

D I A - E x p e r t システム 意味処理部の試作 (2)

— 粒子画像の解析手法と その知識の体系化 —

久保文雄 坂上勝彦 田村秀行
スタンレー電気(株) 電子技術総合研究所 キヤノン(株)中央研究所

DIA-Expertシステムは、画像解析における画像処理研究者/技術者の持つ知識・ノウハウを知識ベース化し、画像解析の処理系列をユーザとの対話によって半自動設計するものである。我々は対象領域を粒子画像とし、粒子画像解析のための支援システムDIA-Expert/PA1(Particle Analyzer version 1)を開発した。実際に20数種類以上の多様かつ複雑な粒子画像に対する解析実験を進めながら、その経験やノウハウをDIA-Expert/PA1の知識ベースとして表現した。本稿では、体系的に整理した粒子画像解析に関する知識の内容について述べる。また新しく開発した多角形近似による接触した粒子の分離手法についても報告する。

A P r o t o t y p e o f D I A - E x p e r t S y s t e m (2)

— Image-Processing Techniques for Particle Analysis and Systematization of Knowledge about Them —

Fumio KUBO Katsuhiko SAKAUE Hideyuki TAMURA
Stanley Electric co.,ltd Electrotechnical Lab. Canon Research Center

DIA-Expert is an interactive consultation system which aids the design work of image-analysis procedures. The system is supported by a knowledge base which represents personal expertise or knowhow of image-processing specialists. The prototype system specific to the particle analysis is called DIA-Expert/PA1 (Particle Analyzer version 1). Experience or knowhow which is acquired thru the image-analysis experiments on more than twenty kinds of particle-image samples is systematized into the knowledge base of DIA-Expert/PA1. This paper describes the contents of the systematized knowledge. The newly developed particle-segmentation algorithm using polygonal approximation is also described.

1. はじめに

DIA-Expertシステムの基本理念は画像解析における画像処理研究者／技術者の持つ知識・ノウハウを知識ベース・システム化し、画像解析の処理系列をユーザとの対話によって半自動設計するものである[1]。我々は対象領域を粒子画像とし、粒子解析のための支援システムDIA-Expert/PA1(Particle Analyzer version 1)を開発した[2]。

粒子画像は医療・薬品・金属・印刷・食品等色々な分野での研究対象であり、一般に大量の画像データを取り扱うことが多く自動解析システムが望まれている。しかしながら、現在市販されている粒子解析システムは計測機能が中心であり、領域抽出(セグメンテーション)された粒子の特徴量を計測する機能は豊富にあるが、複雑な粒子画像のセグメンテーションについては、あまり良い手法がインプリメントされていない。また、粒子画像には多種多様なものがあり、場合に応じていろいろな処理手法を選択する必要がある。しかし、そのための処理手法の整理・体系化はなされていない。従って、新しい解析手法を開発するとともに、画像処理技術者の経験によって得られたノウハウを整理して、エキスパートシステムを構築することは十分意義のあることである。それによって、解析過程において人間の介入を軽減できる。

我々は、DIA-Expert/PA1を開発するに当たって、20種類以上の粒子画像の解析実験を実際に行ない、粒子解析特有の処理手法とその知識の体系化を行なった。そしてそれをDIA-Expert/PA1の知識ベースとして表現した。本稿では、体系的に整理した知識と新しく開発した多角形近似に基づく接触した粒子の分離手法について述べる。

