

TM-1050

制御用エキスパートシステムの  
マルチPSI上での実現

鈴木 淳三、小沼 千穂、岩政 幹人、  
市川 哲彦、末田 直道（東芝）

May, 1991

© 1991, 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**

# 制御用エキスパートシステムのマルチP S I上での実現

鈴木淳三，小沼千穂，岩政幹人，市川哲彦，末田直道

(株)東芝 システム・ソフトウェア技術研究所

## 概要

従来のプラント運転制御システムは、知識ベースに格納された経験則に基づいて推論と運転制御を行うため、事前にその経験則を用意出来ないプラント状態(不測事態と呼ぶ)に対応することができない。またプラント運転制御システムには、リアルタイム性を確保するために推論の高速化も必要である。前者の問題点に対して、我々はモデルに基づく推論に着目し、不測事態において必要なプラント操作に関して、その制御知識をダイナミックに生成できる制御用エキスパートシステムの研究開発を行ってきた。本稿では後者の要求に対するK L I プログラム研究開発実例として、マルチP S I上での制御用エキスパートシステムの実現方式に関して述べる。

## 1 はじめに

制御用エキスパートシステムは、モデルに基づく推論によりダイナミックにプラント運転制御に必要な制御知識を生成できることを特徴とするシステムである<sup>[1]</sup>。本システムは、図1に示すように、予め知識ベースに格納された制御知識に基づいてプラント運転操作に関する推論を行う正常時推論機構、モデルに基づいてプラント運転操作の制御知識を生成する異常時推論機構から構成されている。さらに異常時推論機構は、故障仮説生成部、操作同定部、操作条件生成部、シミュレーション評価部の各推論モジュールから構成されている。また各推論モジュールにおいては図2に示すプラント構成がモデル化されている。これらの推論機構と推論モジュールの高速化に関しては、以下の観点に従った並列化を検討した。

### (1) 正常時推論機構の機能分割による並列化

正常時推論機構は、データ駆動型のリアルタイム制御を実現するために、大別して機能的に独立した7つのプロセスが存在する。例えば、プラントとのデータI/Oを行うプロセス、プラントデータの変化を検出するプロセスなどがある。したがってこれらのプロセスを異なるP E (Processor Element) に割り付けることにより負荷分散が可能である。

### (2) 故障仮説生成部のモデル分割による並列化およびクラスタリングの並列化

故障仮説生成部は、センサにより得られたパラメータ値が期待される値とずれていた場合、その定性的な偏差をパラメータ間の定性的因果関係式に従って結果側から原因側へ定性伝播することにより故障仮説を生成する<sup>[2]</sup>。この定性的因果関係式を、関連する機器毎に異なるP Eで分割管理することにより、異なる機器に関するパラメータの定性的偏差は全て並列に定性伝播することができる。さらに故障仮説生成部では、多重故障に対する故障仮説を生成するために、定性伝播により得られる故障仮説のクラスタリングを行う<sup>[3]</sup>。このクラスタリング処理は集合演算を基に実行されている<sup>[4]</sup>。この時、集合の各要素を並列に計算することのできる部分、および集合の要素の計算においてパイプライン的な計算が可能な部分の負荷分散が可能である。

### (3) 操作同定部の状態探索・状態検証における機器構成による並列化

操作同定部では、プラントを構成する機器の接続関係に従って、個々の機器の状態を生成したり検証したりしながら、故障仮説に対応するプラント操作を生成する<sup>[5]</sup>。この時、並列に接続された機器の状態生成を並列に実行したり、操作対象の機器と接続された複数の機器に対して並列に操作による影響を検証することが可能である。

### (4) 操作条件生成部の操作・条件単位の並列化

操作条件生成部は、プラント操作に対する条件を生成しI F - T H E N形式の制御知識を生成する<sup>[6]</sup>。したがってプラント操作が複数ある場合は、各操作毎の条件生成処理は並列に実行できる。また各操作に対して5種類の条件を生成するが、これに関しても並列に実行できる。

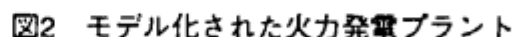
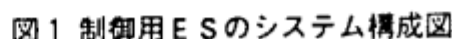
### (5) シミュレーション評価部のモデル分割とパイプライン計算による並列化

