

DIA-Expert システム意味処理部の試作 (1) - 設計理念とシステムの機能 -

田村秀行*¹ 坂上勝彦*² 久保文雄*³ 佐藤宏明*¹

*¹ キヤノン(株)中央研究所 *² 電子技術総合研究所 *³ スタンレー電気(株)

画像処理技術に関するノウハウを知識ベース化したDIA-Expertシステムは、画像処理手順を設計する意味処理部とこれを実行プログラムに変換する構造処理部から成る。既発表の構造処理部が汎用性が高いのに対し、意味処理部はある特定の問題領域に関する画像処理手法をコンサルテーションするシステムとなる。ここでは、粒子画像解析を題材としたDIA-Expert/PA1を開発した。本稿では、DIA-Expertシステム意味処理部の設計理念を述べ、PA1を例にとって考察した画像解析実験における知識の形態や表現方法、システムの機能について説明する。

A Prototype of DIA-Expert System (1) - Design Concept and Characteristics -

Hideyuki TAMURA*¹ Katsuhiko SAKAUE*² Fumio KUBO*³ Hiroaki SATO*¹

*¹Canon Inc. Reseach Center *²Electrotechnical Lab. *³Stanley Electric Co., Ltd.
Morinosato, Atsugi Tsukuba Sci. City Midori-ku, Yokohama
Kanagawa 243-01, Japan Ibaraki 305, Japan Kanagawa 227, Japan

DIA-Expert system, which is a knowledge based consultation system, consists of two subsystems; the semantic processor and the syntax processor. The syntax processor was already implemented in a very general fashion. The remaining semantic processor is newly developed as a prototype system with specific knowledge of particle image analysis. In this paper, we present the general design concept and the characteristics of this system. Also described are the comments on knowledge aquisition and representation in image analysis procedure through this study.

1. はじめに

画像処理技術と知識工学の新しい関りを目指すものとして、筆者らは数年前から画像解析エキスパート・システム (Digital-Image-Analysis Expert System) の考え方を提唱してきた。これは、専門家としての画像処理研究者/技術者の持つノウハウを知識ベース化し、与えられた画像解析/認識の問題に対する解決、即ち処理モジュール系列の設計と実行プログラムの生成を支援しようというものであった。そこには、画像認識・理解の普遍的な枠組を確立するのは困難でも、対象と目的を限定すれば、これまでに構築されてきた画像処理・パターン認識技術は十分な問題解決能力がある、との考えが根拠をなしている。

画像処理技術自身に関する知識 (用途、使用条件等) の利用とエキスパート・システム化という発想については、類した研究開発が活発に行われるようになってきた^[2]。末田らの EXPLAIN^{[3],[4]} は、DIA-Expert とよく似た構造を持つエキスパート・システムで、知識獲得手法についても新しい試みを取入れている。一方、松山らの LLVE^[5] は、ユーザにコンサルテーションを行うものではなく、画像理解システム SIGMA の一部として開発されたエキスパート・モジュールである。また、長谷川らの IMPRESS^{[6],[7]} は、所望の出力 (線・領域など) を画像上にサンプル図形として示し、これに近い結果を得る処理手順を発生させるシステムである。

我々の DIA-Expert システムは、画像と目的が与えられて画像処理モジュールの系列を生成する「意味処理部」と、その処理モジュール系列 (手順) から環境に応じた実行プログラムを発生する「構造処理部」から成る。構造処理部については既に、画像処理モジュールに特有のデータ型や接続関係を記述した辞書 (構造辞書という) を知識ベース化し、プロトタイプ・システムを完成した^[8]。この構造処理部は、ある種の自動プログラミング・システムであり、意味処理部と独立した形でも利用出来る。また、より抽象的な画像演算で記述することにより、辞書内容の高度化・一般化を図っている^[9]。

一方、意味処理部こそ DIA-Expert システムの本質をなすべき部分であり、知識工学の利用の成果が問われるべき部分であるが、一般的な枠組を構築することは難しい。実際、前述した EXPLAIN, LLVE, IMPRESS の適用範囲や能力には、かなり