2. 画像処理の観点からみた粒子画像

粒子画像は画像解析の対象としては比較的簡単な部類であるが、非常にバリエーションがある。本研究に使用した粒子画像の例を写真1に示す。

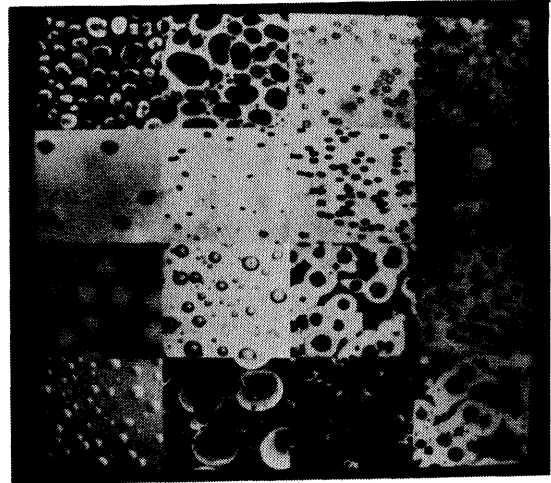


写真1 様々な粒子画像(左上から右方向に順に#1,#2,#3,...,#16)

粒子画像の中にはそれが何の画像であるか、どのような解析目的であるかが分からなくても、どれが粒子であるかを指摘できるものがある。例えば、#5,#9等の粒子画像は明らかに粒子と背景が別れていて、区別しやすい。一方、#4,#11のように粒子以外の成分が数多く含まれていると、何を抽出すればよいのかわからない。さらに、#8は明るさの異なる粒子が混在し、全ての粒子を抽出すべきかどうかは、その粒子に関しての専門家でないとは判断できない。すなわち、粒子画像には画像処理技術者だけで判断できる対象と専門家でないと判断できない対象がある。これは粒子解析における一つの問題点である。

また、粒子解析は大量の画像データを扱うだけでなく、#3,#7のように複雑に接触し重なりあっている粒子を分離して定量的に計測したり、#10,#13のように多数の粒子の特徴量を計測することもある。このような計測を人手で行なうことは非常に労力を要するため、粒子解析システムの自動化が望まれている。

以上は粒子解析における一般的な問題点であるが、デジタル画像処理の立場からみた粒子画像の問題点を考えてみよう。

#2の粒子画像はコントラストが良く2値化のしきい値さえうまく選べば比較的簡単にセグメンテーションできそうであるが、得られ

た2値画像が満足できるものであるかを自動的に判断するのは非常に難しい。#12の粒子画像は2値化した結果、恐らく粒子とそれ以外の成分が残るであろうが、大きさだけでは区別ができない。また、シェーディングのある#3や3次元的構造を持った#14は、単純な2値化処理では粒子の形状を失ってしまうであろうし、#8では明るさの異なる全ての粒子をうまく抽出できるしきい値はないであろう。粒子の明るさが変化している#13も粒子の形状を完全に抽出する手法を考える必要があるが、解析の目的がもし粒子の個数であるならば、粒子の明るい所もしくは暗い所だけを2値化で取り出せば良いはずである。

人間が介入すれば簡単に重なりのある粒子を切り出すことができても、自動的にこなすことは難しい。写真1に見られるように、ほとんどの粒子が何らかの形で接触または重なっており、その形態は粒子間で僅かに接触しているものから大きく重なっているもの、大きさの同じ粒子や異なる粒子で接触しているものまで様々である。全ての状態に適用できる手法は現在の技術では期待できない。従って、その状態に適した手法を選んでいくか、対象ごとに新しいアルゴリズムを開発していく必要がある。

画像処理の手法は当然対象画像によって変えなくてはならないが、#11、#12、#16のように対象が同じでも顕微鏡の倍率や撮影箇所が異なれば粒子以外の成分が微妙に変化し、全く同じ手法では解析できないであろう。つまり、画像処理の立場からみれば画像のクラスが違うことになる。

以上のように、粒子解析における一般的な問題とデジタル画像処理の立場からみた粒子画像の問題は目的による制約や画像の状態によって有機的に絡み合い、複雑な形態をとっている。我々は粒子画像という対象に関する知識と画像処理技術に関する知識を結びつけ、この問題を解決して行かなければならない。

3. 粒子画像解析の枠組み

3.1 粒子解析の基本的な流れ

粒子解析は解析目的を設定して、原画像を入力するところから始まり、目的とする特徴量が計測されたところで終了する。原画像から特徴量が計測される過程で種々の画像処理が実行される訳であるが、次の3つの画像を順次生成していくことが基本となる。

