

画像処理のエキスパート化に関する一考察†

長 橋 宏^{††} 中津山 幹男^{††}

本論文では、任意の画像を対象として、与えられた処理目標を自動的に達成する画像処理のエキスパートについて論ずる。まず、画像処理をエキスパート化するうえで基本となる画像の状態属性という概念と、遷移処理と状態属性との関係について述べる。続いて、画像や処理に関する属性を容易に記述できる画像および処理の表現法を検討し、その表現法に基づいて画像間の因果関係や状態属性を決定することのできる画像処理操作について述べる。さらに、画像の特徴を言語的に表現するために属性述語という概念を導入し、曖昧さの処理が可能なファジイ集合として定義する。そして、属性述語と画像からなる述語命題に対し、真か偽かのいずれかの値ではなく、0から1までのある値をとる確信度を定義する。この属性述語命題の確信度によって、画像の性質や特徴の確からしさを判定することが可能となる。このことを踏まえて、属性述語命題を画像状態の遷移条件の表現に利用する方法と、画像および処理の表現法に基づいて属性述語命題の確信度を求める操作について述べる。そして、画像の状態と遷移命題からなるルールベースをもとに、確信度決定操作と遷移処理実行操作とによって自動的に処理経路と処理を選択し、目標画像を得るといふ画像処理のエキスパート化の方法について述べる。最後に、本方法の有効性について検討する。

1. ま え が き

近年、様々な分野におけるエキスパートシステムが開発されるようになってきた^{1,2)}。画像処理の分野においても、特定の物体形状に関する画像理解システムなどが幾つか試作されている³⁾。また、画像理解とともに重要な画像処理に関しても、エキスパート化の研究が行われるようになってきた⁴⁾。しかしながら、実用的なシステムの開発はほとんど行われていない。その理由として、画像処理技術と画像処理で要求される経験的な知識との関係が十分に検討されていないことが考えられる⁵⁾。

本論文では、画像処理をエキスパート化するための基本的概念について述べ、一連の画像処理というプロセスの中における経験的な知識の利用法と処理の実行法について検討する。その方法として、画像の状態遷移という概念を導入する。筆者らの提案する方法では、処理された画像間の因果関係や抽出された特徴などを処理の過程で効率的に表現する。そのために同一処理の重複を避けることができ、効率的なシステムを構築することが可能となる。また、画像と処理プロセスとの独立性が強いことから、特定の画像に限定されない汎用的なシステムの開発も可能であると考えられる。

2. 画像処理のエキスパート化の基本概念

これまでに多数のエキスパートシステムが開発されているが、その方法としてプロダクションシステム(PS)を採用している場合が多い。本論文でも、PSを基本とした画像処理のエキスパート化の方法について検討する。始めに、画像処理をPS形でエキスパート化するために必要な概念について考え、それに基づいた処理の基本方針について簡単に述べる。

画像処理におけるエキスパートとは何を意味するかということが問題となるが、本論文で述べる画像処理エキスパートを、「任意の画像に対して、与えられた処理目標の達成に必要な処理経路を選択し、必要な処理を自動的に実行するもの」と定義づける。すなわち、与えられた1枚の画像と処理目標から必要な情報や特徴を何らかの方法で取り出し、それに基づいて目標画像を生成することを意味する。したがって、目標達成に必要な処理経路の選択ができるとともに、効率的な画像処理を可能とするエキスパート化の方法を考えなければならない。処理の目標という概念を具体的に表すためには、画像と処理との間に何らかの対応関係がなければならない。そこで、次の定義によって画像と処理プロセスとの関係を記述する。

【定義1】

「任意の画像 n は、その画像に固有な状態属性を持つ。この状態属性を $sf(n)$ と表すとき、処理 p を画像 n に施して得られる結果の画像 m との関係は次式で表す。

$$sf(m) = \lambda(sf(n), p) \quad (1)$$

† A Study of Expert-system in Image Processing by HIROSHI NAGAHASHI and MIKIO NAKATSUYAMA (Faculty of Engineering, Yamagata University).