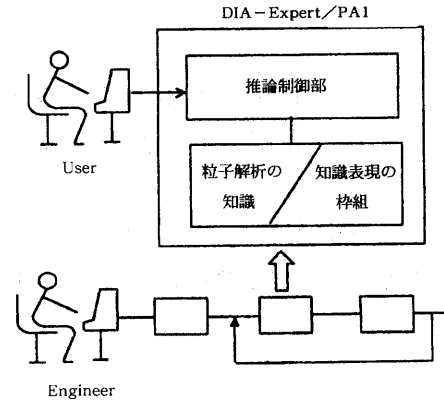


図1 DIA-Expert/PA1 の考え方

違いがある。これは、エキスパート・システムとして目指すところが異なるだけでなく、画像処理技術に関するノウハウ・知識自体に違いがあるためと考えられる。このため我々は、構造処理部のようにいきなり一般的な辞書を作るアプローチを避け、ある限られた対象に関する画像処理ノウハウを整理しながら知識表現方法を徐々に確立して行くという方法を採用した。ここで、例題として選んだのが粒子画像の解析であり、試作したシステムを DIA-Expert/PA1 (Particle Analyzer version 1) と呼ぶ。

本稿では、DIA-Expert システム意味処理部の設計理念を述べ、PA1 を例にとって考察した画像解析実験における知識の形態や表現方法、システムの機能について説明する。

2. 意味処理部の設計理念

2.1 基本機能と前提

DIA-Expert システム意味処理部 (本稿では構造処理部は関係しないので、以下いちいち意味処理部とは言わない) とは、画像と処理・解析の目的が与えられたとき、それまでに知識ベースとして蓄えられている画像処理モジュールや問題領域 (PA1 の場合、粒子の状態や意味など) に関する知識を駆使して、画像処理オペレーションの系列を決定するものである。DIA-Expert/PA1 は粒子画像解析のコンサルテーション・システムであり、図1に示すように、基本的な知識表現法と推論機能 (Kernel 機能) の上に粒子画像に関する知識を記述したものである。Kernel 機能は画像解析特有の問題向きに作られ、知識を入れ替えれば他の画像

解析にも適応し得る一般性を持っている。

ここで、DIA-Expertシステムの構築と利用に関しては、次の三者が関わることを前提としている。

◆ DIA-Expert Designer (DED) ——画像解析エキスパート・システム構築の基本的枠組であるKernel部の設計、知識表現方法の検討を行い、問題に応じてその枠組を強化する。

◆ DIA-Expert Engineer (DEE) ——画像解析のエキスパートで、当該分野の処理に十分な経験 (PA1の場合、実際に多数の粒子画像を扱ったことがあること) を持つ。Kernel部の上にその知識をインプリメントし、DIA-Expertシステムを作成する。

◆ DIA-Expert User (DEU) ——開発されたシステムを利用して、具体的な対象についての解析・処理手順を設計したいユーザ。画像処理・解析に関する基本的な概念・用語などをある程度知っていることを想定している。

ここで、DEUを画像処理についての全くの初心者としなかったのは、システムとの対話に於いて、登場する語彙の説明に無用な労力を使いたくなかったからである。ユーザのレベルに応じて、操作性を高めたり、Help機能を増すなど、マンマシン・インタフェースは改善出来るので、これは本質的な問題ではない。

DIA-ExpertシステムはDEUに対するコンサルテーション・システムである。このため、システムとDEUとの間で頻繁な対話 (Q&A) が繰り返される。結果として、それまでの知識から所望の出力を得ることもあるが、現状の技術では目的は達成出来ないと判定されてしまうこともあり得る。

2.2 画像解析過程のモデル化

我々は先に、DEEが行う画像処理手順の設計過程を図2のように考え、そこに関わる3種の知識について論じた⁷⁾。この種の設計過程で、適切な処理モジュールの集合を有することと、その使い方に関する十分な経験 (第II種の知識) が必要なことは論をまたないが、試行錯誤のプロセスを如何にモデル化し実行するかもまた重要である。実際、DEEの知識は、入力画像と目的だけから結論を出せるほど静的かつ確定的ではなく、図3に示すようなプロセスの中で動的に使われている。