- ・粒子の形状を表現している2値画像
- ・粒子のみが抽出されている画像
- ・各粒子が分離している画像

但し、目的や状態によっては例外も考えられる。例えば、画像全体に対する粒子の占める割合を計測したい場合は粒子間で接触があっても構わないし、濃淡画像処理によって粒子を抽出する方法もありうる。

3.2 粒子画像の2値化

2値化に限らず、処理手法を選択するときには効果の確実性が高いものや処理時間の短いものから適用するのが一般的である。2値化には、固定しきい値による方法と動的しきい値による方法が考えられる。固定しきい値による2値化のしきい値はヒストグラムから自動的に決定できる。生成された2値画像の判断は粒子の形状が失われていないことが原則であるが、もし結果が不十分であるならば、しきい値を手動で決めるようにすればよい。

背景にシェーディングがある場合には、固定しきい値による2値化では粒子だけを抽出するのは難しいため、動的しきい値による2値化が有効である。例として写真1-#3の2つの方法による2値化結果を写真2、3に示す。また、明るさの異なる粒子が混在しているときは、多値化[3]により複数の2値画像を生成し、それぞれについて解析を進めることもできる。

粒子の明るさが変化している場合には上記の方法では粒子の一部が失われてしまうこともあり、良い結果が得られない。また、細かいノイズがあると粒子以外の成分が多くでてしまい、後段の処理が複雑になる。そこで、平滑化等の前処理を適用することも必要となる。



写真2
固定しきい値
による2値化

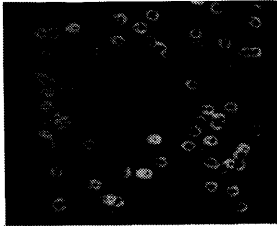


写真3
動的しきい値
による2値化

3.3 粒子の抽出

3.2で生成された2値画像から粒子以外の成分 (Unexpected Object ; 以下UEO と呼ぶ) を取り除き、粒子の抽出を行なう。UEO を、粒子に接触していないものと接触しているものの2種類に分ける。

まず、粒子に接触していないUEO を除去する方法を考える。粒子とこのUEO を区別するのに最も簡単な方法は面積によるものである。しかし、画像処理における面積とはすなわち画素数であり、人間が考える大きさとは異なることがある。特に、粒子に穴があいていたり欠けがあったりすると、必要な粒子も失われてしまう。そのような副作用が起きる可能性があるときは、前処理として穴埋めや欠け補正を施さなければならない。写真4は副作用が生じて、粒子が失われた例である。

面積以外に円形度を用いて区別することもできる。これは粒子が本来丸いという特徴を使い、円形度の値が小さいものを除去すればよい。さらに、画像のフレームに接触している物体 (Frame-Attached-Object ; 以下FAO と呼ぶ) も考慮しなければならない。一般にこれは除去してもよい対象であるが、除去処理により副作用が生じる場合もある。例えば、粒子とFAO が接触していれば除去処理によって粒子も失われてしまうからである。

次に、粒子に接触しているUEO すなわち付着物の除去である。付着物の除去処理は粒子

の整形処理とみなすことができる。収縮処理により粒子と付着物を分離すれば、その付着物は粒子に接触していないUEO となる。従って、面積や円形度でそのUEO を除去することができる。但し、粒子が収縮しているので、膨張処理により粒子をもとの形に戻さなければならない。粒子だけが抽出されたものが写真5である。

