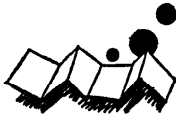


解説

制御分野におけるエキスパートシステム†



船橋 誠壽†† 増位 庄一††

1. ま え が き

制御システムの基本構造は、図-1 に示すように、制御対象と、この運用主体である人間、人間と制御対象との間に介在する制御系から成る。制御系は運用主体の指示どおりに制御対象を動作させるべく、センサ情報を変換しアクチュエータを介して制御対象に作用する。同時に、運用主体に制御対象および自らの状況を報知する。システム論的見地からすれば、制御システムの実現にあたっては、システムの基本機能ともいべき「目標達成」「維持管理」「自己革新」の諸レベルをシステムの構成要素のどこに、どのような形で埋めこんでおくべきかを決定することが重要課題であるが、これまでの制御技術の関心事は、制御系における情報変換機能の実現手段が hard-wired なロジックから計算機へ移行した一時期を除いて、「目標達成」をいかに実現するかにあったといっても過言ではない¹⁾。

制御分野においても、知識処理の一つの応用として、エキスパートシステム実現の試みが活発化しているが、これには、二つの底流が存在するように思われる。第1は、これまでの制御技術の目指す「目標達成」機能の実現の拠り所としてきた制御理論では扱うことの難しかった問題への接近を与え得るという期待である。第2は、制御対象の大規模化にともなって、これまでの「目標達成」という単眼的視点から複眼的視点へと発展せざるを得なくなり、この理論的拠点として知識処理を位置づけていこうとする流れ^{2),3)}である。後者に関しては、その全体を包括的に述べるのはいまだ困難な状況にあること、問題の一部として切り出されている診断については本特集において別途解説されていることから、本解説では、前者の「目標達成」機能の実現を中心として、これまでの伝統的な制御技術がどのような問題を内包していたか、これに対して具

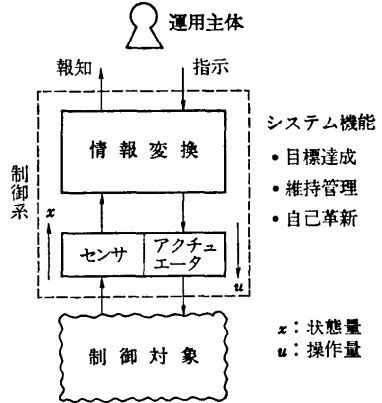


図-1 制御システムの基本的構成

体的にどんな試みが実際のシステムにおいてなされているか、今後どのような方向に進むべきか、述べてみたい。

2. 伝統的な制御技術とその問題点

「目標達成」機能を実現するための理論的な拠り所である制御理論の枠組を述べ、どのような問題点があるか指摘する。

制御理論の基本的枠組は、制御対象の時間的挙動を表す数式モデル

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t), u(t)) \tag{1}$$

ここに、 $x(t)$: 制御対象の状態

$u(t)$: 制御対象への操作量

を前提とし、「目標達成」の度合を示す x, u の汎関数値 $I(x(s), u(s) | s \in T)$ (T は評価時間の区間、 I は順序集合の要素) の上界を与えるような関数構造 (制御則あるいは制御論理と呼ぶ)

$$u(t) = g(x(\sigma), u(\sigma) | \sigma \leq t) \tag{2}$$

を誘導しようとするものである。汎関数の設定は制御の目標に依存する。たとえば、制御対象の振動特性を問題とするならば、周波数領域への変換が汎関数の一

† Expert Systems in Systems Control by Motohisa FUNABASHI and Shoichi MASUI (Systems Development Laboratory, Hitachi, Ltd.).

†† (株)日立製作所システム開発研究所

部として用いられるであろうし、希望する状態 $x^*(s)$ ($s \in T$) に制御対象を追従させたいのであれば、 $I = \int_T h(x^*(s) - x(s)) ds$ が用いられるであろう。目標が複数個ある場合には、非劣な汎関数ベクトル値集合を求め、最終的な選択はシステム運用主体に委ねることも考えられよう。

