

TM-1174

モデルベース推論による制御
エキスパートシステム
ー火力発電プラント制御への応用ー

末田 直道、神谷 昭基、五嶋 安生 (東芝)

April, 1992

© 1992, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191 ~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

タイトル(和文) : モデルベース推論による制御エキスパートシステム - 火力発電プラント制御への応用 -

(英文) : A Plant Control Expert System Using Model Based Reasoning

- Applying to a Thermal Power Plant -

執筆者 和文 : 末田 直道 神谷 昭基 五嶋 安生
英文 : N. Sueda A. Kamiya Y. Gotoh

要旨(和文)

想定していない状況にも柔軟に対応するために、モデルベース推論技術を応用した火力発電プラント制御エキスパートシステムを開発した。これは、状況に適したプラント操作列を、プラントの構造、特性、物理則などのモデル知識を利用してリアルタイムに生成するものである。本システムは、正常時推論機構と異常時推論機構から成っており、更に異常時推論機構は故障仮説生成部、操作列定部、操作条件生成部、シミュレーション評価部から成っておりモデルベース推論技術をベースに構築されている。また、リアルタイム制御のため高速推論が要求されるため、並列論理型言語K L 1にて並列推論を実装した。実験環境はマルチP S I上に制御部を構築し、G8050上に対象プラントのシミュレータを実装しオンライン結合した。

要旨(英文)

We have developed a trial expert system for a thermal power plant control using model based reasoning in order to cope with unforeseen events flexibly. The system can dynamically generate plant operations using model knowledge, namely, knowledge of a plant structure, plant dynamics and physical rules. The system consists of a normal state inference subsystem and an abnormal state inference subsystem. The abnormal state inference subsystem consists of a failure hypothesis generator, an operation generator, a precondition generator and a simulation verifier which are constructed by using model based reasoning. As the system requires a high speed reasoning, it has been written in K L 1 language in order to infer in parallel. The system has been implemented on Multi-PSI, and connected to a plant simulator implemented on G8050.

1 まえがき

知能工学の分野では、問題のタイプを選択型問題(列挙された解空間を探索により選択する問題)と合成型問題(制約を満足するように解を生成していく問題)の二つに大きく分類している。制御問題は一般に解釈・診断問題を内包した選択型問題であると言われている。つまり、センサ情報などにより現在の状況を解釈・診断し、その状況にあった操作を選択することにより制御するものである。しかし、設計時に想定していた状況以外の状況が発生した場合は、対応出来なくなる。そこで、そのような状況でも柔軟に対応できるように問題領域を広げると、操作をダイナミックに生成する機構が必要になり、制御問題は選択型と合成型の複合問題になる。また、その上に性能的にもリアルタイム性、安定性、安全性が要求されるため非常に難しい問題であるといえる。

一方、火力発電プラント制御においては、種々の高機能化が図られており自動化が進んでいるが、更に上記のような状況にも対応できる柔軟で強靱なシステムが求められている。

本研究は構造、機器特性、物理則などのモデル情報(深い知識)から制御に必要な知識(浅い知識)を生成するモデルベース推論技術の確立を目指すものである。ここでは、火力発電プラント制御への応用について述べ、その適用可能性について考察する。

2 システム概要

システム構成を図1に示す。本システムは、浅い知識に基づいてデータ駆動型の推論を実行する正常時推論機構と、異常時推論機構から成っている。

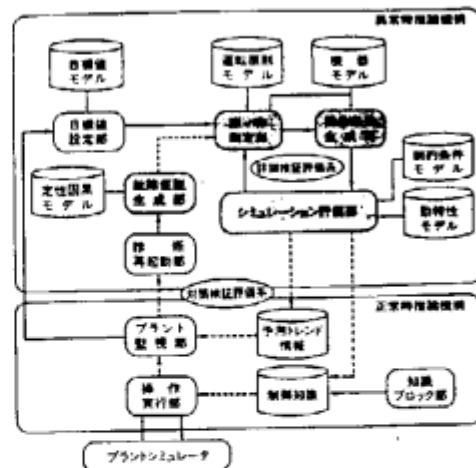


図1. システム機能構成 正常時推論機構と異常時推論機構から成っている。異常時推論機構は状況にあった操作知識を生成する。

Configuration of system functions

2.1 モデル知識

異常時推論機構が用いるモデル知識は以下の4種類である。

(1) 機器モデル 機器モデルは、プラント構成機器毎に定

義されており、構造や機能上の制約条件を記述したものである。図2は給水ポンプの機器モデル表現であり、「スロット：値」の組による記述と階層的記述が可能である。

プラント運転制御においては、プラント構成機器に与えられている制御システムからの要求をモデル化することが重要である。demandスロットはパラメータa_bffに関する要求値が、またgoalスロットにはその充足条件が定義されている。この要求を達成するための各機器の機能は、statesスロットに各機器の取り得る状態として定義され、statusスロットに全ての制約を満たした状態が記述される。各機器に対する可能な操作は、この状態の変更とみなされ、操作によるプロセスへの直接的または間接的な影響は、operationとqualityスロットに定性的に定義される。またプラントの構造に関しては、flow_inとflow_outスロットに入出力機器の接続関係が、また効率的なモデル化を行うために、機器の階層関係がsystemスロットに定義されている。

