

宇宙分野でのデータマイニング応用の動向

産業技術総合研究所 岩田敏彰, 本村陽一
東京大学 矢入健久
宇宙開発事業団 石濱直樹

1. はじめに

2002年6月13日, 宇宙分野でのデータマイニングに関心を持つ産総研・岩田, 東大・矢入, NASDA・石濱とベジアンネットワークの研究者である産総研・本村の4名が産総研の会議室に集まり, 意見交換を行った. 本稿ではそのときの話題について報告する. 岩田は人工衛星の故障診断についてロボットを使って行う研究を行っており[1], そこから派生して過去の人工衛星の故障についてデータベースを作成し, 決定木を使った分類・ベジアンネットワークによる故障推定の研究も行っている[2]. 矢入・石濱は1997年に打ち上げられた技術試験衛星7型(ETS-VII: おりひめ・ひこぼし)のテレメトリデータを使っている. 矢入は相関ルールやクラスタリングの手法を用いた異常検出[3]を, 石濱はリアクションホールに対象を限定した上でデータの視覚化により専門家でなくても異常に気づくシステム[4]を研究している. 今回の会合では矢入・石濱・本村が互いの研究テーマについて紹介し, 岩田がまとめを行った. 以下に岩田, 矢入・石濱の研究を簡単に紹介し, その後の議論について述べる.

2. 人工衛星の故障診断 —知識ベースのアプローチ(岩田)

不具合発生の背景を考察し, 観測データと比較して故障を推定するために, 過去の人工衛星の不具合に関する資料(55衛星104件)をデータベース化した. データベースは背景, 原因, 現象, 観測などの属性からなり, それらの関係をC5.0を使って決定木として求めた. これらの関係を確率的な分析ができるようにベジアンネットワークとして表現した. なお, 詳細は本セミナーで別途発表する[5].

3. 衛星テレメトリデータへのデータマイニング適用による異常検出・診断への試み(矢入)

一般に衛星のテレメトリデータにはシステムの状態を監視する様々な情報が含まれており, 地上局に蓄積された過去のデータを適切に処理し変化を追うことによって, 後の致命的な故障につながるような予兆を検知できる可能性がある[6].

しかし, 現在の衛星運用において日常的に行われているテレメトリデータ利用は, 極一部のデータに対するリミットセンシング(最小・最大値のチェック)や大局的なトレンド監視に留まっており, より高度なデータマイニングや情報可視化などの技術の適用が求められている.

既存のデータマイニング技術を衛星の異常検出という問題に適用する上で特に考慮しなければならないのは以下の2点である. 第一に, 一般にテレメトリデータは非常に高次元(数百~千数百次元)の時系列データであり, 通常のデータマイニングで扱われるテーブル状のデータ構造とは大きく性質を異にするという点である. 第二に, 原則的に全て特注生産である人工衛星は他の大量生産品などとは異なり, 利用可能な過去の故障事例が圧倒的に少ないため, 正常時と異常時のデータを両方用意して教師有り(分類)学習を行うということが不可能であるという点である.

これらの問題点を考慮し, 近年盛んに研究されている時系列データマイニング技術(類似時系列パターン検索[7], 時系列パターンの相関ルールマイニング[8])をテレメトリデータに適用することによって, 膨大なデータから特に重要な情報だけを抽出し, 異常やその予兆の発見を支援する方法を研究している. ここでは, 今現在取り組んでいる2つの具体的なアプローチを紹介する.

(1)類似時系列パターン検索による衛星の状態変化理解の支援[3]

衛星システムの内部状態は時間的に様々な粒度を持ったイベントやモードによって構成されており、これらのイベントやモードを区別しないで統計量やトレンドを計算しても有効な情報は得られない。そこで、ユーザ(運用者や専門家)によって指定された様々な時系列パターンに対して、それと類似するものを蓄積されたテレメトリデータから検索し、集められた類似パターンを比較して提示することにより、システムの異常や経年劣化の状況をユーザが把握することを支援する。

(2)イベントパターン間の相関ルール抽出による衛星変調の検出[9]