しかし、現実には関数構造 g を具体的に与え得るのは、(1)式が線形であり、さらに、汎関数 I の特殊なクラスに限られる。制御理論の工学的貢献は、制御対象の状態 x' や操作量 u が多次元的であっても、あるいは、状態 x が直接センシングできない場合でも、対象構造と制御結果の評価観点とが線形的である範囲内において、合理的な制御方法を誘導可能とした点であり、これによって、多数の操作端の存在のために人間では不可能であった制御を実現可能ならしめた点であろう。この典型的な例としては、多関節系のロボットや電力系統などの制御をあげることができる⁴⁾。しかし、対象構造を非線形としてとらえざるを得ない場合、あるいは、制御結果の満足度を厳しく追求する場合には、このような理論枠組を適用することは困難である。このために、非線形的な系に対する制御理論⁵⁾、あるいは、制御の実行過程において、局所的な線形モデルを生成し、これに基づいて制御の関数構造 g を逐次求めて制御を実行するという適応制御理論⁶⁾の構築がさかんである。しかし、非線形系への理論枠組の拡大は、拡大すべき領域が広すぎてその成果をなかなか享受できないという問題がある。一方、適応制御理論的な接近においては、カタストロフィックに対象の挙動が変化する場合、局所的な対象認識だけでは不十分で多重構造的な対象認識が必要であるにもかかわらず、その基本的な枠組を設定することがいまだ難しい状況にあるという問題がある。

さらに深刻な問題は、制御理論の基本枠組が(1)式のごとき数式モデルを前提としているため、技術の大衆化といった時代傾向にそぐわなくなっている点である。過去においては、制御対象そのものがきわめて高い価値を持ち、そのために制御系の構築にあたって、さまざまな専門家を長期間にわたって投入し、基礎的な実験を積み上げて数式モデルを開発、制御理論を組みあげてきた。しかし、今日では、このような努力によっても依然として解決できず、人間に対応を委ねているか、あるいは、従来の接近では計算機化のための開発投資コストが見合わないため、現状では人間の介入が必須である「維持管理」「自己革新」機能に

加えて「目標達成」機能を人間に委ねているかのいずれかであり、場合の数としては後者が圧倒的に多い。

「目標達成」機能が計算機化できないという問題は、技術の大衆化への不適合とはいえないが、多くの場合その根源は同じであろう。なぜなら、制御の原則は、対象の特性を認識し、この認識に基づいて最良の手を打つことであるが、認識形式を数式モデル(1)のように行うことは、多大なコストを要することになったり、たとえモデル化できたとしても、それは実現象のごく一部分しか表しておらず、最良の手の選択になんら役立たないことがしばしばあるからである。

以上の論議は、制御対象の状態 x が連続的事象の場合(連続のプロセス)に対するものである。状態 x が離散的事象であり、また事象駆動的に状態が遷移する制御対象(離散のプロセス)についても言及して置く。このような制御対象についての制御の基本的枠組は、連続のプロセスの場合とまったく同じである。しかし、この場合には、問題が組合せの性質を有するために、制御理論の形式的誘導はほとんど不可能となる。このため、連続のプロセスに関して述べたような理論体系化はほとんどなされていないのが現状である。このような状況の下では、現場の運用ノウハウをいかに効率よく計算機化するかが課題となる。この運用ノウハウは、局所的に見れば、離散的な値をとる対象状態の組合せで表すことができるため、連続のプロセスにおけるような複雑さはない。しかし、その正当性の検証の問題が、現象が離散的であるために重要化する。

3. 制御エキスパートシステムの実例

制御のためのエキスパートシステム実現の期待は、連続のプロセスにおいては(1)制御対象の特性表現である数式モデルの作成困難さの回避、(2)たとえ、数式モデル化が可能であったとしても、非線形的な対象構造、あるいは評価規範に帰因する形式論的な制御理論の誘導困難さの回避にあり、(3)離散のプロセスにおいては、エキスパートノウハウの記述の容易化、正確化にあることは前章で述べたとおりである。

期待(1)は、メンタル・モデルの獲得であり、さらに、制御分野においては制御理論を誘導するのに有効でなければならないという制約がつく。知識工学分野におけるメンタル・モデルの研究は最近注目をうけ始めている⁷⁾が、制御分野においてはその必然性のために比較的以前から試行がなされている。ここでは焼却炉の制御系開発での実例⁸⁾を紹介する。期待(2)は、

伝統的な知識とエキスパートノウハウとの融合を要求する。制御分野においては、Linguistic Control と呼ばれるエキスパートシステム的な考えがあったが、論理型処理に制御対象の連続事象性を適合させるために Fuzzy 理論をベースとして Fuzzy 制御として具体展開がなされてきた⁹⁾。ここでは、期待(2)の持つ要求に応じた例として、Fuzzy 制御を発展させた列車自動運転制御系への適用¹⁰⁾を紹介する。期待(3)は、知識工学的なプログラミング・スタイルにより、エキスパートノウハウの記述の容易化が達成されることは自明に近いが、論理型処理の世界であるために、知識の整合化、検証をはかることがとくに重要となる。この点に十分に意を払い、実時間制御の分野ではおそらく初めて知識工学的処理を実用した鉄鋼ヤード制御の事例¹¹⁾を紹介する。