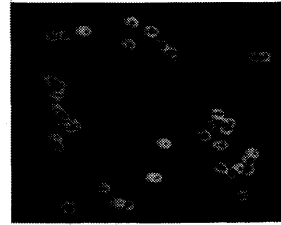


写真4
副作用

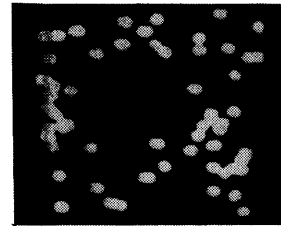


写真5
粒子の抽出

3.4 重なった粒子の分離

抽出された粒子が接触または重なっていて、個々の粒子の特徴量を求めたい場合には分離しなければならない。これは非常に難しい処理であり、決定的な方法はない。

粒子がほぼ円形で接触の状態が僅かなものであり、かつ解析目的が粒子の個数であれば縮退処理により分離することができる。また、粒子が重なっている場合には円近似による分離が有効である[4]。しかし、この手法は円形度を求める場合には意味がないし、粒子の大きさがばらついているとあまり良い結果が得られない。そこで、多角形近似による分離方法をこの研究過程で開発した。その詳しい内容は第4章で述べる。但し、この二つの近似による分離手法はそれぞれ効果的なものであるが、どういう状態の画像にどちらが有効かといった知識がまだ十分に整理されていない。3種類の分離結果をそれぞれ写真6～8に示す。

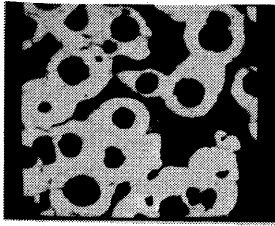


写真6
縮退処理

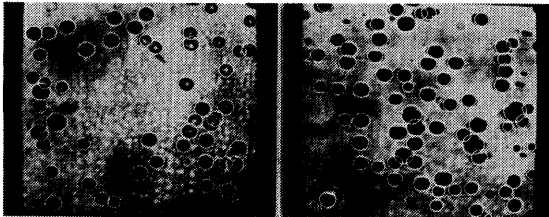


写真7 円近似による分離

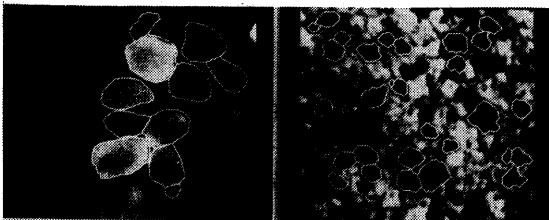


写真8 多角形近似による分離

4. 多角形近似による粒子の分離方法

対象画像を2値画像とし、以下の順で処理を進める。最終的には、複数の粒子が接触した連結成分を分離し、かつ粒子の輪郭を線近似した多角形をうる。

Step1: 各連結成分の輪郭点の座標系列を求める。

Step2: Ramerの方法[5]により、輪郭点の座標系列の多角形近似を行なう。この方法では、近似直線と各輪郭点との最大距離(許容誤差)をパラメータとして与えることにより、頂点数 n が決まる。ここで、その各頂点はもとの画像の格子点上にある。原画像の輪郭線と近似された多角形を図1, 2に示す。

Step3: 線近似により生成される多角形を P_a とし、その円形度 $C_p(P_a)$ を計算する。



図1 原画像の輪郭線

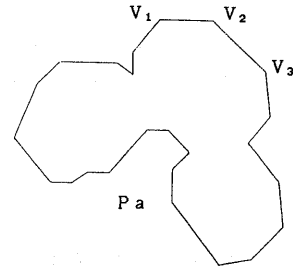


図2 近似された多角形

Step4: 多角形 P_a の各頂点 $V_i (i=1, 2, \dots, n)$ における曲率 $C_u(V_i)$ を計算する。ただし、 $C_u(V_i) = \pi - (\text{V}_i \text{での内角})$ であるので、凸頂点は正、凹頂点は負となる。

Step5: 各粒子は凸多角形であると考え、輪郭の凹部から切断することにより、接触した粒子を分割する。切断の候補として大きなへこみ(曲率の小さな頂点)を選ぶ。すなわち、しきい値 $t (< 0)$ を与え、 $C_u(V_i) \leq t$ の条件を満たす点を切断候補頂点とする。

