

## 研究終了報告書

### 「データ駆動型スパースセンシングによる航空宇宙開発の飛躍」

研究期間：2020年10月～2023年3月

研究者：齋藤 勇士

#### 1. 研究のねらい

本研究は、データ駆動型スパースセンシングによって、航空宇宙機の複雑場の高速・高精度な再構成と不具合事象の事前検知を目指す。航空宇宙機を本研究の対象として、センサ数・配置箇所・コスト等をセンサ制約条件、計算精度・計算量を評価関数とした、データ駆動型スパースセンシング手法の開発を進める。本研究によって開発が進められる最適化手法を航空宇宙分野へ展開し、飛躍的な信頼性の向上を実現する。本研究は、戦略目標「急速に高度化・複雑化が進む人工知能基盤技術を用いて多種膨大な情報の利活用を可能とする統合化技術の創出」を航空宇宙分野で達成する。例えば、ロケット周りに発生するバフェット現象を調査するための風洞試験では、1回で取得される圧力データは14TBに及ぶ。本研究では、燃焼場・流体場を表現する多種・膨大な情報に基づいて事前に低次元モデルを構築し、少数センサだけで複雑場の高速・高精度な再構成および不具合事象の事前検知を実現する。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

本研究はデータ駆動型スパースセンシングによって、航空宇宙機の複雑場の高速・高精度な再構成と不具合事象の事前検知を目指すことを目的として、3つの研究テーマに分けて研究を進めた：A「複雑現象を有する超高速高次元データの収集」、B「データ駆動型スパースセンシングの開発」、C「データ駆動型スパースセンシングの航空宇宙分野への適用」。

研究テーマ A では、複雑現象を有する航空宇宙機の超高速高次元データの収集をすることを目的として、遷音速風洞試験および航空宇宙を専門とする国内研究機関との共同研究によって、複雑現象を有する超高速高次元データの収集することができた：①ロケット周り流れ場データ、②ロケット燃焼場データ、③宇宙機用配管圧力場データ。これらに加えて、開発する手法の妥当性検証のために、④地球海面温度データ、⑤基準翼型周りの流れ場データ。

研究テーマ B では、航空宇宙機の複雑場の高速・高精度な再構成と不具合事象の事前検知を目指すために、データ駆動型スパースセンシング手法の開発をした。研究テーマ A で取得したロケット燃焼データにデータ駆動型スパースセンシング手法を適用し、ロケット燃焼データにもスパースセンシングが適用可能であることを示した。また、センサ設置位置への重み付(コスト有無)を考慮したセンサ位置最適化を、Nondominated-solution-based Multiobjective-Greedy をもとに開発し、地球海面温度場、翼面周り流れ場、ロケット燃焼場に適用し、再構成データと合計コストのパレート解を示すことに成功した。

研究テーマ C では、データ駆動型スパースセンシング手法を航空宇宙の複雑場高速・高精度な再構成に適用し、不具合事象の事前検知を実現し、航空宇宙機の信頼性向上を目指すことを目的とした。データ駆動型スパースセンシング手法を応用して、地球海面温度を対象として異常検知できることを示すことができた。また、宇宙機用配管圧力場データを対象として、データ駆動型スパースセンシング手法を適用し、配管圧力の異常を検知できることを確認した。

### (2) 詳細

#### **研究テーマ A「複雑現象を有する超高速高次元データの収集」**

**【目的】**: 研究テーマ B・C に向けての、複雑現象を有する超高速高次元データの収集をすることを目的とした。

**【成果】**: 本研究期間において、以下 3 つのデータを取得した:

①ロケット周り流れ場データ、②ロケット燃焼場データ、③宇宙機用配管圧力場データ  
上記に加えて、開発する手法の妥当性検証のために

④地球海面温度データ、⑤基準翼型周りの流れ場データ  
を対象データとした。

**【達成状況】**: 遷音速風洞試験および航空宇宙を専門とする国内研究機関との共同研究によって、複雑現象を有する超高速高次元データの収集することができた。しかし、遷音速風洞試験では風洞由来のノイズによって、センサ位置最適化および異常検知実施に向けての達成はできなかった。そのため、③宇宙機用配管圧力場データを新たに取得して、航空宇宙機データへの適用を実施した。

**研究テーマ B「データ駆動型スパースセンシングの開発」**

**【目的】** 航空宇宙機の複雑場の高速・高精度な再構成と不具合事象の事前検知を目指すための、データ駆動型スパースセンシング手法の開発を行うことを目的とした。

**【成果】** 実験計画法における、D-最適計画法に基づいた貪欲法、および、今まで考えてきた手法を多成分拡張した貪欲法を Matlab によって開発した。開発したアルゴリズムをランダムデータセットおよび、NOAA が提供する海面温度（/氷濃度分布データ）および翼周りの流速分布データへの適用し、計算時間および再構成誤差を比較することで性能を評価した。

研究テーマ A で取得したロケット燃焼データにデータ駆動型スパースセンシング手法を適用し、ロケット燃焼データにもスパースセンシングが適用可能であることを示した。また、センサ設置位置への重み付（コスト有無）を考慮したセンサ位置最適化を、Nondominated-solution-based Multiobjective-Greedy をもとに開発し、地球海面温度場、翼面周り流れ場、ロケット燃焼場に適用し、再構成データと合計コストのパレート解を示すことに成功した。

**【達成状況】** 航空宇宙機の複雑場の高速・高精度な再構成と不具合事象の事前検知を目指すためのデータ駆動型スパースセンシング手法を開発した。しかし、低次元モデルの改良検討への進捗が滞ってしまった。従来用いていた POD（固有直行分解）に加えて、NMF（非負値行列因子分解）での比較を行い、今後の指針を取得することができた。

