

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14954

研究課題名（和文）物理的因果関係にもとづいた計測センサの最適配置に関する研究

研究課題名（英文）Optimum placement of measurement sensors based on physical causal relationship

研究代表者

尾亦 範泰（Omata, Noriyasu）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員

研究者番号：80849258

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、産業機器をはじめとする複雑システムにおいて、センサ間の因果関係をデータ駆動型の分析によって導出し、センサの配置を最適化する手法の開発である。まず、各センサの時系列データから特徴的なパターンに着目して因果関係を定量化する手法「クラスタリング移動エントロピ」を提案し、ロケットの打ち上げを模した音響の伝搬を正しく捉えられることを示した。さらに、特定の故障モードを検知するためのセンサ配置を貪欲法によって最適化するフレームワークを、液体ロケットエンジンにおける重大な故障モードの一つである推進剤の漏洩を例に検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、データ駆動型の因果関係推定法の提案と、貪欲法によるセンサ配置の最適化フレームワークの検証を行った。それぞれ、ロケット打ち上げ時の音響とロケットエンジンのシミュレーションデータを用いて検証を実施した結果を、査読付き英語学術論文誌において公表した。これらの手法は、ロケットエンジンのみならず、さまざまな機器のセンサデータに対して広く利用可能であり、今後多くの産業分野において価値を生み出すことが可能な手法である。さらに、時系列データから因果関係を自動で推定する提案手法は理工学研究に応用可能であり、センサ配置の最適化にとどまらない利用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to develop a method to optimize the placement of sensors in complex systems such as industrial equipment by deriving causal relationships among sensors through data-driven analysis. First, I proposed clustering transfer entropy, a method for quantifying causal relationships by focusing on characteristic patterns in time-series data from each sensor, and showed that the method can correctly capture the propagation of acoustic emissions that simulate a rocket launch. Furthermore, a framework for sensor placement optimization for detecting specific failure modes using the greedy approach is validated using a simulated example of propellant leakage, which is one of the critical failure modes in liquid rocket engines.

研究分野：データ工学

キーワード：因果推論 移動エントロピ クラスタリング 時系列データ 異常検知 センサ最適化 シミュレーション ロケットエンジン

1. 研究開始当初の背景

産業機器の安全な運用のためには計測センサによる状態監視が欠かせないが、設置できるセンサの量はさまざまな要因で制限される。特に宇宙機器においては、設置コストのみならず通信コストが大きな負担となるため、この傾向が顕著である。さらに、自動化の観点からも、機械学習分野では「次元の呪い」と呼ばれる、不必要な情報が増加すると検知性能が劣化する現象が存在する。そのため、必要なセンサのみを厳選し最適化することが肝要である。

現状、計測センサの配置は専門家の経験によって構造・システムのつながりをもとに決定されている。物理的に自明な関係性も存在する一方で、発生する事象がどう影響しあって波及していくのか詳細は不明な部分も多く、正確には把握できていない。そして、真に必要な情報が何であるかが不明確となるため、センサ配置が冗長となっていることが指摘される。したがって、センサ値がどのような関連をもって変化するかという因果関係を把握することが配置の最適化にはまず必要である。

一般的に、このような因果関係は機器における物理的なつながりをもとに演繹的に考察されてきた。しかしながら、物理的因果関係が不明瞭である部分は多々存在していることから、演繹的に導出可能な因果関係は一部分でしかないことが指摘できる。一方で、近年、大量のデータから帰納的な分析を行う手法が機械学習やデータマイニングとして発達しており、データから因果関係を探る手法についても研究がなされている。これらの手法を用いることで、物理的な繋がりが複雑なため未知であった因果関係も、データ中に出現するパターンをもって炙り出すことが可能である。そして、このような未知の物理的因果関係を明らかにできれば、それをもとに計測センサの配置を改善することが可能である。

そこで、本研究では、複雑な構造を有する産業機器において、その最適な計測センサの配置とはどのようなものであるかを調査する。データ駆動型の因果推論によって帰納的に導出される、物理的因果関係のネットワークを用いて最適化する新たなアプローチを提示することを目指す。

