

画像解析における知識とその利用法

松山 隆司

(京都大学 工学部)

1. はじめに

1975年に開始された米国のImage Understandingプロジェクトもいよいよ最終段階に入った。1970年代を振り返って見ると、いわゆる「画像理解」を目的として、さまざまな画像を対象に、多くの画像解析の手法が試みられた時期であったと言える。その結果、現在では、知識を利用した画像解析の全体的な枠組について、研究者の間ではほぼ共通の認識が得られるようになったと考えられる。そこで本稿では、そうした枠組に基づいて従来の研究の位置付けを行い、現在の研究の焦点および今後の課題について述べることにする。なお、紙面の都合で、個々の研究の内容を詳しく紹介できないので、具体的アルゴリズムについては参考文献を参照していただきたい。

2. 「画像理解」について

Image Understandingの記語として登場した「画像理解」という言葉も現在ではかなり定着してきたように思える。また、画像理解に関する解説もすでにいくつも行なわれている[1]~[9]。「理解」とはいったい何を意味するのかをつきつめて考えると、理解する主体としての人間の人生観をも包含するような哲学になってしまう[1]。一般に「画像理解」という場合、その意味するものは、単なるパターン分類ではなく、画像として与えられたデータを解析し、その画像が表わす現実世界の情景に関する記述を作成する高度な画像解析の手法ということである。情景の記述が作成されると、その記述を利用して、情景に関する質問に答えたり、対象物に物理的に働きかけを行なうことが可能となり、こうして意味で計算機がその画像を理解できたということになる。

このような画像解析の手法において中心となる問題は、対象の記述法および記述の操作・マッチング法である。解析に利用される記述には、画像の構造記述と認識対象のモデルの記述があり、画像の解釈とは、この両者の間の対応付けを行なうことであると言える(図2)。

パターン認識においても、観測パターンは特徴ベクトルとして記述され、認識対象は特徴空間の部分空間として記述されていると考えることができる。そして分類器によって、特徴ベクトルと概念的シンボルであるカテゴリー名とが対応付けられる。こうした意味で、パターン認識は、画像理解の最も単純な方式であると言える。

画像理解の場合、複雑な情景に対するさまざまな質問に答えられなければならない。そのためには、

- (1) 観測した画像データを多面的に解析し、十分な情報を持った構造記述を作成すること。
- (2) 3次元物体や運動物体など視点の位置や時間によって見え方が変化する対象のモデルや現象をよく記述すること。
- (3) 2つの記述間の柔軟なマッチングおよび相互作用の方式(解析の制御構造)を考えること。

が重要な問題となる。すなわち、パターン認識では、特徴ベクトルや判別関数の形でimplicitに用いられていた対象に関する知識を構造記述や記述間のマッチングとして明示的に表現し、処理に利用しようとするのが画像理解である。

画像理解をもう一步進めるとロボティクスの世界になる[4]。一般に画像理解では、情景の観測は受動的である。ロボティクスでは、観測、認識に引き続き、環境に対する働きかけも行なわれ、その影響が再び観測・認識系にフィードバックされる。この段階に至って初めて行為者としての主体性が実現される。

以上、パターン認識、画像理解、ロボティクスの関係を模式的に表わすと図1のようになる。すなわち、

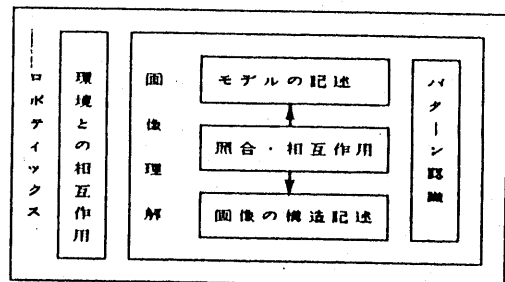


図1 画像理解の位置付け

この順序で情景に対する理解の深さが深くなってゆく。ロボティクスにおいては、環境に対する知識の欠け及びその影響について、事象間の因果関係といった環境のダイナミックな性質に関する知識に基づいた予測・推論ができればならない。また、画像理解においても、対象とする情景の性質によって要求される理解の深さが異なる。一般に static 2D, static 3D, dynamic 3D の順で深い解析が必要となる。ここでは、ロボティクスの問題は取り扱わないことにする。