3.1 メンタル・モデル獲得—焼却炉制御における事例(形態的弛緩法)

(1) 問題の概要

制御対象は都市ごみ用焼却炉である。炉の概要を図-2に示す。ホッパから投入されたごみは、揺動運動する火格子の上をすべり落ちてゆく。火格子の下から

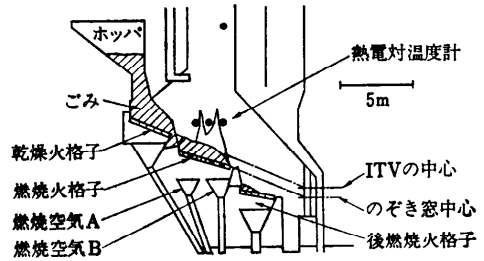


図-2 焼却炉の概略構成

燃焼空気を送り、後燃焼火格子から落下する時点ではごみは灰になっている必要がある。この炉における制御上の課題は、焼却物の燃焼特性(ごみ中の水分、可燃分、灰分の割合と発熱量)と流動特性が時間とともに急速に変化するため、安定した燃焼状態を維持することが難しいという点であり、制御論理を組み上げる上で操作性のよい対象モデルをいかに作成するかという点にかかっている。

(2) 制御対象のモデリング

物理数学的な見地からの対象記述がほとんどできないために、焼却炉運転エキスパートと制御技術者とによって制御対象のモデリングが行われた。ここにおけ

組合せ番号	外乱		操作量								状態量				評価量		総合判定				
	D ₁	D ₂	判定	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		判定	X ₁	X ₂		X ₃	X ₄	V ₁	V ₂
	レベル I	レベル II		レベル I	レベル II	レベル I	レベル II	レベル I	レベル II	レベル I	レベル II	レベル I	レベル II		レベル I	レベル II		レベル I	レベル II		
1-1	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	○	×	×	○	×	×
2-1	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	○	○	○	○	○	○
3-1	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○										
4-1	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○										
1-2	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×										
2-2	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×										
3-2	✓	✓	○	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×										

外乱
 D₁: 塵芥カロリー
 D₂: 塵芥含水率
 評価量
 V₁: 燃焼の強さ
 V₂: 流動の安定性

操作量
 C₁: 総空気量
 C₂: 乾燥火格子速度
 C₃: 燃焼火格子速度
 C₄: 燃焼空気量分布
 C₅: 冷却空気量

状態量
 X₁: 着火点
 X₂: 塵芥滞留状況
 X₃: 炉火部温度
 X₄: 炉工部温度

図-3 形態的弛緩法による分析

る基本的考えは、外乱、操作量、状態量、評価量を概念的にレベル分けを行い、外乱、操作量のすべての組合せについて、その結果がどうなるかということを図-3のようにリストアップしてゆくというものである(ここでは、状態量は外乱、操作量のみによって決まり、過去の状態量には依存しないと仮定された)。この場合には、外乱・操作量に関してレベルの変数が7個あり、全部で $2^7=128$ 個の組合せとなった。

外乱・操作量の組合せに応じた状態量を求めるのに先立って、まずあり得ない組合せが除外された。特定の外乱に対して、明らかに従うべき操作量というものが、このような組合せも検討の範囲から除外された。残った組合せに対して状態量の推定、さらには、評価が行われた。状態量の推定では、検討の初段階でできるだけ自明な組合せに対する検討が行われた。たとえば、明らかに燃焼が持続しない組合せとか、燃焼が激しすぎる組合せが該当する。また、過去の運転経験のある代表的な組合せもこの範疇に入る。自明な組合せに対する検討が行われた後、これらの結果を概念的に内挿するかたちで状態量の推定が行われた。

状態量の推定検討が終了した後、状態量に対する評価が行われ、好ましいと思われる操作量の組合せが図-4のように決定された。さらに、この結果を議論することにより図-5を最終的な結論として得、この結果に基づいて具体的な制御の論理が構築された。

(3) 適用結果

実プラントに適用され、炉温が目標値の範囲内に入っていること、目標焼却量の達成度が90%以上となったこと、回収熱量のばらつきも10%以下と安定していること、燃え残りのごみは発生しないことを検証