この方法ではまず、テレメータの各時系列中の特徴的なイベントパターンをクラスタリングによって切りだし、それらのパターン間の依存関係(因果関係)を相関ルールマイニングによって抽出する。このようにして得られた相関ルールの集合は、正常時における一種のシステム挙動モデルとみなすことができ、その成立具合を監視することによって衛星の変調を検出することが可能になると期待される。今後、これら2つのアプローチを統合し、より一般的なテレメトリデータからの異常検出(支援)システム(図1)へと発展させていく予定である。

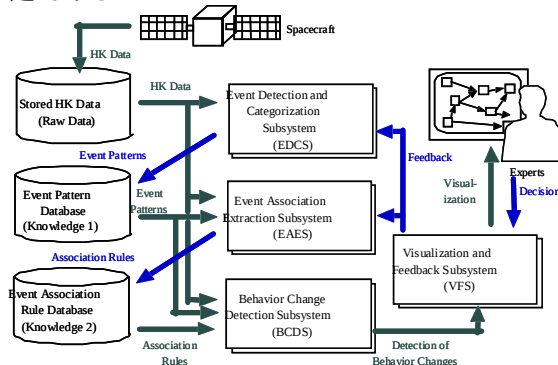


図1 提案する衛星テレメトリデータからの異常検出システム

4. データマイニングを用いた宇宙機の故障診断(石濱)

ETS-VII のリアクションホイールのピッチ軸ドライブカウント値が異常になるという現象が1999年12月に起きた。この異常なテレメトリデータとそれに関連するテレメトリデータを用い問題発生の際について調査を行

った。ホイールタコ信号(回転速度)、ホイールドライブ信号(電流値)、ホイール角運動量、スラストに関するデータ、姿勢制御モード、アクチュエータモードを用いることにより得られたデータを衛星状態ごとに分類し、データの相関関係パターンを求めた。このパターン分類の領域には、クラスタリングの手法を用いて行った。この結果を提示することによりシステムの異常や経年劣化の状況を把握することが出来た。

5. 討論

会合の席上、以下の点について議論があった。会合後、実際の資料に当たるなどして整理を行った。

5.1 スペースシャトルのヘルスチェック

これまでに宇宙関連でどのようなところでベイジアンネットが使われているか、ということが議論になり、表題のようなものが例示された。後日、文献調査を行ったところ、文献[10]が見つかった。

本論文では、Bayesian Network を宇宙分野で応用した先駆的な研究として NASA の Mission Control Center (Houston) における Vista プロジェクトについて紹介されている。

Vista システム は、スペースシャトルの推進系フライトエンジニアの監視(monitors)および意思決定を支援するシステムである。シャトルの推進系の監視というタスクは時間に関して非常にクリティカルで、非常にリスクの大きい意思決定問題を含んでいる(異常の発生が確認されたらすぐに手段を打たないといけないということ)が、推進系のテレメトリデータは非常に膨大であり、全てを見ていたら時間がかかってしまう。そこで、意思決定にとって本当に重要な情報だけを優先的に表示できないかというのがこのシステムの目的である。

具体的なアプローチは2段階に分かれる。

第一段階(Vista I, II) では、シャトルの推進系を Bayesian Network によってモデル化し、異常検知システムを構築する。テレメトリを監視し、異常の確率が閾値を上回ったときにアラームを発する。また、各異常ごとのアクションの効用値をモデル化し、起きた異常に対して効用期待値の高いアクションをエンジニアに助言する。

第二段階(Vista III) では、さらに、異常のシチュエーションごとに、膨大な観測データのうちの何をエンジニアに提示すべきかを

期待効用値に基づいて制御する。具体的には、ある状況においてある観測情報を提示することの価値(EVDI: Expected Value of Displayed Information)を定量的に定義し、その値をBayesian Networkによるシステムモデル、ユーザのアクションモデル、および効用関数モデルに基づいて動的に推定し、価値が高いと判断された付加情報を提示するというものである。

5.2 確率的タスクモデルを用いた研究提案

3節では、テレメトリデータの各系列の特徴的な時系列パターン間の相関ルールを抽出しその成立具合を監視することによってシステムの異常発生を検知しようとする試みを紹介した。

しかし、この手法で得られる個々の相関ルールはテレメトリデータ上に現れる現象の局所的かつ表層的(現象的)な共起関係を表現しているに過ぎないため、それらの現象の背景にあるシステム内部の挙動に関する深い推論までは扱うことができない。したがって、「異常らしき兆候」を検知することはできても、その原因を診断することは困難であると考えられる。