3. 画像理解の一般的枠組

人間および環境への働きかけを含んだ画像理解系の構成は、一般的に図2のように表わされる。画像理解のプロセスは、大きく分けると次の2つの過程から成っている。

(a) ボトムアップ解析

入力画像からエッジや領域といった画像特徴を抽出し、画像の構造記述の要素とする。そのうち、画像特徴の属性やそれらの間の関係性を求め、構造化を行なう。その結果、入力画像の持つ情報がシンボリックな構造記述として表現され、モデルとの照合がとられる。

(b) トップダウン解析

ボトムアップ解析によって、認識対象の具体的なモデルが予測できた場合、そのモデルの記述に従って、特徴抽出・構造化・照合のプロセスを制御し、まだ、解析が付けられていない部分の解析を行なう。その結果、新たな画像特徴の検出、すでにある画像の構造記述の修正、照合の対象範囲の限定、対象の認識などが可能となる。

一般に情景記述の作成(情景の解釈)プロセスにおいては、hypothesis-and-test方式が用いられる。すなわち、ボトムアップ解析で得られた最も信頼性の高い画像特徴を利用して、モデルの選択を行ない、具体的モデルを予測する。この段階で対象の種類、視点の位置等が決められる。次に、予測されたモデルの持つ特徴が画像特徴として存在するかどうかを確認め、そのモデルが正しいかどうかを調べる。もし、モデルが誤っていると、別のモデルを仮定し、同様の操作を繰り返す。正しいモデルが選択されると、モ

デルの特徴を利用してトップダウン解析を行ない、解析の範囲を広げる。こうしてボトムアップ解析とトップダウン解析の繰り返しのにより、情景の記述が逐次完成されてゆく。またときには、新たな解析の結果、すでに作られた情景の記述が修正されるといった backtracking が行なわれることもある[10]。

これとは別の情景解釈の方式として、弛緩法がある。この方法では、まず各画像特徴に対してそれと対応する可能性のあるすべての情景特徴を選び、それと対応関係について、その信頼度を表わす数値(確率)を与える。次に、認識対象に関する知識(主に空間的構造)に基づき、画像特徴とその周囲のものとの解析の整合性から情景特徴との対応を再確率をそれぞれ更新する。この確率更新プロセスを繰り返すことにより、各画像特徴に対する多重解析が徐々に続けられてゆき、最終的にはほぼ一意なものとなる。Waltz の constraint fillinging⁽⁴⁾ は、この方法の代表例である。

4. 画像データの構造化

撮像装置によって観測された画像データは、明/暗や色を表わす数値が2次元配列状に並んだだけのものである。この画像データの構造をシンボリックに記述しモデルとの照合が取り易いように(操作し易いように)するのが画像の構造化の目的である。

構造記述のための要素としては、一般にエッジや領域が用いられ、それらを画像から抽出するに必要の画像処理の手法が数多く試みられて[11][12]。

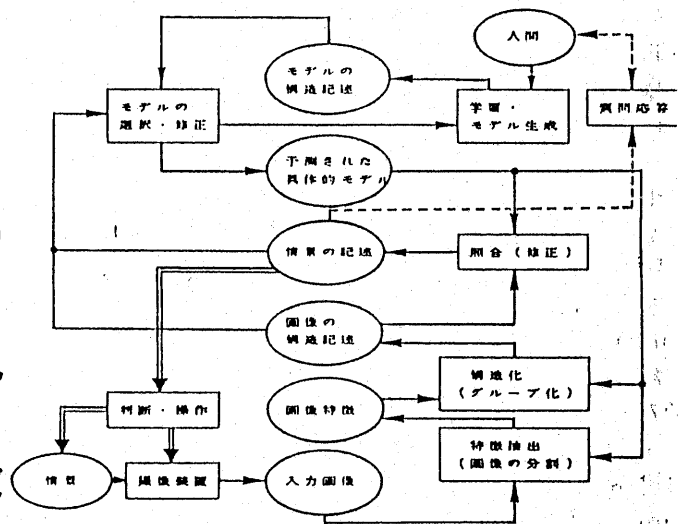


図2 画像理解系のブロック図

その結果、複雑な自然画像から意味のあるエッジや領域を完全に抽出する画像処理の手法は存在しない。ことが明らかになった。そのために一時は、こうした画像特徴の抽出段階に積極的に対象世界に関する知識を導入しようとする動きが盛んになった[13][14]。しかし、そうした方法は、ある限られた対象の専用解析システムを作成するには都合が良いが、画像理解の一般的枠組としては十分なものは言えない。現在では、解析の第1段階である画像データの構造化においては、特定の対象に関する知識を用いない一般的な手法で画像を解析し、画像のもつ情報をできるだけ忠実に表現しようとすることが一般的である。