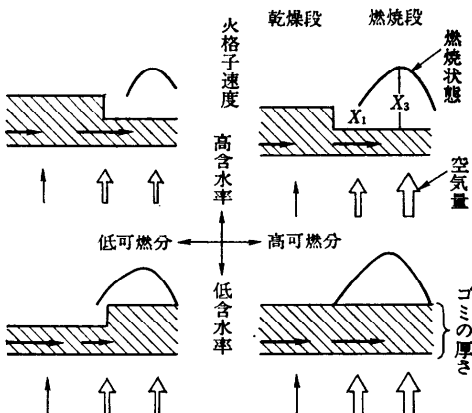


図-4 形態的弛緩法によるメンタル・モデル(改良前)

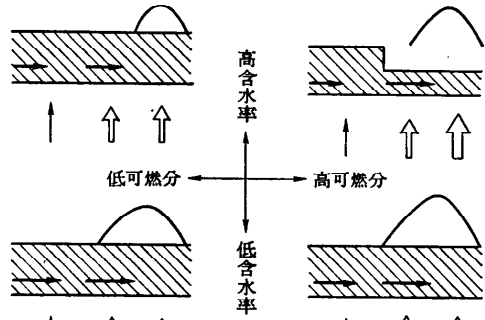


図-5 形態的弛緩法によるメンタル・モデル(改良後)

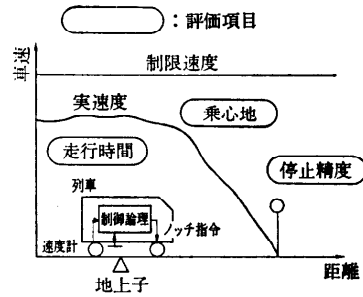


図-6 列車定位置制御問題

しており、モデリングの適切さを窺い知ることができる。

(4) 論評

制御対象のとり得る状態の数が比較的少ない範囲で検討できたということはあるが、エキスパートノウハウに基づくモデルの誘導という面で一つの基本的な枠組を与えているように思われる。形態的分析における知識の抽出順序、さらに、解析で得た知識のブラッシュアップ(図-4から図-5への改善)が本事例のポイントであろう。組合せの場合数の多い問題、再帰的に状態が定まるような問題など、今後、方法論的に充実すべき課題は多い。

3.2 物理数学的な知識とエキスパートノウハウとの融合—列車自動運転制御における事例(予見 Fuzzy 制御)

(1) 問題の概要

列車が特定の地点を通過したことを示す地点情報と速度発電機による一定サンプリング時間内の走行距離とからブレーキの制御を行い、列車を次駅の所定の目標位置に停止させる制御である。ここにおける操作量は、最近の車両で採用されている離散的な減速度に対

応したブレーキ・ノッチである(図-6)。

制御上の課題は、ブレーキ特性に空気圧、パッドの摩擦係数などの変動により $\pm 30\%$ 程度の誤差があり、さらに、路線勾配条件といった外乱の存在、センシングデータの精度の低位性などの悪環境下で、所定の停止目標位置に列車をいかにうまく(高精度、良好な乗り心地)停止させるかということである。

(2) 制御論理の構築

ここで用いられたエキスパートノウハウは、現場のエキスパートである運転士から直接得たものではない。開発者たちはFuzzy制御的な接近をする以前から、列車走行制御系の開発に従事していた。彼らは従来の制御理論に立脚して制御系を構成するなかで、理想的な制御方法を考えていた。その要約は次のごとくである。

列車が駅の手前に置かれた標識(定位置制御を開始すべき地点であり、以後B地点と呼ぶ)を通過すると定位置停止のためのブレーキをかけ始める。ブレーキ・ノッチを出力し、かつそのノッチが安定している場合には、ブレーキ・ノッチに対する実際の列車の減速度を推定する。さらに、時々刻々以下のことを考えながらブレーキ・ノッチを決定してゆく。

(a) 乗り心地を良くするため: B地点を過ぎ、そのままうまく停止できそうなら、そのノッチを保持する。

(b) 走行時間を短縮し、乗り心地を良くするため: B地点の手前ではブレーキをかけず、B地点を通過すると少しブレーキ・ノッチをかける。

(c) 停止精度を良くするため: B地点を通過し、そのままではうまく停止できないと判断した場合は、 $\pm n$ ノッチ以内で正確に止まれるノッチを選択する。

以上の知識において特徴的な事項は、知識の前提部において将来の状態、あるいは評価に対する予見が入っていることである。列車の運動特性は多少の誤差はあるが物理数学的に記述できる。そこで、前提部評価において、この数式モデルが使用され、さらに「うまく」「正確に」といった修飾語を考慮するためにFuzzy論理が用いられた。

