

Resource制約条件下のプラント診断手法に関する研究

A Study on Plant Diagnostic Technique under Resource-Bounded Conditions

○竹井修輔、北村正晴

○Shusuke TAKEI, Masaharu KITAMURA

東北大

Department of Quantum Science and Energy Engineering

Tohoku University

keywords: プラント診断(Plant Diagnosis), 記憶ベース推論(Memory-Based-Reasoning, MBR),
リソース制約(Resource Bounded), 実時間探索アルゴリズム(Realtime Search Algorithm)

1 緒言

現在原子力プラントをはじめとする大規模プラントの多くでは、安全性・稼働率向上のため通常時の運転・管理の面において操作の自動化が進められている。このような自動化は運転員への無用な負担を減らし人的過誤の発生を未然に防止するものと期待されている。しかし異常時における原因事象診断及びそれらへの対処方策の策定については、従来から多種多様な手法の研究がなされてきているものの、実装にまでは至っていないフィールドも少なくない。特に故障確率は低くとも万一の事故時の災害レベルが大きい、いわゆるハイリスクシステムにおいてその傾向は大きい。この実用化における困難の原因は単一ではなく、運転員の支援という作業の本質まで立ち戻って考えるべき多くの因子を含んでいる。(1)センサー故障と機器故障の識別、(2)多重故障、なかでも待機系の latent failure への対応、(3)運転員の mind set や各種バイアスへの対応、(4)未経験事象対応、(5)インタフェース知能化に起因するブラックボックス化回

避、(6)教育訓練の抜本的見直しなど多くの課題がこれまでも指摘されており[1,2]、それぞれを対象とした技術開発も試みられているが[1,3,4]、これらに加えて、問題解決のための推論時において情報収集時間・判断時間・得られる情報の種類・可能な操作などの点において様々な制約(リソース制約)があることも大きな困難のひとつである[5]。この観点から従来の研究を見直した場合、それらの多くは準静的なデータを扱う人工知能技術に基盤をおいており、リソース制約下での推論、問題解決が要請される状況における運転員支援のシステムの技術基盤として適切なものとはいえないと考える。

本研究では以上のような現状認識に基づいて、様々なリソース制約に対応する診断システムについて考察を試みる。本研究プロジェクトで開発を目指す運転員システムは、信頼性や性能の向上、信憑性情報の提供、説明機能の実現などに力点を置く立場から多数の実時間診断志向型アルゴリズムを統合したアーキテクチャを基本枠組みとして構築されるが[4]、本発表では特にその重要な構

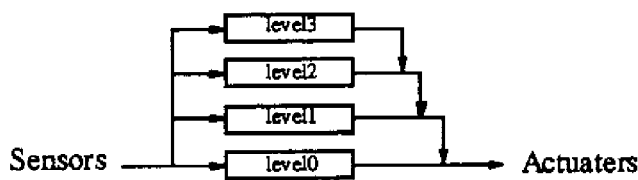


図1 サブサンプリングアーキテクチャ (SSA)

成要素として記憶ベース推論を取り上げ、その有効性を調べた。ここでは具体的対象として原子力プラントをとりあげているが、同様の技術はその他の複雑な機械システムにおいても応用可能なものである。

2 リソース制約と実時間処理

リソース制約

大規模機械システムにおける異常事象診断を考えた場合、以下のような様々な制約が支配的になる状況が存在する。

- 1) 情報収集時間の制約：明確に原因を絞り込んだ結論を得るのに十分な情報が得られていない段階でも、要請に応じてその条件下で合理的な診断を行うことが要求される。
- 2) 判断時間の制約：診断確定の対応操作に十分な時間的余裕を与えるためにも、運転員に心理的余裕を与えるためにも、診断作業自体に消費される時間はなるべく短いことが一般には望ましい。
- 3) 情報自体の制約：センサ故障時において限られた種類の信号から判断する必要に迫られることがある。