シミュレーション評価部は、プラントの動特性モデルに基づいたファジィ化定性推論によりプラントの挙動予測を行う<sup>[7][8]</sup>。この時、ファジィ演算そのものの並列化が可能である。さらに、動特性モデルをその構成によ

以上の並列化ポイントを整理してみると、  
 a) プロセス間通信がない完全に独立したプロセスの並列化、  
 (b) 若干のプロセス間通信を含むプロセスの並列化、  
 (c) パイプライン算の可能なプロセスの並列化、に分類でき。本稿では、ある程度の並列化台数効果の認められた事例として (4) および (5) について詳しく説明し、並列プロセス構成とそ実装方式、実験結果と評価結果を述べる。事例 (4) は並列化ポイント (a)、事例 (5) は並列化ポイント (c) の確認実験となっている。また、その他の事例に関しても最後にまとめて簡単に触れ、KL1 プログラムの難感併せてまとめる。

操作条件生成部では、操作同定部で生成された各プラント操作に対する操作条件を推論し、I F - T H E N形式の制御知識を生成する。したがって、各操作を実行する前のプラント状態を決定した後は、図3に示すように各操作毎に条件生成を並列に実行することができる(操作レベルの並列化)。また各操作に関して5種類の一般化条件を生成するが、これらも互いに独立に生成できる(条件レベルの並列化)。したがって、操作と条件毎に条件生成プロセスを異なるPEに割り付けることにより推論の並列化が可能である。以下ではプロセス構成と実装方式について概略を述べた後に、並列推論の概略フローを示し、最後に実験結果と評価結果に関して述べる。

図4に並列プロセス構成とモデルおよびデータの分散方式を示す。負荷分散されるプロセスには、条件を生成する各操作に対応する条件生成プロセス（操作レベルの並列化）、これらのプロセスを管理し一連の条件生成処理を制御するスーパーバイザ・プロセスが存在する。条件レベルの並列化も行えば、条件生成プロセスの子プロセスがさらにPEに分散されることになる。スーパーバイザ・プロセスはPE0への固定割付、条件生成プロセスとその子プロセスは残りのPEへサイクリックに割り付けられるよ



うにした。負荷分散された複数の条件生成プロセスが共通のモデルやデータにアクセスする時、PEを跨いだ参照が発生するとPE間通信コストのために並列効果が減少する欠点がある。この問題点に対して、メモリ効率を犠牲にして各PEに共通のモデルやデータを予め確保しておく手法を採用した。この処理は条件生成

処理に先だって実行することができるため、推論のリアルタイム性を損なうことがない。

## 2.2 並列推論フロー

図5に並列推論の概略フローを示す。分散データの初期化では、各プラント操作に対して、その実行前の各プラント機器の状態がモデルに設定される。条件生成においては操作レベルと条件レベルの並列化を行い、各操作に対する条件を生成する。条件生成アルゴリズムの詳細は文献<sup>[6]</sup>を参照されたい。各PEに割り付けられたプロセスにより生成された条件は、操作毎に収集された後、タイミングに関する条件（T条件）、操作前の状態に関する条件（P条件）、操作完了に関する条件（C条件）に分類され、最終的にIF-THEN型の制御知識として出力される。実験では、これらの分類処理も並列化を行った。

## 2.3 実験結果と評価

図2に示した対象プラントにおいて、以下に示す4つの事例に関して実験を行った。

- 事例1：給水ポンプ故障によるポンプ切り替え操作（a\_bfp、c\_bfp、b\_cpに関する3つの操作）
- 事例2：海水温度上昇による冷却水ポンプ操作（a\_cwp\_valve、c\_cwp\_valve、c\_cwpに関する3つの操作）
- 事例3：これら両方の操作（6つの操作）
- 事例4：残りの機器操作を合わせた合計10個の操作

図6に並列効果に関する実験結果を示す。横軸は推論に利用したPE台数であり、縦軸は推論総実行時間である（単位はミリ秒）。実験条件としては、PE割付けはサイクリック方式を採用し、負荷分散レベルは操作レベルまでとした。したがって、事例1と2に関してはスーパーバイザと条件分類処理も含めて最高10個のPEを利用した実験結果までをプロットした。