name (機器名):	a_bfp "給水ポンプA"
demand (要求):	a_bff = 360 [ton/hr] "360t/hの流量"
goal (目標):	a_bff <= capacity(a_bff) "給水ポンプAの容量を超えない"
status (現在の状態):	on
states (取り得る状態):	on ; capacity(a_bff) = 615 [ton/hr] off ; capacity(a_bff) = 0 [ton/hr]
operation (操作):	off → on ; time-lag = 0.1 [hr], d/dt(a_bff) = + "タイムラグ: 0.1h, 流量増加" on → off ; time-lag = 0.1 [hr], d/dt(a_bff) = - "タイムラグ: 0.1h, 流量減少"
quality (定性関係):	d/dt(a_bff) = d/dt(a_bff) "吐出流量と吸込流量の定性変化は等しい"
flow_in (流入先):	(上位概念で定義)
flow_out (流出先):	(上位概念で定義)
system (上位概念):	bfp system(a_bff, a_bff) "a_bffとa_bffのパラメータを介して給水ポンプシステムと関係付けられる"

図2. 機器モデルの表現例 プラント機器ごとに機器仕様、結合関係、現在の状態、要求値などが格納されている。
Example of device-model representation

- (2) 定性因果モデル 定性因果モデルはパラメータ間の定性的な因果関係を表し、プラント構成機器毎に定義されている。例えばボイラーのモデルの一部は以下のようになる。
- $$p_druu \leftarrow +(g_fcv.t_htr.g_ms.p_ms) -(g_htr)$$
- これはパラメータ“p_druu”に対してプラスの影響を与えるパラメータは“g_fcv.t_htr.g_ms.p_ms”で、マイナスの影響を与えるパラメータは“g_htr”であることを示している。
- (3) 動特性モデル 動特性モデルは、プラント制御装置の制御特性、プラント内の物理現象に関するダイナミクスを記述したものであり、プロセスパラメータと時間項からなる関係式により記述される。図3に給水ポンプシステムの流量制御特性をモデル化したブロック図を示す。
- (4) 運転原則モデル 運転原則モデルはプラント運転制御において安全上や効率上守るべき制約条件を記述したものであり、絶対条件と機器選択条件から構成される。

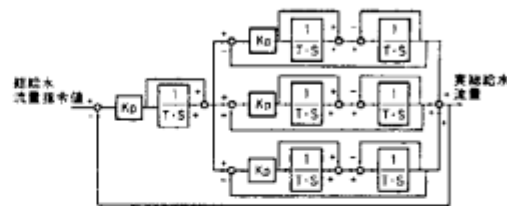


図3. 動特性モデルの例 給水ポンプ系のブロックダイアグラムを示している。3系統のポンプが制御されている。
Example of dynamics model

2.2 正常時推論機構

正常時推論機構は、図1に示すように操作実行部とプラント監視部から成っている。

- (1) 操作実行部 予め知識ベースに格納されたルール型の制御知識（浅い知識）を用いて、プラント状態のリアルタイムの変化に応じたプラント操作を推論・実行する機構である。このようなデータ駆動型の推論を実現するためにトリガアクションと呼ばれる推論メカニズムを採用している。
- (2) プラント監視部 ここでは制御知識で対応出来ない状況を認識し異常時推論機構に制御を移す処理を行う。また、異常時推論機構で推論した操作シーケンスのプラント挙動予測と実際に操作を行った結果のプラント挙動を比較し、もし予測通りの挙動を示さなかった場合、再び異常時推論機構を呼び機構も有している。

2.3 異常時推論機構

本推論機構は、故障箇所を推論する故障仮説生成部、その故障を回避するための操作列を導出する操作同定部、導出された各操作のタイミングを設定する操作条件生成部、それらの操作を行った場合のプラントの挙動を予測・評価するシミュレーション評価部等から成っている。これらは、モデル知識を使い推論している。正常時推論機構は、この生成された制御知識に基づいてプラントに操作する事により発生した異常状態からの回避を行う。

2.3.1 故障仮説生成部 プラント監視部から、監視しているパラメータの正常値からのズレが定性値(+,-)として入力される。故障仮説生成部は、(パラメータ,定性値)の組み合わせで表現された徴候から、定性因果モデルに基づいて(パラメータ,定性値)あるいは(パラメータ,定性値,関係式)の組み合わせで表現される原因候補を推論する。[1]

