

解説

人工知能を用いた画像処理

安田 嘉純

千葉大学工学部電子工学科 〒260 千葉市弥生町 1-33

(1988年7月30日受理)

Artificial Intelligence in Image Processing

Yoshizumi YASUDA

Department of Electronics, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Chiba 260

1. はじめに

人間の視覚の代行を計算機で行なおうとする試みは計算機の出現とともに考えられ、試みられてきている。しかし、人間の能力とはほどとおい。人がシーンまたは画像を見て、それが何であるか認識したり、理解できるのは、目から視覚情報を取り入れる機能に加え、適切な特徴を抽出する機能、そして、種々の知識を用いてその特徴を解釈する機能があるからだと考えられるようになっている。

従来の画像処理では、(1) 前処理、(2) 領域分割、(3) 特徴抽出、(4) 分類、というような四つの処理段階が考えられている。はじめに、センサーから入力された画像は前処理によってノイズの除去、ぼけの修正などが行なわれる。次に、エッジ抽出、閾値処理などによって領域分割し、形として意味のある部分を取り出す。それを解析、測定して幾何的計量を与えるパラメータを求め、対象とする物体の典型的な特徴ベクトルを抽出する。そして、ベイズなどによる統計的決定理論により分類を行なう。このようなデジタル画像処理技術は1980年代に入って、長年の研究の段階を脱し、急速に普及し、また、利用されるようになっていく。その背景にはマイクロチップなどの進歩によるメモリー量の増加、計算速度の急速な高速化があげられよう。また、画像を処理してその画像が何を表わしているか知る、すなわちシーンの記述を作っていくような画像理解の研究¹⁻⁵⁾、ロボットのような機械に人のもつ視覚機能を付け加える問題を考えるロボットビジョン、またはコンピュータビジョ

ンの研究⁶⁻⁸⁾も急速に進んでいる。

計算機による画像処理は局所的な判断に優れているものの、広いところを見る手段がないことが大きな制約となっている。人は細かいところをきちっと見ているとともに、大局的判断も行なっている。したがって、計算機による画像処理では、たとえば木構造を用いて全体を探っていくような分析的、または推論的な手法が試みられるようになっていく。また、人が画像を見てそれが何であるか理解したり、抽出された特徴を解釈するとき種々の知識を用いるのと同様に、画像理解やコンピュータビジョンにおいてもシーン内の対象に関するモデルや知識を利用することが重要となっている⁹⁻¹²⁾。

一方、1950年代から始まった人工知能の研究は推論システムから知識型のシステムへと発展している¹³⁾。また1970年代後半には手軽に人工知能応用システムを開発できるような言語やツールが市販されるようになり、最近における人工知能の産業などへの実用の進展のきっかけとなっている。従来の画像処理においても先見の知識は用いられているが、人工知能の概念に基づく知識ベースシステムを用いることにより、より高度な知識を用いた画像処理が可能である。さらに、医者がX線画像から病状を診断したり、地質学者が衛星画像から地形や岩石形を判読したりするときの応用分野に関する専門知識を画像処理に利用することもできるようになる。また、画像処理専門家のノウハウを知識ベース化し利用することにより、医者や地質解析者が与えられた問題解決のために、種々の画像処理手法を適切に選択し組み合わせるようなシステムの開発も可能となる。

知識を利用しようという考えに対して、物理、光学、幾何学といった視覚のもとになるプロセスを注意深く取り入れることによって、計算機に視覚の能力を与えようとする考え方も人工知能の重要な研究分野となっている^{6,8)}が、ここでは知識ベースシステムを利用した画像処理について述べる。

2. 知識型のシステム

簡単な例として、衛星画像から船を認識する場合を考える。従来の画像処理では画面全面について、差分やマッチングなどの手法を用いて均一な処理を行なう。この場合、ときとして陸上にある構造物が船として認識されたりする。船は水域にあるものであり、また、海岸線や航路図、ドック、港などについての知識、すなわち船という世界についてのモデルを用いることにより処理範囲を限定することができ、処理速度を短縮し、しかも処理結果の信頼度を高めることが可能となる。画像処理、画像理解において利用される知識としては、上の簡単な例のように、(1) 対象の周辺の特徴に関するものがあげられる。さらに、(2) 対象の時間的変動に関するもの、そして、(3) 3次元的情報に関するもの、などがある。また、これらの知識は対象の特徴量、または記述のいずれでもよい。