実験の結果、以下の評価結果を得た。

- (1) 操作レベルの並列化に関しては、推論総実行時間に対して、事例に応じて約2倍から3倍の並列効果が確認できた。当然のことであるが、条件生成を行う操作数が多い事例ほど並列効果が高い結果を得た。これにより操作レベルの並列化の有効性が確認できた。

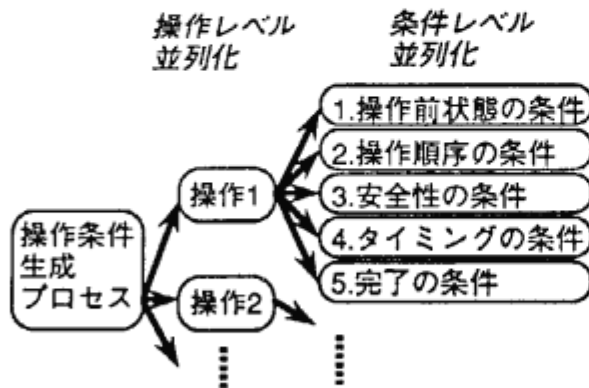


図3 操作条件生成部の並列化イメージ

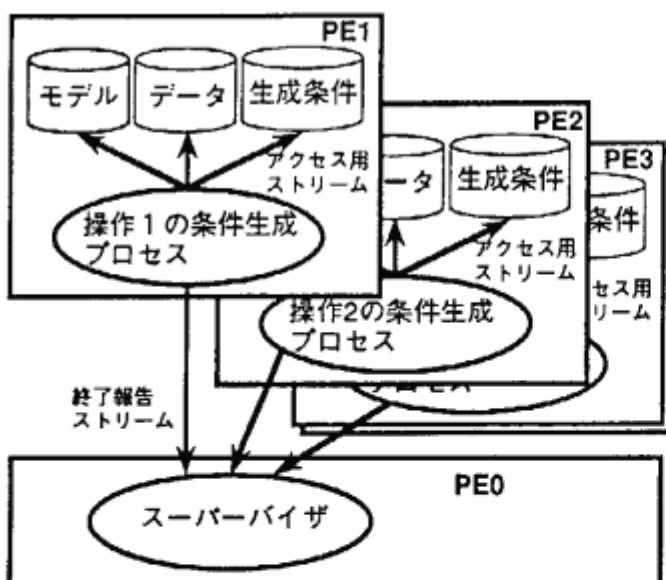


図4 操作条件生成部の並列プロセス構成とモデル・データ分散方式

(2) 上記に関して、図5の条件生成の推論時間に対しては、事例に応じて約3倍から5倍の並列効果が確認できた。一方、図5の条件出力の推論時間に対しては、事例に応じて約2倍から3倍の並列効果しか達成できず、さらに条件出力に要する時間が条件生成に要する時間の4倍程度必要であることが確認できた。したがって、条件出力処理の並列効果が期待した程得られなかった点が、結果として全体の並列効果を引き下げる要因になったと思われる。

(3) 条件レベルの並列化に関しては、これを行わない場合との推論時間の比較において並列効果がでないばかりでなく、かえって推論時間が増加してしまうことが分かった。これは実験でのモデルが比較的単純であるために、各条件の生成を並列に実行することによる効果よりも負荷分散によるPE間通信コストの増加の方が大きいことにあると考えられる。

### 3 シミュレーション評価部のモデル分割とパイプライン計算による並列化

シミュレーション評価部では、生成された制御知識に基づいてプラントを操作した時のプラント挙動を予測する。本モジュールでは、動特性モデルに基づく予測推論機構としてファジィ化定性推論を採用している。これはモデルのあいまい性を考慮できるという点で有効であるが、各パラメータ値の計算を通常のファジィ演算と同様にファジィルールの総合的評価によって計算する必要がある。したがって、一般的な数値演算と比較すると推論コストが高い欠点があり、推論のリアルタイム性の要求に対して問題がある。したがって、以下に示す並列化ポイントに基づいて推論の高速化を検討した<sup>[9]</sup>。

