

回帰木を利用した人工衛星運用データの異常検出支援

Supporting Anomaly Detection from Satellite House-keeping Data by Regression Trees

中津川実^{*1} 小笠原志郎^{*1} 矢入健久^{*1} 石濱直樹^{*2} 堀浩一^{*1} 中須賀真一^{*1}
 Minoru Nakatsugawa Shiro Ogasawara Takehisa Yairi Naoki Isihama Koichi Hori Shinichi Nakasuka

^{*1} 東京大学
 Univ. of Tokyo, JAPAN

^{*2} 宇宙開発事業団
 NASDA, JAPAN

This paper proposes a method for supporting anomaly detection from satellite systems based on the use of regression trees. Because of a huge amount of the house-keeping data downlinked to ground stations, human operators should be supported in the course of understanding the status of satellites. To overcome some difficulties in current methods used for anomaly detection, the proposed approach helps operators monitor the range of numeric sensor values and the change of causal relationships between series in detail.

1. はじめに

人工衛星などの宇宙システムには、地上システムと異なって抜本的な修理ができないという問題点がある。そのため失敗を未然に防ぐために、システム上の異常を早期に検出することが重要である。衛星の状態は、地上にダウンリンクされるハウスキーピング・データによって判断することができる。しかし、そのデータは搭載機器のセンサ出力やスイッチの ON/OFF 状態などの情報からなる 1000 以上の時系列データによって構成されていて、運用者が全体を把握し、その中から異常を発見するのは困難である。そこで運用者が衛星システム全体の挙動を理解するためには、系列間の因果関係や運用モードの変化といった、より抽象度の高い情報を提示する必要がある。

このように、宇宙システムには運用を支援するシステムが不可欠であり、従来、異常検出手段としてリミットチェックが広く用いられてきた。またその一方で、専門家知識を利用したエキスパート・システムや、運動方程式などで記述されたシステム挙動モデルに基づいた、モデルベースド・システムなどが提案されてきた。

しかし、これらの従来手法は対象システムに関して詳細な事前知識を必要とし、さらに、故障事例の絶対数が少ないために故障モデルの作成が困難であるという問題を抱えている。そこで、データマイニングの技術を適用することによって、事前知識獲得のコストが削減されることが指摘されている[Yairi 01]。

このような背景に基づき本研究では、1997 年 11 月に打ち上げられた人工衛星 ETS-1 のデータを主な題材とし、回帰木を用いて衛星の挙動に応じたリミット値を求め、同時に系列間の因果関係を効果的に提示することにより運用者による理解や思考を促進し、異常検出を支援する手法を提案する。

以下本稿では、まず現状の人工衛星の運用における問題点を整理し、次に我々の提案手法について説明する。そして、提案手法を衛星の実データに適用した結果について述べる。

2. 現行の手法における問題点

現行の運用においては、数値系列の値が適切な値であるかどうかを監視するために、数値の上限と下限を定めてチェックする、リミットチェックが行われている。しかし、このリミットチェックには、次のような問題点がある。

1. リミット値は全運用を通じて固定した値である。
2. 実際のデータの範囲からかけ離れた値であることが多い。
3. データにおける外れ値に過敏に反応してしまう。

そのため、結果としてチェックが十分になされていないというのが現状である

一方、衛星のハウスキーピング・データには、リミットチェックの行われぬシンボル系列 (ON/OFF、A/B 系など) が多く含まれている。シンボル系列は衛星の運用モード等によって変化するものであり、これらの組み合わせによって衛星の状態を定義することが可能である。従って、シンボル系列の値に応じたリミットチェックを行うことによって、より精緻なリミット値を求め、衛星の監視を厳しく行うことが可能になると言える。また、シンボル系列の値の組み合わせの変化を監視することは、衛星の状態変化の監視をする上で有望なアプローチであると言える。

3. 提案手法

3.1 概要

提案する手法は、次の4つの過程からなる。

1. 回帰木の作成に用いる属性の選定
2. 外れ値の除外
3. 回帰木の作成
4. 作成した回帰木の枝刈り

図1は、これらの過程を示したものである。

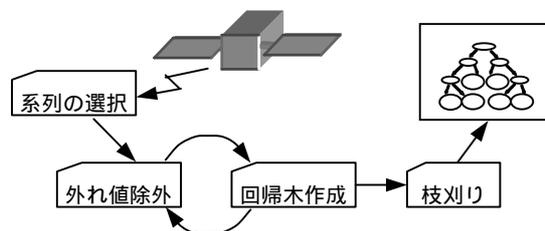


図1. 提案手法の流れ

3.2 回帰木の作成に用いる属性の選定

まず、リミット値を検出したい一つの数値系列 (目的属性) と枝分けに用いるシンボル系列 (条件属性) を、全系列の中から選び、回帰木の作成に用いる。因果関係を調べたい系列同士を選ぶことによって、その関係がツリーの形で得られる。属性を選ぶ際には、衛星のシステムブロック図などの事前知識を利用することが可能である。