知識ベースシステムと呼ばれる人工知能の概念に基づくシステムでは、知識を一定の形式で表現することにより、定義、変更、追加を容易にするような知識ベースを準備する。計算機内における知識の表現方法としては、

スミソナイト	
地表面被覆型	霏岩
吸収スペクトル	① 2.01 μm
	② 2.37 μm
	③ 2.57 μm

図1 フレームによる知識の表現

フレーム方式¹⁴⁾とルール方式¹⁵⁾がよく用いられている。フレーム方式は知識をあるまとまった単位として表現するもので、ルール方式による知識表現に比べ、見通しのよい表現方法となっている。図1は岩石形のスペクトルの特徴をフレームを用いて記述した例である。各フレームには多数のスロットが含まれ、そのフレームの属性や、他のフレームとの関係などを導くことができる。通常のフレームでは、数値や名前などの定数が代入されるが、変数を代入することも可能であり、たとえば、 $1.6 \mu m \leq \text{吸収バンド} \leq 2.2 \mu m$ というような制約条件によって、概念間の階層構造や属性間関係を定義することもできる。

図2は、こうした制約条件による岩石形の分類を表わすような階層構造の例である。上位～下位概念を表わす階層構造の各ノードには、そのクラス(ここでは岩石形)を規定するための制約条件がフレーム形式で記述され、上位のクラスに対する制約条件はそのまま下位のクラス

