

# 工学的知識を用いたセミパラメトリック学習モデルによる宇宙機故障診断

河原 吉伸, 矢入健久, 町田和雄

東京大学大学院工学系研究科

〒153 - 8904 東京都目黒区駒場 4 - 6 - 1 東京大学先端科学技術センター14号館 201号室

[kawahara,yairi,machida}@space.rcast.u-tokyo.ac.jp](mailto:{kawahara,yairi,machida}@space.rcast.u-tokyo.ac.jp)

<http://www.space.rcast.u-tokyo.ac.jp/kawahara/>

Abstract: 宇宙機故障診断問題は、宇宙システム分野における重要な課題の一つである。本研究では、工学的知識と観測データの両特性を利用した診断を行う枠組みとして、セミパラメトリック学習モデルを用いた宇宙機診断法を提案している。本稿の内容は、本枠組みの動機や将来構想を中心としたものである。

## 1. はじめに

人工衛星やロケットなどの宇宙機は、大規模かつ複雑なシステムであると同時に、宇宙環境という特殊な環境下に晒されるため、いかにその信頼性を確保するかは特に重要な問題となる。近年では、宇宙ステーションへの自律ランデブーをはじめ、ミッションの高度化は加速し、その安全性への要求は更に高まっている。こういった背景から、安全な宇宙機の活動を確保するために人間が行う一連のタスクを計算機により支援するための、宇宙機故障診断技術の開発が不可欠となってきている。ここでいう故障診断技術とは、想定外の宇宙機の挙動変化を迅速に捉える異常検知、そして捉えた異常の原因となるシステム要因を絞り込む原因究明を、(半)自動的に行うためのソフトウェア技術を指す。

このような宇宙機故障診断技術を実現するための研究開発は、従来から様々なアプローチにより行われてきた。その中心は、専門家が持つ経験則を用いて宇宙機の状態を判別するエキスパート・システムに基づく診断<sup>[NHCM01]</sup>や、物理モデルから得られる定性モデルを用いてセンサ・データを監視する事で診断を行う定性モデル診断<sup>[W96]</sup>である。更に近年では、パーティクルフィルターなどの確率的推論による診断手法の研究も行われている<sup>[DIH+04]</sup>。これらのアプローチは、事前知識から構築される診断モデルを演繹的に用いる事により診断を行うため詳細で説明力に富んだ診断が可能であるものの、宇宙機システムの複雑性や宇宙環境などに起因する不確実性のために、事前知識のみから正確なモデルを獲得する事が困難であるという問題に悩まされてきた。

そこで本研究では、診断モデルを機械学習的(統計的)な枠組みにより獲得する事で、これらの問題が克服可能な診断の枠組みを検討してきた。その際、単に観測データのみを用いてブラックボックス的なモデルを獲得するのではなく、システム機器やダイナミクスに関する工学的知識(数式モデル)を取り込む事により、診断結果が人間にとって理解可能で、説明力のあるモデルの獲得を念頭に研究を行ってきた。つまり本研究は、従来のアプローチが持つ特性(詳細性・説明力)を失わず、かつ複雑性や不確実性を克服可能な枠組みを目指すものである。

本稿では、まずこれまでに行ってきた研究について簡単に述べ、そこで明らかとなった問題を解決する方法として、セミパラメトリック学習モデルを用いる診断法を提案し、その有用性および本枠組

みの今後の方向性を中心に述べる．

## 2．現在までの取り組み

筆者らは，前章で述べた目標の下，工学的知識を反映した診断モデルの統計的獲得と，獲得モデルを用いた確率的推論による宇宙機故障診断を，その解決方策として取り組んできた．そしてこれまでにその具体化の一つとして，図1に示されるような Dynamic Bayesian Networks (DBNs)を用いた宇宙機異常診断法を提案

