

平成 21 年 12 月 3 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18760607

研究課題名（和文） 宇宙機システムの異常検知・診断支援のための複合的情報提供法に関する研究

研究課題名（英文） Study on Information Integration for Spacecraft Anomaly Detection and Diagnosis

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

研究成果の概要：

人工衛星等の宇宙機システムの開発において、システムの異常を的確かつ迅速に発見し、その原因を同定する技術は宇宙開発にとって極めて重要なテーマである。本研究では、機械学習や確率的推論などの知能化技術を応用し、人工衛星等の運用データから異常パターンを検出し、運用者がその原因を推測する上で有用な情報を提供する技術を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 18 年度	1,500,000	0	1,500,000
平成 19 年度	1,000,000	0	1,000,000
平成 20 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	300,000	3,800,000

研究分野：宇宙工学・人工知能

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：異常検知，故障診断，機械学習，人工衛星

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開発において最も重要な課題の一つが、高度な異常検知・故障診断技術の開発である。特に、地上の様々な人工システムとは異なり、人間が直接監視したり修理することが不可能であるため、宇宙機自身が自律的かつ迅速にシステムの変調を検知するとともに、地上に居る専門家（運用者）がシステムの状態や異常を診断する上で重要な関連情報を適切に提供する技術が求められている。

従来、宇宙機の異常検知・診断法としては、ルールベース推論（エキスパートシステム）、

モデルベース推論、等が研究されてきたが、正確なルールベースやモデルベースを事前に用意しなければならず、広く普及するには至っていない。そのため、現在も宇宙機状態監視の主流は単純なリミットチェックというのが実状である。

これに対して、研究代表者らは宇宙機の運用監視データ（テレメトリデータ）に対して機械学習・データマイニング理論を応用することによって、システムの挙動の変調を検知する技術の開発に取り組んできた。

2. 研究の目的

本課題における目的は主に以下の3つである。

- (1) 姿勢制御系のように、ある程度正確な挙動モデルが事前に得られるサブシステムについては、その挙動の確率的モデルを構築し、確率推論を応用することによって、異常検知・診断を行う技術を開発すること。
- (2) 電力系、温度系のように、正確なモデル化が困難なサブシステムについては、過去のテレメトリデータを訓練データとしてデータマイニング・機械学習手法を応用することによって、帰納的な正常挙動モデルを獲得し、それを新しいデータと照合することによって異常検知を行う技術を開発すること。
- (3) 上記(2)による異常検知結果を運用者が理解し、その原因を推定する上で有用な情報提供・可視化技術を開発すること。

3. 研究の方法

上記の3つの研究目的を達成するために、それぞれ以下のような方法を用いた。

- (1) 宇宙機の挙動を確率的モデルによって表現し、カルマンフィルタやパーティクルフィルタ等の確率的推論手法を用いてシステムの内部状態、および、事前には不確定なモデルパラメータを逐次推定する技術を開発し検証する。
- (2) 宇宙機の正常運用時におけるテレメトリデータに対して、非線形回帰学習および次元削減手法を適用することによって、帰納的な正常システムモデルを獲得する技術を開発し、その有効性を検証する。
- (3) 超高次元な多変量時系列データである宇宙機テレメトリデータを、変数方向、時間軸方向それぞれについて次元削減を行い、低次元空間で可視化することによってシステムの健康状態を運用者が直感的に把握することを支援する技術を開発する。また、次元削減によってデータを一旦圧縮した後に再び元の次元に復元し、元のデータと比較することによって、各変数の異常寄与度を求める技術を開発する。

4. 研究成果

- (1) ダイナミックベイジアンネットワークによって宇宙機の軌道・姿勢制御系をモデル化し、状態変数ベクトルおよびモデルパラメータを推定する技術を開発した。また、異常変数と呼ばれる仮想的な変数をモデルに導入し、その値を逐次的に推定することによってシステムの健康状態を推定する方法を開発した。(発表論文[5],[6],[7])