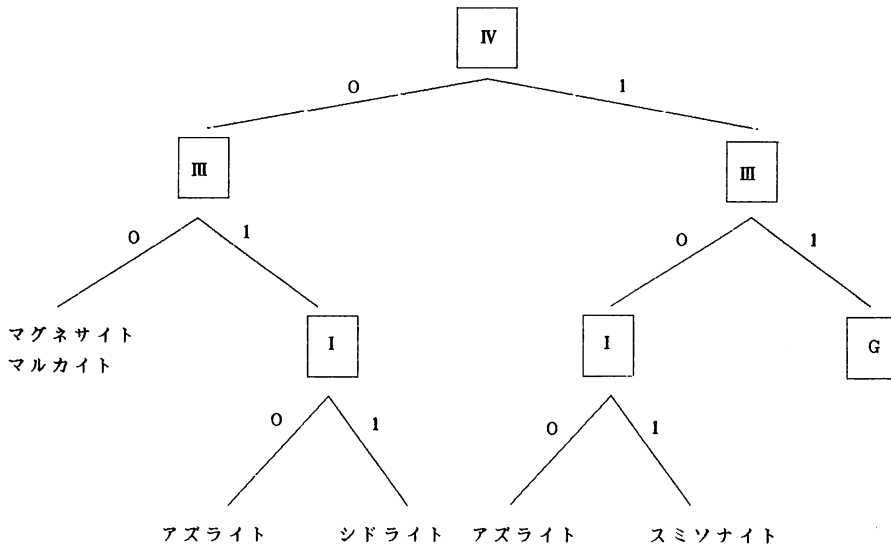


図2 フレーム方式で表現された制約条件を用いた階層的決定木の例

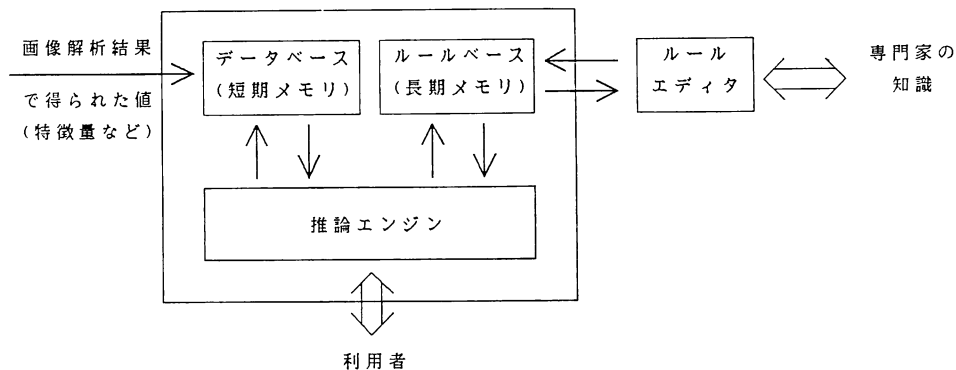


図 3 ルール形式のプロダクションシステム

に継承される。なお、図中の I, II, III および 0, 1 については 3.1 項にて別に説明する。

ルール形式はよく知られるように、if (条件) then (行動) の形式で知識を表現するもので、if~then 形式で書かれたルールをプロダクションルールと呼んでいる。また、ルールの集合と、その上で定義された制御構造などからなる知能システムをプロダクションシステムといっている。図 3 はプロダクションシステムの仕組みを示したものである。外界からの情報、すなわち画像処理で得られた対象に関する特徴量、または記述、たとえば、対象とする物体は 1.9 と 2.05 および 2.28 μm に吸収バンドをもつなどのデータはデータベースと呼ばれる作業メモリに格納される。データベースは認知心理学の用語を用いて短期記憶ということもある。if~then 形式の推論を行なうための知識はルールベース (長期メモリとも呼ばれる) に入れられる。データベース (短期メモリ) には対象に関するデータ (if (条件) にマッチングするデータ) と、推論の途中結果が入れられる。データベースの中身は対象や推論の進展に従ってどんどん変化する。

利用者の知識または判断が必要な場合には、利用者に質問する「問診」をメッセージとして出力することにより、人間と計算機の対話処理も可能である。

推論は AND/OR の木構造による。通常、既知の事実から推論を重ねて新しい推論を得るような前向き推論 (トップダウン) が用いられる。先に結論を仮定し、それを支持する事実があるかどうか考える後向き推論を用いる場合もある。

ルールベースは、解析や判定に関するルールベースのほかに、制御構造についての制御ルールベースに分けられる。制御ルールベースはシステム全体の制御を行なうとともに、所定の順番で解析ルールベースを起動する。こ

のような知識ベース処理が従来の処理プログラムと異なる点の一つはデータベース (短期メモリ) の利用であり、もう一つはルール型言語の適用である。フォートランのような従来の手続き型プログラミングでは、制御と知識が混然となっているため、知識の修正/拡張が困難であり、また、制御構造も書き換える必要がある。他方、ルール型のプログラミングでは制御と知識が分離しており、解析や判定のルールだけを修正/追加すればよいのでシステムの改良が容易となる。ルールベースの修正/追加はルールエディタという機能を用いてエキスパートによって行なわれる (図 3)。

以上に述べた知能ベースシステムの高度化、すなわち、より知能を高めるための方向としては、単に、(1) プロダクションルールの数を増やしていく、だけでなく、(2) if の部分にパターン・マッチングを入れてやることにより、ある種の許容性をもたせることが考えられる。これは人はきちっとした、厳密なマッチングをしていないであろうという考えによる。さらに、(3) 類似性認識または類推による問題解決の重要性を考える、などがあげられよう。類似性認識とは、たとえば電気回路と力学系の類似性のように、一つの世界に A なら B という規準があり、また別の世界にも a, b があり、a は A に、b は B に似ているなら、a なら b と判断しようとするものである。このような考え方は機械翻訳で有効とされ、また、人の神経系でどのように行なわれているかに興味もたれている。

人工知能の研究には関数型言語である LISP と論理型言語である prolog とが用いられている。これらのプログラミング言語は大量のデータと cpu 時間を必要とするのが欠点とされる。

