

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2014

課題番号：22560779

研究課題名(和文)宇宙機テレメトリ情報学の体系化に関する研究

研究課題名(英文)Study on Systematization of Telemetry Infomatics for Spacecraft Systems

研究代表者

矢入 健久(YAIRI, TAKEHISA)

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授

研究者番号：90313189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、人工衛星などの宇宙機システムより得られる膨大なテレメトリデータから、運用者にとって有用な情報・知識を得るための様々な解析手法・処理技術群を体系化することである。具体的には、(1) データアクセス方法、(2) オンライン監視法、(3) オフライン解析法、(4) 他情報源との連携法の4つのサブテーマに取り組んだ。その結果、(1)人工衛星テレメトリの性質の明確化、(2)宇宙機テレメトリに適した前処理法の開発、(3)次元削減とクラスタリングに基づく監視法の開発と拡張、(4)衛星運用での有効性の実証、という成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to systematize a variety of analyzing and processing methods for acquiring valuable information and knowledge for operators from a vast amount of telemetry data transmitted from artificial satellites. For this purpose, we divided the whole study into four subtopics and conducted them - (1) data accessing methods, (2) online monitoring methods, (3) offline analyzing methods, and (4) methods for integration with other information sources. As a result, we obtained mainly four achievements - (1) clarification of characteristics of satellite telemetry, (2) development of preprocessing methods for telemetry data, (3) development and enhancement of health monitoring method based on dimensionality reduction and clustering, and (4) demonstration of the methods in the actual spacecraft operation.

研究分野：航空宇宙工学・人工知能

キーワード：異常検知 航空宇宙システム データマイニング 人工知能

## 1. 研究開始当初の背景

生産プラントや航空宇宙システム、インテリジェントビルなどに代表される大規模複雑システムの安全かつ効率的な運用・維持技術の確立は、安全で持続性のある社会を実現する上で極めて重要な課題である。現在、これらのシステムでは、隅々まで張り巡らされたセンサー網を通じて収集された多次元時系列データを監視・分析することによって異常の検知や診断を行うのが一般的である。本研究では、このようなデータを総称してテレメトリデータと呼ぶ。計測・通信技術の発展に伴ってテレメトリデータの量・種類は急激に増加しており、運用者が常時目視で監視したり、手作業で検知ルール集合を作成することは非現実的になりつつある。この問題への解決策の一つとして、近年、データマイニングや統計的学習理論などの知的情報処理技術の利用が注目されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、主に人工衛星などの宇宙機システムを対象として、大規模で複雑な人工システムより得られる膨大なテレメトリデータから、運用者にとって有用な情報・知識を得るための様々な解析手法・処理技術群を体系化することによって、「宇宙機テレメトリ情報学」を確立することである。ここで、「宇宙機テレメトリ情報学」とは、欠損値・外れ値検知などの下位レベル処理から、運用者意思決定支援などの上位レベル処理まで、宇宙機テレメトリに関わる様々なレベルの情報処理技術を包括的に扱う新分野を意味する。また、「体系化」とは、単に従来の要素技術を枚挙するのではなく、理論的な精査と実験的な検証を通じて個々の性能や適用範囲、相互関連性を明らかにすることによって、当該技術の基礎研究者と応用開発者の双方に有用な俯瞰的視点を提供することである。具体的に本課題では、宇宙機テレメトリ情報学の体系化のために、以下の4つのサブテーマに取り組む。

[Sub-1] テレメトリデータへのアクセス方法の体系化

テレメトリ源泉データに対して[Sub-2]以降の技術の適用が容易になる形式への変換法、および、巨大なデータベースから解析に必要なデータを容易に検索抽出する手段の体系化を行う。

[Sub-2] テレメトリデータの監視方法の体系化

テレメトリに含まれる変数群の値をオンライン監視することにより、事前に想定された正常挙動や過去の標準的な挙動とは異なる異常パターンを検知する手法・技術を体系化する。

[Sub-3] テレメトリデータからの知識発見方

法の体系化

蓄積されたテレメトリデータをオフラインで解析することによって、システムの正常・異常挙動パターンを運用者が発見したり、異常原因を推定することを支援する手法・技術を体系化する。

[Sub-4] テレメトリデータと他情報源との連携方法の体系化

テレメトリデータと、運用手順書やシステムダイヤグラム等の異種情報源とを連携させることによって、運用者によるシステム状態把握や意思決定を支援する手法・技術を体系化する。

