意義をもつ。最も重要な成果として、まず現状のロバスト制御の問題点を明確にし、ノミナル性能の劣化などの課題を識別した上で、パーティクル・フィルタ理論がこれらの課題を解決しうる特性を有することを明らかにした。次に、パーティクル・フィルタ理論を定式化し、この理論を実システムに適用するための課題として、演算時間や演算の非連続性などを抽出した。これらをふまえて、この理論を宇宙システムの簡単化した動特性モデルに適用し、その有効性を数値シミュレーションなどにより示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, it is tried to utilize the particle filter theory to enhance robust control in space applications. First of all, the fundamental issues of current robust controls were identified and it was observed that the property of the theory can tackle with them. Then, the theory was formulated and the challenges to utilize it in real applications were disclosed. Finally, its effectiveness was evaluated by numerical simulation technique.

研究分野：宇宙システム工学

キーワード：宇宙システム ロバスト制御

1. 研究開始当初の背景

【研究の学術的背景(宇宙用ロバスト制御における我が国の最先端の貢献)】

宇宙システムの制御(姿勢制御や振動制御)においては、本質的に地上での検証試験が限定されているために、システムの動特性の変化(不確定性)や想定外のスペクトルをもつ外乱などに対応するべく、ロバスト制御(不確定性に対して耐性の強い制御)と言う概念が極めて重要である。ロケットを例に挙げると、機体の剛性特性はパーツごとに分けて行う振動試験結果を統合した推定であり、機体の空力特性はスケールモデルを用いた風洞試験に基づく推定に過ぎない。ロバスト制御の分野では、 H 制御や μ 制御などいわゆるポスト現代制御理論が90年代以降相次いで登場してきたが、これらの理論は宇宙ロケットのような高次の不安定システムに直ちに適用できるものではない。しかも、これまでの適用例としては、当然ながら車両や電気製品の制御のように事前に繰り返し試験が可能なものばかりであり、宇宙ロケットのように失敗の影響が甚大で、かつ地上での実証試験が限られているために高度のロバスト性が要求されるようなケースでの応用は皆無である。このような状況の中で、研究代表者は、世界でも初めて、 H 制御や μ 制御など先端制御理論を次々と宇宙ロケットに適用することに成功し、宇宙用ロバスト制御の発展に貢献してきた([1], [2])。事前にダイナミクスを検証することのできないロケットに適用することにこそ真価があることを世界に先駆けて見抜いた先見であった。これにより、科学衛星打ち上げ用の M-V ロケットは通常の制御アルゴリズムに比べて格段に余裕のあるロバスト安定性を獲得することができ、4号機の事故の異常飛行時にも制御系が安定して動作したことでその卓越性を知ることができる(ノズルの故障で機体は想定を超える姿勢で飛行したが、制御系は最後まで安定性を失わなかった)。

このように世界でも初めて、 H 制御や μ 制御など先端制御理論をロケット飛行体に適用し成果を示したことは、制御理論の発展において大変意義が大きい。一方、今後の展望としては、さらなる発展が必要であることは言うまでもない。すなわち、 H 制御や μ



制御などは、あらかじめ定義したプラントモデルの変動(制御対象の動特性の不確定性)の守備範囲の中で最悪の状態を想定し、最悪状態を表す数学モデルに対して閉ループ系の安定性や応答性を保証する手法である。言い換えると、ノミナルモデル(most probable model)に対する制御性能を犠牲にするのと引き換えに、ロバスト制御の守備範囲を広げようという考え方である。したがって、あらかじめ定義した制御対象の動特性の変動の範囲内ではロバスト性を保証できるものの、ノミナル状態での制御特性はロバスト性とのバタで劣化してしまう。つまり、万が一に備えるあまり、もっとも起こりうる状態での制御性能を下げたわけである。これでは、あまりエフォート・パフォーマンスが良いとは言えない。しかも、あらかじめ定義した不確定性の範囲を超えて制御対象の動特性が変動した場合、もはやロバスト性は保証されない。

