

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 船曳 敦漠

修士（工学）船曳敦漠提出の論文は「Relative Navigation for Spacecraft Swarms based on Observability-Driven Adaptive Decentralization of Estimation Algorithm（観測性評価に基づき推定アルゴリズムの分散度調整を行う宇宙機スワームの相対航法に関する研究）」と題し、英語で書かれ、9章と付録から構成される。

多数の宇宙機を協調させ1つのシステムとして機能させる編隊飛行のうち、特に数十から数百などの極めて多数機で構成されるシステムは宇宙機スワームと呼ばれ、超多点同時観測を始め、単一の宇宙機や小規模な編隊飛行では実現が困難なミッションを成立させる技術として近年注目を集めている。協調したミッション実現には、通常、宇宙機間の相対位置や速度を正確に知る相対航法が極めて重要であり、従来から研究が行われてきた。しかし、先行研究の中では、測位衛星により絶対位置が得られない状況で、様々な通信・観測ネットワーク構造に対し、常に安定性と精度を両立できる推定手法が確立されていない、宇宙機スワームの運用で想定される種々の実際的な要求条件を満たすような推定が保証されていない、という二つの大きな課題が残されていた。

そこで本論文では、完全分散・部分分散型推定を組み合わせた適応型分散推定（提案Ⅰ）と、観測性評価による推定アルゴリズムの分散度調整（提案Ⅱ）という二つの機能を備えた新しい相対航法アルゴリズムを提案している。まず提案Ⅰにおいて、安定性に優れる完全分散型推定と推定精度に優れる部分分散型推定を切り替えることで、様々な状況において、常に安定性と精度の両立ができることを示している。しかし、十分な観測情報が得られない状況においては、この切り替えのタイミングを事前に設定するのでは、安定性を保証することが困難な状況が発生しうる。このような状況に対しては、提案Ⅱの観測性評価を導入し、推定が不安定になる条件下での切り替えを抑制することで、より高い安定性を実現することができるとしている。

提案手法の有効性を検証するため、代表的な既存手法との性能比較を行っている。数値シミュレーション上で、宇宙機の配置や通信・観測ネットワークの密度を網羅的に変え、推定の収束率、精度、通信負荷を評価し、その結果、特に初期推定誤差が大きく通信・観測ネットワークの密度が低いという厳しい条件下において、既存手法と比較して提案手法が推定の安定性と精度ともにより高い性能を実現できることを定量的に示し、その有効性を主張している。

第1章では、序論として、宇宙機スワームを用いた具体的なミッション・利用例の紹介と合わせて、それらを実現するために相対航法が重要となることを主張している。先行研究の分析を行い、本研究で解くべき課題を明確にしている。

第2章では、本研究で対象としている宇宙機スワームの相対航法の問題をより明確化するため、各種の定式化を含め、前提となる各種条件を定義している。

第3章では、提案する推定アルゴリズムの基礎となるベイズ推定、また分散推定の定式化にあたって重要となるガウスフィルタ、情報ベクトル、情報行列といった概念をまとめ、後述する各種推定アルゴリズムの理解の助けとなる情報を整理している。

第4章では、推定アルゴリズムの性能評価に使用される数値シミュレータに関し、実装の手法、用いられるパラメータ、推定精度・収束率といった性能評価に用いられる指標について詳細に説明している。

第5章では、相対航法に関する既存研究に基づき、中央集権型・完全分散型・部分分散型推定の理論的な背景とその実装法についてまとめている。性能を数値シミュレーションで評価し、特に疎なネットワークにおいて、推定の安定性と精度の両立が困難であることを示している。その結果から、提案手法にはこの両立が求められると主張している。

第6章では、安定性に優れる完全分散型推定と、高い推定精度を実現できる部分分散型推定を組み合わせた適応型分散推定（ADF: Adaptive Decentralized Filter）を提案している。推定の安定性を重視するモードと精度を重視するモードを状況に応じて適切に切り替えることで、安定性と精度の両立が可能であることを述べている。

第7章では、適応型分散推定の性能をさらに向上させる方策として、観測ネットワークの持つ観測性に基づいて、推定アルゴリズムの分散度を動的に調整する概念を提案している。部分分散型推定の推定対象となる状態量の次元数に応じて観測性の閾値を調整することにより、安定性・精度の両面でさらに優れた推定システムが作れることを示し、これを観測性駆動型の適応分散型推定（OD-ADF: Observability-Driven Adaptive Decentralized Filter）として定式化している。

第8章では、提案手法を含めた複数の推定アルゴリズムに対して、数値シミュレーションによる性能評価を行い、宇宙機配置への依存性、初期推定誤差の大きさに対する感度、故障に対する冗長性、ネットワークトポロジーの違いへの対応、という4つの観点で評価を行っている。その結果、提案手法であるOD-ADFが、実際に起こりうる様々な条件において100%近い収束率と高い推定精度を実現できることが示されている。

第9章では、本論文の結論と今後の課題について述べている。

以上要するに、本論文では、宇宙機スワームの相対航法アルゴリズムとして、安定性と精度を両立できる推定アルゴリズム（OD-ADF）を提案し、実際の運用で起きうる様々な条件に対する包括的な評価を行い、その有用性を定量的に示したものであり、宇宙工学・システム工学上、貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。