

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289320

研究課題名(和文) 宇宙機運用者と学習型異常検知システムとの持続的知識相互作用に関する研究

研究課題名(英文) Study on Sustainable Knowledge Interaction between Spacecraft Operators and Data-driven Anomaly Detection System

研究代表者

矢入 健久 (YAIRI, TAKEHISA)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：90313189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人工衛星などの宇宙機システムの運用者と、学習型(データ駆動型)状態監視・異常検知器との間の持続的な知識相互作用という新たな方法論の確立を目的とするものである。大局的で離散的なモード遷移と局所的で連続的な状態遷移から構成される人工衛星システムの挙動特性を考慮した次元削減とクラスタリングに基づく学習型状態監視法を提案し、運用者への有用情報の提示、運用者からの専門知識の獲得、両者の継続的な相互作用の励起に有効であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish a new methodology of sustainable knowledge interaction between operators of space systems such as artificial satellites and machine learning-based or data-driven health status monitoring systems. We developed a data-driven health monitoring method based on dimensionality reduction and clustering, which takes into account that artificial satellite systems consist of global discrete mode transition and local continuous state transition. We showed this method is able to provide operators with useful information, to acquire expert knowledge from the operators and to encourage continuing mutual interaction of them.

研究分野：人工知能

キーワード：宇宙工学 機械学習 異常検知 健全性監視 運用支援

1. 研究開始当初の背景

人工衛星に代表される宇宙機システムの運用では、遠隔からシステムの健全性を常時監視し、異常を迅速に検知する技術が極めて重要である。現在の運用では、宇宙機内部に張り巡らされたセンサ網によって収集されたデータを地上局で事前に作られた異常検知ルール集合によってチェックするのが一般的であるが、これは、運用者による監視業務を計算機に「代替」させるといえる。しかし、宇宙機システムの高度化および多様化により、膨大なデータをチェックするルール集合を手作業で作成するのは困難になりつつある。

申請者はこの問題に対する機械学習技術の有効性にいち早く着目し、過去4回の科研費助成を受けて、宇宙機の過去の膨大なセンサーデータからシステムの正常な挙動モデルを統計的に学習して健全性監視に用いる「学習型異常検知」を提唱し研究してきた。これは、浅く広く監視することを目的としている点で、運用者と「相補」的な関係と言える。

具体的には、様々な機械学習手法を応用した異常検知アルゴリズムを開発し、多くの人工衛星のアーカイブデータを用いた実験によって有効性の実証を積み重ねてきた。

一方で、この研究経験において現状の学習型異常検知が抱える限界とそれを打破するための知見を得たことが、本研究提案に至った理由である。申請者が得た知見とは、具体的に以下の3点である。

(知見1) 運用者にとって有用な知識提供を目的とした評価基準の必要性

従来の異常検知手法は、異常検出率・誤検出率によって評価されていたが、実際の宇宙機運用では異常検知自体が最終目的ではなく、原因特定と問題解決に貢献することがより重要である。また、申請者は学習型異常検知器が「副産物」として出力する、データクラスタ構造、低次元空間での状態軌跡などから運用者が衛星の健康状態について洞察を得る場面を多く目撃してきた。すなわち、「システムの健康状態を理解するために役立つ知識を運用者にどれだけ提供できるか」という新たな評価基準が必要である。

(知見2) 分野固有の専門家知識およびフィードバック利用の重要性

機械学習理論では手法の汎用性を重視し、分野固有の知識利用を軽視する傾向があるが、学習型異常検知法によって有意義な結果を得るには、運用者との議論から得た様々なノウハウに基づいた変数選択、欠損値補間、外れ値除去等のデータの前処理が必須であった。また、異常検知器の出力(前述の「副産物」情報を含む)に対する運用者の評価は、検知アルゴリズムをチューニングする上で重要な情報である。すなわち、学習型異常検知

器がデータからだけではなく、運用者からも「学習する」仕組みが必要である。

(知見3) 運用者と学習型異常検知器との持続的相互作用の設計論の必要性

従来の学習型異常検知は、伝統的な機械学習にならい、訓練データでモデルを学習し、テストデータでの異常の有無を判定するという1回限りの短期的プロセスになっている。しかし、実際の宇宙機運用は通常数年間に及ぶ長期的活動であり、上述の2つの知見と合わせて、運用者と学習型異常検知器との相互作用サイクルを持続させ、(知見1)で述べた評価関数を大局的に最大化するための設計論が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、宇宙機システムの運用者と、学習型状態監視・異常検知器との間の持続的な知識相互作用という新たな方法論を提唱し、最適な設計法を確立することである。具体的には、前述の知見に対応する3項目の研究目標を掲げる。