2. 研究の目的

本研究の目的は、機器のセンサ間に存在する未知なる関係性を従来の演繹的なアプローチとは異なる方法を用いることで解明し、得られた関係性をもとに最適なセンサの配置を決定することである。最適なセンサ配置を解明するため、機器における計測センサの因果関係をデータ駆動的に解明し、未知の物理的因果関係を明らかにする手法を開発する。そして、計測センサ間の関係性を考慮してセンサの必要性を議論することで、最適な計測センサの配置について明らかにする。

このようなセンサ最適化フレームワークは適用の対象に強くは依存しないと考えられる。そのため、工業プラントをはじめとして、非線形性の強い物理現象や複雑な構造をもつ産業機器における、物理的因果関係の探索や計測方法の最適化に対しても適用が可能であり、広く他の産業分野への応用がおこなえる研究である。

3. 研究の方法

所属する研究機関において入手可能なデータである、ロケット周りの音響や、モデル燃焼器における燃焼場、ロケットエンジンの動作などに関するシミュレーションデータを基に研究を実施した。因果関係を推定する研究に関しては、物理的な解釈が可能な、音響場や燃焼場といったものを対象に解析を実施し、抽出された結果に対して専門家との議論を実施し、当該分野における知見と合致するかどうかを確認した。また、センサ最適化に関する要素研究は、複雑な産業機器にたいして広く応用可能となるよう、複雑なシステムのひとつであるロケットエンジンのデータを用いて実施した。

4. 研究成果

【研究成果概要】

本研究では、主な成果として2つの要素技術を獲得した。まず、(1)【因果関係の帰納的な推定】の成果として、各センサの時系列データから特徴的なパターンに着目して因果関係を定量化する手法である、クラスタリング移動エントロピを提案し、ロケットの打ち上げを模した音響の伝搬を正しく捉えられることを示した。さらに、(2)【センサ最適化】の成果として、特定の故障モードを検知するためのセンサ配置を貪欲法によって最適化するフレームワークを、液体ロ

ケットエンジンにおける重大な故障モードの一つである推進剤の漏洩を例に検証した。これらの成果については、以下で詳述する。

なお、2. で述べた当初計画では、これらの因果関係の分析手法とセンサ配置最適化の方法を組み合わせることで、因果関係を考慮したセンサ配置の最適化を実施する計画であった。しかしながら、当初より使用を計画していたロケットエンジンのデータに対して、この方法では適切な手法を構築することが難しいことが判明し、これらの要素技術を統合した技術の開発・実証には至らなかった。

(1) 【因果関係の帰納的な推定に関する研究成果】

システムに配置された各センサから得られる時系列データを用いて、システムを構成する要素間の因果関係を分析する方法について研究開発を実施した。時系列データにおいて特徴的なパターンがしばしば表れることに着目して因果関係の指標を定量化する手法である、クラスタリング移動エントロピを提案した。この手法は、教師なし学習の手法であるクラスタリングによって時系列に存在するパターンを抽出し、経時的なパターンの出現頻度を表す確率分布をもとに、移動エントロピと呼ばれる因果関係の指標を情報理論的に算出する。

開発したクラスタリング移動エントロピによって、人工的力学系や音響の伝搬、燃焼器内の現象について正しく因果関係が推定できることを示した。特にロケットの打ち上げを模擬した噴流周辺に生じる複雑な音響場において、従来手法では捉えられなかった関係性を捉えることに成功した。さらに、モデル燃焼器内における燃料・酸化剤の伝搬に関して、物理的に妥当な因果関係と合わせて、未知の因果関係を複数検出した。これらの結果を、国内外の学会において発表した[1]ほか、査読付き英語学術論文誌 AIAA Journal 誌上において発表した[2]。本研究成果の概要を図 1 に示す。