人工知能が実用的に用いられようとしている背景には、エキスパートシステム構築用ツールの開発があげら

れる。現在では OPS-5 などの第1世代のツールにかわって、KEE (Intelicorp 社), ART (Intelence 社) また、Knowledge Craft (Carnegie group) などの第2世代のもの¹⁶⁾が利用できるになっている。KEE はフレーム形式が主体となっており、それにルールベースがつけ加えられている。ART や Knowledge Craft は OPS-5 と同じようなルールベースを主体として、フレーム形式がつけ加えられている。ART は推論のわく組(世界)を複数個定義でき、推論を並列的に行ない、途中、推論が失敗した世界は消し、可能性のある世界のみを残して最終的な結論を得る。

Knowledge Craft は前向き推論によるルールベースシステムである OPS-5 と、後向き推論によるルールベースシステムである EMYCYN, および LISP, prolog など複数のツールと言語を寄せ集め、それぞれの機能を生かすように考えられている。日本でも、OPS-5 などと類似のツールが開発されるようになってきている。また従来のルールベースに加えて、ファジー推論の機能を取り入れた ESHELL (富士通) のような独自のものが開発されている。

これらのツールを利用するためのハードウェアとしては、シンボリック社の 3600 シリーズがよく知られ、SUN-3 や VAX の AI ステーションもよく使われている。

3. 知識システムの利用

画像処理や画像理解への人工知能の利用には二つの場合が考えられている。一つは解析する対象に関する知識を取り扱うシステム、他の一つは画像処理そのものについての知識を取り扱うシステムである。前者の例としては航空画像の立体解析、シーン解析、動きの解析そして岩石の種類の自動判別、X線画像の診断など多くの報告がある^{17-20, 26, 28)}。後者の例としては、画像処理技術自身に関する知識(用途、使用条件など)の利用と実行プログラムの作成という考え方によるものである^{21-25, 27)}。画像処理は使用目的によって有用な処理の内容およびノウハウ、知識が異なる場合が多い。したがって、画像処理そのものの知識を扱うようなシステムの場合でも、画像処理エキスパートシステムとしての一般的な構造を見いだすことはむずかしく、エキスパートシステムの対象として、具体的に、粒子画像解析エキスパートシステムとか衛星画像解析エキスパートシステムのようにシステムの対象を決める必要がある。

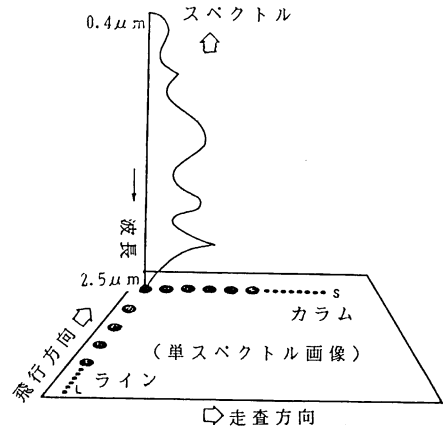


図4 イメージングスペクトルメーターによる画像データ

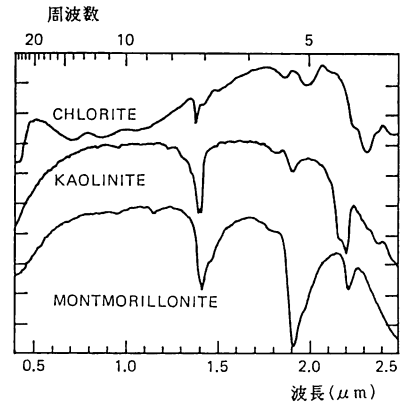


図5 岩石のスペクトルの例

3.1 地質調査エキスパートシステム¹⁸⁾

資源や環境の調査、評価用として、可視～赤外多重分光放射計であるランドサット MSS や TM などが知られるが、1990年代の地球観測用システムはイメージングスペクトルメーターが主要となると考えられている。たとえば、アメリカの HIRIS (1995年予定) は 0.4~2.5 μm のスペクトルの範囲を 10 nm おきに 192 分光バンドでデータをとる。図4はイメージングスペクトルメーターの画像データを図的に示したもので、1画面の大きさは 1000 カラム×1000 ライン×192 分光バンドとなる。1画素の地上の瞬間視野は 30 m, 12 bit 量子化であり、最大データ速度は毎秒 512 Mbit にもなる。HIRIS で得られたハイパー分光画像を従来の統計的な決定推論を用いて処理しようとするとは 192次元の特徴空間を考えることが必要であり、これを実行することは実際的でない。図5は岩石のスペクトル特性を測定した例

