

データ駆動型アプローチによる水レジストジェットスラスタにおける 運用時推力および欠損データの推定方法

A Method Estimating Thrust and Missing Data by Data Driven Approach When Utilizing a Water Resistojet Thruster

学生証番号 47186061 氏名 王 啓航
(指導教員 小泉 宏之 准教授)

Key Words : Water Resistojet, Random Forest, LightGBM, Space Environment, Missing Data

1. はじめに

50kg級以下の超小型衛星は大型衛星と比較すると、コストが低く、開発周期が短いメリットがあり、宇宙産業から注目されている。また、民間企業や大学が参入しやすいため、超小型衛星の打ち上げ数は年々増えている¹⁾。宇宙で衛星を制御するために、推進システムの推力をリアルタイムで正確に知ることが重要である。多くの推進システムの運用時推力は物理モデルから推定できるが、水レジストジェットスラスタのような理論がまだ完全に確立されていない推進システムに対して、このようなアプローチは適用できない。また、宇宙の過酷な環境で、電気的な原因でセンサーの破損、データの欠落などが発生する可能性があり、対策としては冗長系を使用する。しかし、スペースが限られている超小型衛星は多くの冗長系を使用することができない。近年、機械学習が様々な領域で活用され、データ駆動型アプローチの機械学習は衛星の自律制御、異常検知などに大きく貢献している²⁾。本研究の目的は水レジストジェットスラスタの地上試験データを用いて、データ駆動型アプローチによる推力及び欠損データを推定する手法を提案し、適用する際の予測精度を確認することである。また、手法を評価することである。

2. データ収集

本研究は東京大学が開発している水レジストジェット推進システム AQUARIUS(AQUA ResIstojet propUlsioin System)のフライトモデルを検証対象として、データを収集した³⁾。図1はAQUARIUSの概念図を示している。AQUARIUSは水を気化させ、水蒸気を真空中に噴射し、推力を得る推進システムである。水を完全に気液分離させるために、ノズルと水タンク間に気化室が設置されている。水タンクと気化室間のレギュレーションバルブ(以下RVと呼ぶ)をオープンし、液体の水を気化室に送る。水を完全に蒸発させ、その後再びRVをオープンする。このように脈動的に水を噴射し、作動する。推力は、振り子式スタンドで測定

する。図2は作動履歴の一例を示している。本研究ではAQUARIUSの推力測定値、搭載されている圧力センサー、温度センサーの値、そして、印加電力、噴射量の値などの特徴量を使用する。

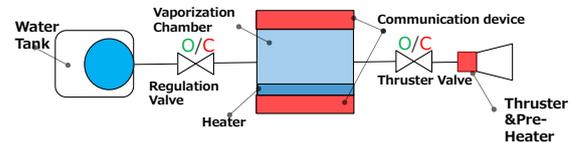


図1 AQUARIUSの概念図

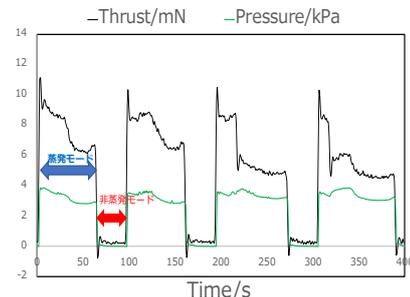


図2 気化室圧力と推力履歴の一例、蒸発モードと非蒸発モードが存在している脈動式噴射。

3. 推力推定

特徴量の情報価値を高めるために、特徴量エンジニアリング(以下FEと呼ぶ)で、ラグ特徴量、Rolling Windowsによる特徴量、物理モデルから得られた特徴量などを作った。また、データの不均一性を取り除くために、K-meansでデータを5つのクラスに分け、SMOTEによるオーバーサンプリングを実行した。推力推定の際に、特徴量の重要度を計算できる回帰木のアンサンブル学習のランダムフォレストと、LightGBMを使用した。汎化誤差を評価するために、複数回、学習データとテストデータを8:2の比率でそれぞれ2つのノズルに対してランダムに選び、モデルを学習させた。推定結果の評価は推定値と測定値のRMSEと、RMSEの標準偏差、そして一つの噴射サイクル平均推力のRMSE、RMSEの標準偏差を求めた。また、一部の実

験では2つの変位計から推力推定したため、その場合は得られた2つの変位計による推力のRMSEは約0.28mNと比較し、評価した。FE、およびSMOTEによるオーバーサンプリングの有効性を確認するために、FEなし、FE有り、FEありかつSMOTEありの3つのケースを学習させた。図3はその結果を示している。