この考え方は、Mattのprimal sketch[15]や大田らのpatchy data structure[16]において明確に示されている。後者においては、領域分割の結果を図3に示すような関係記述で表現し、こうした画像の構造記述に対する検索や図形操作を行なう機能を実現している。たとえば、図3(b)は、「縦に長く、その左に黄色い領域があるすべての領域を求めよ」という検索要求を表わしている。

4.1 画像理解と画像データベース

画像データを生の形で記憶するのではなく、その構造をシンボリックに記述し、さまざまな検索要求や図形操作に柔軟に答えられるようにしようとすることは、最近注目をあびつつある画像データベース[17]の大きな目的となっている。画像理解における画像の構造記述およびその操作に関して、画像データベース的な考え方を導入し、モデルとの照合やトポロジカル解析における画像特徴の選択プロセスにおいて、画像の構造記述への統一的なアクセス法を確立することは重要な問題である。

そのためには、画像の持つ情報を構造記述として十分に表現できなければならない。構造記述の方法としては、図3のような関係グラフや関係データベース[17][18]がこれまでに使われてきた。しかし、こうした方法では、図形要素の属性やそれらの間のトポロジカルな関係は記述できるが、距離や方向を含む一般的な位置関係を構造的に表現することができないという欠点がある。このため、我々が行なった航空写真の解析[10]においては、ラベル画像というシンボリックな2次元データを利用し、各種の図形要素間の複雑な2次元関係を求めた。

最近では、図形要素間の近接性を構造的に表現

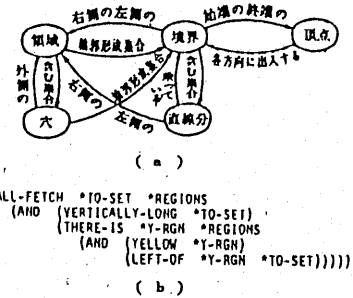


図3 図形要素間のトポロジカルな関係 [16]

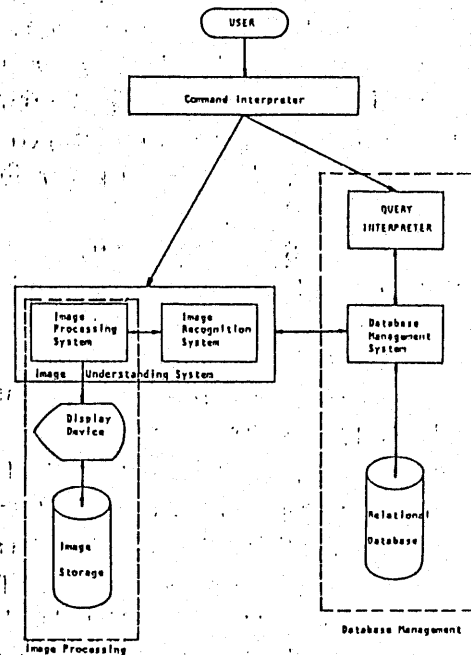


図4 IMAIDのブロック図 [23]

するためのデータ構造として、Voronoi Diagram[20]やleaf Treeを利用した方法[21]が提案されている。また、pyramid法やquad treeによる画像データの階層的記述法およびその操作法に関しても、数多くの研究が発表されている[44]。さらに、現在、図形間の各種の空間的関係は効率的に求めるためのアルゴリズムに関する研究(Computational Geometry)[22]が活発に行われており、こうした研究の成果を画像の構造記述に利用し、柔軟で効率的な画像情報の表現法、検索法、操作法を確立することは、画像理解、画像データベース研究における今後の大きな課題である。

図4は、Purdue大学のN.S. Changらによる画像データベースシステムIMAID[23]の構成図で、

画像理解と画像データベースとの関係のもう一つの局面を表わしている。すなわち、IMAIIDの場合、データベースに蓄えられるのは、画像データの構造記述ではなく、情景の構造記述となっており、画像から情景の記述を求めするための機能として画像理解システムが組み込まれている。つまり、IMAIIDは、図2に示した情景の記述に対する質問応答をデータベースとして実現しようとしたものであると言える。(ただし、現在の画像データベースでは、情景の構造を2次元的にしか表現していないものがほとんどである。)

このように、画像理解と画像データベースは、画像データの柔軟な構造記述法およびその操作法の開発という共通の課題を持ち、お互いに相手のシステムの機能ブロックとなるといった密接な関係にあると言える。