表 1 10の岩石型の短波長赤外における吸収帯域

Sample	V	IV	III	II	I
Azurite	1.9	—	2.05	2.28	—
Dolomite	1.86	1.99	2.14	2.33	2.53
Calcite	1.88	2.0	2.26	2.35	2.55
Magnesite	—	—	—	2.32	2.52
Malachite	—	—	—	2.29	2.52
Rhodochrosite	1.90	2.02	2.17	2.37	2.57
Siderite	1.92	—	2.17	2.35	2.56
Smithsonite	—	2.01	—	2.37	2.57
Strontianite	1.89	2.02	2.18	2.36	2.56
Witherite	1.92	2.05	2.21	2.39	2.60

表 2 三つの波長帯域 (I: 2.5 μm , III: 2.1 μm , IV: 2.0 μm) の吸収の有無を 1.0 で表示

Band			
IV	III	I	
0	0	0	—
0	0	1	Magnesite, malachite*
0	1	0	Azurite
0	1	1	Siderite
1	0	0	Azurite**
1	0	1	Smithsonite
1	1	0	—
1	1	1	Others

* Magnesite and malachite can be separated by band II.

** Band IV in azurite was presumably absent, but it may have been shifted into band III due to the degenerate state. The program can correctly select both cases.

で岩石のスペクトル判読の専門家は通常、この曲線のピークや谷 (吸収バンド) の有無、およびそれらの波長などのいくつかの属性を見る。このようなスペクトルの判定過程をもとに、ある鉱物に関する属性をまとめて図 1 のようなフレーム形式で記述する。表 1 はアズライトなど 10 の岩石型を判定するのに有用な五つの吸収バンド (I ~ V) の有無を示したもので、この五つのバンドに吸収があるかどうかを 1, 0 で表わすと、表 2 のように三つの吸収バンド (I, III, IV) の制限条件で岩石型を決めることができるようになる。この判定のようすを木構造で示すと図 2 のようになる。

NASA では航空機搭載用のイメージングスペクトルメーター (AIS) で得られたハイパースペクトルデータを用いて、まず、自動的に吸収バンドを抽出するアルゴリズムを作成した。吸収バンドなどに関する知識は種々

の鉱物や岩石の地球物理的、地球化学的パラメータの調査に基づいている。図 1, 2 の説明では簡単に示すため少数の岩石の吸収バンドに関する知識のみを用いて示した。実際には地表面の土地被覆型や、1 画素内に植物が混入した場合、また、1 画素内に複数の岩石や鉱物が混合しているような場合も取り扱えるよう、高度な知識ベースが構築されている。このエキスパートシステムを考えることにより、大量の分光データをほぼリアルタイムで処理できるシステムが実現可能と考えられている。また、地球以外の惑星の探査への応用も考えられている。

3.2 胸部 X 線画像スクリーニングシステム²⁸⁾

千葉大学では毎年 12000 名以上の学生、教官の胸部 X 線画像の集団検診を実施している。これらの X 線写真の多くは間接撮影で撮影されているため小さなサイズのフィルムが用いられていること、被写体の個体差などによる写真のばらつきがかなりあること、多量の X 線写真を限られた時間で処理するために 1 枚当りの撮影時間はかなり短いものになってしまうことなどの悪条件のため、医師の負担が大きく、また、複数の医師による多重チェックを行なって、見落としが生じないようにする必要があり。このような状況を改善するために、コンピュータを用いたデジタル画像解析技術を応用して、現在行なわれている読影作業を支援するシステムを開発することが考えられる。ここでは、明らかに正常な写真を自動的に選別し、残りの異常の疑いのある写真を画像解析の結果を参考に医師が注意深く読影を行なうことによって、省力化と疾病の見落としを防ぐようなシステムを検討している。