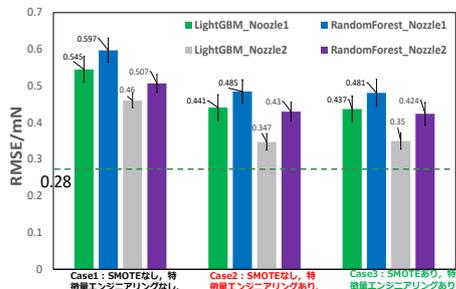


図3 推力推定結果, RMSEと, RMSEの標準偏差。

一サイクルの推力推定のRMSE, RMSEの標準偏差は3つのケースともに 0.1 ± 0.03 mN程度である。

推定結果から, FEを実行することで, RMSEは0.1mN向上でき, 0.28mNの2倍以内に抑えた。木系の機械学習モデルから特徴量の気化室圧力, 水タンク圧力の重要度が高い結果が得られた。ラバールノズル理論と比較すると, 定性的に一致している。

4. 欠損データ推定

本研究は気化室圧力センサー, ノズル前圧力センサーが欠損したことを仮定し, 気化室圧力を推定した。推定は2段階の推定に分けられる。

1). 気化室圧力とノズル前圧力を使用せず, FEで得られた特徴量を使用し, ランダムフォレストで蒸発モード判定を行った。精度は真陽率TPRと偽陽率FPRを使用する。結果を表1にまとめた。

表1 蒸発モードと非蒸発モード判定の評価

評価指標	ノズル1使用	ノズル2使用
FPR	7.3%	3.3%
TPR	98.5%	99%

2) 非蒸発モードの場合, 気化室圧力を0kPaとする。蒸発モードの場合は推力推定と同じ方法で圧力を推定した。精度評価は, RMSEと, RMSEの標準偏差を用いる。また, 一部の測定実験で別の圧力計で気化室の圧力を測定した。二つの圧力計のRMSEは約0.32kPaである。この値と推定値を比較した。気化室圧力は蒸発の物理モデルから計算することもできるが⁴⁾, 圧力と流量のコンダクタンスを知ることが必要である。本研究は2つのケースで圧力を求めた。

Case1. 80%データからコンダクタンスの平均値を求

め, 残った20%で気化室圧力を計算する。

Case2. 気化室が既知の場合, 各噴射サイクルでコンダクタンスの平均値を求め, 気化室圧力を求める。

物理モデルからの結果と本研究で提案した方法で計算したモデルの中で一番精度が高い結果を図4にまとめた。

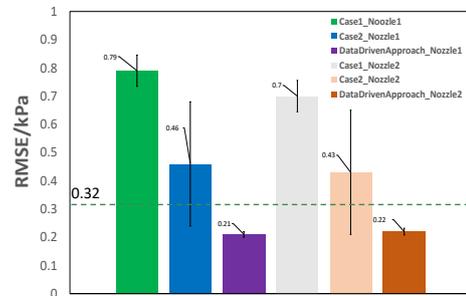


図4 データ駆動型の推定結果と物理モデルからの推定結果の比較。

データ駆動型アプローチによる推定結果は0.32kPaより低く, 物理モデルより優れていることが分かった。気化室内に残った水と, 時間の重要度が高い。これは蒸発モード中に2段階の蒸発が存在していること, および, 蒸発は液滴の表面性と関係していることによると考えられる。

5. まとめ

- 1) 提案したデータ駆動型アプローチによる推力推定方法は, RMSE0.4mN程度, 水レジストジェットスラスターの推力を推定できる。
- 2) FEすることで, 推力推定精度をRMSE0.1mN程度向上できる。
- 3) データ駆動型アプローチにより, 圧力の欠損データを冗長系誤差以内に推定できる。
- 4) 選定した木系の機械学習モデルから得られた特徴量の重要度を物理現象と比較し, 定性的に一致している。

参考文献

- 1) SpaceWorks', 2018 Nano/Microsatellite Market Forecast C Williams, B Doncaster, J Shulman, 2018.
- 2) Takehisa Yairi. et al. 'A Data-Driven Health Monitoring Method for Satellite Housekeeping Data Based on Probabilistic Clustering and Dimensionality Reduction', *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 53, (2019), pp. 1384-1401.
- 3) ASAKAWA, J. et al. 'Fundamental Ground Experiment of a Water Resistojet Propulsion System: AQUARIUS Installed on a 6U CubeSat: EQUULEUS'. *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, AEROSPACE TECHNOLOGY JAPAN* 16(2018), pp. 427-431.
- 4) Nishii, K. 'Vaporizing Mechanisms and Micro-nozzle flows of the Water Resistojet Thruster for CubeSats'. 2018 Master Thesis.