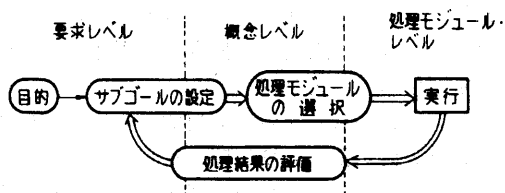


図2 設計過程における試行錯誤

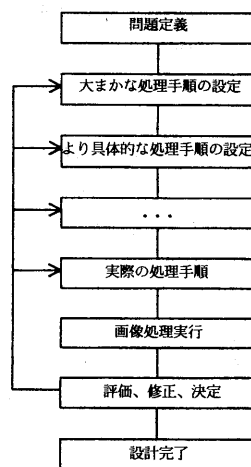


図3 段階的な処理手順の選択と決定

DIA-Expertシステムもまた、このような問題解決プロセスを実行出来るように設計されている。即ち、まず与えられた問題を画像処理の概念で置換え、次いで目的とする画像状態を得るための手順を考える。例えば、2値化するとか、不適当な部分を取り除くといった大まかなレベルで手順を考え、さらに詳細な決定を行うことで処理内容の具体化を行う。実行可能な段階まで具体化された手順は必要に応じ処理実行され、得られた中間結果を用いて手順の修正、変更が行われる。段階的な処理手順の選択は問題解決の初期段階に於ける刈込みと部分問題への分解に相当し、これによってその後の選択の幅を実用的な大きさまで縮小する。

システムは、(1) 画像解析の目的の記述、(2) 入力画像や中間画像の状態、(3) 処理結果の満足度、等をDEUに問い掛けることによって、上記のプロセスを制御する。ここで、DEEの知識は有効な手法の選択や手法の効果を推定することなどに用いられる。

2.3 エキスパート・システムとしての意義

画像解析は、特徴量も変換された画像データの
一形態であると考えれば、

「与えられた画像から特定の目的に合うように変換された画像を得る変換手順を決定せよ」という問題である。つまり、画像処理・解析の過程の主要な部分は使用可能な画像処理アルゴリズムを組み合わすことによる画像の変換手順の設計であり、AI流の表現を用いれば、「与えられた画像を初期状態、変換された画像をゴール、画像処理アルゴリズムを作用素とするプランニングの問題」である。

ここでは、画像解析の大まかなレベルから詳細レベルまでの処理を全て「オペレーション」と呼ぶ。オペレーションには大別して、「終端オペレーション」と「概念レベル・オペレーション」の2種類がある。終端オペレーションとは、画像処理実行部（後述）で用意されている実行モジュール群である。一方、概念レベル・オペレーションとは非終端レベル・オペレーションの総称であり、抽象度の高いものから終端に近いレベルまで階層がある。

DIA-Expertシステムは、高位の概念レベル・オペレーションが与えられたとき、その下位レベルのオペレーション系列を再帰的に選択・展開する。この動作を全オペレーションが終端レベルに到達するまで繰り返すことにより、画像処理手順の設計が完了する。こうした選択・展開によって生じるオペレーション木の例を図4に示した。

この高位レベルから終端レベルに至るオペレーション木の選択・展開に、画像処理技術に関する様々な知識が使われる。

3. DIA-Expert にとっての粒子画像解析

3.1 粒子画像解析の特質

DIA-Expertシステムの開発例に、いわゆる粒子画像解析の世界を対象として選んだ。粒子画像は、医学・薬学・金属・印刷などの色々な分野で顕微鏡写真として扱われることが多く、画像解析の分野でも長い歴史がある。市販の解析装置も数多い。DIA-Expertシステムの対象として考えた場合には、次のような特徴がある。