- (2) 非線形回帰学習、次元削減および部分空間法等の機械学習技術を応用し、正常時の衛星テレメトリデータから人工衛星の正常挙動モデルを獲得し、テストデータを照合することによって異常を検知する技術を開発した。(発表論文[3],[4],[8],[14]-[18],[20])
- (3) 膨大なテレメトリデータに対して非線形次元削減法を応用することによって、宇宙機システムの大局的な状態や観測変数間の関係の直観的把握を可能にする技術を開発した。また、次元削減した後にデータを再構成することによって、各変数の正常な範囲を動的に予測する適応型・学習型リミットチェック技術を開発した。(発表論文[1],[9],[11]-[13],[19],[21])

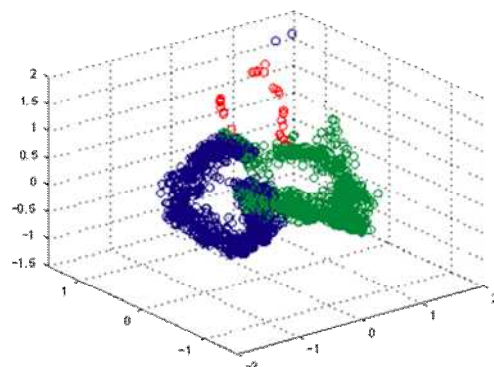


図1：高次元テレメトリデータを非線形次元削減することによって可視化された人工衛星の状態遷移(各「環」は、「昼」、「夜」、「蝕」を表すことが判明した)

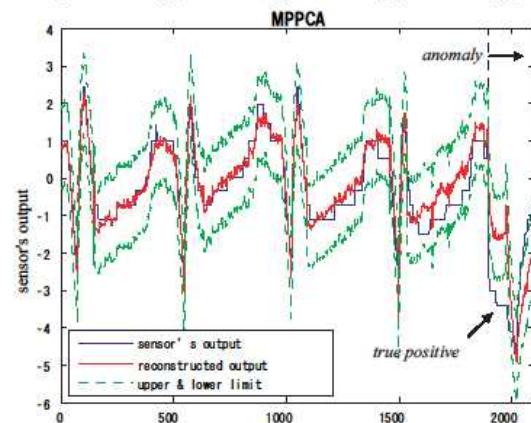


図2：次元削減・再構成による学習型・適応的リミットチェック

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8件)

[1] Minoru INUI, Yoshinobu KAWAHARA, Kohei GOTO, Takehisa YAIRI and Kazuo MACHIDA: "Adaptive Limit Checking for Spacecraft Telemetry Data Using Kernel Principal Component Analysis", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol. 7, pp.Pf_11-Pf_16 (2009) .

[2] 中須賀真一, 田中秀幸, 矢入健久, "小型衛星とロボット・知能化研究", 日本ロボット学会誌, 特集「ロボット技術による宇宙開発の最前線」, Vol.27 No.05, pp.502-505, 2009

[3]河原 吉伸, 矢入 健久, 町田 和雄, "部分空間法に基づく変化点検知アルゴリズム", 人工知能学会論文誌, 第 23 巻 2 号, pp.76-85, 2008

[4]藤巻遼平, 矢入健久, 町田和雄, "非定常データに対する Sparse Bayesian Learning", 人工知能学会論文誌, 第 23 巻 1 号, pp.50-57, 2008

[5]吉田圭吾, 白坂洋平, 矢入健久, 町田和雄, "Unscented Kalman Filter を用いた故障衛星のロバストな姿勢運動推定", 日本航空宇宙学会論文誌, Vol.56, No.649, pp.65-71, 2008

[6]河原吉伸, 後藤耕平, 矢入健久, 町田和雄, "逐次モンテカルロ法に基づく宇宙機異常診断法: パラメータと異常モードのオンライン同時推定によるアプローチ", 日本航空宇宙学会論文集, Vol.55, No.642, pp.344-354, 2007

[7]後藤耕平, 河原吉伸, 矢入健久, 町田和雄, "Particle Filter を用いたパラメータ推定による宇宙機異常検知", 日本航空宇宙学会論文集, Vol.55, No.642, pp.355-358, 2007