†† 山形大学工学部電子工学科

ただし、関数 λ は、処理 p と引数画像の状態属性から結果の画像の状態属性を決定する関数とする。」

この定義によって、個々の画像ではなく、画像の状態と画像処理という関係に基づいた議論が可能となる。すなわち、 $sf(n)$ 、 $sf(m)$ をそれぞれ s_1 、 s_2 、状態属性の集合を S とするとき、式(1)は、一般的に

$$s_2 = \lambda(s_1, p) \quad s_1, s_2 \in S \quad (2)$$

と表すことができる。このような条件を満たす画像処理 p を、画像の状態を遷移させるという観点から遷移処理と呼ぶ。ところで、式(1)において、画像の状態属性は遷移処理 p の種類と処理対象画像の状態属性によって決定されるが、何の処理も施されていない画像自身の場合は、状態属性を決定することはできない。そこで、このような画像に対しては、画像の原始状態を表す特別な状態属性 s_0 を付与する。

遷移処理の中には同じような画像を生成するものがあるが、それらと画像の状態との関係に関して次の定義を行う。

【定義2】

「状態属性値 $s_1 \in S$ に対して、遷移処理 p_1 と p_2 との間に次の関係が成り立つとき、

$$\lambda(s_1, p_1) = \lambda(s_1, p_2) \quad (3)$$

遷移処理 p_1 と p_2 とは、状態属性 s_1 に関して縮退関係にあるという。」

与えられた目標状態の画像を生成するためには、縮退関係にある処理の中のどの遷移処理を選択するか、あるいは、対象としている遷移自体が適切であるかを判定する必要がある。したがって、与えられた画像に応じてこれらを選択する条件が必要となる。この条件を遷移条件と呼ぶ。遷移条件と、それに対応する遷移処理によって状態遷移のための規則を構成することが可能となる。この規則を遷移命題と呼ぶ。任意の2つの状態 s_i と s_j において、 s_i から s_j への遷移が可能であるとき、対応する遷移命題を次のように付加する。

$$\begin{array}{c} (f(x) \rightarrow p(x)) \\ s_i \xrightarrow{\quad} s_j \end{array} \quad (4)$$

上式は、「もし、状態 s_i の画像 x が $f(x)$ であるならば、処理 p を x に施し、状態 s_j へ遷移せよ。」ということを表す。 s_i から s_j への遷移命題が縮退関係によって複数個存在する場合は、縮退関係にあるすべての命題を s_i から s_j への遷移枝に対して付与する。次に、遷移命題の選択あるいは遷移するか否かの選択をする手段として、遷移の確からしさという概念を導入する。すなわち、式(4)で表される遷移命題の確からしさとして、

$$0 \leq t(f(x)) \leq 1 \quad (5)$$

となるような確信度関数を定義する。状態 s_i から s_j への遷移の確からしさを $c(s_i, s_j)$ で表すとき、状態 s_i の処理対象画像 x が指定された時点で、遷移命題の確からしさ $c(s_i, s_j)$ を決定することができる。今、初期状態を s_1 とし、 s_1 から状態 s_0 に至る一つの候補経路を (s_1, s_2, \dots, s_0) とする。このとき、この候補経路の確信度 $c(s_1, s_0)$ を次のように定義する。

$$c(s_1, s_0) = c(s_1, s_2) \cdot c(s_2, s_3) \cdots c(s_{0-1}, s_0) \quad (6)$$

s_0 を最終状態とすれば、 $c(s_1, s_0)$ は目標画像を生成する処理経路の確からしさを表す。もし、 s_1 から s_0 へ至る経路が複数個存在する場合は、式(6)で与えられる確信度の一番大きい経路が最適経路となる。次節以降で、経路の選択法、遷移条件の判定法、実際の画像処理の実行法などについて検討する。

3. 画像および画像処理の表現法について

前章で述べた画像処理のエキスパート化法を効率よく実現するためには、それに合った画像の表現法と処理法という最も基本的なことから検討する必要がある。そこで、知識工学の分野でしばしば用いられるフレーム風のデータ構造による画像および画像処理の表現法について以下に述べる⁶⁾。

【定義3】

「2次元アレイ型のデータ構造をもつデータを総称して画像と呼び、その集合を N で表す。また、任意の画像 $n \in N$ を、

$$n := (A_n, M_n) \quad (7)$$

で表現する。ただし、 A_n は画像 n に関する属性集合である。また、 M_n は2次元配列データを表す。」

属性集合の要素は、属性名と値を対にしたリストで表され、その属性名によって管理される。2次元画像配列のデータ型や配列のサイズ、格納位置を画像の基本属性と呼ぶ。この基本属性は、画像が生成された時点ですべての画像に付与される。