(1) 色々な画像が比較的容易に入手しやすく、解析・計測の目的も多様である。即ち、一口に粒子解析といっても、画像処理技術側から見ると画像

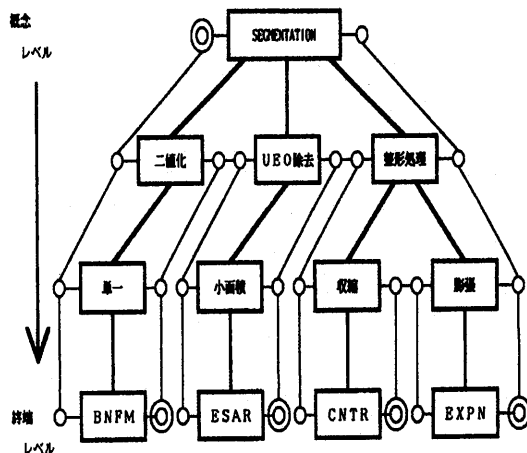


図4 粒子のセグメンテーションのオペレーション木

パターンとしては多様で、かなり異った処理手法を駆使しなければならない。

(2) 問題の意味を考えやすく、結果も評価しやすい。個々の問題領域において、粒子の径の分布や粒状度など、解析の意味は専門的であっても、専門家以外に読み取れないということは余りない。即ち、「何をどう計測して欲しい」と明示されれば、後は当該分野の非専門家でも解析結果の可否を評価することは出来る。これは、DIA-Expertシステムにおける3種の知識^[1]でいえば、第II種の知識で解決出来ることが多く、第III種の知識の役割は僅かということになる。

(3) 2値化、膨張・収縮など、比較的単純な画像処理の演算の組み合わせで対処出来る粒子画像も多い。反面、複雑な形状の粒子が重なりあった場合など、現在の画像処理技術ではまず解決出来ない対象も少なくない。即ち、解決可能かどうかの判断や画像処理手順生成のストラテジーが重要な意味を持つ。

以上のように、粒子画像解析はDIA-Expertシステムの柔軟性を十分生かせる題材である。

3.2 DIA-Expert/PA1における対話機能

DIA-Expert/PA1で扱った粒子画像は分野・目的・粒子の形態にバラエティを持たせた20数種類の濃淡画像である。その個々の特徴及び解析手法については、別稿^[10]に譲る。このような多岐にわたる画像パターン全体を考えることはめずらし

く、大抵の場合もう少し狭いクラスの問題（たとえば粒子の種類が限られている）を扱う。

また、図2のようなプロセスによる対話型の画像解析の目的は次の2つに大別できる。

CASE-1：何枚かの画像で画像処理手順を設計し、同じクラスの画像にこのアルゴリズムを適用する。

CASE-2：与えられた当の画像についてのみ、所望の解析結果を得る。

明らかにCASE-1とCASE-2では、問題解決のアプローチが異なる。CASE-2の場合は、対象療法的な手法を用いることが出来るし、画像内の特定の領域を指し示すことも可能である。一方、CASE-1ではかなり一般的な手法の組み合わせしか利用出来ない。市販の粒子解析装置の場合、複雑な重なりのある粒子については、ポインティング・デバイスなどを用いてCASE-2の方法で問題を回避していることが多い。

DIA-ExpertがめざすのはCASE-1のプロセスの知能化である。このため、我々はDEUとシステムとの対話に以下のような制限を課した。

(1) 特定の画像（粒子）にのみ通用する表現は避け、なるべく一般的な用語で画像の状態（中間結果を含む）を記述する。

(2) 画像の状態や結果の評価については、システム側が誘導尋問を発し、ユーザはそれにYes/Noまたは選択枝の一つを選ぶ形で答える。

(3) システム及びユーザのいずれも画像内の特定の点や領域を指す機能を用いない。

4. 知識表現の方法とソフトウェア環境

DIA-Expertシステムは、図5に示すように、知識ベースと操作用のワークメモリ、それらを参照・操作する推論エンジンで構成されている。ここで、問題固有の知識を除いた基本構成をKernelと呼ぶ。