3.3 外れ値の除外

衛星から地上に送られてくるハウスキーピング・データには、ビット反転などのために値が周囲と大きく離れている箇所が随所に存在する。衛星システムを監視するためにリミット値を求める際には、そのような外れ値は意味を持たないので取り除く必要がある。そこで、データの分布が正規分布であると仮定して、平均値から標準偏差の3倍よりも大きく離れた値は、外れ値(outlier)であるとしてデータから除外する。

3.4 回帰木の作成

回帰木の作成には相互情報量の基準で最適な分割テストを用いる[Witten 99]。すなわち、データが正規分布であると仮定して、エントロピーを次式で計算する。

$$H = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log_2 p(x) dx = \log_2 \sqrt{2\pi e \sigma^2} \quad (\sigma^2 : \text{分散})$$

そして、各中間ノードにおける分割テストにおいて、エントロピーの減少量(相互情報量)が大きく、結果としてエントロピーが最も小さくなるような枝分けを実現するシンボル系列を、条件属性に選ぶ。

3.5 作成した回帰木の枝刈り

作成した木が必要以上のデータ分割によって過度に複雑になると、目的属性に関する法則は理解しづらいものになってしまう。そのようなオーバーフィッティングの状態を防ぐため、目的属性である数値系列が枝分けによって異なる集合に分かれたかどうかを、統計学的に検定する。そのために、F検定とt検定を利用した分散と平均に関する検定、あるいはKolmogorov-Smirnov検定を利用した分布形の検定によって枝刈り(pruning)を行う。

4. 実験評価

図2は表1の17系列において、1997年11月30日のデータを用いて回帰木を作成し、リアクションホイール回転数(系列名D61180)のリミット値のモデル化を行った例である。ホイールの回転数が、シンボル系列の値によって変化していることが見て取れる。

また、図3は同様に表1の系列において、1997年11月30日から12月5日までの一週間のデータを用いて回帰木を作成した例である。図2と図3の比較をすることにより、リミット値の変化だけでなく、木構造の変化も起こっていることがわかる。このように異なる時間区分で作成した回帰木を比較することは、リミットチェックを精緻に行うだけではなく、衛星の運用データにおける経年変化や季節変動の検出に役立つと考えられる。また、ツリーの構造の変化は、系列間の因果関係の変化を示唆していると考えられる。

表1 回帰木の作成に使用した系列

D61180 [リアクションホイール回転数]	D61457 [アナログ信号入出力ポートA]
D60011 [AOCS制御モード]	D61458 [アナログ信号入出力ポートB]
D61023 [地球センサライフステータス]	D61461 [誘導計算機A]
D67052 [入出力信号制御装置1]	D61462 [誘導計算機B]
D67053 [入出力信号制御装置2]	D61463 [アンテナパドル駆動ポート]
D68064 [AOCSアクチュエータ選択状態]	D61474 [ホイール駆動回路2]
D60103 [太陽電池パドル駆動モード2]	D61481 [パドル駆動回路A]
D60104 [太陽電池パドル駆動モード1]	D61482 [パドル駆動回路B]
D61005 [地球センサ選択状態]	

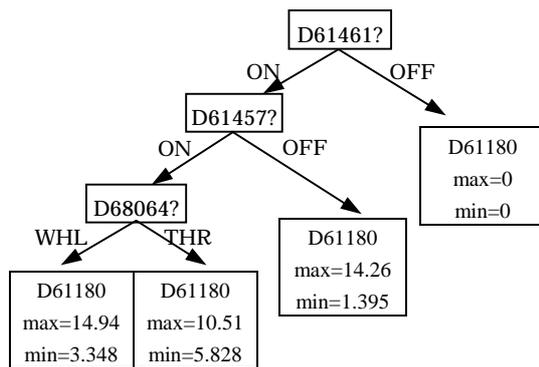


図2. 回帰木の例1 (1997/11/29 一日間で作成)

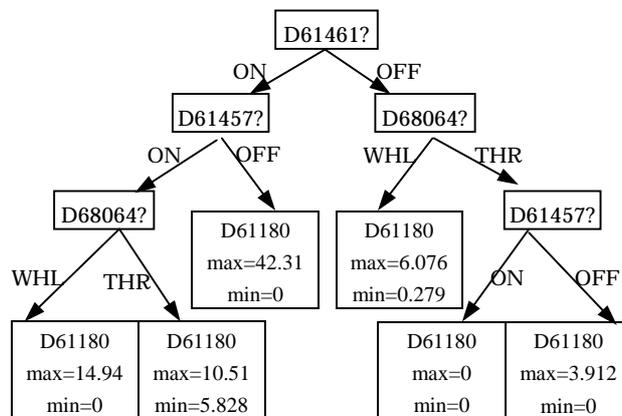


図3. 回帰木の例2 (1997/11/29 ~ 12/5 一週間で作成)

5. おわりに

本稿では人工衛星のハウスキーピング・データに、回帰木を適用することによって、衛星システムの異常検出を支援する手法を提案した。今後、専門家が持つ知識の利用について考慮しつつ、より多くのデータを対象に実験を行い、提案手法の有効性を検証していく予定である。

参考文献

[Yairi 01] T. Yairi, Y. Kato, and K. Hori : Fault detection by mining association rules from house-keeping data. In Proc. of International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2001.

[Witten 99] I.H. Witten, E. Frank : Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations , Morgan Kaufmann, 1999