(3) 適用結果

シミュレーションによる評価結果を図-7に示す。ブレーキ特性の変動に対しても停止精度、乗り心地(ノッチ変更回数)両面で良好な結果を得ている。この後、制御の範囲は、駅間自動走行まで拡大され¹²⁾、実車試験においてもシミュレーションと同様な性能を得ている。

(4) 論評

ここで用いられたエキスパートノウハウは、制御系の開発者自身のものである。列車運転への適用の後、まったく同じ知識の枠組、すなわち、知識の前提部に予見を含ませる方法が、コンテナ・クレーンの自動運転に適用された¹³⁾。この場合には実際のオペレータから知識を取得し、これを開発者が制御対象の特性に基づいて吟味し、ルールに翻訳した。実プラントでの実験でも従来の制御論理よりも優れた結果が得られており、制御対象の特性が比較的精緻にわかっている場合の有力な枠組を予見Fuzzy制御は与えているとみな

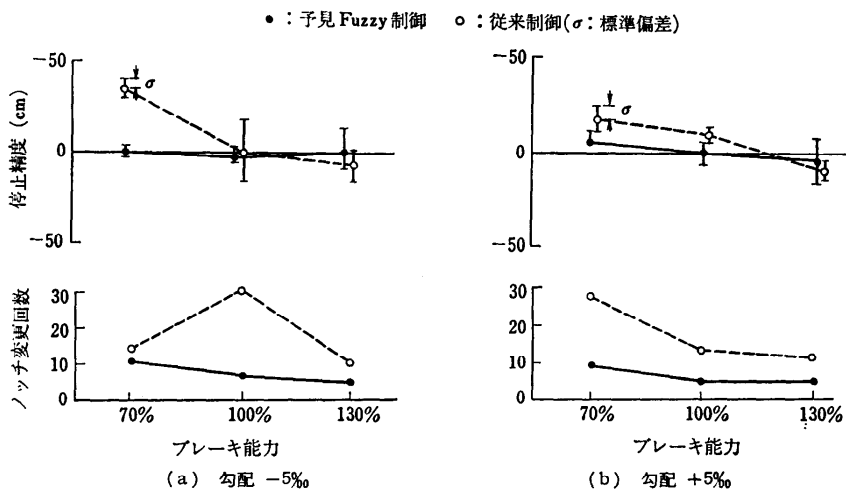


図-7 予見 Fuzzy 制御のシミュレーション結果

(3) 開発結果

作成されたルールは260個である。開発工数は、図-10に示すように、従来の高級言語利用時に比べ1/3に低減できたと推定されている。この主な要因は

(a) システム設計段階で決定されるルールは制御プログラムそのものであり、従来のシステム設計書をもとにしたテーブル設計、処理フロー設計、コーディングといった作業を省略することができる。

(b) プログラム(ルール)がシステム設計段階で高品質化でき、もっとも工数の要する現地デバッグの工数が大幅に低減できた。

ことによると考えられている。

制御対象はこの後増設され、ルール数は528個にまで現在増やされている。

(4) 論評

離散的プロセスを人間が介入しない閉ループで制御する場合には、とくに論理の正当性を十分に事前確認する必要がある。このような場合に対する有力な方法は、ベトリネットに基づくものである¹⁵⁾が、本事例のように対象によってはベトリネット記述が困難なこともある。ルール型記述は、この場合の一つの道を与えるが検証が重要化する。前提部の排他性から検証するという本事例は、有力な方法と思われるが、さらに操作性の高い検証方法を追求してゆく必要がある。定理証明に基づく方法も今後期待されるものといえよう¹⁶⁾。

4. エキスパートシステム構築ツール

制御分野においてもいくつかのエキスパートシステム構築ツールが開発されている。前章で述べた離散的プロセス制御は、SCD¹⁷⁾と呼ぶツールによって実現されており、これは自動倉庫における制御系構築にも用いられている。このほかに、石油精製プラント監視に適用されているPICON、スペースシャトル着陸管制を実現したART、本章で概述するEUREKAなどがある¹⁸⁾。