研究代表者は、このような制約を緩和すべく、ローカライズド制御と言う全く新しい制御の概念を切り拓き、ロバスト制御の発展に大きく貢献した([3])。この方法は、最適制御レギュレータの評価関数にシステムの有限要素的振動特性を記述し、制御理論の構築において制御対象の構造特性を陽に反映するものである。これにより、構造特性の変動に対するロバスト性と応答性のトレードオフをこれまでより直接的に行うことが可能となり、ノミナル特性に対する制御特性の劣化をより小さく抑えることが可能となる。しかし、取り扱う不確定性は構造特性に限られる。さらに研究代表者は、世界でも初めて予測関数制御の概念を宇宙機の制御に導入して適応制御とロバスト制御の融合という新境地を開拓、ロバスト制御のさらなる発展をもたらした([4])。いわゆるモデル適応型の制御であり、現実の特性に対して最適な応答特性を実現し、ノミナルモデルに対する制御特性を劣化させることなしにロバスト性を獲得する可能性を示した。しかし、ロバスト制御の守備範囲はあらかじめ用意するモデルの数によって規定されるため、実システムに対する応用の限界も明らかになった。

2. 研究の目的

以上を背景に、研究代表者は、これまでの一連の研究をさらに発展させ、宇宙システムに不可欠のロバスト制御の分野を発展させるために、パーティクル・フィルタ(粒子フィルタ)という新しい概念を世界でも初めて宇宙システムのロバスト制御に適用すべく研究を推進している。この理論は、いわゆる統計数理の分野で進化してきたもので、これまでのロバスト制御の限界(ノミナルの制御特性の劣化やロバスト性の限定された守備範囲)を破るものと期待されている。

パーティクル・フィルタは統計数理の分野で発展してきた高次元状態ベクトル推定の新しい手法であり、制御対象の動特性を規定

するシステム・パラメータを含めた一般化された状態ベクトルを多数の粒子の分布で近似するものである。粒子は一般化された状態空間上に状態の候補として配置され、計算機内で遷移させた粒子とセンサデータ（観測値）を比較して各粒子の確率的重みが更新される。この確率重みに従って粒子を再抽出することで粒子の分布を真の状態ベクトルに収束させていくという戦略である。パーティクル・フィルタでは、状態ベクトルだけでなくシステム・パラメータをも直接に推定することができるため、パラメータの不確定の幅（ロバスト制御の守備範囲）をあらかじめ規定しておく必要がない。加えて、ノミナル特性の劣化もないのが特徴である。

本研究は、パーティクル・フィルタという統計数理的な概念を宇宙システムのロバスト制御に適用しようという一連の研究であり、ロバスト制御理論を大きく発展させる極めて独創的な研究ということができる。予備的研究では、パーティクル・フィルタの有効性を簡易的に示した〔5, 6〕。本研究では、これまでの成果をさらに拡張し、実システムにパーティクル・フィルタ理論を適用するための課題の識別を図ることにより、パーティクル・フィルタ理論の確立を一層目指す。国内外で複雑な宇宙システムの制御の研究は盛んに行われているが、これほどロバスト性能の拡大を図った例はない。宇宙システムに対してこの理論が確立すれば、ロケットや人工衛星ばかりでなく、将来の再使用ロケットや月・火星基地に至るまで、今後ますます複雑な環境におかれる宇宙システムの制御をより効率的に進めることができるものと期待でき、その学術的、工学的意義は極めて大きいと考える。

【これまでの研究成果を発表した文献】

- [1] Y. Morita and S. Goto, "Design for robustness using the μ -synthesis applied to launcher attitude and vibration control," Acta Astronautica, Volume 62, Issue 1, January 2008, p.p. 1-8.
- [2] Y. Morita, "An Idea of Applying the μ -synthesis to Launcher Attitude and Vibration Control Design," J. of Vibration and Control, Vol. 10, 2004, p.p. 1243-1254.
- [3] Y. Morita and K. C. Park, "An Idea of Localized Vibration Control of Flexible Space Structures," Proceedings of the 14th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics, ISAS, 2004, pp. 38-43.
- [4] Matko, Y. Morita and M. Lepetic, "Robust Adaptive Control of a Highly Nonlinear Ill-conditioned Plant," IEEE International Symposium on Industrial Electronics 2005, Paper No. A1-01, Dubrovnik, Croatia., June 2005.
- [5] 三浦政司, 森田泰弘, "将来宇宙輸送システムに向けた、統計数理的手法を用いたロバスト適応制御に関する研究," 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 2J14, 静岡, 2010 年 11 月.
- [6] M. Miura and Y. Morita, "Robust Adaptive Control for Future Space Transportation," 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS),

Okinawa, Japan, 2011, paper No. ISTS 2011-d-85p.