Step6: 切断線分の両端となる2点の組み合わせを S_j, S_k とし、以下の条件をどちらも満足する全て組み合わせを求める(図3)。

$$\bullet j \neq k \quad \text{かつ} \quad j \neq k \pm 1 \\ (j, k=1, 2, \dots, n)$$

• 切断線分 $S_j S_k$ が P_a の内部にある

Step7: 選ばれた2点により分離される2つの多角形の各の円形度の和 $CS_l, l=1, 2, \dots, m$ (m は組み合わせの数)を計算する。

Step8: $C_p(P_a)$ より大きい値を取る CS_l の中で、最大の値をとる組み合わせ l を切断線分とし P_a を2つの多角形に分離する(図4)。

分離された各の多角形でStep3~8を繰り返す。各多角形で分離する組み合わせがなくなった時点で1つの連結成分に対する分割が

終了する。最終結果を図5に示す。これを全連結成分に対して実行する。

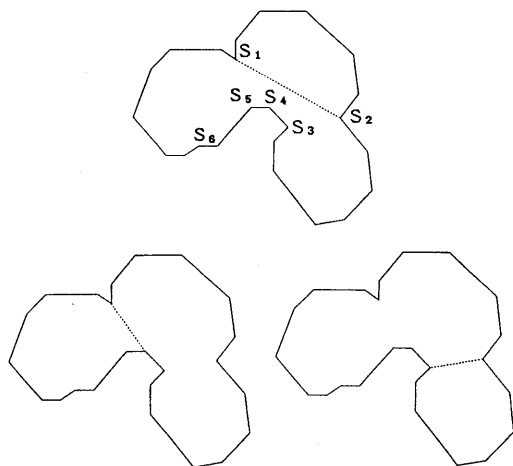


図3 分離する組み合わせ例

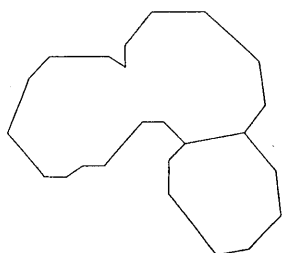


図4 最初に分離された結果

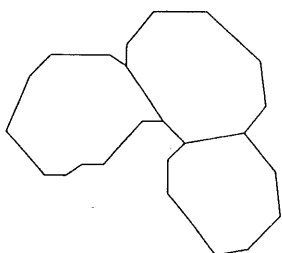


図5 最終結果

5. 粒子解析手法の知識ベース化

5.1 DIA-Expert/PA1への

インプリメンテーション

第3章で述べた内容をDIA-Expert/PA1で実現するため、一般的に用いられる解析目的と処理手法を選択し、粒子解析の基本的な流れとして解析手順の状態を次のように設定した。

状態0：解析目的が選定されている

1：原画像が入力されている

2：2値画像が粒子の形状を十分に表現している

3：粒子のみが抽出されている

4：各粒子が分離している

5：目的とする特徴量が計測された

すなわち、粒子解析は状態0～5のパスを必ず通って行なわれ、状態5がゴールであり2～4はサブゴールと言える。状態0の解析目的はいくつか考えられるが、次の7つを選んだ。

- (1) 画像全体に対する粒子の割合 (面積比率)
- (2) 粒子の個数
- (3) 個々の粒子の面積
- (4) " 周囲長
- (5) " 円形度
- (6) " 中心位置
- (7) " 円相当形

また、次に挙げる16種類の処理モジュールをDIA-Expert/PA1にインプリメントした。

- (1) 固定しきい値による2値化
- (2) 動的しきい値による2値化
- (3) 固定しきい値による3値化
- (4) 平滑化
- (5) エッジの検出
- (6) 穴埋め処理
- (7) 膨張・収縮
- (8) 面積による物体除去(大、小面積)
- (9) 円形度による物体除去
- (10) FAO 除去
- (11) 縮退処理
- (12) 円近似による粒子の分離
- (13) 多角形近似による粒子の分離
- (14) 穴の存在の自動判定ルーチン
- (15) FAO 存在自動判定ルーチン
- (16) 計測ルーチン