#### (1) ファジィ演算の並列化

メンバーシップ関数に基づいたmin-max演算を行う時に、各ファジィルールの演算は並列に実行することができる。

#### (2) 動特性モデル分割による並列化

プラントの動特性モデルを複数のエリアに分割することにより、各エリアにおけるパラメータ値の計算を並列に実行したりパイプライン的に計算することができる。

以下ではプロセス構成と実装方式について説明した後、実験結果を示しその評価を行う。

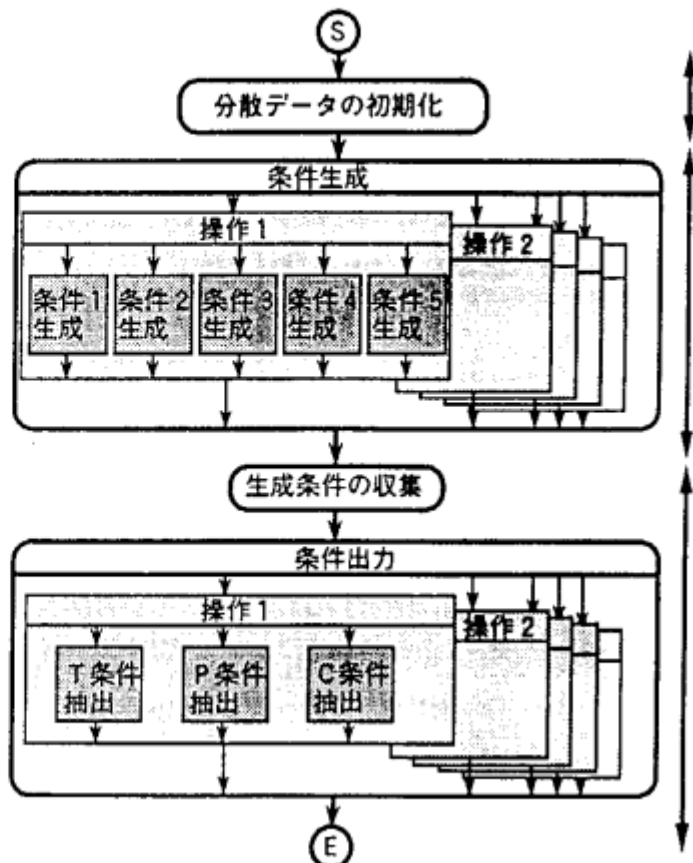


図5 操作条件生成部の並列推論概略フロー

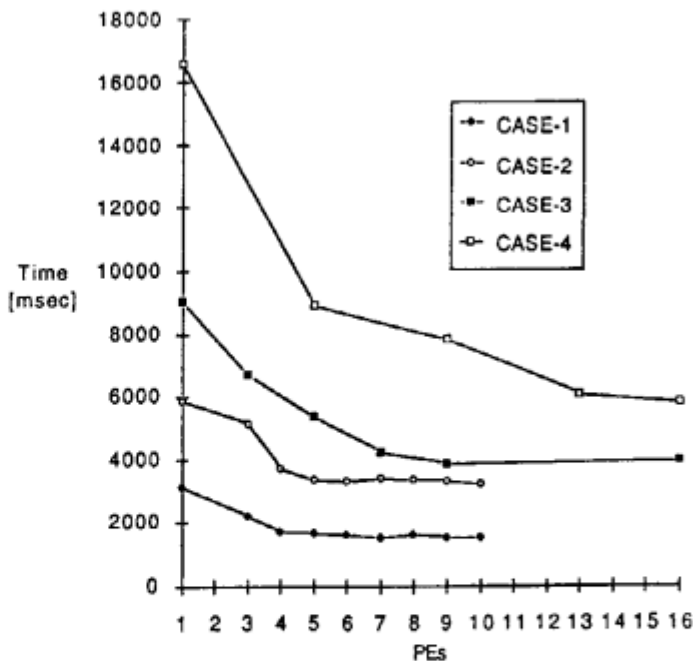
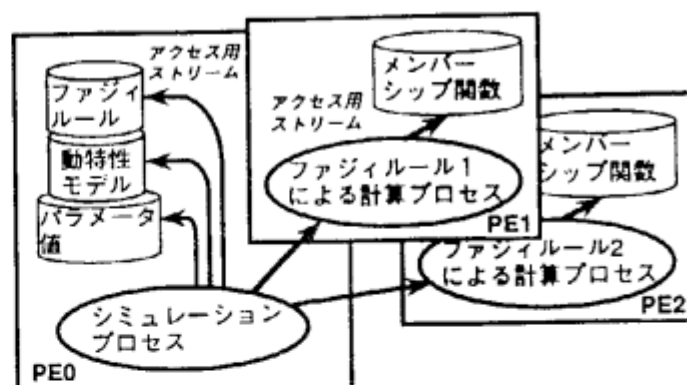