等の制約が加わる。更に診断後の対応操作に際しても、状況により利用できない機器・システムが存在する一方で、緊急時にはある機器を本来の設置目的以外への転用をあえて行うこともありうるなど、様々な制約条件が加わる。

このようなリソース制約の状況で推論を行う場合、状態が推論と無関係に動的に変化するの

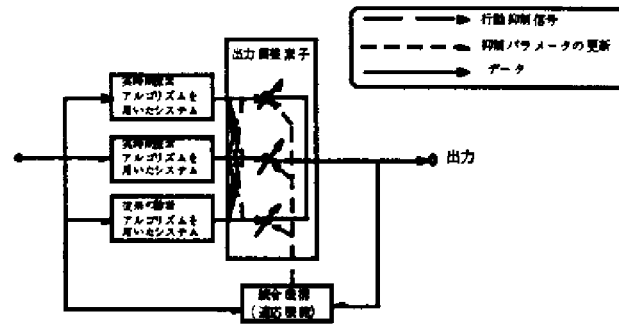


図2 実時間診断機構のイメージ

推論実行中においても新しく得られた情報を推論機構が逐次的に獲得可能であることが望まれる。また異常事象発生後の対処を考えると、推論機構は中断が可能で、それまでの探索時間に対応した精度の解を得ることが望まれる。一方でこれらの要請に応えるに際しては、不確実な情報の提供は無用の混乱やストレスの原因となるので、提供情報の意味的な内容については十分な配慮が必要である。またこの場合、各時刻における回答は「完全な」ものではないためその後の事象の予見が本質的に必要となる。特に予想される最善・最悪の状態を予見することはその後の対処においてきわめて重要となる。

実時間処理に適した統合機構

リソース制約対応型の診断機構を構築する際には、各手法には長所と短所（処理速度、頑健性、精度など）があるため、信頼性の向上のため複数の診断エージェントの併用が求められる。実時間処理における複数手法の統合については、サブサンプリング・アーキテクチャ (SSA) を応用した機構を用いることにより分散協調的に統合する方式がよく知られている (図1)。周知のように Brooksが提唱したSSAは、移動ロボットの制御系の構築技術として提案されたものである[6]。従来のロボットでは全体の処理は観測→モデリング→プランニング→実行という直線的な手続きで行なわれている。この様な枠組みでは、環境のモデリングに多大な計算時間を要し、ロボットの動きが非常に緩慢となる。これに対しSSAでは、高度な処理を行う上位レベルの行動 (例：地図作成) とよ

り単純な処理（例：障害物回避）が並列に機能し、上位レベルが下位レベルを抑制(Subsume)することにより制御を行う（図2）。各レベルのタスクは直接センサから情報を受け取り、並列に処理をすすめるため従来の方式よりも実時間性に優れている。本研究プロジェクトにおいて開発を目指している診断機構においてはこの方法をそのまま踏襲することはできないが、多数のエージェントの自律的協調と目的合理性のある動作の実現という意味で同様の考え方に立った機構の実現が望まれる。

実時間探索アルゴリズム

従来の人工知能システムでは、実際には存在するリソース制約を考慮せず準静的なデータを扱うことが多かった。これに対しここで推論エンジンとして用いられる実時間探索アルゴリズムには

- ・（ある程度の質を犠牲にした）高速な探索
 - ・時間制限内にできる限り良い解を得る
 - ・中断が可能で、それまでの探索時間に対応した精度の解を得る（anytimeアルゴリズム[7]）
- といったことが特に求められる。

ルールベースのアルゴリズム（エキスパートシステム等）では通常if-then型のルールを蓄えた知識ベースを構築し、ルールを何段にも連鎖させる多段推論を行っている。このような手法を実時間探索アルゴリズムに用いた場合、答を出すための時間が予め設定できなかつたり、推論途中で結論を出せないため実時間探索アルゴリズムにはあまり適していないので、これを用いる場合にはDELTA-MINアルゴリズムの様に実時間処理に有効な様に