4.2 画像特徴のグループ化

画像解析の初期段階で得られたエッジや領域は、認識対象のモデルと照合を取るには記述レベルが低すぎる場合がある。このため、いくつかのエッジや領域をグループ化し、画像の記述単位を高度化することが必要となる。この場合、こうしたグループ化は、あくまでも画像データの構造化の一部であり、グループ化によって生成された記述単位とモデルの構成要素とは区別されなければならない。このため、このグループ化は、対象世界に関する知識とは独立に、画像特徴の空間的配置に関する情報のみを利用したものでなければならぬ。

グループ化の具体的方法としては、Primal sketchにおけるエッジの方向性に注目して、滑らかな曲線やテクスチャ領域の抽出を行なう方法^[15]、領域間の相対的位置関係から規則的なテクスチャの構造を記述する方法^[24]などがある。また、Stanford大学のACRONYM^[25]では、図5に示すように、画像から抽出されたエッジをリボンと見做される領域にまとめあげ、記述単位を高度化を行なっている。リボンは、3次元物体の構造記述法である一般円筒の2次元版で、中心となる線とその線に沿った巾の変化によって領域の形状を表現しており、エッジによる記述に比べ、認識対象との照合が取り易くなっている。

Hough変換^[26]は、孤立したエッジ点を直線にまとめあげて手法として有名である。辻ら^[26]は、機械

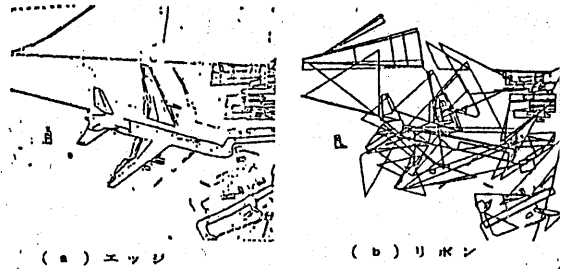


図5 記述単位の高度化 [25]

部分の認識において、エッジ画像からHough変換によって楕円を検出した。楕円は、円盤状の物体を斜めから見た場合に生じる画像特徴で、その形から物体とカメラとの位置関係を推定することもできる。さらに、Hough変換の応用としては、次節で述べる2次元の画像特徴であるエッジから3次元空間における平面の傾きを求める方法^{[27][28]}、あるいは異なるセンサーや異なる時期に与えられた2枚の画像の対応点を求める方法^[29]、画像中の各点において計算された速度ベクトルから移動物体の速度を求める方法^{[30][31]}などがあり、雑音を含む画像特徴のグループ化の方法としてその有用性が確かめられている。

従来のHough変換では、検出されるべき図形が解析関数の形で表現されていなければならぬといった制限があった。これに対し、Ballard^[32]は任意形状の図形の検出が可能な一般化Hough変換を提案し、Hough変換の対象図形の拡張をはかっている。

また、先に述べた弛緩法を画像特徴の抽出やその後のグループ化のために利用しようとする試みも数多くなされている。^[32]弛緩法の場合、グループ化の判断基準は、局所的な画像特徴とその他の画像特徴との間の空間的配置の整合性を表わす重み係数の形で表現される。この重み係数を用いた確率的反復計算によって、局所的な画像特徴がより大きな画像特徴へとまとめられることになる。このため、この重み係数の与え方が非常に重要になるが、現在のところ人間が適当に決める以外良い方法がなく、弛緩法の1つの問題点となっている。しかしながら、雑音に対する処理の安定性、低レベル・高レベルいずれの処理も適用可能なこと、局所的な解析に付きもののあいまい性(多義性)をうまくとり除けることなどから、今後弛緩法のマダマダな応用が進められるものと考えられる。

5. 画像特徴から情景特徴への写像

一般に画像は、3次元の情景の2次元平面への投影であるため、奥ゆきの情報が失われており、画像上での2次元的な形状や位置関係が、情景に於ける3次元的な形状や位置関係と直接対応するとは限らない。

奥ゆき情報を得る方法としては、ステレオ写真やレーザ・スリット光・モアレパターン等を利用するものがあり、これらの方法により距離画像を作成し、解析に利用しようとするものがある。距離画像においては、画像特徴が直ちに3次元的な意味を持つことになり、解析が容易になる。しかし、直接距離測定を行わずに、2次元の画像データから3次元の情景を理解する方法を考えることも重要である。最近の画像理解の研究では、2次元の画像特徴の3次元的な解釈の方法がさかんに研究されている。もちろん、2次元と3次元の対応を考える場合、あいまい性が存在することになるが、これらの方法では対象に適当な制限(仮定)を加えることにより、その問題をなくしている。