ここで、(14)、(15)の自動判定ルーチンはユーザとの対話を少しでも少なくするために用いる。

以上の設定からDIA-Expert/PA1の機能を体系化して表わしたものが図6である。

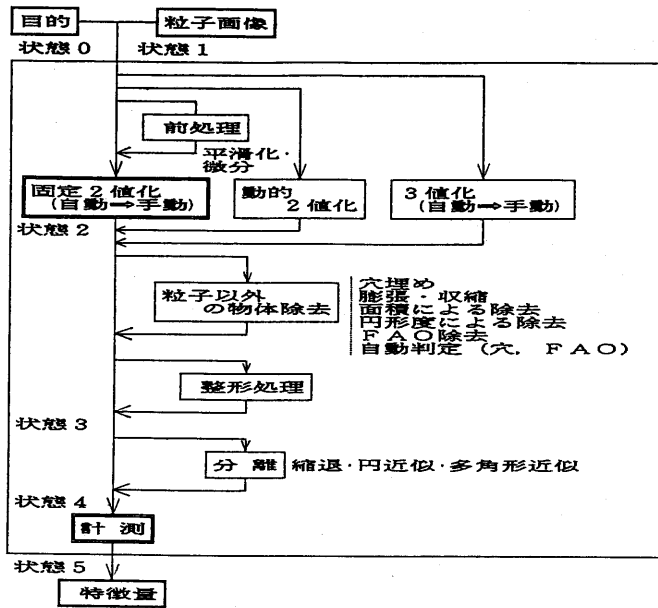


図6 粒子解析手法の体系化

状態0, 1から状態2を生成するのに前処理（平滑化，微分）・固定2値化・動的2値化・固定3値化の方法があり、固定2値化を2重枠で囲っているのは必ず1度実行する意味である。また“自動→手動”は自動的にしきい値を決めた結果が不満足であれば手動に切り換えることを意味している。

状態2から状態3の生成は粒子以外の物体除去・整形処理の順で行ない、穴埋め・膨張・収縮・自動判定等の処理モジュールを用いる。

状態3から状態4へは3種類の分離方法を用いる。最後に特徴量を求めるため、計測ルーチンを必ず通る。

5.2 知識ベース化の問題点

粒子解析における断片的な知識を実際にDI A-Expert/PAIの知識ベースとしてインプリメントする上で様々な問題が生じてきた。

A：解析目的によって適用できる手法とできない手法がある。従って、目的によって処理モジュールを選択できるように知識表現しなければならない。例えば、重なり合った粒子を分離してからそれぞれの円形度を計測する場合には、円近似による分離は意味をなさ

ないため、他の方法を使わなくてはならない。つまり、処理結果の粒子の形状のもつ意味を注意して、目的から処理モジュールを選択しないと、全く意味のない処理をしてしまうことがある。同じ粒子画像に円近似と多角形近似の2つの分離方法で処理した結果を写真9に示す。

また、粒子の個数を求めるのが目的であれば各粒子の形状を保存する必要はないが、面積を求めるのが目的ならば形状を変化させる処理モジュール（例えば収縮処理）の使用には注意を要する。従って、個々の処理モジュールがどう対象画像を変化させるかを、知識ベースに記述しなければならない。収縮処理

を繰り返し適用すると粒子の形状は変化してしまうが、同じ回数だけ膨張すれば面積や中心位置はほとんど変わらない。このように複数の処理を結びつけて記述する必要もある。

B：処理モジュールの中には入力画像の状態によって副作用を生じる恐れのあるものがある。この場合には、入力画像の状態を判断した上で、前処理等を追加し副作用の発生を防ぐ必要がある。すなわち、知識ベースには処理モジュールの効果だけでなく副作用に関するルールも記述されていなくては行けない。画像の状態の判断に関しては、それまでの処理系列から推論できない場合には自動判定ルーチンの起動あるいはユーザへの質問を行えばよい。小面積除去処理の副作用を回避するためのルール例を図7に示す。