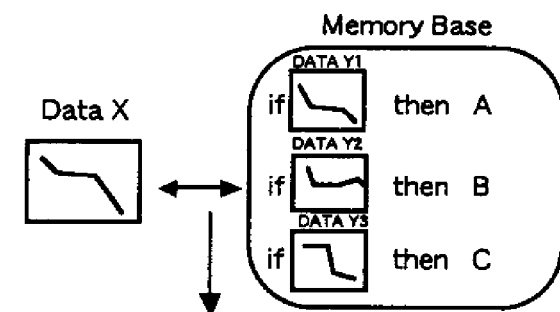


図3 記憶ベース推論

修正が必要となる[8]。

これに対し多段推論を行わないアルゴリズムとしては、記憶ベース推論(Memory Based Reasoning : MBR)等が挙げられる[9]。MBRでは、知識ベースとして問題と回答のペアを大量にデータベースに蓄えておき、新たな質問にはデータベース内から最も類似した事例を検索し、その類似事例の回答をそのまま質問の回答としている（図3）。このため、

- ・エキスパートから知識を引き出す必要がないため知識獲得が容易。
 - ・ルールが多段に連結することなく、1段しか適用されない。
 - ・記憶ベースにない回答を生成する能力はない。
- といった特徴をMBRは有するとされている。

MBRを用いる場合注意しなければならないのは、MBRは質問と知識のマッチングのみによって推論を行うため、類似度の決定方法が回答に大きな影響を与えることである。

質問信号と回答の類似度は

$$\text{Similarity}(u, v) = \sum_i w(a_i, c_u) f(u_i, v_i)$$

但し、

- u: 訓練事例
 - v: テスト事例（質問）
 - a_i : i番目の特徴
 - c_u : 訓練事例uの属するカテゴリ
- $$f(x, y) = \begin{cases} 1 & (\text{if } x=y) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

の用にマッチングの際に一致した特徴の重み値を足しあわせることで得られる。各特徴とカテゴリ間の重み値wの決定方法としては人間が専門知識を考慮して決める方法や条件付き確率を基にした方法などがある。MBRは推論構造が非常に単純であり、高速な探索がおこなえる。また探索時間に応じた解を得ることも可能であり、本研究で実現を目的とする実時間アルゴリズムの要素技術として有望な特性を持っていると考える。なお、支援の対象とするプラント運転員は、豊かな経験と高

度の知識を持ち、かつクルーとして互いに情報交換を行いながら問題解決できる環境におかれている。したがって支援システムからの提供情報は必ずしも最終的な正解である必要はなく、mind setや心理的バイアスからの解放をうながすヒントだけでも貴重な情報となりうること、MBRによる提供情報は、もし適切になされるならばこのような目的にも活用可能であることを指摘しておく。

3 原子力プラント異常診断への記憶ベース推論の適用

記憶ベース推論のデータベース構築において、評価には実データを利用することが最も理想的だが、対象とした異常のほとんどが実際の原子力プラントで試験的に発生させることは難しい。一方近年十分な精度をもつシミュレーションコードが利用可能となっている。このため本研究においては3ループ型PWRシミュレーションコードによる異常時過渡応答データを計装信号データとして用いた。対象とする異常事象としては、

- a 蒸気発生器伝熱管破損
- b 制御棒連続引き抜き
- c タービン制御弁誤開
- d タービン制御弁誤閉
- e 給水流量部分喪失
- f 復水器循環水部分喪失

の6種を用いた。これらの異常事象は推論中に状態の遷移が比較的ゆるやかにおこるため、手法の評価には適している。瞬間的、突発的な異常事象への対応は、診断システムの機能拡充よりはむしろ予兆監視技法の開発導入による、予測保全的な技術に力点をおいて考える方が現実的である。本研究で選択している事象群はその意味で妥当なものと考えている。