ある条件のもとでは、2次元の画像データから、そこに埋め込まれている3次元情報を復元できることを最初に示したのは Horn⁽⁹³⁾ である。彼は、グラディエント空間を利用して、表面における光の反射関数が単純な物体の形状を、その物体の画像上における明るさの勾配から求める方法 (Shape from Shading) を示した。この研究は、明るさの変化という画像特徴から3次元物体の形状という情景特徴が求められること、またそのためには、光源やカメラの位置等の画像が撮影された環境における物理的拘束を利用する必要があることを明らかにし、その後の研究に大きな影響を与えた。

Horn の後、他の物理的拘束条件を利用した3次元構造の検出法がいろいろ試みられた。その代表的なものとしては、通常の軸対象の条件を少し緩めた skewed symmetry という画像特徴を利用して、平面や傾きを求める方法^[94]、要素となる領域の形状の変化やエッジ配列の規則性からテクスチャパターンが描かれた平面や曲面の形状を求める方法^{[95][96][97]} (Shape from Texture

図6)、影を利用して3次元構造の検出法^{[98][99]}などがある。これらの研究は、「画像特徴の持つ性質は偶然によって生じたものではなく、情景中の規則性(平行線、規則的配列、対称性等)が画像平面に投影された結果である」というヒューリスティックに基づいた画像解析法であるとも言える。

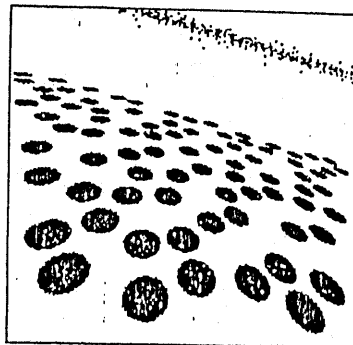
動画像解析においても、画像における明るさの空間的、時間的变化を利用して、対象の運動に関する情報を求めようとする optical flow (図7) の研究がさかんに進められている^{[90][91][95][99]}。物体の運動と画像の明るさの変化の関係を示す。基本方程式は

$$V_x * G_x + V_y * G_y = -D_t$$

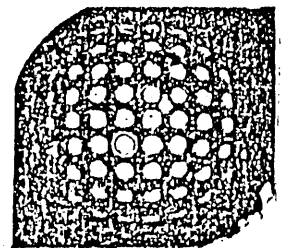
と表わされる。ここで、 (V_x, V_y) は画像上の点 (x, y) における速度ベクトル、 (G_x, G_y) は空間的な明るさの勾配、 D_t は時間的な明るさの変化を表わす。 G_x, G_y, D_t は画像データから求めることができ、それらを利用して速度ベクトル (V_x, V_y) を求めようとするのが optical flow の原理である。

2個の未知数に対して、制約条件となる式が1つしか存在しないことから、上式から直ちに (V_x, V_y) が求められるわけではなく、何らかの他の条件が必要となる。これまでに使われた条件としては、物体の運動を画面に対する平行運動だけに限るもの^{[90][91]}、速度ベクトルは増減に変化すると仮定するもの^[92]、あるいは物体の輪郭線を表わすエッジの運動との組み合わせを考えるもの^[93]などがある。

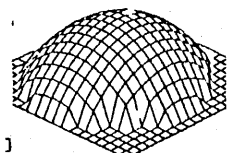
或田ら⁽⁹⁰⁾は、積木の世界の線画における接続点の構造変化から、物体の運動情報を抽出し(図8)、この場合、物体の移動による接続点の構造変化のパターンには物理的制約



(a) バニシングラインの抽出 [36]



(b) ゴルフボールの表面



(c) (b) の3次元形状 [35]

図6 Shape from Texture の例

が存在することを知識として利用しており, Walley^[13]らによる積木の世界を表わす線画のラベル付けの画像解析への拡張と考えられる。この方法のように, 運動情報から3次元物体の構造を求めようとする研究は, "structure from motion"^[14]と呼ばれている。

以上述べたいずれの方法においても, 画像特徴と情景特徴との間に存在する物理的拘束を知識として利用し, 画像解析を行なっている。すなわち, 最近の画像理解研究においては, 研究の初期に行なわれたような ad hoc な知識を利用したのでは, 複雑な画像を解析することは到底不可能で, 画像という物理計測データに内在する物理的規則こそ画像理解のための知識の本質であるということが強く意識されている。その結果, 研究の内容が理論的, 数式的になってきていると言える。