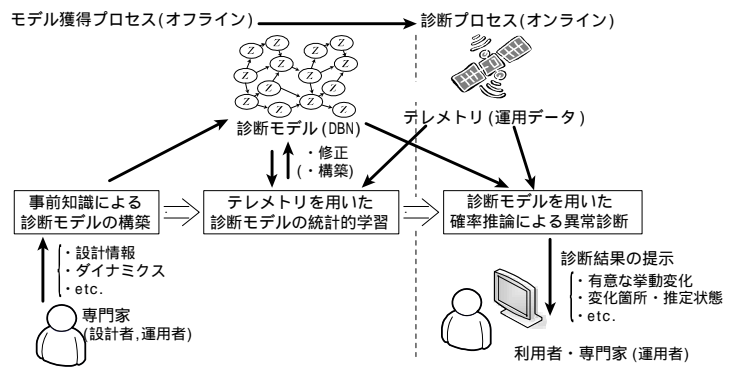


図1．DBNsを用いた宇宙機異常診断法

した<sup>[河原06,KYM05]</sup>．DBNsとは，隠れマルコフモデルやカルマンフィルタを包含する汎用的な確率的状態空間モデルであり，本法ではこれを対象システムに関する事前知識と正常時に得られた観測データから構築する．そして更に，これを用いた確率的推論により，内部状態や異常モード，異常パラメータ等を同時に推定する事により診断を行う．つまりフィルタリング問題として，異常診断問題を扱う．

例えば図2は，本枠組みを，宇宙航空研究開発機構(JAXA)から提供を受けた宇宙機のランデブー・プロセス中に発生するスラスト異常を模擬したデータに対して適用した際に，与えたDBNsの初期構造である．宇宙機の姿勢・並進運動に関連する状態量およびその観測値に加え，スラストの状態を表すのに有用なパラメータや，その異常の有無を表す変数が組み込まれている．このDBNsを正常時のデータを用いて学習(修正)し，異常を模擬したデータに対して適用した例が図3および4である．図3は，異常が発生したスラストの異常確率の推移を表しており，異常発生直後(図中250[s])に急激に上昇し，迅速に異常を捉えている事が分かる．また図4は，各スラストの推定推力の推移を表しており，実際の挙動を観測データのみから適切に再現可能である事が確認された．