胸部 X 線集団検診における X 線写真の読影の判断基準は次のように整理される。

- (1) 胸郭では鎖骨、胸骨、肋骨、脊椎、その他の骨に変形がなく、胸郭の骨構造が左右対称であること
- (2) 肺陰影は左右対称であり、輪郭は滑らかであること
- (3) 気管陰影が中央にあること
- (4) Costphrenic angle は左右ともに明瞭であること
- (5) 横隔膜の高さが左右とも正常の位置にあり、右が左より高いこと
- (6) 横隔膜陰影の輪郭は、滑らかで円弧状であること
- (7) 心臓陰影の大きさは左右ともに正常な範囲にあること

- (8) 肺門部陰影は左右とも正常な陰影の範囲内にあること
- (9) 大動脈弓陰影は左側にあり、大きさは正常な範囲内にあること
- (10) 脊椎は胸部の中央にあって、変形がなく、まっすぐであること

これらの読影の判断に関する知識は、X線写真の読影の経験を積んだ医師のみが用いることができるものであり、X線写真の「読み方」を知らない者がこれらの知識を使い診断ができるものではない。したがって、これらの知識をコンピュータに移植するためには、前提となるX線写真の「読み方」の知識も移植する必要がある。

この「読み方」の知識を理解するために、数多くの典型的な正常および異常像をデジタル化しコンピュータにより解析し異常部分の画像データのパターンが同じ部分の正常な画像データのパターンに対し、どのように異なっているかを調べた。そして、画像のどの部分に対してどのような画像解析を行なうか、どのような解析結果の値により正常/異常の判定を行なうか、という形の知識に整理した。

上記の判断基準のうち、(2)、(4)~(7)、(9)の異常は、いずれも肺野の輪郭の形状に影響を及ぼすものである。したがって肺野の輪郭を正確に抽出し、得られた輪郭線の幾何学的な特徴を調べることによりこれらの項目の正常/異常の判定を行なうことができると考えられる。また、(10)については、肺野の輪郭に影響はしないが、脊椎の輪郭を抽出すれば、同様な手法で、正常/異常の判定を行なうことができる。

フィルムスキャナによりデジタル化されたX線写真画像(1画素 200 μm , 450 \times 450 画素 \times 8 bit)をメモリに読み込み、まず CRT 上に表示する。読み込んだ画像データに対し、異常の検出に必要な画像解析を行ない、解析値が正常な値の範囲を超えた部分を異常の候補として、image display に重ね合わせてグラフィック表示することによって、その部分が正常でない構造をもっていることを指示する。脊椎の彎曲の検出例を図6に示す。

システムは図3のようなルール形式のプロダクションシステムによっている。ソフトウェアは大きく分けて二つの部分から構成されている。一つは、システム全体のコントロールを行ない、解析された結果から正常かどうかの判定をする制御と判定プログラムであり、もう一つは、制御プログラムから呼びだされ、画像データに直接アクセスし処理/解析などを行なう画像処理プログラム