[研究目標1] 運用者への有用情報提供を主目的とした学習型異常検知法の確立

学習型異常検知法の評価基準として、「運用者がシステムの健康状態を理解し異常の原因解明や問題解決を行うのにどれだけ寄与したか」という新たな指標を提唱する。また、この基準に基づき、異常検知器が出力すべき情報の種類や形式を考察し、最適な学習型異常検知器の構築法を明らかにする。

[研究目標2] 運用者から学習型状態監視器への知識転移促進方法の開発

運用者が持つ知識も学習型異常検知器にとっての情報源と捉え、運用手順書など明文化された事前知識源から有用な情報を抽出する方法、および、異常検知器の出力結果に対する運用者の反応から暗黙の専門知識を抽出して還元し、性能を改善する方法を明らかにする。

[研究目標3] 運用者と学習型異常検知器との持続的相互作用の励起法の開発

研究目標1と2の達成によって、両者の「知識相互作用」が実現される。この相互作用のサイクルを持続し活性化するための動機付け法を解明するとともに、学習型異常検知器の運用全期間での評価関数の総和を最大化する方法を明らかにする。

3. 研究の方法

前述の研究目的に基づき、実際に人工衛星を開発・運用する機関や大学研究室等と協力しながら、以下の手法の開発と評価に取り組んだ。

(1) 運用者への有用情報提供を目的とした学習型異常検知法

従来の異常検知手法のように、「異常らしさ」の度合いを表す異常度を出力するだけでなく、検知された現象がなぜ異常と推定されるのか、システムのどの部分が異常に関わっているのか、その異常がどれくらい深刻なものと考えられるのか、など、運用者による状況理解や意思決定に有用な情報を提供する方法を検討し、実装、評価した。

(2) 運用者から学習型状態監視器への知識転移促進方法

従来のデータ駆動（学習型）異常検知は、システムが正常なときのデータのみが与えられ、そのデータに対して次元削減、クラスタリング、確率密度分布推定などの教師なし学習を適用することによってシステムの正常モデルを獲得するというものであった。それに対して、申請者らは、人工衛星運用者が人工衛星の稼働状態を単に正常か異常かという2分類するだけでなく、正常状態をより細かく様々な稼働モードに分けて管理していることに着目し、そのような既知の複数種類の正常モードに関する事前知識をラベル情報として利用し、教師あり学習あるいは半教師あり学習を用いる方法を検討し、評価した。

(3) 運用者と学習型異常検知器との持続的相互作用の励起法

従来の学習型異常検知は、最初に正常訓練データを用意し、これに機械学習手法(前述のように、多くの場合は教師なし学習手法)を適用して正常モデルを獲得し、新しい未知データにこれを適用することで検知を行う1回完結型のプロセスであった。しかし、訓練データがシステムのあらゆる正常状態をカバーしているとは限らないため誤検知が頻発する問題がある。本研究では、そのような誤検知を運用者が評価し、学習型異常検知器にフィードバックして再学習を行うことによって、持続的な学習サイクルを実現することを目指した。この提案手法は、学習型異常検知器との継続的な相互作用から運用者自身も宇宙機システムに関する健康状態理解を深めていくという効果も持つことが期待される。

4. 研究成果

本研究の主な成果の一つは、運用者への有用情報の提供と運用者からの知識提供を考慮した学習型健全性監視手法として、次元削減とクラスタリングに基づく異種多次元データのモデル化手法を提案し、その有効性を実際の人工衛星運用データを用いて検証したことである。

本研究では、人工衛星のような複雑な人工システムの挙動が、複数の異なる稼働モード間の遷移(大局的な状態遷移)と各稼働モード内での連続的な状態遷移(局所的な状態遷移)によって記述されることに着目し、連続値・離散値が混合した高次元の運用データ

(テレメトリ)の分布を、離散的な潜在変数と連続的な低次元潜在ベクトルを用いてモデル化し、そのモデル化パラメータを与えられた正常訓練データから学習する手法を提案した。

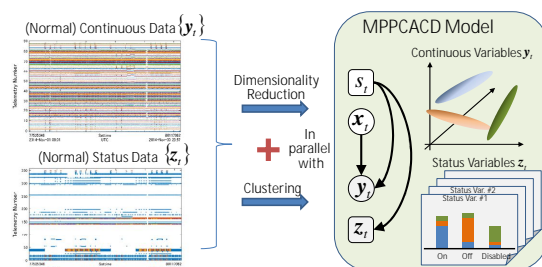


図 1 提案モデルの概要

本研究の第1の目的である「運用者への有用情報提供」という観点からは、提案手法は、単に衛星システムの「異常度」だけでなく、離散的潜在変数の遷移を表示することにより、衛星システムの大局的な稼働モードの遷移を可視化することが可能である。これは運用者によるシステム状態の大局的な把握を支援することが示された。また、連続的潜在ベクトルの遷移を可視化することによりシステムの局所的な状態変化を監視したり、マイナス対数尤度による異常度、あるいは再構成誤差への各変数の寄与率を示すことにより、異常原因の解析に有用な情報を提供することが確かめられた。