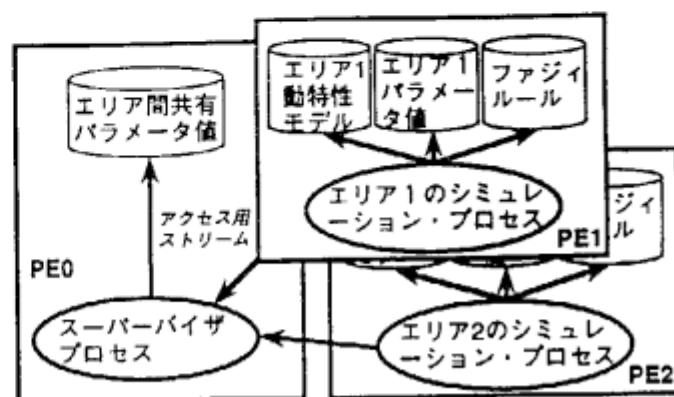
図6 操作条件生成部の操作レベルの並列化実験結果

### 3.1 プロセス構成と実装方式

先に示した各々の並列化ポイントに対して、図7(a)(b)に示すような2つのシミュレーション・プロセス構成とモデル・データ分散方式を試作した。同図(a)はファジィ演算の並列化に関するものである。動特性モデルとファジィルールおよびパラメータ値はPE0で一括管理され、シミュレーション・プロセスもPE0に割り付けられる。パラメータ値の計算のためファジィ演算を実行する時、各ファジィルールに対するメンバーシップ関数上の計算プロセスが各PEにダイナミックに生成され、負荷分散が行われる。一方、同図(b)は動特性モデル分割による並列化に関するものである。動特性モデルの分割されたエリア毎に、エリア内のシミュレーションを実行するプロセスが各PEに割り付けられる。また各エリアに関連する動特性モデル、各エリア内のパラメータ値などはエリア毎に分散管理される。さらに各エリア境界に相当するパラメータ値は、スーパーバイザにより管理される。ファジィ化定性推論に基づくシミュレーション手順の詳細は、文献[7]を参照されたい。



(a) ファジィ演算の並列化方式



(b) 動特性モデル分割方式

図7 シミュレーション評価部並列化のプロセス構成とモデル・データ分散方式

### 3.2 実験結果

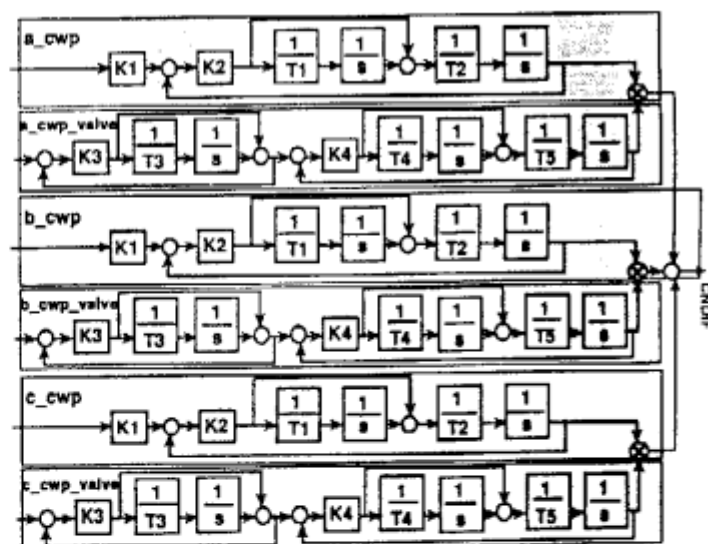
図8(a)(b)に示す2つの動特性モデルを利用して実験を行った。本モデルは、(a)復水器内の圧力に関する動特性と、(b)復水器に冷却水を供給する冷却水ポンプシステムの吐出流量に関する動特性を示している。各冷却水ポンプ(a\_cwp, b\_cwp, c\_cwp)に関する制御目標値、各冷却水バルブ(a\_cwp\_valve, b\_cwp\_valve, c\_cwp\_valve)に関する制御目標値は、プラント操作に関するIF-THEN形制御知識のTHEN部で規定される入力値である。またその他の定数もプラント状態に応じてセンサから得られる入力値である。並列化ポイントに従って、実験結果を示す。