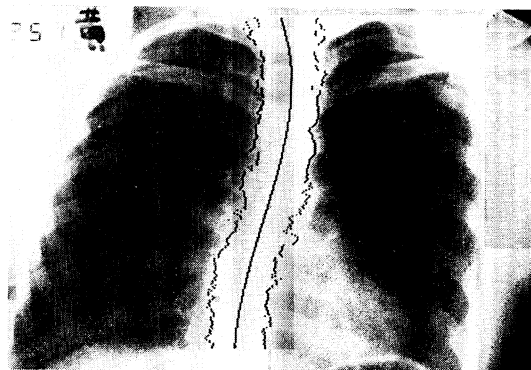


図6 脊椎の彎曲の検出例

である。

制御プログラムは、あらかじめ定めた手順に従い、異常の検出を行なう部位に応じて必要な画像の解析を行なう画像処理プログラムを呼び出す。呼びだされた画像処理プログラムは、与えられた条件により画像データの処理/解析を行ない、中間結果の解析値を短期メモリ(データベース)に記憶するとともに、指定された解析値を判定プログラムに戻す。判定プログラムは、戻された解析値を調べ、正常値の範囲を超えた場合には、その部分の画像の表示を変化させるように画像処理プログラムと指示する。画像処理の部分はFORTRANによっている。また、制御判定プログラムの部分はルール型言語であるOPS83で記述している。脊椎の彎曲の判定プログラムの部分例を図7に示す。このように、システム全体のコントロールや、異常の判定の条件、画像解析の条件をif~then形式のプロダクションルールの形に整理し、プログラムの本体から分離するのはシステムの修正や、拡張を容易にするためである。

男女の正常例各50、異常例各50の画像を選び本システムのテストを行なっているが、異常例が異常として判定される割合は診断項目によって異なるが最低82%である。しかしこれを90%以上にする必要がある。また、正常例が異常と判定される割合は最高42%程度とやや多い。実用的には12000枚の画像をこのシステムを用いて6分の1の2000枚程度にスクリーニングすることを目標としている。現在における1枚の画像の処理時間は画像の入力を除いて、1分以内であり、専門医の1枚当りの読影に要する時間と同じ程度である。ルールベースのルール数は160程度であり、全体をFORTRAN言語で書くことも可能であろう。しかし、ルール型言語を用いることにより知識の改良やルールの追加が容易である利点は大きいといえる。

```

module CVRULES()

--          脊椎の湾曲を調べるルール          --
--          --          --

(

use COMMON;

use MSGDEF;

--          1次直線の傾きを調べる          --

rule CV101
(
  &G ( goal status=VERTEBRA );
  &F ( fact part=VERTEBRA; coef=1; value>=0.008 );
->
  call PUTMSG(|脊椎が湾曲している疑いがあります。|);
  modify &G ( status=NEXT );
);

--          2次曲線の係数を調べる          --

rule CV102
(
  &G ( goal status=VERTEBRA );
  &F ( fact part=VERTEBRA; coef=2; value>=0.00005 );
->
  call PUTMSG(|脊椎が湾曲している疑いがあります。|);
  modify &G ( status=NEXT );
);

--          3次曲線の係数を調べる          --

rule CV103
(
  &G ( goal status=VERTEBRA );
  &F ( fact part=VERTEBRA; coef=3; value>=0.0000004 );
->
  call PUTMSG(|脊椎が湾曲している疑いがあります。|);
  modify &G ( status=NEXT );
);

```

図 7 判定のプログラムの例 (部分)

4. あとがき

画像処理および理解に人工知能がどのように用いられるか実際の例を含めて述べた。人工知能は人の脳の代りをする機械の実現をめざしている。しかし、実際の利用の方向をみても、どちらかというと計算機を使いやすいようにする、または人の頭脳の補助をする程度が現状といえよう。

知識ベースシステムを用いる人工知能は論理型とよばれるもので、知識をいかに論理という枠組を用いて計算機に移すことができるか、また、計算機がそれらをいかに利用して推論し、有用な解や手段を作り出すことができるかを問題にしている。

他方、論理型に対して、コネクショニズムとよばれる

人工知能の研究も行なわれている。この流れの代表的なものに最近注目をあびているニューロコンピュータがある。人の脳を模倣するためにたくさんの計算機を集め、ちょうど脳細胞のネットワークのようにそれらを相互に結合させる。そこに多くのデータを流しこむことで学習を行なう。このようなプロセスは、計算機には元来不得意であった画像処理とか画像理解に向いているといわれる。ニューロコンピュータの機能をもつ計算機(ハードウェア)では光技術を利用するものも考えられており、AIを用いた画像処理に新しい道をひらくものと期待される。