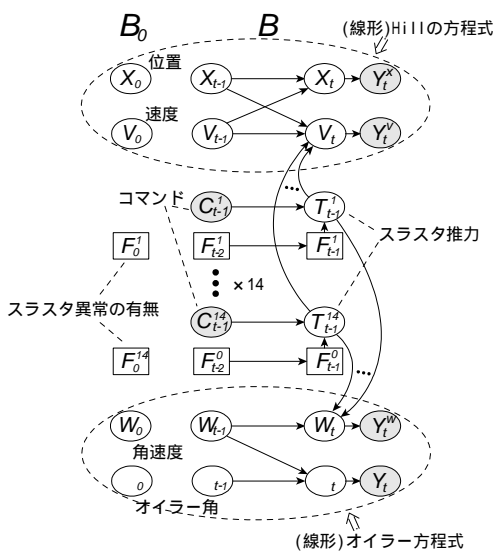


図2．診断に用いたDBNs構造

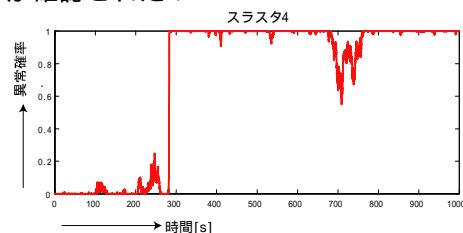


図3．異常スラストの異常確率の推移

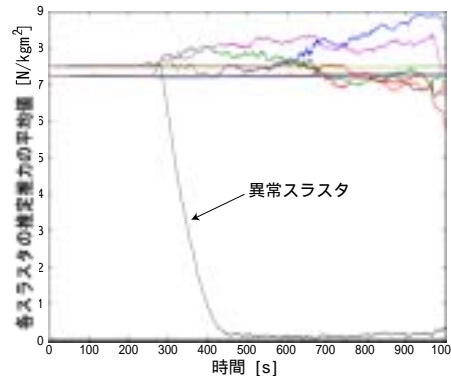


図4．各スラストの推定推力の推移

### 3. アプローチ

前章で述べたように、筆者らは、工学的知識を反映した診断モデルの統計的獲得と、獲得モデルを用いた確率的推論による宇宙機故障診断の具体的な枠組みとして、DBNsを用いた異常診断法を提案し、具体的問題へと適用した。しかし、複雑な変化を伴う異常ではしばしば異常パラメータの推定が困難になるなど、本枠組みではいくつかの不十分な点がある事が明らかになった。この原因の一つに、モデル表現力の不足が挙げられる<sup>[河原05]</sup>。つまり DBNs では、連続領域に関しては線形性を仮定しており、また学習に関しても事前知識を初期構造として与えたのみであるため、複雑な異常の場合には、宇宙機の挙動がモデルで精度良く表現できる領域を逸脱してしまう事が原因であると考えられる。従ってより複雑なシステムを扱うためにも、非線形化などでモデル表現力を向上させる必要があるが、大規模な適用の場合、システム全体の詳細なモデル化は、逆に精度低下(オッカムの剃刀)や計算コストの増大を招く恐れがある。そこで筆者らはこの問題に対し、診断の必要に応じて適宜部分的に知識を反映した詳細なモデルを獲得する事が妥当であると考えた。そして、その具体的手段として、セミパラメトリック学習による診断モデルの獲得を行う事を考案した。

ここでのセミパラメトリック学習とは、次式のような、パラメトリックな関数  $f$  とノンパラメトリックな確率分布  $\xi$  から構成されるモデルを統計的に獲得する枠組みであり、本研究ではこれを工学的知識と観測データの両特性を併せ持った診断モデルを獲得するために利用する。

$$y = f(x_{known}) + \xi(x)$$

つまり、診断に重要な領域(変数)は、工学的知識をパラメトリックな関数として導入する事で高精度に学習し、その他の領域は、ノンパラメトリックな部分で抽象的かつ次元を圧縮した形で学習する。

簡単なセミパラメトリック学習の例として、

$$y = \sin x + \text{sinc}(2\pi(x-5))$$

の回帰問題の適用例を示す。この関数は、第1項が主な特性を表し、第2項は外乱のように寄与する。図5は、上式にノイズを加えられたデータを用いてノンパラメトリックな異分散回帰学習<sup>[LSC05]</sup>を行った例である。また図6は、 $f(x) = \beta_1 \sin x + \beta_2 \cos x + \beta_3 \cdot 1$ を事前知識として与えセミパラメトリックな異分散回帰学習を行った例である。図5に比べ、データの密度が高い部分はタイトで、低い部分は分散が大きいモデルが得られている。これらから分かるように、完全でなくても適切な事前知識を利用したセミパラメトリック学習が、より忠実にデータの性質を表すモデルの獲得に有用である事が分かる。

ここでは単に回帰を用いて説明したが、本研究ではこれを確率的状態空間モデルへと拡張し、これを用い、DBNs

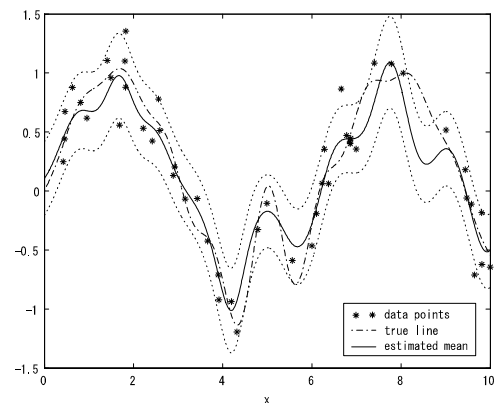


図5. ノンパラメトリック学習結果

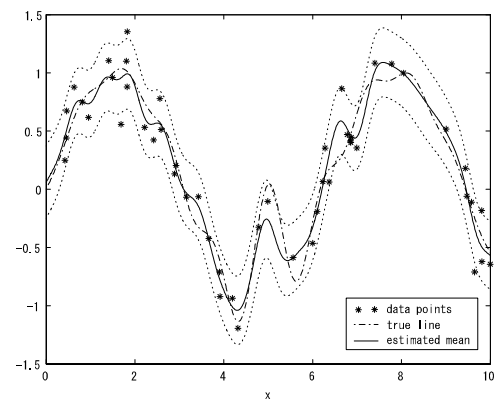


図6. セミパラメトリック学習結果

を用いた異常診断と同様，確率的推論による診断手法を適用し，工学的知識と観測データの両特性を反映した故障診断を実現する．更に将来的には，次の研究課題を同時に遂行し，最終的に図7に示すような枠組みの構築を目指している．