- (1) 定性伝播部 徴候から定性因果モデルを辿って関係する原因の候補を全て集めて原因候補集合を生成する。
- (2) クラスタリング部 定性伝播部で得られた「徴候と原因候補の集合」の関係に基づいて共通の原因候補を持つ徴候のグループ分けを行なう。1つの徴候のグループの原因候補集合の交わり(クラスターと呼ぶ)がこのグループに

含まれる故障の共通の原因候補であり、1つのグループ分けに対して1つのクラスターの組み合わせが得られる。このクラスターの組み合わせは故障を説明することのできる多重故障の組み合わせに対応する。クラスタリング部は、故障に対する全ての可能なクラスターの組み合わせである多重故障を推論する。図4は二つの故障から単一故障と二重故障の二つのクラスターを生成した事を示している。

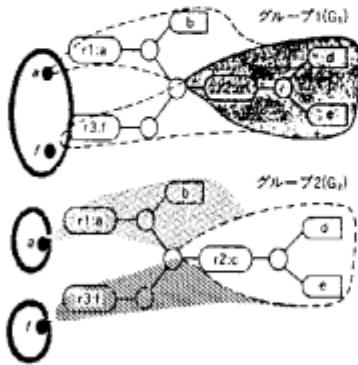


図4. 定性因果モデルの例 二つの故障から定性依拠して故障原因集合を求め、故障の組を説明できる故障原因集合クラスターを生成する。

Example of qualitative causal model

(3) 評価部 得られたクラスターの組み合わせの集合から最も可能性のある原因候補の組み合わせを選ぶ。これは、単一故障優先、故障の確率、重要度などの経験的知識によって選択する。

2.3.2 操作同定部 操作同定部は、機器モデルと運転原則モデルにより規定される全ての制約を満たしたプラント状態（以下では目標状態と呼ぶ）を決定する[2]。一般的に、異常の発生はプラント状態を変化させ、その結果目標状態における制約違反を引き起こす。したがって操作同定部には以下に示す2つの機能が必要である。

- (1) 制約条件の検証機能 ある機器の状態の変化や関連パラメータ値の変化に対して、その機器に関する制約条件、さらに接続関係を介して関連付けられる他の機器の制約条件が満たされているか否かを検証する。
- (2) 目標状態の更新機能 機器に与えられた要求値に対して、この要求値を達成し、かつこの機器の他の制約条件をすべて満たした状態を推論する。これには機器モデルが利用される。この時、運転原則モデルにより状態候補の枝刈りや要求値の下位階層機器への展開方法などが決められる。推論はある機器の処理結果を接続する他の機器に局所的に伝播することにより行なわれる。機器故障に起因する異常の場合は、その故障機器を停止するという状態変化に対して制約条件を検査し、外界異常（冷却海水温度の上昇など）に起因する場合は、これと関連する機器の制約条件を再度検証することにより推論が起動される。ここで制約を充足

できない機器が発見されると、この機器に対して目標状態の更新処理が行われる。最終的に得られたプラントの目標状態と現在の状態の差分から、それを埋めるためのプラント操作が生成される。

2.3.3 操作条件生成部 操作条件生成部は、生成されたプラント操作に対して、機器モデルに基づいて操作の順序付けや操作実行前にチェックすべき条件を生成する[3]。

プラント操作の順序付けは、プラントの設計方針に基づいた次の原則に従い5種類の条件を生成する。

- ・機器の起動操作は、プロセスフロー（例えば水の流れ）に従って入力側の機器から出力側の機器に向かって行なわれる。
 - ・機器の停止操作は、上記と逆の向きに行なわれる。
- (1) 操作前状態を規定する条件：操作の対象機器およびこれと並列に接続された機器の操作前の状態を規定する。
 - (2) 操作順序を規定する条件：プラント操作順序を規定する。
 - (3) プラントの安全性を確認する条件：操作によるプロセス変化は、機器の接続関係を通じて他の機器に影響を及ぼすため隣接機器に対して、この影響が安全範囲内に収まることを確認する。
 - (4) 操作タイミングを規定する条件：プラント運転効率及び安全上、機器の操作はそれが本当に必要になるまで待つ方がよい。本条件はこのような操作タイミングを規定する。
 - (5) 操作の完了を確認する条件：プラント操作を実行した結果状態を規定し、プラント操作の完了を確認する。

これらの条件生成は、プラントの目標状態を機器モデルを利用して解析することにより生成する。すなわち、条件に必要な機器状態は、プラント構造と状態に関する記述から解析する。また操作による影響は、プラント構造、操作によるプロセスへの直接的または間接的な影響、機器毎のローカルな制限値に関する記述から解析を行う。さらに、操作タイミングは、プラント構造、最大出力プロセス量に関する記述から解析できる。