知識ベースには次のような知識が蓄えられる。

(a) 処理手法選択のための知識

(a-1) 上位概念を具体化する系列選択の知識

(a-2) 副作用回避のための予防的オペレーションの知識

(a-3) 意図した効果を達成するための付加的オペレーションの知識

(a-4) 別系列を選択するためのバックトラックの知識

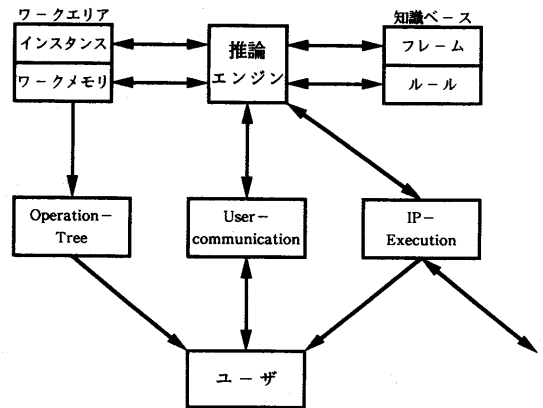


図5 DIA-Expert/PA1のモジュール構成

(DEFRAME ESAR

(SUPER	OPERATION)
(TYPE	TERMINAL)
(KS	(NULL-KS))
(NAME	"ESAR")
(ARGUMENTS	((input) (output) (athr))
(input	(TYPE Bina))
(output	(TYPE Bina))
(output	(ATTR (Has-SUEO Not-hold)))
(output	(ATTR (Has-hole Not-hold))
	(input-data-condition
	input Has-hole Not-hold)))
(output	(ATTR (Has-hole \$Undef)))
(athr	(ATTR Athr)))

図6 オペレーション・フレームの例

(b) オペレーションの効果・副作用を推定するための知識

(c) 画像の状態を評価するための知識

これらの知識を表現方法としてフレームとルールシステムを用いる。(b),(c)はそれぞれオペレーション・フレーム、データフレームとして表現する。一方、(a)は全てプロダクション・ルールの形で表現する。

ワークメモリ内では、インスタンスエリアにオペレーションや画像データのインスタンスが格納され、ワークエリアにオペレーション木、その他の内部情報が格納されている。推論エンジンはルールの制御、適用によりインスタンスを生成し、ワークエリアを更新する。

実際の知識表現に関しては、ルール記述を容易

にするためにKernel標準述語を開発し、オブジェクト記述のためにフレームへ付加スロットを設定した。これらの詳細や推論エンジンの機能などについては文献 [11] に譲り、ここでは図6にオペレーション・フレームの例のみを挙げておく。

DIA-Expert/PA1の画像処理実行部を除く部分は、Uranus (Prolog/KR^[12]の拡張版) 言語で記述され、LispマシンSymbolics上で稼動している。そのソフトウェア構成は図7に示す。

Uranusを用いる利点としては

- (1) Prologにはないプログラムとデータの同一性と決定的な制御機構
- (2) Lispにはない組み込みの推論機能
- (3) Uranus独自の多重世界機構

などが挙げられる。特に(3)はKernelで使用するフレームやルールのモジュール化等に大きな役割を果たしている。

5. DIA-Expert/PA1の動作

DIA-Expertシステムは、ユーザが画像を提示し、システム側からの質問に答えることによって動作を開始する。ユーザは、図5の下半分に示す3

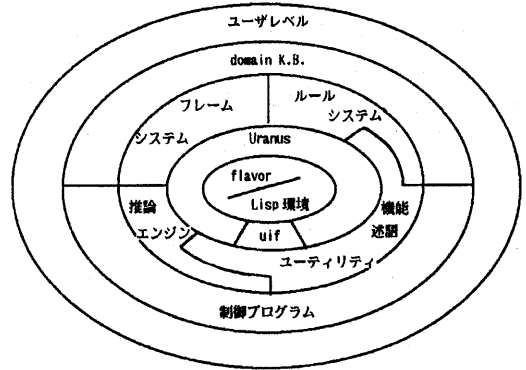


図7 Symbolics環境下でのソフトウェア構成

つのブロックを介して、システムと対話したり、システムの動作を確認したりすることが出来る。これは丁度図8に示すSymbolicsのモニタ上の3つのウィンドウに対応している。

図8の左上は、ユーザとシステムの対話部 (User-Communication) である。ここで、大半のメッセージはシステムからユーザへの動作の説明か質問である。右上は推論エンジンと画像処理実行

```

Now we try to determine SPLI-OBIECT method
1 CIRCULAR-APPROXIMATION      Recommend when can approximate circle
2 POLYGONAL-APPROXIMATION     Recommend when can approximate polygon
select number :
Target Image data : 7
Are there any obstacles not touching to particles yet? n
Target Image data : 8
Are there any obstacles sticking to particles? n
If there exist some particles touching each other,
Then SYSTEM split them.
Target Image data : 8
Is particle isolated each other? n
Target Image data : 8
Do some particles overlap each other? n
Target Image data : 8
Are particles nearly same size? n
Now Polygonal-approximation expected better
User-Communication

Please Enter following value
Output data >
RETURN : n
NC : (8 8 8)
EXECUTE IMAGE-PROCESSING REQUEST > EXPN
Input data : INPUT : 7
Output data : OUTPUT : 8
Parameters : ITER : 3
              NC : $UNDEFINED
Please Enter following value
NC : (8 8 8)
EXECUTE IMAGE-PROCESSING REQUEST > JFAD
Input data : INPUT : 8
Parameters :
Output data : RETURN : $UNDEF
IP-Execution
    
```