## 3. 研究の方法

本課題では、「宇宙機テレメトリ情報学の体系化」という目標を達成するために、テレメトリ源泉情報を入力とし、運用意思決定を出力とする一連の情報処理過程を、下位から上位まで、(1) データアクセス方法、(2) オンライン監視法、(3) オフライン解析法、(4) 他情報源との連携法、の4層に分割し、各々の体系化を4大サブテーマ(Sub-1Sub-4)として位置付けた上で研究を実施する。ここで、各サブテーマ研究は以下の4段階の共通基本作業によって構成される。

(a) 調査：当該手法群の選定および理論面における調査(原理・位置付け)、応用実績の調査

(b) 実装：当該手法群のプログラム実装およびライブラリ化

(c) 試験：テレメトリデータへの適用による当該手法群の基礎的な検証実験

(d) 評価：試験結果に基づく各手法の性能および適用範囲の評価

また、4つのサブテーマ研究の実施後に、より現実的な利用環境を想定して、統合された「宇宙機テレメトリ情報学」の総合検証(Demo)を行う。

## 4. 研究成果

本研究の主な成果として、以下の4項目が挙げられる。

[成果1]人工衛星テレメトリの性質の明確化  
様々な人工衛星テレメトリに共通する特に考慮すべき重要な性質を整理した。具体的には、(a)多次元性・高相関性、(b)多モード性、(c)異種性、(d)時系列性、(e)構造的データ欠損、(f)非ガウスのノイズ、という特有の性質を明らかにした。

[成果2]宇宙機テレメトリに適した前処理法の開発

[成果1]を受けて、宇宙機テレメトリを様々な機械学習アルゴリズムで扱うことを可能にするための前処理法を検討・開発した。具体的には、(a)突発的外れ値の検出・除去、(b)データ欠損補間、(c)異種変量正規化、で

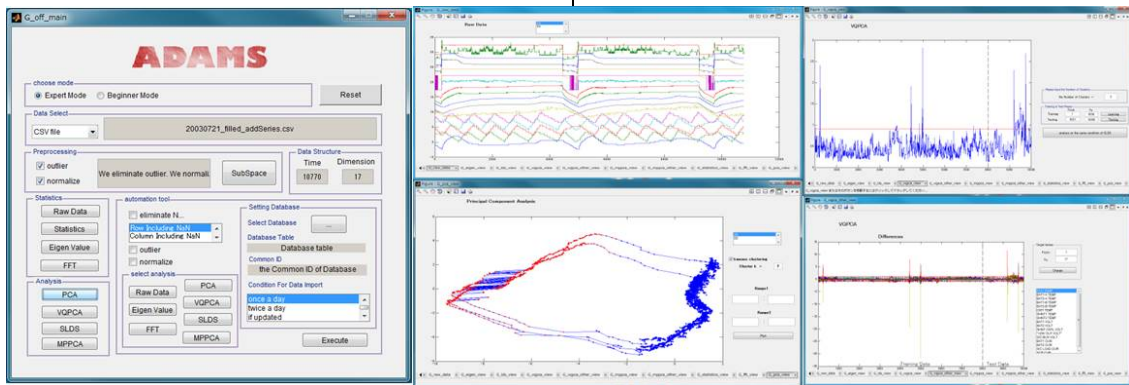


図 1: 人工衛星テレメトリ監視・異常検知システム

ある。

[成果 3]次元削減とクラスタリングに基づく監視法の開発と拡張

[成果 1]および[成果 2]を踏まえ、人工衛星テレメトリデータの多次元性と多モード性を考慮したデータモデル化・監視法として、教師なし次元削減とクラスタリングに基づく手法を開発した。また、宇宙機テレメトリの重要性質である、異種性および時系列性を扱えるように拡張を行った。

[成果 4]衛星運用での有効性検証

上記の[成果 1]～[成果 3]に基いて、人工衛星データ監視・異常検知システム(ADAMS, 図 1)を構築し、JAXA 等の外部機関と協力して実際の人工衛星のテレメトリデータに提案手法群を適用してその有効性を検証した。その結果、運用者が人工衛星システムの健康状態を理解したり、予期せぬ事象を検出してその原因を調査する上で有用な情報を提供することが示された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 矢入健久, 乾稔, 河原吉伸, 高田昇, "次元削減とクラスタリングによる宇宙機テレメトリ監視法", 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 59, No. 691, pp. 197-205, 2011
- ② 上甲昌郎, 河原吉伸, 矢入健久, "局所線形モデルのアライメントによる非線形動的システムの学習法" 人工知能学会論文誌, Vol. 26, No. 6, pp. 638-648, 2011
- ③ 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", 航空宇宙技術, 採録済み・掲載予定