制御分野におけるエキスパートシステム構築ツールの要件は、(1)制御に特徴的な知識処理、すなわち、制御対象のモデル表現とこれを用いた推論に適した知識の表現形式を備えていること、(2)実時間で動作可能な推論処理性能を有していること、である。ここで

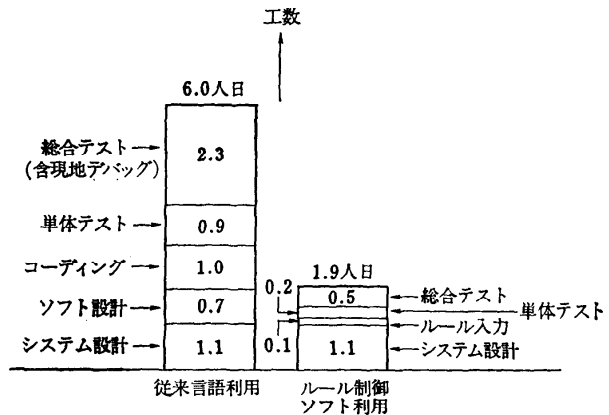


図-10 ソフト開発工数の比較

は、著者らによって開発されたEUREKA^{19),20)}においてこれらの要件をどのように達成しようとしているかを紹介する。EUREKAは、これまでに、大規模浄水場の故障時運転ガイドランス、高炉操作ガイドランスなどの制御問題や、LSI製造工程の不良診断²¹⁾にツールとして用いられている。

4.1 知識の表現形式

図-11はEUREKAが前提としている制御エキスパートの知識処理モデルを表す。エキスパートは、制御対象の現況に関する知識をベースとして推論処理を進める。この知識の中には二つのタイプのものがある。一つは、センサ情報によって規定することができる物対応の知識であり、他の一つは、メンタル・モデルにおいて規定される制御対象の概念的状態を表す知識である。エキスパートは、センサ情報、すなわち物対応の知識から、概念的状態に関する知識を作り出す。この段階は、見方によっては診断に相当するものであり、一時的な知識である仮説を生成し、場合によっては問合せを行って状態推定のための推論を行う。概念的状態が推定できると、次には、操作案を生成し、メンタル・モデルに基づいて制御対象の将来状態を予見する。予見結果は、制御対象の状態に関する知識を多重に表現しているとみなせる。最後に、予見結果を比較評価し、最適な操作案を選択する。

以上のエキスパートの知識処理モデルに基づいて、EUREKAは4個の知識コンポーネントの組合せによる表現形式をとった。制御対象に関する知識は「オブジェクト」によって表すことにした。予見Fuzzy制御での成功にみられるように、物理数学的な知識を利用

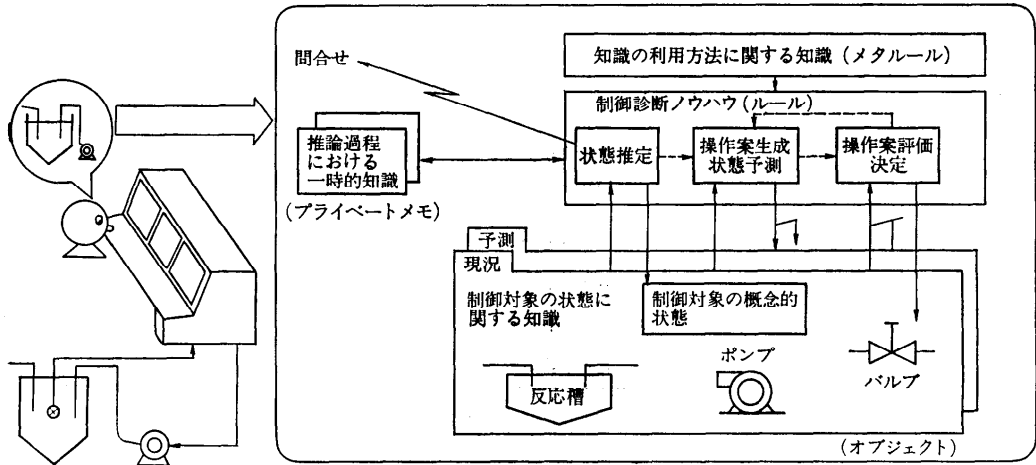


図-11 制御エキスパートの知識処理モデル

することによって質の高い制御を実現することができる。このため、物対応の知識の一部として、対象特性の数式モデルを手続きプログラムで記述できるようにしている。さらに、予見による多重世界を構成できるよう、オブジェクト全体 (オブジェクト・ベース) を多重化して持てるようにした。仮説に代表される一時的知識は、「プライベートメモ」と呼ぶ変数域を含む文字列で表すこととした。文字列として表現する理由は、仮説は一般に構造化が困難であり、オブジェクトとして表現しづらいと考えたからである。状態推定から操作案決定に至るまでの一連の知識は、オブジェクトやプライベートメモを前提部、結論部で記述する「ルール」で表し、さらに、ルールのある部分が段階的に推論処理の対象となってゆくことから、この過程を表現する知識として「メタルール」を導入した。メタルールは、オブジェクトの状態値に応じてルールの推論処理のプライオリティを変更するものである。