Measurement					Calculation				
Segmentation									
Binarization									
F8698	E8718	E8731	E8735	E8735	E8764	R8777	Split-Obj		
Fill-hole					Eject-stick				
F8714	F8739	F8735	E8735	E8764	Eject-stick				
Edge-thresh					Contraction				
F8718	F8743	E8748	E8759	E8778	C8785	E8798	E8793	Expansion	
MFA					CHTR				
E8722					C8797				
					H8886				
					E8818				

Operation-Tree
06/24/86 12:57:06 satou USER: tyt

図8 マルチウィンドウ機能を用いたDIA-Expert/PA1の実行画面

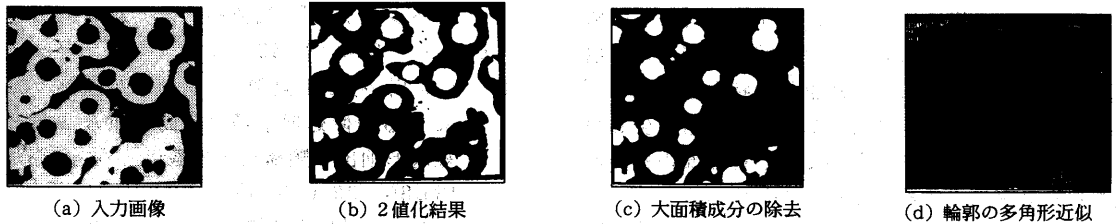


図9 DIA-Expert/PA1の動作例

部との通信内容 (IP-Execution) である。画像名 (システム内で命名される。ここでは数字を使っている) やパラメータの値などが授受される。画像処理実行部は、DIA-Expert 意味処理部に内在するサブモジュールであり、構造処理部とは異なる。この画像処理実行部による処理結果は、3つのウィンドウとは別のイメージディスプレイに表示され、ユーザはそれを見て判断を下す。

図8の下半分には、ワークエリア中のオペレーション木の展開状況が表示される。この Operation-Tree ウィンドウで、水平方向は画像処理オペレーションの系列が、垂直方向にはオペレーションの概念レベルから終端レベルへの具体化が示されている。各列の最も下にあるブロックが実行モジュール名である。

現在、DIA-Expert/PA1 にインプリメントされているルール数は約 150、フレーム数は約 60 である。このシステムは、粒子画像の状態とユーザの応答により極めて複雑な動作をするが、以下では比較的良好な結果を得た動作例の概略を説明する。

(1) 図9 (a) は、入力画像である。ここでは各粒子の面積を測ることが目的である。

(2) 可能なら最も単純な固定しきい値による 2 値化、かつ、しきい値を自動決定することが望ましいので、これを優先的に選択するようにルールが書かれている。図9 (b) はその実行結果である。これが粒子形状を保存した満足のゆく 2 値化であるかどうかは、ユーザが判定しなければならない。不満足と答えた場合は、別の径路 (他の 2 値化や多値化の方法等) が探索される。

(3) どれが計測したい粒子であるかはユーザしか判断出来ないが、粒子自体を指し示す機能は与えられていない。システムは、粒子以外の対象物 (Unexpected Object: UEO) の有無や、粒子と UEO の識別方法を誘導尋問によりユーザから聞き出す。図9 (b) には目的とする粒子よりも面積の

かなり大きな UEO が存在している。質問応答により選択した系列で、これらを取り除いた結果が図9 (c) である。

(4) さらにいくつかの整形処理を施したが、粒子自体にかなり重なりがある。指定した計測の目的から判断して、重なりを切断する縮退操作などは利用できない。そこでシステムは各粒子の分離方法として円近似による方法と多角形近似による方法を提示してくる。ただし、いずれが決定的に有効かは断言出来ないため、ユーザにその二者択一を求めてくる。図9 (d) は多角形近似を選択した場合の結果である。これで分離が満足であると答えれば、各粒子の面積が計算される。