【定義4】

「式(7)で表される画像に対して施される処理 p を式(8-a)のように表す。また、処理 p が q 個の画像 n_1, n_2, \dots, n_q を対象とする処理であるとき、 p を q 個の処理と呼び、それらの画像に p を施す操作を式(8-b)で表す。

$$p := (A_p, R_p) \quad (8-a)$$

$$\phi(p)[n_1, n_2, \dots, n_q] \quad (8-b)$$

ただし、 A_p は処理 p に関する属性情報を表し、 R_p

は処理プロセス本体を表す。また、 ϕ は処理 p を起動するとともに、その結果を特別のラベルで画像表現する関数である。」

式(8-b)の処理操作においては、汎関数 ϕ の結果自身が式(7)の形式で表現されることから、汎関数 ϕ の結果に対しても ϕ による次の処理が可能となる。ただし、その特別なラベルの属性と画像配列は、次の処理の実行によって消滅する。もし、必要な画像である場合は、次の汎関数 ϕ の実行前に別の名前の画像として保存しなければならない。固有なラベルを返す関数を $lbl()$ とすると、次式はその固有なラベルでの保存操作を表す。

$$lbl() \leftarrow \phi(p)[n_1, \dots, n_q] \quad (9)$$

ところで、定義1で導入した状態遷移関数 λ は、処理前と処理後の画像の状態間の関係を表すものとして定義されているが、複数の引数画像を必要とする q 個の処理の場合は、引数画像と結果の画像とが一対一に対応しない。そこで、式(8-b)の操作における第二引数以降のすべての引数は、第一引数と何らかの関係にあり、第一引数と結果との間でのみ遷移関係が規定されるという制限を設ける。これにより、定義1で述べた画像の状態遷移という概念が、式(8-b)で表現された処理操作においても適用することが可能となる。そこで、定義1の状態遷移関数 λ に対応した遷移処理実行操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ を導入し、式(9)を次式のように表す。操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ の詳しい内容は後述する。

$$m \leftarrow \langle n, p \rangle \quad (10-a)$$

$$:= (lbl() \leftarrow \phi(p)[n, n_1, \dots, n_q])$$

$$sf(m) = \lambda(sf(n), p) \quad (10-b)$$

簡単な例として、原始状態の画像 pic に対して、ヒストグラムを求める処理 $hist$ を実行したとする。すなわち、操作 $\leftarrow \langle pic, hist \rangle$ を行う。その結果として得られた画像は、“ヒストグラム”状態の画像であり、遷移処理 $hist$ によって原始状態から遷移したことを表す。

画像処理をエキスパート化する上で基本的に必要なことは、処理プロセスの効率的な合成法であると考えられる。しかも、画像状態の遷移という概念を基にした本論文のエキスパート化法では、遷移処理としての合成が可能でなければならない。また、合成された処理は、遷移処理 p と同等に実行されることが望ましい。ところで、式(10-a)右辺の $\leftarrow \langle n, p \rangle$ による遷移処理 p の実行においては、処理に必要な第二引数以降の引数が指示されない。したがって、それぞれの遷

移処理に必要な引数情報が個々の処理に対して付与されている必要がある。また、遷移処理の引数対象画像からすべての引数を決定できることも要求される。これらの要求を満足する画像と処理の関係表現法を次に検討する。

まず、画像間の関係表現について考える。画像の状態属性については、ISA (Image State Attribute) という属性名で表現する。一般に、ある画像に対して何らかの遷移処理を行った場合、処理結果の画像と処理対象画像との間には、いわゆる親子関係が成立する。そこで、画像に対して行われた遷移処理の因果関係を表す属性として、処理対象画像には親属性を表す POF (Parent OF) 属性を、子属性を表す COF (Child OF) 属性を結果の画像に付与する。また、親画像から子画像に継承される属性として、子孫関係を表す DOF (Descendant OF) 属性も付与する。状態属性として原始状態を表す so が付与されている画像は親属性 POF の値がない。そこで、自分自身を DOF 属性の値として付与されるものとする。次に、遷移処理の表現法について検討する。

ここで、属性に関する基本的な操作として、ラベル n から属性 a の値を取り出す操作と、属性 a の値として x を付与する操作を次のように表す。

$$\leftarrow \langle n, a \rangle \quad (11-a)$$

$$\rightarrow \langle n, a, x \rangle \quad (11-b)$$

上述の属性操作を用い、改めて遷移処理 p を引数画像との関係から定義しなおす。

【定義5】

「処理 p の第一引数画像 n に対して、 $n_0 = \leftarrow \langle n, DOF \rangle$ であるとき、処理 p の第二引数以降の画像 n_i に関して

$$n_0 = \leftarrow \langle n_i, DOF \rangle \quad (12)$$

の関係が成り立つならば、処理 p は遷移処理である。」

この定義から、 n_0 に複数回の遷移処理を連続して施すことによって引数画像 n_i を生成することが可能となる。今、連続する遷移処理が $p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iv}$ の順序であるとする、画像 n_i は操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ によって次式のように表される。

$$\begin{aligned} n_i &= \leftarrow \langle \dots \leftarrow \langle \leftarrow \langle n_0, p_{i1} \rangle, p_{i2} \rangle, \dots, p_{iv} \rangle \rangle \\ &= \leftarrow \langle \dots \leftarrow \langle \leftarrow \langle n, DOF \rangle, p_{i1} \rangle, \dots, p_{iv} \rangle \rangle \quad (13) \end{aligned}$$