[8]藤巻遼平, 矢入健久, 町田和雄, "回帰学習による逐次予測を用いた宇宙機の適応的リミットチェック", 航空宇宙学会論文集, Vol.54, No.630, pp.312-318, 2006

〔学会発表〕(計 21 件)

[9]吉木明博, 矢入健久, 乾稔, 河原吉伸, 高田昇, 町田和雄, "次元削減技術を用いた宇宙機テレメトリの異常検知法", 第 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009 年 9 月 9 日, 京都

[10] Masao JOKO, Takehisa YAIRI and Kazuo MACHIDA, "Attitude Motion Estimation Using Semisupervised Dimensionality Reduction", ICROS-SICE International Joint Conference 2009, 2009 年 8 月 20 日, 福岡

[11]乾稔, 矢入健久, 河原吉伸, 町田和雄, "次元削減の再構成誤差を用いた異常検知手法の比較", 人工知能学会第 23 回全国大会 (JSAI 2009), 2009 年 6 月 17 日, 高松

[12]乾稔, 矢入健久, 町田和雄, "次元削減の再構成誤差を用いた異常検知手法の比較", 第 11 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2008), 10 月 30 日, 仙台

[13] Minoru INUI, Yoshinobu KAWAHARA, Kohei GOTO, Takehisa YAIRI and Kazuo MACHIDA, "Adaptive Limit Checking for Spacecraft Telemetry Data Using Kernel Principal Component Analysis", The 26th International Symposium on Space Technology and Science (26th ISTS), 6 月 2 日, 2008, 浜松.

[14] Yoshinobu KAWAHARA, Takehisa YAIRI, and Kazuo MACHIDA, "Change Point Detection in Time Series Data based on Subspace Identification", Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), Omaha, NE, USA, 2007, pp.559-564, 2007 年 10 月 29 日

[15]河原吉伸, 矢入健久, 町田和雄 (2007) 確率部分空間同定法に基づく時系列データにおける変化点検知, 第 10 回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS), 2007, 11 月 5 日, 長津田

[16]河原吉伸, 矢入健久, 町田和雄 (2007) オンライン状態空間学習による安定性監視法, 第 21 回 人工知能学会全国大会 (JSAI2007), 3F8-4, 2007 年 6 月 18 日, 宮崎

[17] Yoshinobu KAWAHARA, Takehisa YAIRI, and Kazuo MACHIDA, "A Kernel Subspace Method by Stochastic Realization for Learning Nonlinear Dynamical Systems", the 12th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), 2006 年 12 月 4 日, Vancouver, Canada

[18]藤巻遼平, 矢入健久, 町田和雄, 非定常データに対する Sparse Bayesian Learning,

第 9 回情報論的学習理論ワークショップ
(IBIS 2006), 2006 年 10 月 31 日,大阪

[19] Yuichi Sato, Yoshinobu Kawahara, Takehisa Yairi and Kazuo Machida, "Visualization of Spacecraft Data Based on Interdependency Between Changing Points in Time Series", SICE-ICASE International Joint Conference (SICE-ICCAS) 2006 年 10 月 18 日, Busan, Korea

[20] Yoshinobu KAWAHARA, Takehisa YAIRI, and Kazuo MACHIDA, "Real-time Monitoring for Spacecraft Fault Diagnosis by Combined Parameters and Fault Modes Online Estimation", The 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT), the Special Mini-workshop on Student Space IT Research and Projects, JULY 17 - 20, 2006, Pasadena, CA, USA

[21] Takehisa YAIRI, Yoshinobu KAWAHARA, Ryohei FUJIMAKI, and Kazuo MACHIDA, "Telemetry mining: A Machine Learning Approach to Anomaly Detection and Fault Diagnosis for Space Systems", Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT), 2006 JULY 17 - 20, 2006, Pasadena, CA, USA

6 . 研究組織

(1)研究代表者

東京大学・先端科学技術研究センター・准教授・矢入健久

研究者番号：90313189

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし