

補助事業番号 2024M-420
補助事業名 2024年度 衛星の運動モデル予測値とセンサー観測値の残差によるデータ
駆動判別 補助事業
補助事業者名 国立大学法人東海国立大学機構
名古屋大学 大学院工学研究科 准教授・稲守 孝哉

1 研究の概要

近年、小型衛星の打ち上げが増加し、新たなリモートセンシングへの期待が高まっている。しかし、数千機規模の運用では従来の人による異常対応は現実的でない。そこで、衛星自体が自律的に異常を検知し、その結果を地上局へ送信するシステムの構築が求められている。本研究は、計算量の課題を乗り越え、実際の超小型衛星MAGNAROを用いた適用方法を検討し、提案手法の実現性を示すことを目的としている。

2 研究の目的と背景

宇宙利用の敷居を下げる試みとして、低コスト、短い開発期間の利点をもつ小型の衛星の打ち上げ機数が増加し、高機能で多数機の衛星群によりはじめて可能となる、広大な領域における国土管理、森林管理、水資源管理、食料安全保障などの様々な分野での通信やリモートセンシングが強く期待されている。数千機という衛星の運用が検討されるなか、衛星の機上で発生する異常を従来のように地上局において行うことは現実的ではない。そこで衛星が自律的に異常を検知し対応する衛星の管理・運用が求められている。従来研究において、深層学習を用いた異常検知は計算量の観点から衛星の機上に搭載することは困難であった。本研究では、多数機の衛星の管理・運用を効率的に実施するため、衛星の異常を機上で自律的に検知し、異常検知の結果を衛星から地上局に自律的に送信する効率的な運用システム構築する。また、実利用を見据えて実際の衛星であるCubeSat級超小型衛星での適用方法を検討する。

3 研究内容 (http://nanosat.nuae.nagoya-u.ac.jp/research_nanosat.html)

本研究では、衛星の異常を機上で自律的に検知し、異常検知の結果を衛星から地上局に自律的に送信する効率的な異常検知・判別のシステムを構築する。本研究では FDI(Fault Detection and Fault Isolation、異常検知および異常判別)を衛星の搭載計算機に実装し、衛星で自律的に異常を検知する。機上で異常検知を行うことで素早く対応でき地上局においての管理・運用を簡易化できる。従来、モデルベース FDI とデータ駆動 FDI の 2 つの方法が検討されてきた。モデルベース FDI では姿勢センサーの観測値と衛星の運動モデルによる想定値とを比較して異常を検知するが、長期にわたる観測データのパターンからの異常検知に限界がある。一方、データ駆動 FDI は、長期にわたる観測データからパターンを抽出し統計的学習によって異常を検知するが、

人工衛星の搭載計算機で記録容量や計算能力に制約があるなかでの適用に限界がある。本研究では、モデルベース FDI とデータ駆動 FDI の両手法の利点を生かし、長期間の観測データのパターンを機上で扱える FDI を構築する。

具体的には以下の検討を行った。

(1)データ駆動 FDI の衛星での性能評価

センサーとアクチュエーターモデルを実装した姿勢制御システムのシミュレーターを構築する。データ駆動 FDI による異常検知性能とその計算量を確認した。

(2)データ駆動 FDI とモデルベース FDI を統合した残差による FDI の構築

姿勢の運動モデルから観測データの予測を求める拡張カルマンフィルタ(EKF)を構築し、提案手法である残差を用いた場合の FDI の結果を混同行列として示し異常検知の性能を評価した。

(3)衛星への実装の検討

搭載計算機の電子基板を開発し提案手法を実装することで衛星での実利用における問題点を検討した。

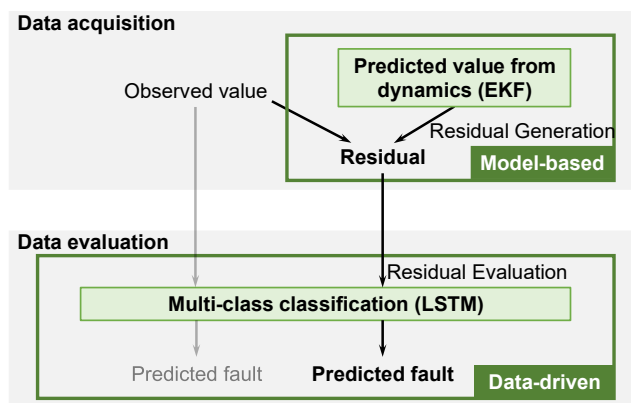


図1 観測値(左)と残差(右)による FDI の流れ

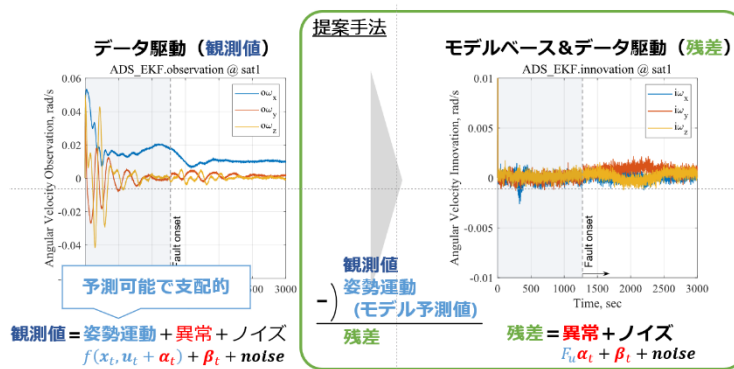


図2 観測値と運動モデルによる予測値との差による残差生成

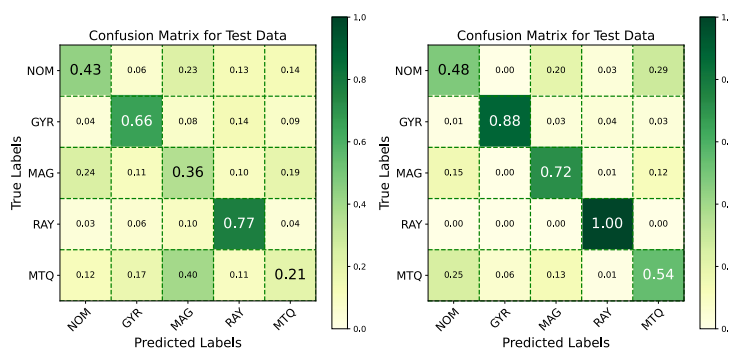


図3 (左)観測値 (右)残差による異常検知および異常判別 (FDI)

本研究は、宇宙機の姿勢軌道制御システムにおけるFDIの信頼性向上を目的として、モデルベースとデータ駆動の双方の利点を活かす新たな手法を提案する。まず、センサーの観測値と数理モデルの予測値との差(残差)に着目し、従来の観測値そのものを用いる手法に比べ、パラメータ推定の負荷を低減する点を明らかにした。残差生成にはExtended Kalman Filter(EKF)を利用し、生成された残差の時間的長期依存性の抽出には、時系列データに優れたLong Short-Term

Memory (LSTM)を適用した。シミュレーション実験では、単一の異常シナリオにおいて、従来手法（観測値のみ利用）の平均適合率・再現率がそれぞれ約47% - 48%であったのに対し、残差を用いる提案手法では71% - 72%に改善する結果が得られた。しかし、複数の異常が同時に発生した場合には、残差パターンの類似性から誤判別が生じ、性能が低下する（平均適合率40%、平均再現率39%）ことが確認された。そこで、出力磁気モーメントと磁場の大きさという2種類の物理量に対応する残差も追加することで、異常の個別識別精度を大幅に向上させ、最終的に平均適合率・再現率ともに92%まで改善できることを示した。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究により衛星の異常を自律的に検知し対応できれば、観測データの量と質を向上することが期待できる。また、本研究により多数機の運用・管理が自律的に行うことができれば、より多数機の衛星を軌道上に展開でき、災害のみならず、国土管理、森林管理、水資源管理、食料安全保障をはじめとしたリモートセンシングの様々な分野でにおける発展に貢献できるものと期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

今回の研究では、衛星の機上での姿勢制御用センサーやアクチュエータの異常の検知技術の開発を行った。今後は、実際の運用を意識した衛星システムへの組み込みを行い提案手法の軌道上実証を目指す。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

小林 尚生, 稲守 孝哉, 山口 皓平, Ji Hyun Park: 宇宙機の運動モデルとデータの残差更新周期に着目した異常検知・判別の高精度化, 第68回宇宙科学技術連合講演会, P194, 姫路, 2024.

7 補助事業に係る成果物

特になし。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 名古屋大学(ナゴヤダイガク)

住 所: 〒464-8603

名古屋市千種区不老町 名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

担 当 者 准教授 稲守 孝哉(イナモリ タカヤ)

担 当 部 署: 大学院工学研究科(ダイガクインコウガクケンキュウカ)

E - m a i l: inamori@nuae.nagoya-u.ac.jp

U R L: <http://nanosat.nuae.nagoya-u.ac.jp/index.html>