4.2 推論処理の高速化方法

推論処理の高速化方法として著名なものに Rete アルゴリズム²³⁾がある。このアルゴリズムの基本的な考え方は、推論処理のなかでもっとも負荷が大きいのは、前提部の成立判定であることに着目し、次の二つの施策をとるものである。(1)ルールの前提部には重複した項目が含まれているので、重複した判定処理を避けるために、前提部全体を弁別ネットワークにより表現する。(2)推論の過程で変化する短期記憶の要素はごく一部に限られるため、ネットワーク中に短期記憶の要素を記憶しておき、変化した要素についてのみ

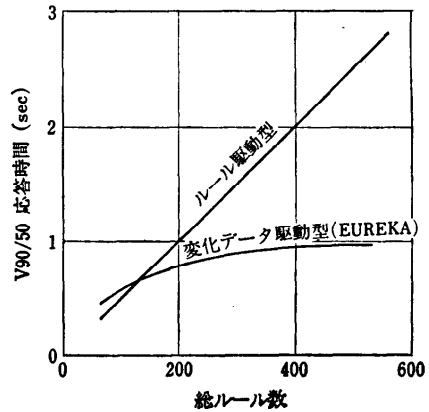


図-12 EUREKA の推論処理性能

ネットワークの上流から項目別の成立状況を調べなおすというデータ駆動型の判定処理を行う。

Rete アルゴリズムの開発によってルール・ベースシステムは実用に近づいたといえるが、ルール記述の複雑な場合、あるいは、ルール総数が大きくなった場合には依然として性能上の問題が残されていた。このため、EUREKA ではルール記述が複雑化 (OR 接合の記述) しても、ネットワークの規模の爆発が回避できるよう階層的なネットワークの表現形式を導入²³⁾し、さらに、ネットワーク内の項目別の判定単位 (ノード) を、その性質に応じて並べかえて、判定処理の最適化を行った²⁴⁾。

実システムにおける知識をモデルとして、性能評価を行った。制御用計算機 HIDIC-V 90/50 (約 2MIPS) による推論処理実行速度は 140~160 ルール/秒であ

り、また、図-12 からルールの総数が大きくなるにしたがって応答性能はルール総数には依存しなくなっていることがわかる。知識の形にもよるが、通常の場合に結論を出すまでの実行ルール数は100以下であるため、秒オーダーの応答性が期待でき、制御における適用範囲も広いと考えられる。

5. む す び

伝統的な制御技術の持つ問題点とエキスパートシステムへの期待、制御分野におけるシステム実現上の課題としてのメンタル・モデリング、物理数学的な知識との融合、知識の正当性の検証に関する事例、およびシステム構築ツールについて述べた。

これまでに述べてきた事項から、今後の課題を以下のように要約して本解説をむすびたい。

(1) 知識の正当性の検証方法：連続的プロセスではFuzzy論理などの導入により、制御対象に関する多重モデル化が実現され、推論結果の安定化が期待される。しかし、離散的プロセスでは、このような接近は困難であり、誤った知識がdrasticな結果を招く危険が高い。正当性検証方法の検討がここで述べたもの以外にも行われている²⁵⁾が、いずれも基礎的な段階にある。

(2) メンタル・モデリング：制御対象のモデル化において、物理数学的知見が援用できない場合には、メンタル・モデリングが必要となってくる。複雑度の比較的低い対象については、ここで紹介した形態的接近が効果的であるが、状態のとりうる個数が増大した場合には、適用困難である。

(3) システム基本機能の総合化：ここでは、制御システムが持つべき三つの基本機能のうち「目標達成」にかかわるエキスパートシステムについて吟味した。本来、制御系は三つの基本機能に関してシステム運用主体を支援し、制御対象の範囲拡大に貢献すべきである。「目標達成」を実現するにあたって必要とした対象モデルが「維持管理」「自己革新」のための対象モデルとどのようにかわり合わせ、その効果性を引き出すかは冒頭にも述べたように今後の大きな課題である。