**研究テーマ C「データ駆動型スパースセンシングの航空宇宙分野への適用」**

**【目的】** データ駆動型スパースセンシング手法を航空宇宙の複雑場高速・高精度な再構成に適用し、不具合事象の事前検知を実現し、航空宇宙機の信頼性向上を目指すことを目的とした。

**【成果】** 航空宇宙機データへの適用の前に、地球海面温度をもとに、エルニーニョ現象を異常と定義して、異常検知を目指す手法を開発し、わずか 4 点温度センサでエルニーニョ現象を検知できることを示した。エルニーニョ現象に着目すると、特定モードにエルニーニョ現象と類似した挙動があることが分かった。そこで、開発してきたデータ駆動型スパースセンシング手法を特定モードに正しく検知できる手法へ適用した。センサ数4で、振幅-0.05 を検知できることが分かり、センサ数4で異常を検知できることを示した。また、開発した異常検知手法を宇宙機データに適用し 5 つのセンサのみで、バルブの応答速度に匹敵する速度で、誤検知なく異常検知することを示すことができた。

**【達成状況】** データ駆動型スパースセンシング手法を応用して、地球海面温度を対象として異常検知できることを示すことができた。また、宇宙機データの異常検知に本手法を適用した。宇宙機の姿勢異常に繋がるバルブ検知では、バルブの応答速度に匹敵する速度で実施できることを示すことができた。宇宙機異常の事前検知を達成することができ、航空宇宙機の信頼性向上に資する手法であることを示すことができた。

### 3. 今後の展開

本研究成果によって、航空宇宙機データに向けたデータ駆動型スパースセンシング手法および異常検知手法が確立された。これを自身研究目標である、革新的ハイブリッドスラスタの実現に組み込みたいと考える。2021年度より、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)官民による若手研究者発掘支援事業に採択され、共同研究先と共に小型宇宙機用のスラスタ開発を進めている。本研究で開発した手法は、上記事業にも宇宙機健全性確認のために貢献する。

### 4. 自己評価

**【達成状況】**航空宇宙機の複雑な燃焼場・流体場の超高速高次元データを収集しデータ駆動型スパースセンシングを適用し、複雑場の高速・高精度な再構成と不具合事象の事前検知を実現し、航空宇宙機の信頼性向上を目標として研究を遂行してきた。また、2022年度後半には異常検知手法に着手し、異常モードに着目したデータ駆動型スパースセンシング手法を開発し、エルニーニョ現象および宇宙機バルブ異常に適用した。特に、宇宙機の姿勢異常に繋がるバルブ検知では30ms以内に実施できることを示すことができ、宇宙機異常の事前検知を達成することができた。

**【研究の進め方】**新型コロナウイルス感染症による遷音速風洞試験実施の延期に加えて、2021年度には同じ大学内での異動があり研究内容の一部変更があったが、当初より、航空宇宙機を対象とすることに変更はなく実施できた。今まで培ってきた共同研究との交流ネットワークを生かし、研究目標遂行に向けて研究を進めることができた。特に風洞試験では異常検知に適用困難であることを判断して、共同研究先に研究紹介を実施して、共同研究および宇宙機データへの適用を素早く実施することができた。

**【研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果】**新型コロナウイルス感染症により学会発表などを頻繁に行うことができなかったが、論文発表という形で成果を報告することができた。また、我が国の航空宇宙開発を進める、JAXAとの共同研究を複数実施して、航空宇宙分野への貢献することができた。また、自らが進める他事業への展開は大きく期待でき、本研究成果の一部が商品化される可能性もあり、研究成果の科学技術および社会への波及効果は高いと考える。

**【研究者自身の評価】**手法開発では一定の成果を残すことができ、かつ、共同研究からのデータ提供を進めることで、宇宙開発への貢献をすることができた。論文成果のみならず、当初目標であったデータ駆動型スパースセンシング手法を異常検知まで適用し、共同研究先からの高い評価を受けることができ、本研究の当初目標よりも大幅に進捗を出すことができたと考える。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 8件

1. Yuji Saito et al. . Determinant-Based Fast Greedy Sensor Selection Algorithm. 2021, 9, 68535 – 68551

本研究は、スパースセンサ位置最適化アルゴリズムを実験計画法における、D-最適計画法に基づいた貪欲法を Matlab でコーディングした。開発したアルゴリズムをランダムデータセット、および、アメリカ海洋大気庁(NOAA)が提供する海面温度分布および翼周りの流速分布データへの適用し、計算時間および再構成誤差を比較することで性能を評価した。先行研究よりも、計算時間および再構成誤差を大幅に改善できることを示した。

2. Yuji Saito et al. . Data-Driven Determinant-Based Greedy Under/Oversampling Vector Sensor Placement. 2021, 129, 1 – 30

本研究は、従来のセンサ最適化位置最適化手法を多成分拡張した場合の貪欲法を Matlab でコーディングした。開発したアルゴリズムをランダムデータセット、および、アメリカ海洋大気庁(NOAA)が提供する海面温度分布/氷濃度データおよび翼周りの流速分布(主流方向、主流方向と垂直方向)データへの適用し、計算時間および再構成誤差を比較することで性能を評価した。一つのセンサから複数成分を取得する際に有効な手法を提案することができた。

### (2) 特許出願

該当なし

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

・プレスリリース(令和4年8月30日): 高速な空気の流れをリアルタイム計測従来比20倍速を実現