#### (1) ファジィ演算の並列化

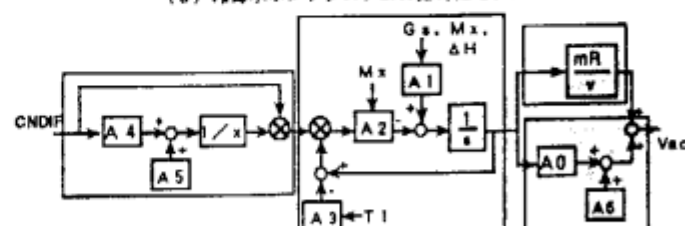
図8の矩形や丸印で示された部分がファジィ演算の対象となり、各演算に関してファジィルールが定義されている。この時、ファジィルール単位に演算プロセスをPEにサイクリックに負荷分散して実験を行った。その結果、負荷分散することにより総推論時間が逆に増加することが確認され、並列効果は得られなかった。

#### (2) 動特性モデル分割による並列化

図8でハッチングを施した単位のエリア分割を一例として、いくつかのエリア分割バ



(a) 冷却水ポンプシステムの動特性モデル



(b) 復水器の動特性モデル

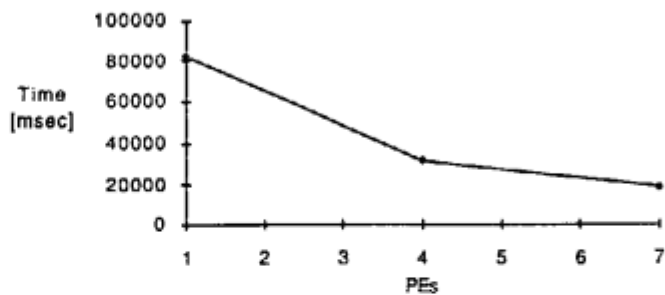
図8 並列化実験の動特性モデル

ターンに関して実験を行い、各エリア毎にシミュレーション・プロセスを負荷分散して実験した。PEへの割付はサイクリック方式を採用した。図8 (a) (b) それぞれの分割エリア数に応じてPE台数を変化させ、50ステップ分のシミュレーションを行った時の総推論時間を図9に示す。その結果、エリア分割することにより冷却水ポンプモデルの場合で約4.5倍、脱気器モデルの場合で約2.1倍の並列効果が確認できた。