3. 研究の方法

以上を背景に、本研究は宇宙システムに不可欠のロバスト制御の高度化を目的とし、そのための手法として、パーティクル・フィルタと言う新しい制御の概念を実システムに適用するための道筋をつけることを目指す。本研究の遂行に当たっては、まず、現状のロバスト制御の問題点を明確にし、課題を識別することから始める。次に、制御系の設計やシミュレーションを行う環境を整備し、ダイナミクスを定式化を行う。これらの準備が整ったところで、制御対象の動特性にパーティクル・フィルタを組み込んだ閉ループ系を構成してロバスト制御系の設計・解析を行い、パーティクル・フィルタ理論の有効性の検証やこの理論を実システムに適用するための課題の抽出を行う。なお、後述するように、パーティクル・フィルタ自体は制御対象の動特性に対する深い知識を必要としないが、その有効性の検証のために、学術的に高いレベルの知識を必要とすることは言うまでもない。

最も重要な研究課題は、現状のロバスト制御の問題点の識別とパーティクル・フィルタ理論を実システムに適用するための課題の抽出である。制御対象となる実システムとしては、運用中の小型の衛星打ち上げロケットやエアロンチなど研究開発中のロケットシステム、あるいは、回収や再利用のできる将来型の宇宙輸送システムなどを想定する。

研究の実施に当たっては、航空宇宙システムの制御の分野において、欧米でも最先端の研究活動を行っている米国・コロラド大学、およびスロベニア・リュブリャナ大学と連携して、その協力を得ながら進める構想である。ともに、ロバスト制御の分野では欧米を代表する研究機関であり、本研究の遂行にあたって、最も適切な協力関係を期待できる。具体的な共同研究の実施は、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所で行うが、適宜両大学での研究打ち合わせ等の方法も活用する。

4. 研究成果

本研究は、パーティクル・フィルタという統計数理的な概念を宇宙システムのロバスト制御に適用しようという研究であり、ロバスト制御理論の分野を発展させる極めて独創的な研究ということができる。本研究の成果として、以下を挙げることができる。

まず、現状のロバスト制御の問題点を明確にし、あらかじめ定義した制御対象の動特性の変動の範囲内ではロバスト性を保証できるもののノミナル状態での制御特性は劣化してしまうこと、また理論に基づき導かれる制御器は一般に高次の特性をもち、そのままでは実際の宇宙システムへ適用することができないことなどを解決すべき課題として明らかにした。

次に、パーティクル・フィルタがこのような課題を解決するための特性を有しているこ

とを示し、特に、パーティクル・フィルタは制御対象の状態量だけでなくシステム・パラメータも推定できるため、アルゴリズム自体は極めてシンプルであるにもかかわらず、ノミナルの制御特性を損なうことなくロバスト性能を獲得することが可能であることを明らかにした。

一方、最も重要な研究項目として、パーティクル・フィルタ理論を実システムに適用するための課題を抽出し、本質的なものとしては演算に時間を要するというのと演算途中で粒子の伝搬の不全が起こりうるということを識別した。これらをふまえて、パーティクル・フィルタ理論を定式化するとともに、宇宙システムの動特性モデルにこれを適用して、その有効性を数値シミュレーションなどにより示した。

なお、研究実施に当たっては、宇宙機の制御分野において精力的な研究活動を行っている欧米の諸大学（リュブリャナ大学、ローマ大学、コロラド大学）と連携して進めた。

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）

〔学会発表〕（計2件）

[1] Y. Morita, “Advanced Robust Control Design for Space Launch Systems”, to be submitted to the 36th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2017), International Association of Science and Technology for Development.

[2] Y. Morita, H. Ohtsuka and K. Tanaka, “Novel Guidance & Control Design of Epsilon Launch Vehicle”, The 34th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2015), International Association of Science and Technology for Development, Paper No. 826-035, Innsbruck, Austria. 2015.

6．研究組織

(1)研究代表者

森田 泰弘 (MORITA, Yasuhiro)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
教授

研究者番号：80230134

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：