本研究の第2の目的である「運用者からの知識転移」という観点からは、運用者が事前に把握している衛星システムの大局的な稼働モードに関する知識、例えば、「この期間は〇〇実験を行っている」というような情報を、提案モデルの離散的潜在変数に関するラベル情報として扱うことにより、半教師あり学習の方法論を用いて効率的にモデル学習を行うことが可能であることを示した。また、モデル学習に用いた正常訓練データの中に含まれていなかったために異常の誤検知が生じた場合に、運用者による判断をフィードバックさせて新たな訓練データを構成し直すことによってそれ以降の誤検知を抑制する仕組みを示した。

本研究の第3の目的である「運用者と学習型異常検知器との持続的相互作用の励起」という観点からは、上で述べた「運用者への有用情報提供」と「運用者からの知識転移」とを継続させることによって、学習型異常検知器の性能向上に加えて、運用者の衛星システムについての理解や「気づき」の促進、および、学習型異常検知器へのフィードバックを行うモチベーション向上がもたらされることが観察された。これは、機械学習と専門家との協調・共存の可能性を示すものであり、大きな意義を持つ。

5 . 主な発表論文等

【雑結論文】(全て査読有り)(計 5 件)

1. Samir Khan and Takehisa Yairi, "A review on the application of deep learning in system health management", Mechanical Systems and Signal Processing , Vol. 107, pp.241-265, 2018
2. Ryo Sakagami, Naoya Takeishi, Takehisa Yairi and Koichi Hori, "Visualization Methods for Spacecraft Telemetry Data Using Change-point Detection and Clustering", Aerospace Technology Japan, 2018 (To appear)
3. Takehisa Yairi, Naoya Takeishi, Tetsuo Oda, Yuta Nakajima, Naoki Nishimura, Noboru Takata, "A Data-driven Health Monitoring Method for Satellite Housekeeping Data based on Probabilistic Clustering and Dimensionality Reduction", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.53 (3), pp.1-18, June 2017.
4. Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, and Takehisa Yairi, "Subspace dynamic mode decomposition for stochastic Koopman analysis", Physical Review E, vol. 96, pp. 033310, 18 September 2017
5. 桑原 絢一、酒匂 信匡、矢入 健久、「次元削減を用いた超小型衛星の画像劣化発生条件推定」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 63 (2015) No. 4 p. 119-128

【学会発表】(計 22 件)

1. Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Takehisa Yairi, "Learning Koopman Invariant Subspaces for Dynamic Mode Decomposition", Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017)
2. Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Takehisa Yairi, "Sparse Nonnegative Dynamic Mode Decomposition", 2017 IEEE International Conference on Image Processing, Beijing, Sept. 2017.
3. Naoya Takeishi, Yoshinobu Kawahara, Yasuo Tabei, Takehisa Yairi, "Bayesian Dynamic Mode Decomposition", the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2017), Melbourne, August 2017.
4. Samir KHAN and Takehisa YAIRI , "Perspectives on Using Deep Learning for System Health Management", Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management Society 2017 (PHMAP-2017), Jeju, Korea, July 2017
5. Samir KHAN and Takehisa YAIRI,

- "Towards a Cloud-based Machine Learning for Health Monitoring and Fault Diagnosis", Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management Society 2017 (PHMAP-2017), Jeju, Korea, July 2017
6. 秋元 康佑, 武石 直也, 堀 浩一, 矢入 健久, "Markov logic network を事前分布に持つ潜在変数モデルの検討", 第 31 回人工知能学会全国大会 (JSAI), 名古屋,
7. 武石 直也, 河原 吉伸, 矢入 健久, "ベイジック動的モード分解", 第 31 回人工知能学会全国大会 (JSAI), 名古屋, 2017 年 5 月
8. Naoya Takeishi, Takehisa Yairi, "Dynamic Grouped Mixture Models for Intermittent Multivariate Sensor Data", The 20th Pacific Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD) 2016. Apr.19-22, Auckland, New Zealand.
9. Kosuke Akimoto , Naoya Takeishi , Takehisa Yairi, Koichi Hori, Naoki Nishimura, Noboru Takata, "Tree-based Nonparametric Prediction of Normal Sensor Measurement Range Using Temporal Information", S-9b-2, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2016), Beijing, June 20-22 2016
10. 秋元康佑, 武石直也, 矢入 健久, 堀浩一, 西村尚樹, 高田昇, "アンサンブル木学習によるノンパラメトリックなセンサー値正常範囲推定", 3K3-1, 2016 年度人工知能学会全国大会 (第 30 回) 論文集, 2016 年 6 月 6 日(月) - 6 月 9 日(木), 北九州国際会議場
11. 武石 直也, 矢入 健久, 工学システムの間欠的センサデータのための動的混合モデル, 4M1-2, 2016 年度 人工知能学会全国大会 (第 30 回) 論文集, 2016 年 6 月 6 日(月) - 6 月 9 日(木), 北九州国際会議場
12. Sakurada, Mayu; Yairi, Takehisa; Nakajima, Yuta; Nishimura, Naoki; Parikh, Devi, "Semantic classification of spacecraft's status: integrating system intelligence and human knowledge," Semantic Computing (ICSC), 2015 IEEE International Conference on , vol. , no. , pp.81-84, 7-9 Feb. 2015, Anaheim, CA, USA
13. 武石直也, 矢入 健久, "センサデータとテキスト運用記録を活用した宇宙機運用支援", 2015 年度 人工知能学会全国大会 (第 29 回), 2015 年 5 月 29 日-6 月 2 日, 函館
14. 矢入 健久, 武石直也, 秋元康佑, 西村