式(12)の条件のもとでは、第一引数画像である n をもとに第二引数以降の画像 n_i を決定もしくは生成することができることを式(13)は示している。 p_{i1} から p_{iv} までの一連の遷移処理プロセスを新たな処理 p_i

で表すとき、処理 p_i を複合遷移処理と呼び、次のように表現する。

$$p_i = (p_{i1}, \dots, p_{i2}, p_{i1}) \quad (14)$$

複合遷移処理の実行に関しては、式(13)に示したように、操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ による個々の遷移処理の起動が必要である。これまでは、単一遷移処理の実行を目的として操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ を使用してきたが、以後、単一遷移処理と複合遷移処理、さらには遷移処理のリストを统一的に処理できるものとする。また、遷移処理の属性操作も行うものとする。すなわち、画像 n に処理 p の結果が既に属性付与されている場合、 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ はその値である画像を返し、もし無ければ処理 p を実行した後に結果を返すとする。ここで、汎関数 ϕ による単一遷移処理 p の実行式を、 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ と式(14)の関係を用いて書き換えると次式ようになる。

$$\begin{aligned} \phi(p)[n, \leftarrow \langle n, \text{DOF} \rangle, p_1], \dots \\ \dots, \leftarrow \langle n, \text{DOF} \rangle, p_q] \end{aligned} \quad (15)$$

そこで、拡張関数 $\text{sprd}()$ を次のように定義する。

$$\text{sprd}(\langle p_1, p_2, \dots, p_q \rangle, x) := \left(\leftarrow \langle x, \text{DOF} \rangle, p_1 \right), \dots, \leftarrow \langle x, \text{DOF} \rangle, p_q \right) \quad (16)$$

(p_1, \dots, p_q) を遷移処理 p の補助処理と考え、AUX(AUXiliary)を属性名として

$$\rightarrow \langle p, \text{AUX}, (p_1, \dots, p_q) \rangle \quad (17)$$

の操作を処理 p に対してあらかじめ行っておく。これにより、式(10-a)の操作が可能となる。また、複合遷移処理 p_i に対しては、式(14)の右辺のリストを p_i の複合処理属性 PRO(PROcesses)の値として付与する。すなわち、

$$\leftarrow \langle p_i, \text{PRO}, (p_{i1}, \dots, p_{i1}) \rangle \quad (18)$$

```

procedure  $\leftarrow \langle n, p \rangle$  ;
  (var x, px;
   if null(p) then return(n);
   x=cadr(assoc( $\leftarrow \langle n, \text{POF} \rangle, p$ ));
   if not(null(x)) then return(x);
   if atom(p) then do {
     px= $\leftarrow \langle p, \text{PRO} \rangle$ ;
     if (not(null(px))) then do {
       x= $\leftarrow \langle n, px \rangle$ ;  $\rightarrow \langle n, p, x \rangle$ ;
       return(x);
     }
   }
   else do {
     x=(lbi() $\leq \phi(p)[n, \text{sprd}(\leftarrow \langle p, \text{AUX} \rangle, n)$ ]);
      $\rightarrow \langle x, \text{COF}, n \rangle$ ;
      $\rightarrow \langle n, \text{POF}, \text{list}(p, x) \rangle$ ;
      $\rightarrow \langle x, \text{DOF}, \leftarrow \langle n, \text{DOF} \rangle \rangle$ ;
      $\rightarrow \langle x, \text{ISA}, \lambda (sf(n), p) \rangle$ ;
     return(x);
   }
  )
else  $\leftarrow \langle \leftarrow \langle n, \text{cdr}(p) \rangle \rangle, \text{car}(p) \rangle$  ;

```

図1 遷移処理操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ の定義
Fig. 1 Definition of $\leftarrow \langle n, p \rangle$ operation for executing image processings.

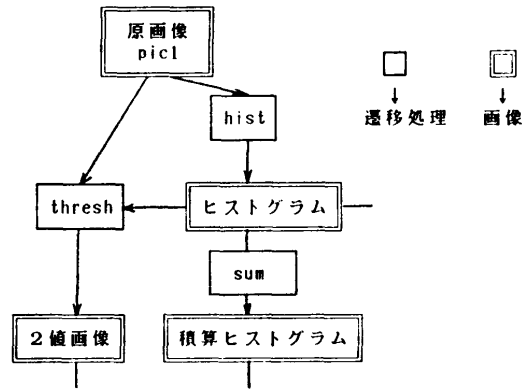


図2 遷移処理と画像との関係例
Fig. 2 An example of relationships between transition processings and images.