文 献

- 1) T. O. Binford: "Survey of medel-based image

- analysis system," *Int. J. Robotics Res.*, **1** (1982) 18-64.
- 2) T. Kanade: "Region segmentation: signal vs semantics," *Comput. Graphics Image Processing*, **13** (1980) 279-297.
 - 3) T. Kanade: "Model representation and control structures in image understanding," *Proc. of 5th ICPR* (1977) pp. 1064-1074.
 - 4) 大田友一, 金出武雄: "米国における画像理解研究", *情報処理*, **24** (1983) 1446-1452.
 - 5) 白井良明: "画像理解", *情報処理*, **21** (1980) 626-632.
 - 6) P. H. Winston and R. H. Brown: *Artificial Intelligence; An MIT Perspective*, Vol. 2 (MIT Press, 1979).
 - 7) D. H. Ballard and C. M. Brown: *Computer Vision* (Prentice-Hall, Inc., 1982).
 - 8) B. Klaus and P. Horn: *Robot Vision* (The MIT Press and McGraw-Hill Book Co., 1986).
 - 9) 白井良明編: *パターン理解* (オーム社, 東京, 1987) 43-117.
 - 10) 松山隆司: "画像理解における知識の利用", *情報処理*, **24** (1983) 1437-1445.
 - 11) R. Nevatia: *Machine Perception* (Prentice-Hall Inc., 1982).
 - 12) 上野晴樹, 石塚 満 (共編): *知識の表現と利用* (オーム社, 東京, 1987).
 - 13) P. H. Winston: *Artificial Intelligence*, 2nd ed. (Addison-Wesley Publishing Co., 1984).
 - 14) M. Minsky: "A framework for representing knowledge," *The Psychology of Computer Vision*, ed. P. Winston (McGraw-Hill, 1975).
 - 15) D. G. Bobrow and T. Winograd: "An overview of KRL, a knowledge representation language," *Cogn. Sci.*, **1** (1977) 3-46.
 - 16) G. R. Cross: "Tools for constructing knowledge-based systems," *Opt. Eng.*, **25** (1986) 436-444.
 - 17) 松原 仁, 井上博允: "プロダクション・システムによる線画の解釈", *コンピュータビジョン*, **26-1** (1983).
 - 18) W. C. Chiou: "NASA image-based geological expert system development project for hyperspectral image analysis," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2085-2091.
 - 19) S. A. Stansfield: "A rule-based expert system for automatic segmentation of coronary vessels from digital subtracted angiograms," *IEEE, PAMI-8* (1986) 188-199.
 - 20) M. M. Trivedi and J. F. Gilmore, ed.: "Applications of artificial intelligence," *Opt. Eng.*, **25** (1986) 331-435.
 - 21) 田村秀行, ほか: "DIA-Expert システムとその知識表現", *情報処理学会論文誌*, **29** (1988) 199-208.
 - 22) 久保文雄, 佐藤宏明: "粒子画像解析エキスパートシステム DIA-Expert/PA1", *情報処理学会論文誌*, **29** (1988) 209-219.
 - 23) 松山隆司, 村山直樹: "画像解析における戦略の表現", *情報処理学会論文誌*, **29** (1988) 169-177.
 - 24) 鳥生 隆, 岩瀬洋道, 後藤敏行, 吉田真澄: "コンサルテーション型画像処理用エキスパートシステム", *情報処理学会論文誌*, **29** (1988) 150-159.
 - 25) 塩野 充: "パソコン画像処理ライブラリーを用いた画像処理教育用エキスパートシステム EXWIPER", *電子通信学会技術研究報告*, **ET 7-5** (1987) 13-18.
 - 26) F. Wang and R. Newkirk: "Design and implementation of a knowledge based system for remotely sensed change detection," *J. Imaging Technol.*, **13** (1987) 116-122.
 - 27) D. G. Goodenough, *et al.*: "An expert system for remote sensing," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **GE-25** (1987) 349-359.
 - 28) Y. Yasuda, *et al.*: "Computer-aided diagnostic system for mass survey chest images," *Proc. SPIE*, **914** (1988) 772-779.