6. おわりに

本稿では, 画像理解における解析の全体的枠組を示し, 画像データの構造化, 物理的拘束条件を利用した画像特徴と情景特徴の対応付けに関して, 最近の研究を紹介した。

画像理解におけるモデル(知識)の表現法や制御構造に関しては, ほとんどいれなかったが, 我々の開発した航空写真の解析システム^[10]をはじめ, ACRONYN^[15], 大田らの屋外風景解析システム^[16], 辻らの心臓の放射線画像の解析システム^[4]など, プロタクションシステム(PS)を利用したものも多く発表されている。今後こうした傾向は続くものと考えられるが, そうした場合, 4で述べたように, PSの中心にあるブラックボードにおける画像データの構造記述法あるいはそれへの柔軟なアクセス法が, 1つの研究課題となると考えられる。

3次元物体のモデル記述法としては, 一般円筒が従来からよく用いられている。3次元物体の計算機内部での表現法, 表示法, 操作法に関しては CAD の分野で研究が進められており, こうした CAD の手法を画像理解におけるモデル記述, 情景記述への質問応答に応用することが考えられる。

一般円筒は, 複雑な3次元物体を

いくつかの一般円筒の組み合わせとして表現するという体積指向型の表現法となっている。これに対し, 前節で述べたような方法で求められるのは, 物体表面における各点の接平面方向という物体の表面形状に関する情報(±D記述)で, この両者の間の対応関係をいかに見つけるかということが, 大きな問題となる。^[17] 表面形状に重点を置いた3次元物体の表現法としては, Horn^[18]らによる Extended Gaussian Image^[19]があるが, 表現の柔軟性, 操作性などの点において問題がある。^[20] このため, さらに柔軟で表現力の高い3次元モデルの表現法の開発が期待される。

これまでの画像解析の研究の結果, 現在こ

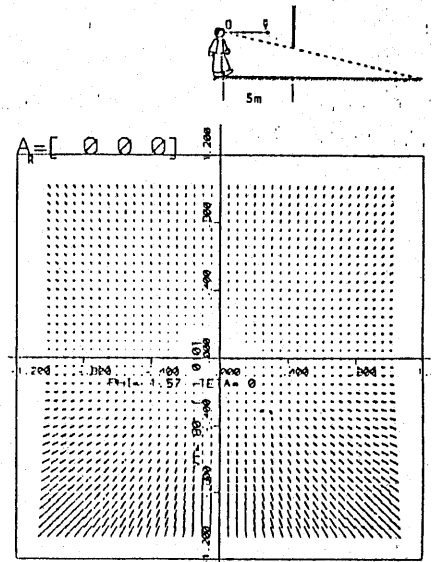


図7 Optical Flowの例 [5, 0]

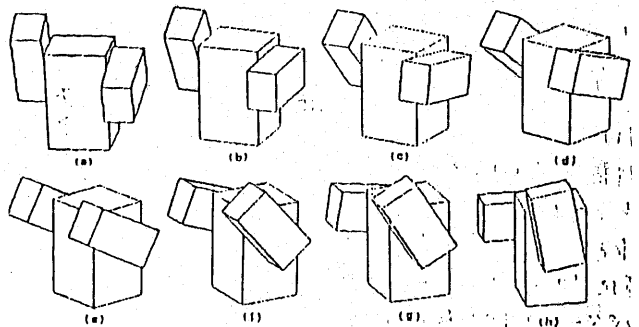


図8 運動物体を表わす線画列 [5, 1]

各種の画像処理の手法や前節で述べたような方法により、多くの画像特徴や情景特徴を求めることができるようになった。しかし、これらの特徴は、ある種の仮定のもとで抽出されたもので、雑音の影響を受けたり、互いに矛盾したりすることがあり、完全なものとは言えない。情景の解析プロセスにおいては、こうしたあいまい性をもつ特徴を統合化して、意味のある整合性のとれた情景の記述を作成する必要がある。このための方式として、ここで述べた hypothesis-and-test 法と弛緩法とが考えられているが、前者ではある対象の認識(指定)を行なうのに十分な局所的特徴とは何で、どの程度の広さの範囲の局所性を調べれば、十分信頼できるのかといったことを決めるためのメカニズムを明らかにする必要がある。このことは、学習の問題とも密接に関連しており、今後の大きな研究課題である。一方弛緩法では、すべての局所的特徴が一様に取扱いわれており、処理の柔軟性がとぼしい。このため、画面内のある部分に注目し、他の部分とは異なった解析法を行なうという focus of attention のようなメカニズムをどのようにして組み込むのか今後の問題となるであろう。