を行う。以上のことを踏まえ、前述の操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ を定義したのが図1である。同図の, null, not, atom, cadr, assoc, list 等はリスプで定義されている基本関数と同じ働きをする。操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ によって、前節で述べたエキスパート化の最も重要な部分である遷移処理の実行が可能となる。操作 $\leftarrow \langle n, p \rangle$ に基づいた簡単な処理について図2の例をもとに述べる。図2の二値化処理 thresh がヒストグラムからいき値を決定する処理であるとする。この処理の中でも原画像からヒストグラムを求めることができるが、処理の終了とともにそのデータを消滅してしまう。一方、同図の例のようにヒストグラムデータを他の処理で利用するとすれば、ヒストグラム処理が重複して行われることになる。そこで、ヒストグラム画像を thresh の第二引数として登録しておき、操作 $\leftarrow \langle \text{pic 1}, \text{thresh} \rangle$ を行えばよい。この操作の中で、

$$\phi(\text{thresh})[\text{pic 1}, \leftarrow \langle \text{pic 1}, \text{hist} \rangle]$$

を評価する際にヒストグラム画像が既にあれば、それを第二引数とする。もし無ければ、ヒストグラム処理の起動が自動的に行われて画像として表現された後に、thresh に渡される。

4. 画像の特徴と言語的概念による特徴表現

現在の一般的な画像処理は、我々の経験的な知識に基づいて行われる場合がほとんどである。これらの経験的知識は、画像のもつ様々な特徴の分析に基づいている場合が多い。また、これらの特徴を特徴量自身で表現するよりも、数量概念を表す言語で表現した方が特徴概念の把握が容易であ

ると考えられる。そこで、画像の特徴と言語的概念とを結びつけた遷移条件の記述法、および遷移条件の評価法について検討する⁷⁾。

【定義6】

「画像の特徴 α を表す言語 L 内の語 w_α を、画像に関する属性述語と呼び、その述語集合を W で表す。」
 一般に、特徴 α を表す属性述語を $w_\alpha \in W$ 、画像を n とするとき、「画像 n は属性 w_α である」という命題が成立する。この命題を $w_\alpha(n)$ で表す。 $w_\alpha(n)$ は、画像に関する属性述語命題となる。この属性述語命題を「真」か「偽」かのいずれかの真理値をとる2値命題として扱うことは適当ではない。なぜなら、特徴の決定過程とその表現方法に起因する曖昧性が存在するからである。そこで、次の定義を行う。

【定義7】

「属性述語 w_α と画像 n とからなる述語命題 $w_\alpha(n)$ の確からしさを表す関数を t とするとき、属性述語命題 $w_\alpha(n)$ を、

$$0 \leq t(w_\alpha(n)) \leq 1 \quad (19)$$

とする。また、 $t(w_\alpha(n))$ を、 $w_\alpha(n)$ の確信度と呼ぶ。」
 ここで、画像 n に対する属性述語命題の確信度を求める操作 $\leftarrow(n, w_\alpha)$ を導入する。この操作は、属性述語 w_α の命題確信度が既に n に付与されているとき、その値を返すものとする。もし、確信度が付与されていない場合は、その確信度を求める処理を行った後にその結果を返すものとする。ところで、属性述語命題 $w_\alpha(n)$ の確信度を求めるためには、属性述語 w_α に対する特徴の定義とその特徴の抽出方法が明らかになっていなければならない。そこで、画像の特徴量を求める処理について考える。前節で述べた遷移処理では、式(7)の画像形式で結果の表現が行われる。しかしながら、画像の特徴を表すスカラ量を求めたい場合、処理結果を画像形式で表現する必要はない。そこで、遷移処理とは別にもう一つの処理概念を導入する。

【定義8】

「属性述語 w_α に対応する特徴概念 α を示唆するスカラ値を、 n および n_1, \dots, n_q から求める処理を E_α 、 E_α で得られる値の存在する空間を D_α とするとき、この処理操作を次式で表す。

$$d = E_\alpha(n, n_1, \dots, n_q), \quad d \in D_\alpha \quad (20)$$

また、処理 E_α を特徴抽出処理と呼ぶ。」

確信度抽出操作 $\leftarrow(n, w_\alpha)$ では、画像と属性述語のみが情報として与えられる。この操作で確信度計算を行

うためには、特徴抽出処理に関する情報を述語自身の属性情報として与えておく必要がある。そこで、属性述語 w_α と特徴抽出処理 E_α との関係を記述するために、述語 w_α に対して次の属性操作を行う。