データベース構築用データとしては、これまでに進めてきた診断技法の開発経験に基づいて、過渡応答データを各信号について、最小値と最大値を用いてその間を5等分することにより離散化した。

またサンプリング時間は10秒で、異常発生時から240秒間のデータを用いた。検証用データとしては、構築用データにその分散の5%を最大値とする一様乱数を付加することにより摂動データを作成した後、同様に離散化した。このデータを用い、異常発生時から情報収集の時間を変化させて記憶ベース推論の性能を評価した。

観測信号としてはプラント全体を網羅する様に17種の信号を用いた。類似度計算時における各信号の重みづけは、各信号と異常事象間の重みについての客観的な値を用意できなかったため、同一の値を採用した($w_i=1/17$)。

図4に情報収集時間と異常事象bに対する類似度の変化を示す。異常事象同定はあるカテゴリ(異常事象)がその外のカテゴリより類似度が大きいかどうかにより行うことが可能である。結果を見ると、収集時間が短くてもある程度の事象同定が可能なこと、収集時間が増加するにつれ異常事象b以外の類似度が減少していることから、より精度の高い同定が可能であることがわかる。また他の各事象についても同様の良好な結果が得られた。このことから本記憶ベース推論手法が、着目事例の範囲では診断用実時間アルゴリズムとして高い有効性を持つことが確認された。

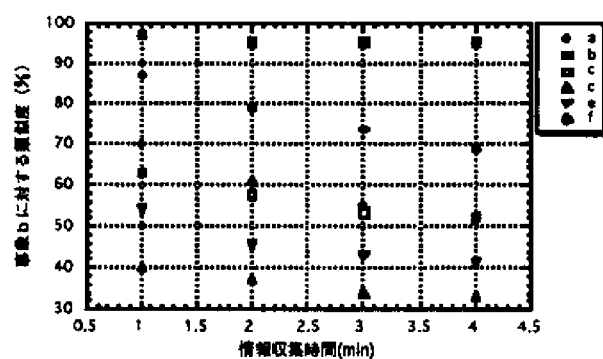


図4 類似度の変化

4 結言

リソース制約対応型プラント診断で求められる実時間探索アルゴリズムの一つとして、記憶ベース推論(MBR)を用いて原子力プラントにおける異

常事象の同定を行い、この手法が有効であることを確認した。今後の研究としては、MBRについては

- ・各信号と異常事象間の適切な重みづけの導入
- ・信号の値の離散化手法による影響の評価
- ・より大きな事例データベースを対象とした場合の性能評価

等を考えている。また、各種の診断アルゴリズムの情報欠落時や情報収集・判断時間制約時の性能評価も必要である。最終的には複数のアルゴリズムのシステムとしての合理的統合を試みる計画である。

参考文献

- [1] N.G.Leveson; Safeware, System Safety and Computers, Addison-Wesley Publ. Co. (1995)
- [2]中島,高野,伊藤; 思考、岩波講座 認知科学 8、(1994)
- [3]Proceedings of the Topical Meeting on Nuclear Power Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies, May 6-9, University Park, PA (1996)
- [4]鷲尾、佐久間、古川、北村; 原子力プラント知的診断における多様性評価基準、日本原子力学会誌 38, pp.1128-1136 (1995)
- [5] 榎木; 意思決定論に基づく異種情報源の融合と協調、計測と制御, 32, pp.229-236 (1993)
- [6] Rodney A. Brooks, "A Robust Layered Control System For A Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation Vol. RA-2, No.1, March 1986, pp14-23, 1986
- [7] Thomas Dean and Mark Boddy, "An Analysis of Time-Dependent Planning", AAAI-88, pp.49-54, 1988
- [8] James G. Carbonell, "DELTA-MIN : A Search-Control Method for Information-Gathering Problems", AAAI-80, pp.124-127, 1980
- [9]毛利隆夫,田中英彦, "記憶に基づく推論による天気予測", 人工知能学会誌, Vol.10, No.5, pp.798-805, 1995