制御分野においては、その必然性のためにエキスパートシステムの考え方は古くから存在したが、知識工学という枠組で実用化されたものはまだ数少ない。今後、さらに実践を重ねてゆく必要がある。「目標達成」を肩代わりするエキスパートシステムは、単

機能であるために、システム運用主体からみれば一種の「サーバント」である。実践を重ねると同時に、「維持管理」などの機能と融合し、システム運用主体にとっての「パートナー」に成長させてゆく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 船橋：IFAC Congress にみる制御技術の流れ、計測と制御、Vol. 23, No. 11, pp. 966 (1984).
- 2) Rouse, W. B.: Systems Engineering Models of Human-Machine Interaction, Elsevier North Holland, Inc., New York (1980).
- 3) Sheridan, T. B.: Supervisory Control, MIT Industrial Liaison Program Report, 9-72-85, MIT (1985).
- 4) Siljack, D. D.: Large-Scale Dynamic Systems, North-Holland, New York (1978).
- 5) たとえば、特集「非線形システムと制御理論、計測と制御」、Vol. 25, No. 7 (1986).
- 6) Landau, I. D., 富塚：適応制御システムの理論と実際、オーム社 (1981).
- 7) 古川他編：メンタル・モデルと知識表現、共立 (1986).
- 8) 春名他：形態的弛緩法による都市ゴミ焼却炉制御方式の開発、電気学会論文誌、Vol. 97-C, No. 8 (1977).
- 9) 菅野：あいまい集合と理論の制御への応用、計測と制御、Vol. 18, No. 2, pp. 150-160 (1980).
- 10) 安信他：Fuzzy 制御による列車定位置停止制御、計測自動制御学会論文集、Vol. 19, No. 11, pp. 973-880 (1983).
- 11) 都島他：流れ作業ライン制御へのルール型制御方式の適用——製鉄所のピレット精整ライン制御への適用——、計測自動制御学会論文誌、Vol. 21, No. 10, pp. 1113-1120 (1985).
- 12) 安信他：予見 Fuzzy 制御方式による列車自動運転、システムと制御、Vol. 28, No. 10, pp. 605-613 (1984).
- 13) 安信：予見 Fuzzy 制御方式によるコンテナ・クレーン自動運転、計測自動制御学会論文誌、Vol. 22, No. 10, pp. 1066-1073 (1986).
- 14) Guena, J.: The Use of Simulation Models and Human Advice to Build on Expert System for the Defense and Control of River Floods, Proc. of IJCAI 83, pp. 246-249 (1983).
- 15) 薦田他：ペトリネットの FA 制御への応用、システムと制御、Vol. 30, No. 1, pp. 42-51 (1986).
- 16) 松本他：系統操作の正当性を自動検証する一手法、電気学会論文誌、Vol. 104-B, No. 10, pp. 633-638 (1984).
- 17) 田代他：ルール型制御ソフトウェアシステム SCD (Station Coordinator) の開発、Trans. IPS Japan, Vol. 27, No. 5, pp. 552-561 (1986).
- 18) 特集「AI; 実践の時代」、日経コンピュータ、1985. 3. 18号, No. 91, pp. 388-391 (1985).

- 19) 増位他: 知識制御ソフトウェア EUREKA の記述体系, Proc. 29th Annual Convention IPS Japan (1984).
- 20) 松橋他: FA 分野におけるエキスパートシステム構築用ソフトウェア・ツール EUREKA, 日立評論 Vol. 68, No. 11 (1986).
- 21) 栗原他: 知識ベースに基づく半導体プロセス診断方式, Trans. IPS Japan, Vol. 27, No. 5, pp. 541-551 (1986).
- 22) Forgy, C.L.: Rete; A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Match Problem, Artif. Intell. Vol. 19 (1982).
- 23) 田野他: 知識処理型ソフトウェア EUREKA における推論機構の高速化, Proc. 31st Annual Convention IPS Japan, pp. 993-994 (1985).
- 24) 田野他: 知識処理ソフトウェア EUREKA におけるルールネットワークの効率化方式, Proc. 32nd Annual Convention IPS Japan, pp. 1517-1518 (1986).
- 25) 渡辺: 知識獲得支援システム, 計測と制御, Vol. 23, No. 9, pp. 767-773 (1983).

(昭和 61 年 12 月 9 日受付)