$$\rightarrow(w_\alpha, \text{EXT}, E_\alpha) \quad (21)$$

さらに、特徴抽出処理で必要とする n 以外の引数画像については、遷移処理における第二番目以降の引数画像の場合と同様に、特徴抽出処理自体に情報が付加されることが必要である。そこで、特徴抽出処理に必要な第二引数以降の画像 n_i を原画像から生成する遷移処理もしくは複合遷移処理が p_i となるとき、

$$\rightarrow(E_\alpha, \text{AUX}, (p_1, p_2, \dots, p_q)) \quad (22)$$

の操作を E_α に対して行う。

次に、特徴抽出処理で得られた特徴量を評価することによって、命題の確信度を求める。特徴量の評価および判定については、経験的な要素が含まれる場合が多い。そこで、経験性あるいは直感性を積極的に活用する目的で、本論文では、1965年にZadehによって提唱されたファジイ集合理論を導入する⁸⁾。画像処理とファジイ集合との関係を述べる前に、ファジイ集合の基本的な性質について簡単に述べる。今、 x を要素とする全体集合を X とするとき、 X におけるファジイ集合 A とは、

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1] \quad (23)$$

なるメンバシップ関数 $\mu_A(x)$ によって特性づけられる集合のことである。このファジイ集合の代表的な特性をあげると、

(1) ファジイ集合 A の補集合 $\sim A$ が存在し、そのメンバシップ関数は、

$$\mu_{\sim A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (24-a)$$

で与えられる。

(2) ファジイ集合 A, B の和集合 $C = A \cup B$ もファジイ集合となり、そのメンバシップ関数は、

$$\begin{aligned} \mu_C(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \\ &= \max_{x \in X} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \end{aligned} \quad (24-b)$$

で与えられる。

(3) ファジイ集合の A, B の共通集合 $C = A \cap B$ もファジイ集合となり、そのメンバシップ関数は、

$$\begin{aligned} \mu_C(x) &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \\ &= \min_{x \in X} [\mu_A(x), \mu_B(x)] \end{aligned} \quad (24-c)$$

で与えられる。

つぎの定義は、属性述語をファジイ集合として定義するものである。

[定義9]

「特徴抽出処理 E_α によって得られるスカラ特徴空間 D_α 上で、式(25-a)を満たす特性関数 μ_α を導入する。また、 $\mu_\alpha(d)$ の値を、特徴概念 α を表す属性述語命題の確信度と呼び、式(25-b)のように表す。

$$0 \leq \mu_\alpha(d) \leq 1, d \in D_\alpha \quad (25-a)$$

$$t(w_\alpha(n)) = \mu_\alpha(d) \quad (25-b)$$

この定義によって、属性述語 w_α は μ_α によって特性づけられたファジイ集合となる。ところで、特徴概念が多くなるに従って、それに対応したメンバシップ関数の数も増大する。また、複雑な概念に対応する属性述語命題の確信度をどう定義するかということも問題となる。そこで、既に定義された属性述語によって新たな属性述語を定義することについて考える。属性述語 w_α と w_β が画像に関するファジイ集合で、それぞれのファジイ集合を特性づけるメンバシップ関数が μ_α, μ_β であるとする。式(25-b), (24-c)から、ファジイ集合の和集合と積集合を求めることができる。それぞれの集合に特徴概念的に該当する L 内の語 w_r, w_s が存在するとき、 w_r および w_s を属性述語 w_α と w_β によって定義された複合述語と呼び、それぞれのメンバシップ関数を次式で与える。

$$\mu_r(x) = \mu_\alpha(x) \vee \mu_\beta(x) \quad (26-a)$$

$$\mu_s(x) = \mu_\alpha(x) \wedge \mu_\beta(x) \quad (26-b)$$

一般に、 q 個の属性述語 w_1, \dots, w_q を要素とし、ファジイ論理和、論理積それに否定の演算子 \cup, \cap, \sim から成る任意の述語多項式を $F(w_1, \dots, w_q)$ 、対応するメンバシップ多項式を $f(\mu_1, \dots, \mu_q)$ でそれぞれ表す。もし、述語多項式 $F(w_1, \dots, w_q)$ に該当する述語 w_q が存在するならば、