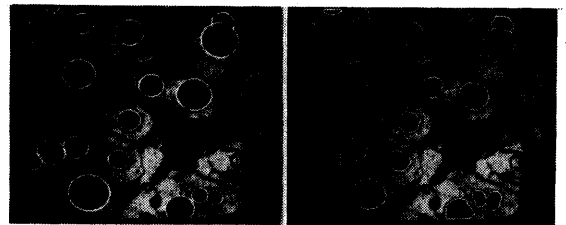


写真9 円近似、多角形近似による分離

```
;; To delete small area objects
;; These are rules to insert preprocessing operations for suppression of side-effects
;;
```

```
(DEFKS delete-small-area-preparation
  (OPR (Delete-small-area (*arg1) (*arg2) ()))
  (STAT $Not_Processed)
  (MODE All)
  (NEXT $Preprocessed)

  (RULE delete-small-area-preparation-r000
    (TIMES 1)
    (IF (input_condition *arg1 Attr (Has_scratch hold))
      (user_ga *arg1 "Restore scratch OK? " hold))
    (THEN (insert_op (Restore-scratch (*arg3) (*arg4) ()))
      (connected_arg *arg *arg1)
      (connect_arg *arg *arg3)
      (connect_arg *arg4 *arg1)))

    (RULE delete-small-area-preparation-r001
      (TIMES 1)
      (IF (input_condition *arg1 Attr (Has_hole hold))
        (user_ga *arg1 "Fill hole OK? " hold))
      (THEN (insert_op (Fill-hole (*arg3) (*arg4) ()))
        (connected_arg *arg *arg1)
        (connect_arg *arg *arg3)
        (connect_arg *arg4 *arg1))))
```

図7 インプリメントしたルール例

C: ある処理モジュールの絶対的な効果に関しての知識がまだ整理されていないときは、複数の手法が適用可能な場合がある。つまり、現時点でインプリメントされている知識ではどれが最適であるかを判断できない。そのような場合にはそれぞれの処理モジュールの意味を指摘し、ユーザにアドバイスして選択させる必要がある。

D: 個々の処理モジュールの効果と副作用に関する知識が十分に整理されていないと、ユーザーとの対話が繁雑になる。これをできるだけ少なくするためには、自動的に画像の状態を判断する処理をインプリメントし、それを状況に応じて起動できる記述方式が必要となる。DIA-Expert/PA1では穴・FA0の存在を自動的に判断するルーチンをインプリメントした。より高度な解析システムを構築するためには、自動評価ルーチンを今後数多く作成して行かなければならないだろう。

DIA-Expert/PA1は柔軟な知識表現の構造を用いて、以上のような知識ベース化の問題を解決している。

6. むすび

本研究では、粒子解析における問題点を抽出し、解析手順の基本的な枠組みを整理した。さらに、解析実験によって一般的な粒子解析に関する知識を体系化し、DIA-Expert/PA1の知識ベースとして表現した。また、多角形近

似による接触した粒子の分離手法を新しく開発した。

謝辞 知識表現に関して、熱心に御討論いただいたキャノン中央研究所佐藤宏明氏に深く感謝します。また、粒子画像データを提供していただいた韓東芝、韓ニレコ、韓エー・ディー・エス、韓ネクサス、韓神戸製鋼所、住友金属工業韓、スタンレー電気韓の関係各位に深謝します。

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3種の知識”, 電子通信学会技術研究報告, PRL83-49(1983).
- [2] 田村, 坂上, 久保, 佐藤: “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-”, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料, CV43-2(1986).
- [3] 大津展之: “判別および最小2乗規準に基づく自動しきい値選定法”, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 4, pp. 349-356(1980).
- [4] 坂上, 高木: “反復演算による重なり合った粒子像の分離”, 情報処理学会論文誌, Vol. 24, No. 5, pp. 561-567(1983).
- [5] U. Ramer: “An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves”, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 1, pp. 244-256(1972).