[学会発表] (計 14 件)

- ① Masao Joko, Yoshinobu Kawahara, Takehisa Yairi, "Learning Non-linear Dynamical Systems by Alignment of Local Linear Models", 20th

International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2010 年 8 月 24 日 イスタンブール (トルコ)

- ② Takehisa Yairi, Minoru Inui, Akihiro Yoshiki, Yoshinobu Kawahara, Noboru Takata, "Spacecraft Telemetry Data Monitoring by Dimensionality Reduction Techniques", The SICE Annual Conference 2010 (SICE 2010), 2010 年 8 月 19 日, 台北 (台湾)
- ③ Takehisa Yairi, Minoru Inui, Yoshinobu Kawahara, Noboru Takata, "Spacecraft Telemetry Monitoring by Dimensionality Reduction and Reconstruction", The NASA Conference on Intelligent Data Understanding (CIDU-2010), 2010 年 10 月 5 日, マウンテンビュー (米国)
- ④ 上甲昌郎, 河原吉伸, 矢入健久, "局所線形モデルの整列による非線形システムの学習法", 第 24 回人工知能学会全国大会 (JSAI2010), 2010 年 6 月 10 日, 長崎
- ⑤ 矢入健久, "宇宙機システム監視と部分空間法", 部分空間法研究会 2010, 2010 年 7 月 26 日, 釧路
- ⑥ Takaaki Tagawa, Takehisa Yairi, Noboru Takada and Yukihiro Yamaguchi, "Data Monitoring of Spacecraft Using Mixture Probabilistic Principal Component Analysis and Hidden Semi-Markov Models", The 3rd International Conference on Data Mining and Intelligent Information Technology Applications (ICMIA2011), 2011/10/24, マカオ
- ⑦ Takehisa YAIRI, 他 8 名, "Telemetry Monitoring for Artificial Satellites with Machine Learning Techniques", The 28th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 2011/6/7, 沖縄県宜野湾市
- ⑧ 田川貴章, 矢入健久, 高田昇, 山口由仁, "混合確率主成分分析と隠れセミマルコフモデルを用いた宇宙機データ

監視”,人工知能学会全国大会(第25回)  
JSAI2011, 2011/6/2, 盛岡市

- ⑨ 矢入健久、他8名, “次元削減技術を用いた衛星テレメトリ監視法の提案”, 宇宙・航行エレクトロニクス研究会(SANE), 2011/6/23, JAXA 筑波宇宙センター
- ⑩ Takehisa YAIRI, Takaaki TAGAWA, Noboru TAKATA, “Telemetry Monitoring By Dimensionality Reduction and Learning Hidden Markov Model”, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2012), 2012年09月04日~2012年09月06日, Turin, Italy
- ⑪ 小田哲生, 塩井宏亮, 谷本啓, 武石直也, 桑原絢一, 矢入健久, 酒匂信匡, “小型衛星のための知的テレメトリ監視システムの提案”, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 2012年11月20日~2012年11月20日, 別府
- ⑫ 矢入健久, 小田哲生, 塩井宏亮, 中島佑太, 三浦尚幸, 高田昇, “SDS-4運用におけるデータ駆動型テレメトリ監視システムの検証実験について”, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 3E08, 鳥取県米子, 2013年10月11日
- ⑬ 小田哲生, 塩井宏亮, 谷本啓, 武石直也, 桑原絢一, 矢入健久, 酒匂信匡, “小型衛星向け知的テレメトリデータ監視システムの開発”, 第27回人工知能学会全国大会, 1E3-1, 2013年6月4日, 富山
- ⑭ 矢入健久, “学習による異常検知—人工衛星データへの適用を中心に—”, 計測自動制御学会北陸支部講演会, 2014年1月20日, 福井大学

[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, 2015年8月(掲載予定)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

矢入 健久 (YAIRI, Takehisa)  
東京大学・先端科学技術研究センター  
・准教授  
研究者番号: 90313189

### (2) 研究協力者

上甲 昌郎 (JOKO, Masao)  
桑原 絢一 (KUWABARA, Junichi)  
田川 貴章 (TAGAWA, Takaaki)  
小田 哲生 (ODA, Tetsuo)