$$w_q := F(w_1, \dots, w_q) \quad (27-a)$$

と表し、メンバシップ関数 μ_q を次式で定義する。

$$\mu_q = f(\mu_1, \dots, \mu_q) \quad (27-b)$$

属性述語とメンバシップ関数との関係についても、特徴抽出処理の場合と同様に次の操作によって関係記述を行う。

$$\rightarrow \langle w_\alpha, \text{MEM}, \mu_\alpha \rangle \quad (28)$$

複合述語に対しては、複合遷移処理の場合と同様にその述語を構成する述語多項式を PRE (PREdicates) 属性の値として付与する。すなわち、

$$\rightarrow \langle w_q, \text{PRE}, F(w_1, \dots, w_q) \rangle \quad (29)$$

以上のことを考慮して確信度操作 $\leftarrow \langle n, w_\alpha \rangle$ を定義したのが図3である。図3の定義から、 w_α が属性述語

```

procedure  $\leftarrow \langle n, w_\alpha \rangle$ ;
{var x, wx, E $\alpha$ ,  $\mu_\alpha$ ;
  x=cadr(assoc( $\leftarrow \langle n, \text{PRD} \rangle$ , w $\alpha$ ));
  if not(null(x)) then {
     $\mu_\alpha \leftarrow \langle w_\alpha, \text{MEM} \rangle$ ;
    return( $\mu_\alpha(x)$ );
  }
  if eq(w $\alpha$ , F(w1, ..., wq)) then do {
    x=F( $\leftarrow \langle n, w1 \rangle$ , ...,  $\leftarrow \langle n, wq \rangle$ );
    return(x);
  }
  else do {
    wx= $\leftarrow \langle w_\alpha, \text{PRE} \rangle$ ;
    if eq(wx, F(w1, ..., wq)) then do {
      x=F( $\leftarrow \langle n, w1 \rangle$ , ...,  $\leftarrow \langle n, wq \rangle$ );
      return(x);
    }
    else do {
      E $\alpha$  =  $\leftarrow \langle w_\alpha, \text{EXT} \rangle$ ;
       $\mu_\alpha$  =  $\leftarrow \langle w_\alpha, \text{MEM} \rangle$ ;
      x = E $\alpha$ (n, sprd( $\leftarrow \langle E_\alpha, \text{AUX} \rangle$ , n));
       $\rightarrow \langle n, \text{PRD}, \text{list}(w_\alpha, x) \rangle$ ;
      return( $\mu_\alpha(x)$ );
    }
  }
}

```

図3 述語命題の確信度操作 $\leftarrow \langle n, w_\alpha \rangle$ の定義
Fig. 3 Definition of $\leftarrow \langle n, w_\alpha \rangle$ operation for calculating truth-value of attributive predicates.

以外にも、複合述語あるいは述語多項式のいずれであっても確信度を求めることが可能である。次に、述語命題について簡単な例を述べる。

ヒストグラム状態の画像から平均値を求める処理として average 1 という処理があるとする。この average 1 は特徴抽出処理と考えることができる。しかし、処理の結果は平均値を示しているだけで、それに対する評価は行われていない。そこで、「暗い」という語を導入すると、平均値濃度 d の画像に対して「平均値濃度 d の画像は暗い」という一つの命題が構成される。一方、「暗い」という述語を特性づけるメンバシップ関数が図4のように与えられているとすれば、濃度 d に対するグレードを求めることができる。その値が、「平均値濃度 d の画像は暗い」という命題の確信度となる。

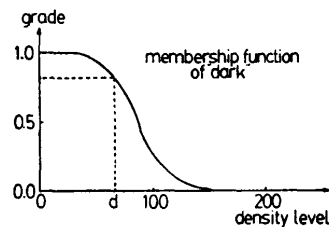


図4 属性述語「暗い」を特性づけるメンバシップ関数の例
Fig. 4 An example of membership function characterizing a predicate "dark".

5. 処理の実行法と本手法の有効性について

ある画像状態で遷移処理を選択すると、遷移すべき状態が決定される。一つの画像状態においては、複数の状態への遷移が可能である。同じ状態への遷移でも縮退関係から複数の遷移処理が存在する場合もある。このような遷移状態や遷移処理の選択を行うために、処理の目的や対象画像の特徴などを指定する遷移条件が利用される。そこで、あらかじめ作成された状態属性と遷移命題のルールをもとに経路を選択し、処理を実行する方法について簡単に述べる。

今、初期状態と最終状態をそれぞれ s_1 と s_n とするとき、式(6)より、 s_1 から s_n に至る任意の経路の確信度を決定することができる。ただし、式(6)の積演算子はファジイ積演算子とする。 s_1 から s_n に至るすべての候補経路の中で、確信度の最も高い経路が最適処理経路となる。しかし、この最適な経路での処理を選択するとすれば、 s_1 から s_n に至るすべての経路の確信度を求めなければならない。この最適経路での処理は、非常に多くの処理時間がかかることから現実的な選択ではない。本論文では、最初に、初期状態から最終状態に至るすべての候補経路を、ルールベース中の状態属性のマッチング操作によって求める。この段階では確信度の計算は行わない。次に、その候補経路の中で最も経路長の短い候補経路を決定し、その経路に沿った各状態間の確信度を求める。例えば、注目している経路上の頂点 s_i から隣接する頂点 s_j への遷移確信度 $c(s_i, s_j)$ を求める場合を考える。図3に示した操作 $\leftarrow\langle n, w_a \rangle$ のそれぞれの引数に対して、処理対象画像と s_i から s_j への遷移条件が束縛され実行される。その値が指定された値以下であるとき、その候補経路での処理は不適当と判定する。しきい値より大きい場合は、 s_i から s_j への遷移処理が取り出され、遷移操作 $\leftarrow\langle n, p \rangle$ によって実行される。その結果は、状態 s_j の画像として新たなラベルで表現され、 s_j から次の状態への遷移命題の処理対象画像となる。このようにして、頂点 s_n まで到達できる最初の候補経路が得られたとき、その経路を準最適経路として採用する。