(5) このシステムで最終的に得られる出力は、測定結果ではなく、それを得るための終端オペレーション系列とそのパラメータである。(勿論、このシステムを各粒子画像の特徴計測そのものに用いても構わない。) また、前項の二者択一の場面の他、各判断の時点における別のパスを試行することも可能である。これを容易にするため、バックトラックの発生時点の復元や部分系列の再実行をする機能も備わっている。

6. むすび

DIA-Expert システム意味処理部の試作例として、粒子画像解析を対象とした DIA-Expert/PA1 を開発した。ここで、粒子解析に関する知識を除いた Kernel 機能については、画像解析プロセスのエキスパート・システム化をかなり一般的な形で実現出来たと思われる。例えば、選択オペレーションによって動的に変化する対象を木に位置付けことや、あいまいな作用素によって生ずる効果と副作用を知識として記述することなどは新しい試みである。

一方、多様な粒子画像に対する解析手法を統合したため、ユーザとシステムの対話や評価には具

体的な表現を用いることが出来ず、隔靴搔痒の感を免れない。現実にもっと狭い問題領域を扱う場合には、より対象に即した語彙や特徴量を使うことが出来るだろう。また、知識自体ももう少し決定的な形で記述することができ、推論部の動作ももっと効率良くすることができるだろう。

知識ベース・システムの最大の効用は、断片的に獲得した知識を統合した形で運用出来ることにある。一方、ルールとして表現する知識の矛盾の問題がある。これを逆にとれば、我々の知識自体の首尾一貫性の無さをチェックすることも出来る。実際、DIA-Expertシステムの構想段階では、画像処理の専門家のノウハウを経験の浅いユーザへトランスファーすることを目標としていたが、このDIA-Expert/PA1を使ってみた実感では、むしろ画像処理の研究者/技術者自身が自らの経験を反映・統合しながら使うアルゴリズム開発支援システムとしての価値の方が高い。

知識の表現方法や推論の制御機構には、まだ不備な点もあり、この分野は今後も発展の余地のある研究課題であると思われる。

謝辞

本研究は、電子技術総合研究所・画像処理研究室で行われたものである。本研究・技術指導の実施に関してご支援下さった関係各位に感謝致します。とりわけ、Symbolics及びUranusの利用に関して、多大な御協力を頂いた人間機械システム研究室中島秀之氏、言語処理研究室戸村哲氏に深謝致します。

参考文献

- [1] 田村,坂上:“画像解析エキスパート・システムのための三種の知識”,信学技報, PRL83-49 (1983).
- [2] 田村:“エキスパート・ビジョン”,第16回画像工学コンファレンス論文集,4-1 (1985).
- [3] 末田,三亀,片桐:“画像処理エキスパートシステム”,東芝レビュー, vol.40, no.5, pp. 403-406 (1985).
- [4] 星,末田:“画像処理エキスパートシステム知識獲得の一手法について”,第31回(昭60後期)情処全大,8M-2 (1985).
- [5] 松山,長崎:“LLVE:トップダウン・セグメンテーションのための画像処理エキス

パートシステム”,情処論, vol.27, no.2, pp.191-204 (1986).

- [6] 長谷川,久保田,鳥脇:“サンプル図形の提示による画像処理手順の自動構成方法とその線図形抽出手順構成への適用”,信学技報, PRL85-38 (1985).
- [7] 長谷川,久保田,鳥脇:“サンプル図形提示による線図形および面図形抽出手順の自動構成方法の実現”,情処研報, CV42-5 (1986).
- [8] 坂上,田村:“処理モジュールの構造的知識を利用した画像処理プログラム自動作成システム”,情処論, vol.26, no.4, pp. 652-661 (1985).
- [9] 坂上,田村:“高速プロセッサのための基本画像演算について”,第30回(昭60前期)情処全大,3M-2 (1985).
- [10] 久保,坂上,田村:“DIA-Expertシステム意味処理部の試作(2)”,情処研報, CV43-3 (1986).
- [11] 佐藤,田村:“画像解析エキスパート・システムのKernel機能と知識表現方法”,信学技報, AI86-9 (1986).
- [12] 中島秀之:“知識表現とProlog/KR”,産業図書 (1985).