この問題に対する一つのアプローチとしては、システムの内部的挙動およびテレメトリデータ上の現象パターン間の関係を、HMM(隠れマルコフモデル)や Input-Output HMM などの確率的状態遷移モデルによって大局的かつ陽に表現するということが考えられる。このような拡張によって異常の発生原因などに関してより深い推論が可能になると期待される。

ただし、このような高度な状態遷移モデルを構築するには蓄積されたテレメトリデータだけでなく相当量の専門家知識も必要になると考えられ、2つの情報源をどのようにして統合するかということが大きな課題になる。

5.3 ロボットとセンサを用いた衛星の故障診断

人工衛星の状態を何種類かのセンサでロボットが調べることを考える。あらかじめ、人工衛星のさまざまな状態のセンサデータをロボットが持っており、それをもとに診断するものとする。このときの診断法としては、はじめに診断に対してもっとも効果的なセンサを選択し、もっとも効果的な位置で計測を行い、その結果を専門家(地上側)に送信する。その結果に基づき、地上側では次に用いるセ

ンサと計測位置を指示する。このとき、ロボットの側でも次に計測する場所の候補はこれまでのデータに基づいて用意することができるが、地上側の決定を優先するものとする。

このような過程を考えると、ロボットと人間の協調作業が非決定論的に行われることがわかる。このような状況は、タスクモデル(診断作業のモデル化)、状況のモデル(センサの出力とロボットの知識)、ユーザモデル(専門家の知識のモデル化)により、本村らが提案している確率論的タスクモデル[11]などを使用して問題解決が図れる可能性があり、現在検討を進めている。

5. まとめ

2002年6月13日に宇宙分野でのデータマイニングに関心を持つ者が集まり、相互の研究紹介と情報交換を行った。本稿では、それぞれの研究内容とそのときに議論になった点について改めて調査し、まとめた。今後、このようなグループでの情報交換が発展し、共同研究などに発展することを期待している。

文献

- [1] T. Iwata and K. Machida: "Diagnosis of Small Satellites Using Multiple Sensors and a Robot," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, A00-37177 (CD-ROM), Paper # AIAA-2000-4498, 2000.
- [2] T. Iwata, Y. Motomura and K. Machida: "Diagnosis of Satellites -Top-Down Approach-", 23rd International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2002-f-18, 2002.
- [3] S. Ogasawara, T. Yairi, N. Ishihama, S. Nakasuka and K. Hori: "Anomaly Detection Support System for Spacecrafts Based on Data Mining Techniques," 23rd International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2002-f-19, 2002.
- [4] N. Ishihama, S. Ogasawara and T. Yairi: "Spacecraft Fault Diagnosis Using a Data Mining," 23rd International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2002-f-23, 2002.
- [5] 岩田, 本村, 町田: "人工衛星の診断 - 知識ベースアプローチ -", ペイジアンネットセミナーBN2002.

- [6] 福島, 石濱: “宇宙機のテレメトリ・データマイニング”, 第 44 回宇宙科学技術
連合講演会, 2000.
- [7] E. J. Keogh and P. Smyth: “A
Probabilistic Approach To Fast Pattern
Matching in Time Series Databases,”
Proceedings of the Third International
Conference on Knowledge Discovery and
Data Mining (KDD-97), pp. 24-30, 1997.
- [8] G. Das, K-I. Lin, H. Mannila, G.
Renganathan, P. Smyth: “Rule
Discovery from Time Series,”
Proceedings of the Fourth
International Conference on Knowledge
Discovery and Data Mining (KDD-98), pp.
16-22, 1998.
- [9] T. Yairi, Y. Kato and K. Hori: “Fault
Detection by Mining Association Rules
from House-keeping Data,” Proceedings
of International Symposium on
Artificial Intelligence, Robotics and
Automation in Space (i-SAIRAS 2001)
2001.
- [10] E. Horvitz and M. Barry: “Display of
Information for Time-Critical Decision
Making,” Proceedings of the Eleventh
Conference on Uncertainty in
Artificial Intelligence, 1995.
- [11] 本村, 佐藤: “確率的タスクモデリング
によるインタラクティブシステムの制御
と学習”, 第 16 回人工知能学会全国大会,
2002 .