2.3.4 シミュレーション評価部 上記の操作同定部、操作条件生成部は機器モデルを利用して制御知識を生成していた。しかし機器モデルは各機器の静的な情報（静特性）であるため、プロセスの時間特性に関する動特性モデルを用いた制御知識の検証が必要である。ここでは、プラントの動特性モデルを利用して、生成された制御知識を実際にプラントに対して実行した場合のプラント挙動をシミュレーションにより予測し、検証評価を行なう[4]。図5にシミュレーション結果の例を示す。特に、プロセス量が過渡的にその許容最大値や許容最小値の制限値制約に対する制約違反の発生を検出する。検出された制約違反値をその機器に対する新たな要求値とみなして操作同定部にフィードバックし、違反回避操作を生成する。また、この予測結果はプラント監視部に渡され、プラント挙動の監視用データとして利用される。

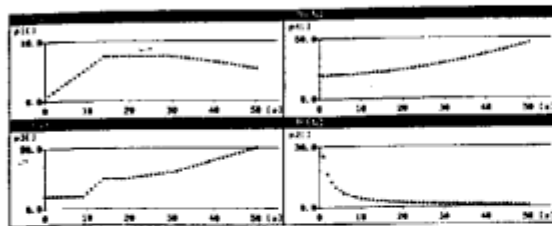


図5. プラント挙動シミュレーションの結果例 生成した操作知識に従ってプラントを操作すると、どのような挙動を示すかを検証し問題がないかを検証する。

Example of plant behavior simulation

3 実験システム

- (1) ハード環境 本システムは並列処理マシンであるマルチP S I上に並列論理型言語K L Iで実装されている。また、火力発電プラントに対しリアルタイムに監視・制御を行う必要があるため、そのシミュレータとしてミニコンピュータG B 0 5 0上に運転員訓練シミュレータを実装しマルチP S Iとオンラインで接続した。(口絵写真)
- (2) モデル環境 実験モデルは給水系、復水系、循環水系、燃料系、コントローラを範囲とし主要機器約50に対してモデル化した。これは実際の火力発電プラントの1/5程度の規模に相当する。
- (3) 実験方法 実験はプラントシミュレータから発生させる故障に対する制御知識を事前に制御知識ベースから取り除くことにより想定外の状況を作りだし、システムが生成した制御知識によって制御した結果、プラントが正常な挙動に移行するかを観察し評価する。また、生成した知識と取り除いた知識を比較して、誤り、欠落、冗長性を評価する。

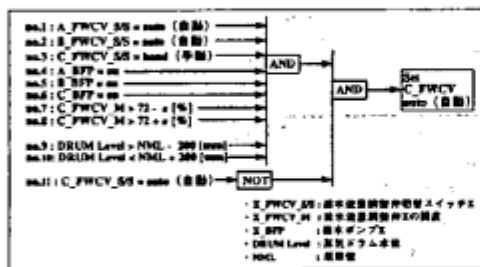


図6. 生成知識例 「記述された操作条件がすべて成立したら、機器“C_FWCV”をautoモードにする」という知識を示している。

Example of generated operation knowledge

図6に本システムで生成した知識の一例を示す。

- (4) 実験評価 故障に対して対策操作の結果、プラントが正常な挙動に移行できた割合は約80%である。また、生成した知識と取り除いた知識の整合率は約65%であった。これは、故障に対処する知識は生成できたが、未だ安全性に対する操作条件などの考慮が不十分であることを示している。

4 あとがき

本研究によりモデルベース推論のプラットフォームを示す事ができた。今後は、上記評価に基づいて、モデルの詳細化、推論機構の洗練化を進めるとともに、既存の経験知識による推論技術、数値シミュレーション技術などの融合を計って行きたい。

謝 辞

本研究は、新世代コンピュータ技術開発機構(I C O T)からの委託テーマのとして行ったものである。この研究の機会をいただいたI C O T第七研究室新田室長をはじめ関係者に感謝の意を表するしだいである。

【文献】

- [1] 岩政、他：制御用ES—定性モデルによる診断機構—、第41回情報処理全国大会、pp.(2-13)~(2-14)、(1990)
- [2] 末田、他：深い知識に基づく制御用ES、東芝レビュー、44、8、pp.665~668、(1989)
- [3] 小沼、他：深い知識に基づく制御用ES—操作条件生成機構の開発—、第12回知能システムシンポジウム、pp.12~18、(1990)
- [4] Suzuki, et. al: Plant Control Expert System Coping With Unforeseen Events-Model Based Reasoning Using Fuzzy Qualitative Reasoning, IEA/EAI'90, pp.431-439, (1990)