

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月21日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：H22. 4. 1～H25. 3. 31

課題番号：22560787

研究課題名（和文）

パーティクルフィルタによる宇宙用ロバスト制御の研究

研究課題名（英文）

The research to apply the concept of "particle filter" to the robust control of space systems.

研究代表者：森田 泰弘（MORITA, Yasuhiro）

独立行政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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）という統計数論的な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るための方法論を確立し、この分野の大いなる飛躍に道筋をつけた。具体的には、エアロンチを想定した先進的ロケットシステムのダイナミクスを構築し、これにパーティクル・フィルタ理論を適用して、ノミナル性能の向上とロバスト性能の拡大などの観点において、従来のロバスト制御を大きく上回るこの理論の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

The research established a methodology to apply the concept of "Particle filter" to robust control of space systems for the first time ever in the world, which can be considered great contributions to the field of robust control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成22年度	800,000	240,000	1,040,000
平成23年度	900,000	270,000	1,170,000
平成24年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：5601 総合工学

キーワード：誘導・航法・制御

1. 研究開始当初の背景

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。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翔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。

一方で、 H^∞ 制御や μ 制御など先端制御理論においては、いくつかの問題点も指摘されている。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ー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てきたわけである。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。

以上を背景に、本研究は、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大きく飛躍させるべく、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）と言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し、その有効性を示す。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）を大きく打ち破り、さらなる発展をもたらすことが期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、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大きく飛躍させるべく、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）と言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し、その有効性を示すことを目的とする。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）を大きく打ち破り、さらなる発展をもたらすことが期待できる。

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パラメータ（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（リサンプリング）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。つまり、これまでのロバスト制御理論の限界を打破するものである。統計数理的な理論はその演算時間の長さ故に、これまで宇宙システムへの適用は敬遠されてきたが、パーティクル・フィルタはこの欠点を改良し、リアルタイム制御に道を開くものである。

以上をまとめるに、本研究は、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）という統計数理的な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るための方法論を構築し、ロバスト制御の大いなる飛躍を図ろうとするものであり、極めて独創的な研究といえることができる。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、これほど大幅に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、その学術的、工学的意義は極めて大きいと考える。

3. 研究の方法

パーティクル・フィルタ理論は、いわゆる統計数理的アルゴリズムを実時間計算に適合できるように進化させたもので、システムの動特性を規定するパラメータ（システム・パラメータ）と状態ベクトルで張られた空間（一般化された状態空間）の格子点に確率を重みとしてもつ点（粒子）を多数分布させる。そして、粒子の時間変化を系の遷移則に基づいて予測（推定）、観測値との適応度（ゆう度）により重みを更新していくことで、粒子の分布を真の一般化状態ベクトル（システム・パラメータと状態ベクトル）に収束させていく。すなわち、パーティクル・フィルタは、状態ベクトルだけでなく、システム・パラメータも同時に推測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のが最大の武器である。しかも、パーティクル・フィルタは、ロバスト制御の泣き所であった制御対象のノミナルモデルに対する制御特性の劣化を招くこともない。これらは、これまでのロバスト制御の限界を補って余りある特性である。

このようにパーティクル・フィルタはロバスト制御の大いなる飛躍をもたらすものであり、極めて独創的な研究と考えることができる。加えて、このような統計数理的な概念をロバスト制御に導入する試みは、宇宙の分野では世界でも初めてのものである。

具体的な研究の遂行に当たっては、まず制御系の設計やシミュレーションを行う物理的な環境を整えた上で、対象とする制御プラン

トのダイナミクスを定式化、次いで、パーティクル・フィルタの概念を計算機コード化するなど段階的に準備を進める。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、ロバスト制御系の設計・解析を実施する。このように、数値シミュレーションの手法を通じて、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方法を構築しその有効性を示す。なお、本研究の遂行にあたっては、制御対象の動特性に対する深い知識を必要とし、システム工学はもとより、空力、構造、推進、制御など多角的な工学知識を必要とするために、学術的に横断的な計画の遂行が必要である。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が必要という意味である。

4. 研究成果

本研究の成果を一言でいうと、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）という統計数論学的な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るための方法論を確立し、この分野の大いなる飛躍に道筋をつけた。具体的には、エアロンチを想定した先進的ロケットシステムのダイナミクスを構築し、これにパーティクル・フィルタ理論を適用して、ノミナル性能の向上とロバスト性能の拡大などの観点において、この理論の有効性を示した。

具体的には、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）理論の定式化と解析・シミュレーション環境の整備を行い、簡単な数学モデル上でパーティクル・フィルタ理論を宇宙システムのロバスト制御に応用することの有効性の評価や妥当性の検証を行った。続いて、

宇宙システムを模擬する数学モデルに対して、ロバスト制御を構成する場合の課題を識別、宇宙システムのロバスト制御においては、ノミナル性能の向上とロバスト性能の拡大の観点極めて重要であることを明らかにした。これらの課題を解決するモデルケースとして、エアロンチを想定した先進的ロケットシステムのダイナミクスを構築、これにパーティクル・フィルタ理論を適用するための方法論を導くとともに、このような現実的なシステムに対するこの理論の有効性を示した。注目するのは、制御対象のパラメータ変動に対するロバスト性と制御対象のノミナルな動特性に対する制御特性であり、その性能と有効性を数値シミュレーションにより明らかにした。

本研究は、パーティクル・フィルタ（粒子フィルタ）という統計数論学的な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ることによりロバスト制御の大いなる飛躍を図ろうとするものであり、極めて独創的な研究といえることができる。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た。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適切な協力と助言を得ることができた。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ったが、適宜両大学と意見交換を行うなどの方法を活用した。

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 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

・L. Ridolfi and Y. Morita, “ROBUST CONTROL FOR AIR-LAUNCHED SYSTEMS,” 61st Congress of the International Astronautical Federation (IAC), Prague, Czech Republic, 2010, Paper No. IAC-10.D2.7.7.

・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.

・ 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.

・ Y. Morita, “ROBUST CONTROL OF THE ADVANCED SOLID ROCKET LAUNCHER,” First IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DyCoSS1), Porto, Portugal, 2012, Paper No. IAA-AAS-DyCoSS1-07-07/ American Astronautical Society, Advances in the Astronautical Sciences, Vol. 145, pp. 739-747, 2013.

・ Y. Morita, H. Ohtsuka and K. Tanaka, “A NEW CHALLENGE IN ROBUST CONTROL OF THE ADVANCED SOLID ROCKET LAUNCHER” , The 32nd IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control (MIC 2013), International Association of Science and Technology for Development (IASTED), Paper No. 794-017, Innsbruck, Austria. 2013.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 泰弘 (MORITA, Yasuhiro)
独立行政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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：