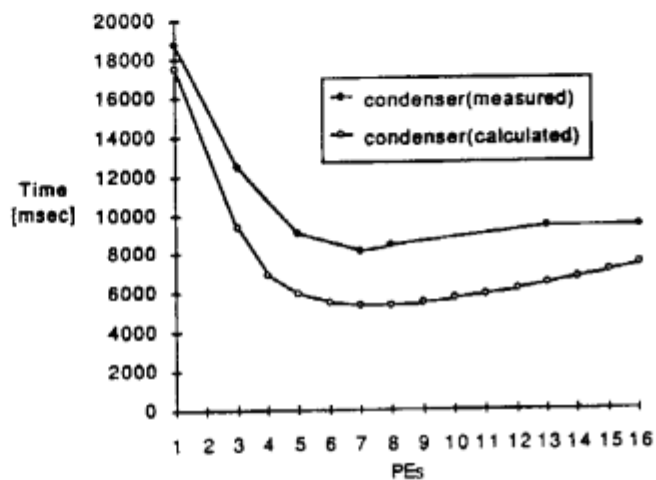
### 3.3 実験評価

先に述べた実験結果に関して、以下の評価結果を得た。

- (1) ファジィ演算の並列効果は認められなかった。これは、各ファジィルールのメンバーシップ関数に基づく計算コストが非常に軽いため、負荷分散することによるPE間通信コストの方が重くなり並列効果がなかったと考えられる。したがって、本ポイントに基づく並列化はマルチPSI上では妥当な手法とは言えない。
- (2) 動特性モデル分割において、並列に計算できるエリアに関しては負荷分散が可能である。図8 (a) では、冷却水ポンプシステムに関する6つのエリアに関しては、それぞれの計算プロセスが異なるPEに割り付けられた時が最も並列効果が高くなることが確認された。
- (3) 同じく動特性モデル分割において、互いに入出力関係にあるようなエリアにおいてもパイプライン的な効果により並列効果が上がる部分がある。図8 (b) において、脱気器に関する4個のエリアでの各計算プロセスは、自己エリアの計算が終了しその結果を出力側のエリアにストリームを介して流した段階で、次の時刻の入力値に基づいた計算が可能である。このように各計算プロセスを異なるPEに分散することによりパイプライン的な並列効果を達成することが可能であり、これは実験においても確認されている。
- (4) まとめるとシミュレーション部の推論高速化に関しては、動特性モデルの分割が有効な方法である。この時、並列に計算できるエリアのシミュレーション・プロセスを異なるPEに負荷分散することにより並列効果を上げることができる。さらにそれ以外の部分に関して、パイプライン的な並列効果を達成できるように、動特性モデルを適当に分割できる可能性がある。



(a)冷却水ポンプモデルの場合



(b)脱気器モデルの場合

図9 動特性モデル分割による並列化実験結果

現在マルチPSI上で試作しているファジィ化定性推論システムにおいては、各ファジィ演算に対する推論時間が実験により確認されている。またデータ当りのPE間通信時間は約210 [msec/50ステップ]、データ当りのスーパーバイザと各シミュレーション・プロセスにおける管理データのアクセス時間は無視できる程小さいことが同じく実験により確かめられている。詳細は省略するが、これらの事実から、本システムにおいてパイプライン的な並列効果を引き出せる動特性モデル分割基準として以下の指針が得られる。ただし、各エリアに関する計算コストは均等に分割されており、エリア境界には1つのパラメータを含み、通信コストはPE間通信の回数の総和で近似できると仮定した。

$$T=T_0 \cdot (S-1)+T_a+T_c \cdots (1)$$

ただし、

$T_0$ : 最も入力側のエリアに含まれる動特性モデルの全演算式の1ステップ分の計算コスト(単位はミリ秒/ステップ)

$S$ : シミュレーション・ステップ数

$T_a$ : 動特性モデル全体に含まれる全演算式の1ステップ分の計算コストの総計(単位はミリ秒)

$T_c$ : エリア間の通信コストの総計。エリア分割数を $N$ 、データ当たり1回の通信コスト $T_{com}$ とすると以下の式で与えられる(単位はミリ秒)

$$T_c=2 \cdot T_{com} \cdot (N-1) \cdot S$$

$T$ : モデルを $N$ 個のエリアに均等に分割して、 $S$ ステップのシミュレーションに要する総推論時間(単位はミリ秒)

(1) 式で計算できる $T$ を最小にする $N$ の値がパイプライン的並列効果を最大にするモデル分割数であり、 $T_a/N$ の値が均等に分割された時の各エリアにおける計算コストを示す。図8(b)の脱気器に関するモデルに対して、エリア分割の各ケースに応じて(1)式による計算値を図9(b)に合わせて表示した。実験で得られた値と計算値のずれは、実験では全てのプロセスを均等に分割することが必ずしもできなかったことが主因であると考えられる。ただし、(1)式により与えられる計算値は大体の傾向を予測するのに利用でき、エリア分割方法の決定に有効と考えられる。

#### 4 おわりに

本稿では制御用エキスパートシステムのマルチPSI上での並列化に関して、2つのモジュールを取り上げ検討を行ってきた。これらのモジュールは、(a)プロセス間通信がない完全に独立したプロセスの並列化、または(c)パイプライン演算が可能なプロセスの並列化により、2倍から4倍程度の並列効果が確認できた大規模なKL1応用プログラム例になっている。本稿では詳しく説明しなかったが、その他のモジュールに関して、上記(a)(c)の観点の他、(b)若干のプロセス間通信を伴うプロセスの並列化という観点においても、それぞれ並列効果が確認されている。(b)の一例としては、故障仮説生成部の並列定性伝播プロセスがある。各プロセスは定性因果モデルにおける関係式やパラメータに対応し、それぞれが定性偏差を内部状態として管理するプロセスとして実現されている。