1. 統計的予測に基づく異常変数の選択
2. 工学オントロジーを利用した宇宙機診断知識の体系的記述

1.では，故障診断に重要なシステム要因を統計的予測に基づいて絞り込む．そして絞り込まれた範囲に関連する工学的知識を用いてセミパラメトリック学習により診断モデルを獲得し，このモデルを用いた確率的推論により診断を実行する．この際，計算機により自動的に必要な工学的知識が利用可能となるように，事前に体系的に記述しておく(2.)．

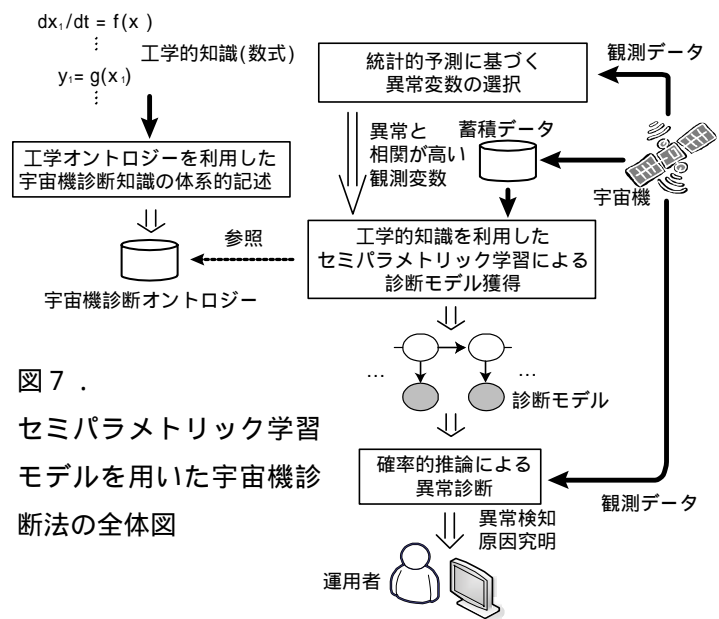


図7. セミパラメトリック学習モデルを用いた宇宙機診断法の全体図

#### 4. おわりに

本稿では，工学的知識と観測データの両特性を利用した診断を行う枠組みとして，セミパラメトリック学習モデルを用いた宇宙機診断法を提案し，その動機や将来構想を中心に述べた．今後解決すべき課題は多いが，これらを解決して統合する事で，宇宙機の故障診断技術に対する高い要求にこたえる診断システムの実現が期待される．

#### 参考文献

- [WM96] B. C. Williams, P. P. Nayak "A Model-Based Approach to Reactive Self-Configuring Systems", in Proc. of the 13<sup>th</sup> National Conf. on Artificial Intelligence and 8<sup>th</sup> Innovative Applications of Artificial Intelligence Conf., 1996
- [NHCM01] N. Nishigori, M. Hashimoto, A. Choki, M. Mizutani "Fully Automatic and Operator-less Anomaly Detecting Ground Support System for Mars Probe 'NOZOMI'", in Proc. of the 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space(i-SAIRAS01), 2001
- [DWH+04] R. Dearden, et al. "Real-time Fault Detection and Situational Awareness for Rovers: Report on the Mars Technology Program Task", in Proc. of IEEE Aerospace Conference, March 2004
- [河原 06] 河原吉伸, 矢入健久, 町田和雄 "Dynamic Bayesian Networks を用いた宇宙機異常診断法" 人工知能学会論文誌, Vol.21, No.1, 2006
- [河原 05] 河原吉伸, 矢入健久, 町田和雄 "知識とデータ学習の融合アプローチによる宇宙機異常診断法", 第49回宇宙科学技術連合講演会 2E13, 2005, 広島
- [KYM06] Y. Kawahara, T. Yairi, K. Machida "Diagnosis Method for Spacecraft Using Dynamic Bayesian Networks", in Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space(i-SAIRAS05), Munchen, 2005
- [LSC05] Q. V. Le, A. J. Smola, S. Canu "Heteroscedastic Gaussian Process Regression", in Proc. of the 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on Machine Learning(ICML), 2005