【参考文献】

- [1] 長尾, 画像の理解と認識における諸問題, 信学技報, PRL 79-64, 1979.
- [2] 白井, 物体・光景の認識と理解, 情報処理, Vol. 19, No. 10, 1978, pp. 969-976.
- [3] 白井, 画像理解, 情報処理, Vol. 21, No. 6, 1980, pp. 626-632.
- [4] 坂井, 1980年代の画像処理, 情報処理, Vol. 21, No. 6, 1980, pp. 639-644.
- [5] 坂井, 情報基礎論の展開, 電子通信学会誌, Vol. 64, No. 8, 1981, pp. 793-797.
- [6] T. Kanade, Model Representation and Control Structures in Image Understanding, Proc. of 5th IJCAI, 1977, pp. 1074-1082.
- [7] T. Kanade, Region Segmentation: Signal vs Semantics, Computer Graphics and Image Processing, Vol. 13, 1980, pp. 279-297.
- [8] 長尾, 松山, 構造的パターン認識 [I], 計測と制御, Vol. 20, No. 6, 1981, pp. 46-55.
- [9] 松山, 航空写真解析における知識の利用, 第10回画像工学コンファレンス, 1979, pp. 121-126.
- [10] 松山, 長尾, 航空写真の構造解析, 情報処理, Vol. 21, No. 5, 1980, pp. 468-480.
- [11] 坂根, 田村, 画像処理アルゴリズム概観(3), 電統研彙報, Vol. 44, No. 7, 8, 1980, pp. 56-75.
- [12] 横矢, 富田, 田村, 画像処理アルゴリズム概観(5), 電統研彙報, Vol. 44, No. 7, 8, 1980, pp. 96-112.
- [13] Y. Yakimovsky and J. A. Feldman, A Semantic-Based Decision Theory Region Analyzer, Proc. of 3 IJCAI, 1973, pp. 580-588.
- [14] J. M. Tenenbaum and H. G. Barrow, Experiments in Interpretation - Guided Segmentation, Artificial Intelligence, Vol. 8, No. 3, 1977, pp. 241-274.
- [15] D. Marr, Early Processing of Visual Information, A. I. Memo, No. 340, A. I. Lab. MIT, 1975.
- [16] 大田, 金出, 坂井, 領域分割処理によるカラー画像情報の構造化, 情報処理, Vol. 19, No. 12, 1978, pp. 1130-1136.
- [17] 横矢, 田村, 画像データベース研究の現状について, 情報学会研究, コンピュータビジョン4-6, 1981.
- [18] 画像データベースへの関係モデルの応用が進む, 日経エレクトロニクス, 1979, 2, 17.
- [19] K. E. Brassel, A Topological Data Structure for Multi-Element Map Processing, Proc. of 1st International Advanced Study Symposium on Topological Data Structures for Geographic Information Systems, Vol. 4, 1978.
- [20] P. J. Green and R. Sibson, Computing Dirichlet Tessellations in the Plane, Computer Journal, Vol. 21, No. 2, 1977, pp. 168-173.
- [21] 松山, ハオ, 吉田, 長尾, 空間的近接性に基づくファイル分割アルゴリズムの性能評価, 信学技報, IE 81-14, 1981.
- [22] G. T. Toussaint, Pattern Recognition and Geometrical Complexity, Proc. of 5 ICPR, 1980, pp. 1324-1347.
- [23] N. S. Chang and K. S. Fu, A Query Language for Relational Image Database Systems, Proc. of Future Data Description and Management Workshop, 1980, pp. 68-73.
- [24] 松山, 佐分, 長尾, 格子配列に基づくラフスキュアの構造記述, 情報学会研究, コンピュータビジョン6-2, 1980.
- [25] R. A. Brooks, Goal-oriented Edge Linking and Ribbon Finding, Proc. of Image Understanding Workshop, April, 1979, pp. 72-78.
- [26] 中野, 谷内田, 辻, 三次元モデルを用いた機械部品の認識, 信学技報, PRL 79-85, 1980.
- [27] J. Kender, Shape from Texture: A Brief Overview and A New Aggregation Transform, Proc. of Image Understanding Workshop, Nov. 1978, pp. 79-84.
- [28] T. Kitahashi et al., Extraction of Vanishing Point and Its Application to Scene Analysis Based on Image Sequence, Proc. of 5 ICPR, 1980, pp. 270-272.