以上、画像処理を PS 形式でエキスパート化する方法について述べた。次に本方法の特徴とその有効性について考察する。まず、画像の状態遷移という概念と汎用遷移操作を導入したことによって、個々の画像と処理プロセスの独立性が極めて良くなっていることが挙げられる。その結果として移植性が良くなり、他の

方法による画像処理エキスパートへの応用も十分可能であると考えられる。また、処理途中の結果についての因果関係の記述も行われるため、同じ画像に対する同一遷移処理や特徴抽出処理の重複を避けることができる。それぞれの処理に関しては、処理ルーチンと属性表現とが区別されているため、新たな処理の登録や不用な処理の削除等を容易に行うことができる。処理ルーチンについては、アセンブラやC言語を用いて記述できるため、処理の高速化が可能である。さらに、操作 $\leftarrow\langle n, p \rangle$ と $\leftarrow\langle n, w_a \rangle$ を対話的に利用することによって、実際の画像処理を通じてエキスパート化に必要な遷移命題を決定していくことが可能である。このような観点から、本論文で提案した方法は、有効な画像処理のエキスパート化法であると考えられる。この方法に基づいた画像処理のエキスパートシステムを、筆者らが既に報告したリスプ指向形の画像処理システム上に作成している。その詳細については稿を改めて報告するが、基礎的な実験の結果からも本方法の有効性が確認されている。

6. む す び

プロダクションシステムに基づく画像処理のエキスパート化のための基本的概念について考え、それに合った画像と処理プロセスの表現方法について検討した。また、画像処理に関する経験的知識の効果的な表現法についても検討した。さらに、与えられた処理目標を達成するのに必要な処理経路の決定法と、それを実現するための2つの重要な操作について述べた。本論文で導入した画像および処理プロセスの表現法は、それぞれの属性と実際のデータや処理ルーチンとを区別して表現する。そのため移植性が良く、他の画像処理エキスパートにも適用できる有効な表現方法であると考えられる。現在、本論文で述べた概念に基づく画像処理エキスパートシステムを作成し、その評価を行っている。今後は、個々の画像処理と画像の特徴概念との関係、さらには属性述語との関係についてもより検討を加えていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 田中幸吉編：知識工学，朝倉書店，東京(1984).
- 2) IEEE Computer Society: Expert Systems in Engineering, *Computer*, Vol. 19, No. 7 (1986).
- 3) 情報処理学会編：特集：コンピュータビジョン，情報処理，Vol. 24, No. 12 (1983).
- 4) 田村ほか：EIA-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. 情報処理学会研究会資料, CV 3-2 (1986).

- 5) 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, PRL 83-49 (1983).
- 6) 長橋, 中津山, 西塚: マイコン用会話形画像処理システムについて, 信学論 D, Vol. J68-D, No. 11, pp. 1926-1933 (1984).
- 7) 長橋, 中津山, 西塚: フェジイ的属性述語による画像処理のエキスパート化について, 信学技報, PRU 86-52 (1986).
- 8) Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353 (1965).

(昭和 61 年 12 月 22 日受付)

(昭和 62 年 10 月 14 日採録)



長橋 宏 (正会員)

昭和 26 年生. 昭和 50 年東京工業大学電気工学科卒業. 昭和 55 年同大学院総合理工学研究科博士課程修了. 昭和 56 年山形大学工学部電子工学科助手. 昭和 62 年同助教授, 現在に至る. 工学博士. パターン認識, 画像処理, エキスパートシステムなどの研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.



中津山幹男 (正会員)

1932 年生. 1955 年東京工業大学工学部電気工学課程卒業. 1957 年同大学院修士課程電気工学専攻修了. 同年, 山形大学工学部助手. 1962 年助教授. 1972 年電子工学科教授, 現在に至る. 工学博士. その間, チョッパ増幅器, 波形変換, 高速アダマール変換用プロセッサなどの研究に従事. 現在は画像処理, フェジイ集合による推論などに興味をもっている. 電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員.