データ駆動型因果解析手法の開発と、燃焼器内における物理量の因果関係の分析

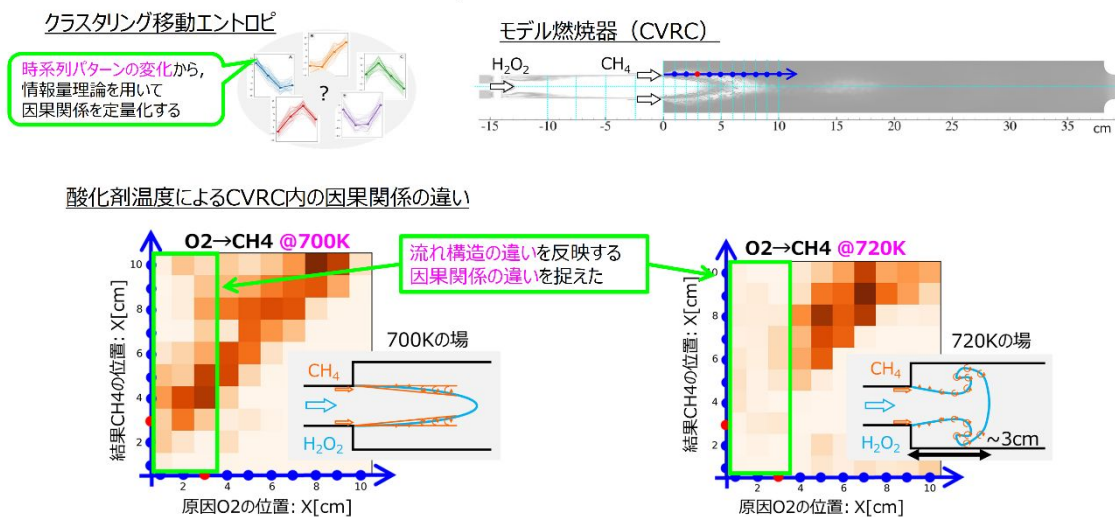


図 1 因果関係の帰納的な推定に関する研究成果概要

(代表的な発表文献)

[1] Omata, N., Tsutsumi, S., Shimizu, T., Koizumi, H. “ Causal analysis of flow physics using transfer entropy, ” AIAA Aviation 2020 Forum, AIAA 2020-2945, 2020.

<https://doi.org/10.2514/6.2020-2945>

[2] Omata, N., Tsutsumi, S. “ Causal analysis of flowfields using clustering entropy, ” AIAA Journal, Vol.58, No.12, pp.5472-5477, 2020,

<https://doi.org/10.2514/1.J059604>

(2) 【センサ最適化に関する研究成果】

センサ最適化のストラテジーとしては、システムの運用においてクリティカルである故障モードを検知することを念頭に、必要な計測センサを絞り込むことを考えた。故障の検知方法としては、教師あり学習である線形判別分析を利用して、その性能が向上するセンサの組み合わせを探索した。このようなセンサ最適化は組み合わせ最適化の問題であり、総当たり法では組み合わせ爆発が起こるので、貪欲法によって使用するセンサを減らしていくことで対処した。開発した手法は、液体ロケットエンジンにおける重大な故障モードの一つである推進剤の漏洩を例として検証した。検証に必要なデータをモンテカルロシミュレーションによって取得したが、この際に正常状態と故障モードにおけるバラつきを実際に即して模擬するための手法を副次的に開発した。センサ最適化の検証はロケットエンジンを例に行われたが、開発されたセンサ最適化の枠

組みは一般的なシステムにおいて適用可能であり、普遍的なものである。この結果は、健全性予測・ヘルスマネジメントに関する国際学会などで発表した[3]ほか、査読付き英語学術論文誌 Acta Astronautica に掲載された[4]。当該論文は科研費による支援によってオープンアクセス論文として全世界に広く公開することができた。本研究成果の概要を図2に示す。