- 尚樹, 中島佑太, 高田昇, "SDS-4 運用における学習型テレメトリ監視システムの性能向上検討(1) - 手法と実装 -", 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1113, 2015 年 10 月 7-9 日, 鹿児島
15. 西村尚樹, 中島佑太, 高田昇, 矢入健久, 武石直也, 秋元康佑, "SDS-4 運用における学習型テレメトリ監視システムの性能向上検討(2) - 検証と評価 -", 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1114, 2015 年 10 月 7-9 日, 鹿児島
 16. Takehisa Yairi, Tetsuo Oda, Yuta Nakajima, Naoyuki Miura, Noboru Takata, "Evaluation Testing of Learning-based Telemetry Monitoring and Anomaly Detection System in SDS-4 Operation", International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2014), Montreal, Canada, June 17-19 2014
 17. Takeishi, N.; Yairi, T., "Anomaly detection from multivariate time-series with sparse representation," Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2014 IEEE International Conference on , vol. , no. , pp.2651-2656, 5-8 Oct. 2014, San Diego, CA, USA
 18. Mayu Sakurada and Takehisa Yairi, "Anomaly Detection Using Autoencoders with Nonlinear Dimensionality Reduction", The 13th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (PRICAI 2014) Workshop on Machine Learning for Sensory Data Analysis (MLSDA), 2014.
 19. 櫻田麻由, 矢入健久, 「オートエンコーダを用いた次元削減による宇宙機の異常検知」, 2F3-2, 第 28 回人工知能学会全国大会, 2014 年 5 月 12 日-15 日, 愛媛県・松山市
 20. 矢入 健久, 武石 直也, 櫻田 麻由, 西村 尚樹, 中島 佑太, 関川 知里, 井上 浩一, 高田 昇, 「SDS-4 運用における学習型テレメトリ監視システムの構築 (1) - アルゴリズムと実装 -」, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014 年 11 月 12-14 日, 長崎
 21. 西村 尚樹, 中島 佑太, 関川 知里, 井上 浩一, 高田 昇, 矢入 健久, 武石 直也, 櫻田 麻由, 「SDS-4 運用における学習型テレメトリ監視システムの構築 (2) - 運用システムによる検証と評価 -」, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014 年 11 月 12-14 日, 長崎
 22. 武石直也, 矢入健久, "連続離散混在データに対する潜在変数モデルを用いた異常検知", 第 17 回情報論的学習理論ワークショップ, 2014 年 11 月 16~19 日, 名古屋

【その他】

1. 矢入健久, "衛星の状態監視システムのつくりかた - 過去のデータに基づく異常検知 -", 情報処理学会誌, Vol.56, No.8, pp.777-780, 2015 年 8 月
2. 矢入健久, "大規模人工システムのためのデータ駆動型異常検知について", 第 16 回 産総研人工知能セミナー「人工知能を活用したインフラ健全性のモニタリング」, 産総研臨海副都心センター, 2017 年 6 月 30 日
3. Takehisa Yairi, "Data-driven Health Monitoring for Artificial Satellites based on Clustering and Dimensionality Reduction", Korea-China-Japan Joint Workshop on Prognostics and Health Management, 24 February, 2017 Jeju National University Ara Convention Hall

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢入 健久 (YAIRI, Takehisa),
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号: 90313189

(2) 研究協力者

カーン サミル (KHAN, Samir)
 武石 直也 (TAKEISHI, Naoya)
 秋元 康佑 (AKIMOTO, Kosuke)
 阪上 遼 (SAKAGAMI, Ryo)
 櫻田 麻由 (SAKURADA, Mayu)
 桑原 絢一 (KUWABARA, Junichi)