これまでの試作を通じて、マルチPSIでのKL1応用プログラムに関して以下の知見を得ている。

- (1) 非常に感覚的ではあるが、プログラムの細かい処理部分の「精巧な負荷分散」を工夫しても、並列効果という点では効果が薄い。ある意味で「大胆に大雑把に負荷分散」する方が良さそうである。
- (2) 並列効果とは別の観点として、機能的に独立したプロセスが連携して一連の処理を行うようなシステムは、KL1プロセスのストリームによる同期メカニズムを利用するとかなり簡単にかつ美しくプログラミングが可能である。我々のアプリでは、浅い知識に基づいてプラント操作の推論と実行を行う正常時推論機構がこの例に当たる。
- (3) 制御用エキスパートシステムのKL1プログラミングに対しては、例題として与えた問題規模にもよるが、推論の高速化という観点では今一步という結果であった。ただし先に述べたように、複数の推論プロセスからなるシステムのより自然なプログラミングという観点での効用は大きく、レスポンスやスループットの向上という効果もある程度得られた。今後はモデル規模の拡大に対して、さらにどの程度の推論高速化が可能なかを理論的に検討し、実験により検証していきたい。

上に述べたように、マルチPSIおよびKL1のインパクトは強いものがあつた。一方、システム実装面においては、いくつかの問題点も見られる。以下に特に目についたものを挙げて今後の改善を期待するとともに、本報告の締めくくりとしたい。

- (1) KL1セルフコンパイラのレジスタ・オーバーフローの問題

KL1言語仕様上、述語の引き数が増加する傾向が強く、ベクタ等による引き数の構造化もボディ部では限界があり、また処理速度上の問題もある。さらに、KL1コードの自動生成機構を実現する場合には、この問題の存在は大きな制約となる。

- (2) SIMPOSとのインタフェースの問題

本格的なアプリケーションに対しては使い勝手のよいMMIが必須となる。MMIはSIMPOS上に構築することになるが、PIMOSとのインタフェースが



ストリング上でしか提供されていない。したがって、リアルタイムに推論状況を表示するには速度的に問題があり、インプリメント上の大きな制約となる。

### (3) PIMOSが良く落ちることの問題

システム開発過程において、シェルやリスナのプロセスだけでなく、PIMOSまで落ちることがある(CSPからのレポートができない)。エラーに対する処理系の強化を望みたい。

Proc.of the Third International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, pp.431-439 (1990)

- [9]小沼千穂,他:制御用エキスパートシステムー詳細検証評価機構の並列化,第42回情全大, pp.(2-205)-(2-206) (1991)

## 謝辞

本研究に関して、日頃ご助言を頂いたI C O T第7研究室の新田室長、市吉室長代理に感謝します。また研究開発の機会を与えて頂いた当社システム・ソフトウェア技術研究所の西島所長ならびに研究第1部の河野部長に感謝します。

## 参考文献

- [1]鈴木淳三,他:深い知識に基づく制御用エキスパートシステムー深い推論機構と詳細検証機構との融合ー,第11回知識智能システムシンポジウム,pp.7-12 (1990)
- [2]岩政幹人,他:制御用エキスパートシステムー定性的モデルに基づく診断機構ー,第41回情全大,pp.(2-13)-(2-14) (1990)
- [3]岩政幹人,他:深い知識に基づく制御用エキスパートシステムー定性的因果モデルとクラスタリングによる診断機構の開発ー,第13回知識システムシンポジウム,pp.1-6 (1991)
- [4]Peng,Y.,et.al :Basics of Parsimonious Covering Theory in Abductive Inference Models for Diagnostic Problem- Solving, Springer- Verlag, pp.49-98 (1990)
- [5]鈴木淳三,他:深い知識に基づく制御用エキスパートシステム,第9回知識工学シンポジウム,pp.153-157 (1989)
- [6]小沼千穂,他:深い知識に基づく制御用エキスパートシステムー操作条件生成機構の開発ー,第12回知識システムシンポジウム, pp.13-18 (1990)
- [7]小沼千穂,他:不測事態に対応するプラント制御用エキスパートシステムー定性推論を組み込んだ推論機構の開発ー,第40回情全大, pp.298-299 (1990)
- [8]Suzuki,J.,et.al :Plant Control Expert System Coping with Unforeseen Events - Model-based Reasoning Using Fuzzy Qualitative Reasoning -,