ロケットエンジンにおける燃料漏洩診断のためのセンサ最適化

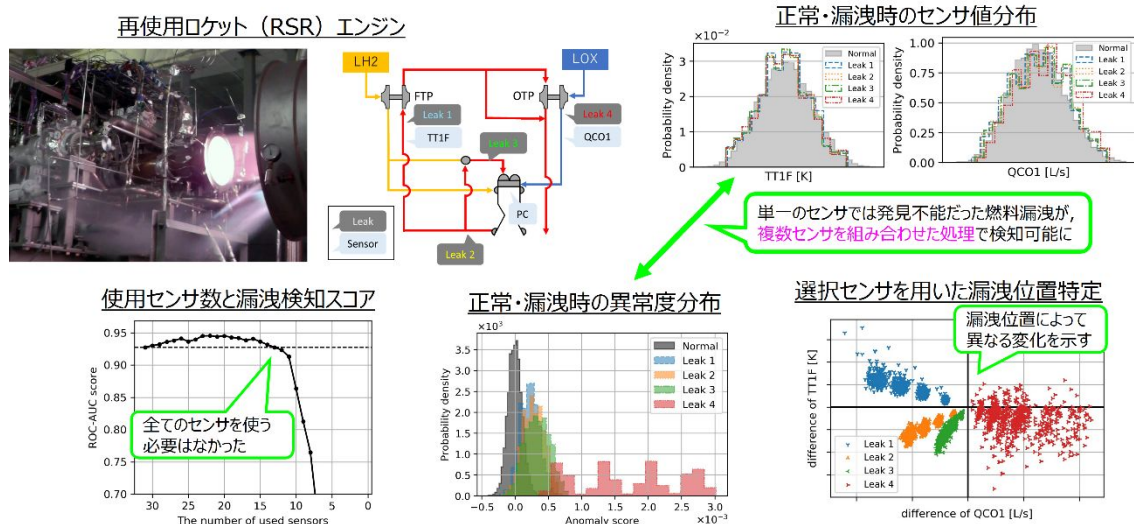


図2 センサ最適化に関する研究成果概要

(代表的な発表文献)

[3] Omata, N., Satoh, D., Tsutsumi, S., Kawatsu K. Abe, M. "Efficient sensor placement for health management of a rocket engine using Monte Carlo simulation," Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2020, 1135, 2020, <https://doi.org/10.36001/phmconf.2020.v12i1.1135>

[4] Omata, N., Satoh, D., Tsutsumi, S., Kawatsu, K., Abe, M. "Model-based supervised sensor placement optimization to detect propellant leak in a liquid rocket engine," Acta Astronautica, Vol.195, pp.234-242, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.02.009>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Omata Noriyasu, Satoh Daiwa, Tsutsumi Seiji, Kawatsu Kaname, Abe Masaharu	4. 巻 195
2. 論文標題 Model-based supervised sensor placement optimization to detect propellant leak in a liquid rocket engine	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Astronautica	6. 最初と最後の頁 234 ~ 242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.actaastro.2022.02.009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Omata Noriyasu, Tsutsumi Seiji	4. 巻 58
2. 論文標題 Causal Analysis of Flowfields Using Clustering Entropy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 5472 ~ 5477
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2514/1.J059604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 尾亦範泰, 佐藤大和, 平林美樹, 堤誠司, 河津要, 安部賢治
2. 発表標題 モンテカルロシミュレーションを用いたロケットエンジンの故障検知・診断
3. 学会等名 2020年度 人工知能学会全国大会（第34回）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Omata Noriyasu, Tsutsumi Seiji, Shimizu Taro, Koizumi Hiroshi
2. 発表標題 Causal Analysis of Flow Physics Using Transfer Entropy
3. 学会等名 AIAA Aviation Forum 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Omata Noriyasu, Satoh Daiwa, Tsutsumi Seiji, Kawatsu Kaname, Abe Masaharu
2. 発表標題 Efficient Sensor Placement for Health Management of a Rocket Engine Using Monte Carlo Simulation
3. 学会等名 Annual Conference of the PHM Society 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾亦範泰, 堤誠司, 清水太郎, 小泉拓
2. 発表標題 燃焼場における因果関係のクラスタリング移動エントロピによる解析
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------