- [59] D. Kahl, A. Rosenfeld and A. Danker, Some Experiments in Point Pattern Matching, *IEEE Trans.* Vol. SMC-10, No. 2, 1980, pp. 105-116.
- [30] C. Cafforio and F. Rocca, Methods for Measuring Small Displacements of Television Images, *IEEE Trans.* Vol. IT-22, 1976, pp. 573-579.
- [31] C. L. Fennema and W. P. Thompson, Velocity Determination in Scenes Containing Several Moving Objects, *Computer Graphics and Image Processing*, Vol. 9, 1979, pp. 301-315.
- [32] D. H. Ballard, Generalizing the Hough Transform to Detect Arbitrary Shapes, *Pattern Recognition*, Vol. 13, No. 2, 1981, pp. 111-122.
- [33] B. K. P. Horn, Understanding Image Intensities, *Artificial Intelligence*, Vol. 8, No. 2, 1977, pp. 201-231.
- [34] T. Kanade, Recovery of the 3-Dimensional Shape of an Object from a Single View, *Tech. Rep.*, CMU-CS-79-153, 1979.
- [35] K. Ikeuchi, Shape from Regular Patterns, *Proc. of 5 ICPR*, 1980, pp. 1032-1039.
- [36] 大田, 前信, 坂井, 透視射影されたラスチャから平面の傾きを得る方法, 情報学会研究, コンピュービジョン16-2, 1982.
- [37] D. G. Lowe and T. O. Binford, The Interpretation of Three-Dimensional Structure from Image Curves, *Proc. of 6 IJCAI*, 1981, pp. 613-618.
- [38] B. K. P. Horn and B. G. Schunck, Determining Optical Flow, *AI Memo 572*, MIT, 1980.
- [39] 谷内田, 時空間的透視を用いた速度情報の抽出, 情報学会研究, コンピュービジョン16-1, 1982.
- [40] M. Asada, M. Yachida and S. Tsuji, Three Dimensional Motion Interpretation for the Sequence of Line Drawings, *Proc. of 5 ICPR*, 1980, pp. 1266-1273.
- [41] S. Tsuji and H. Nakano, Knowledge-Based Identification of Artery Branches in Cine-Angiograms, *Proc. of 6 IJCAI*, 1981, pp. 710-715.
- [42] 坂上, 田村, 高木, 画像処理アルゴリズムの概観(2), 電報研究報, Vol. 44, No. 7, 8, 1980.
- [43] D. L. Waltz, Understanding Line Drawing of Scenes with Shadows, *The Psychology of Computer Vision* (Winston ed.), McGraw-Hill, 1975, pp. 19-91.
- [44] A. Rosenfeld, Quadrees and Pyramids for Pattern Recognition and Image Processing, *Proc. of 5 ICPR*, 1980, pp. 802-807.
- [45] R. Nevatia and T. O. Binford, Description and Recognition of Curved Objects, *Artificial Intelligence*, Vol. 8, 1977, pp. 77-98.
- [46] R. O. Duda and P. E. Hart, Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures, *Commun. Assoc. Comput. Mach.*, Vol. 15, 1972, pp. 11-15.
- [47] S. Inokuchi and R. Nevatia, Boundary Detection in Range Pictures, *Proc. of 5 ICPR*, 1980, pp. 1301-1303.
- [48] K. Sugihara, Range Data Analysis Guided by a Junction Dictionary, *Artificial Intelligence Journal*, Vol. 12, 1979, pp. 41-69.
- [49] A. K. Mackworth, Interpreting Pictures of Polyhedral Scenes, *Artificial Intelligence*, Vol. 4, No. 2, 1973, pp. 121-137.
- [50] K. Pradzny, Egomotion and Relative Depth Map from Optical Flow, *Biol. Cybernetics*, Vol. 36, 1981, pp. 87-102.
- [51] S. Ullman, *The Interpretation of Visual Motion*, MIT Press, 1979.
- [52] R. Bajcsy, Three-Dimensional Scene Analysis, *Proc. of 5 ICPR*, 1980, pp. 1064-1074.
- [53] D. Smith, Using Enhanced Spherical Images for Object Representation, *A.I. Memo*, No. 530, MIT 1979.