

シルエットによる対象物認識

北橋 忠宏* 尹 巨煉* 古林 貴**

* 大阪大学産業科学研究所

** 三菱重工KK

あらまし シルエットあるいは輪郭線像は、産業あるいは特殊環境における物体認識のためにしばしば利用される。これらに関連して、単一物体の部分分解および重複物体の分離が2次元画像の処理として議論されてきた。本稿では対象および観点の相違が処理手法にもたらす共通点と相違点を、それらを論じるために必要とされる仮説を通じて明らかにする。それと同時に、部分分解に対しては新しい手法を示し、重複物体に対しては問題の定式化を行い、それぞれについていくつかの新しい結果を示す。また輪郭線より3次元構造を抽出する問題についても言及する。これらの考察を通じて、物体あるいはその複合体のシルエットに基づく対象物の認識に関する包括的な議論の確率を試みている。

Three Aspects of Decomposition of a Silhouette for pattern recognition

Tadahiro Kitahashi* Yin Ju-lian* Takashi Kobayashi**

* The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka 567 JAPAN

** Mitsubishi Heavy Industries, LTD. Kobe shipyard & machinery works
1-1-1 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652 JAPAN

Abstract This paper describes studies three aspects of decomposing a silhouette, that is, decomposition of a polygonal silhouette of an object into parts, determining of overlapping areas to recover the shape of partially occluded objects and also a three-dimensional interpretation of a polygonal silhouette. Some descriptions, especially graph-theoretic discussions about the analysis of a silhouette of overlapping objects may provide a new scheme to the further discussion. This paper also depicts common and individual features among the aspects of silhouette decomposition by proposing a few assumptions shared with all aspects and individual ones required by each aspect.

1. まえがき

パターン認識においては内部エッジの抽出は必ずしも容易ではないのに対し、輪郭線の抽出は比較的容易であることが多い。少数の安定した姿勢をもついくつかの物体を迅速に識別することが要求される場合、しばしば意識的にシルエット像が用いられる。また災害時とくに火災の際にはシルエット像を認識に用いることが考えられる。このような画像処理という観点からしても、あるいは人間がシルエット像や輪郭線から容易に対象を識別または認識できるという心理学的な観点からしても、これらの問題を考察することは有用かつ興味あることである。その一段階として輪郭線図形の部分分解に関する研究が行われており、これまでも多くの試みが報告されている。これらはつぎのように大別されると考えられる。

(1) 部分構造をもつ単一の物体のシルエットとみなし、部分構造に分解する^{〔1〕-〔6〕}

(2) 重複する物体のシルエットとみなし、個々の物体に分離し、その輪郭線を求める。^{〔7〕}

本稿では、(1)の問題に対し従来は、単純に分割のみを考えることが多かったのに対し、一旦過剰に分割を進め、これを統合することによって分割線を求めるという、分割・統合手法を提案する。

ところで杉江ら^{〔8〕}は彼らが提案した主観的輪郭の生成法を、重複のものと見受けられる輪郭線から個々の物体を切り分け、その輪郭線を抽出するために利用することを試み、上記(2)の問題に新しい観点を導入している。第4章では、この杉江らの考えに沿う手法を提案し、(2)の問題を論じると同時に、その考え方を(1)に対して適用することによって、分割のあり方について別の観点が生まれ、その応用分野の存在することも指摘する。

本稿におけるもう一つの新たな提案はシルエット像から3次元物体を復元する試みである。筆者らの所属する研究室では画像から抽出された単純な多角形、主として四辺形領域を人工物の一部とみなすことによって、その3次元姿勢・形状の解釈に制約を加え、適用順序を規定した仮説集合を準備し、これを用いて仮説検証によりその3次元解釈を求めようとしてきた。この手法が凹多角形領域の3次元構造の解釈にまで拡張できることも示した^{〔9〕}。これはシルエットを3次元の対象物

として解釈する手法に発展して行く考え方として、その一部を示しておく。先の結果と同時にニューラルネットワークを用いた正規化法に基づく線画領域の3次元構造が復元可能であることが示されている^{〔10〕}。

2. 基本仮説

本稿で考察する対象は主として人工物とし、しかも比較的単純な形状のものを想定し、微細構造をもつものはその概形を取り扱うにとどめる。また形状に依存するボトムアップ処理を基本とする。このためその基礎となるいくつかのレベルの概念について、つぎのような仮説を置く。いずれの仮説も例外を多く含むものであるが、上記のような限定された対象を扱う範囲では妥当であると考えた。

2. 1 形状に関する仮説

物体の各部分についても、物体と同様に頂点以外の点では輪郭線は滑らかであるとする。部分の分割が人間にとって自然だと感じられるものは、意味・機能の点からも妥当な分割を与えることが多い。そこでこのような分割を得るための一つの評価基準として「図形を分解したときに各部分図形ができるだけ良い形を取るよう分割が行われる」という仮説を設定した。これは心理学ではブregナンツの法則として知られるものに類似している。また部分の境界では輪郭線の方角変化が不連続で、輪郭線の追跡方向とは逆方向に変化する、すなわち輪郭線内部から見たとき凹頂点をなすことが多い^{〔3〕-〔5〕}。これらを以下の議論の共通の仮説として次のように表す。

仮説1 輪郭線の凹頂点を結ぶ線が分割線になる可能性が高い。

仮説2 一つの機能をもつ部分は形が整っている。形のよさの評価尺度としては、図形特徴の一つである面積周長比を利用する。

$$\text{面積周長比} = (\text{周囲長})^2 / (4\pi \times \text{面積})$$

2. 2 分割に関する仮説

分割線の基本的性質を考えれば、つぎのような条件が必要と考えられる。

仮説3 分割線は多角形の外にあってはならない。

以下の各章に、本稿で提案する手法を述べるが、その際これらの仮説に加えて、それぞれに固有の仮説を必要に応じて設ける。

3. 分割・併合法

この手法は部分図形が仮説2のように形の整ったものであるということを重視し、人間が妥当と考える分割結果は分けようとすれば、さらに詳細な分割が可能であると考え、まず基本図形を定め、分割によってまず基本図形を求めた後、仮説2を適当な併合によって目標とする分割を得る。このため、つぎのような仮説Aを設ける。すなわち併合の核となる部分、つまり重要性のある部分を見つける。

仮説A 重要部分は面積が大きい、もしくは他の部分との接続数が多い。

仮説B 交差する分割線を双方同時に分割に採用することはない^[3]。

このように併合処理はある種の意味処理を行うことになる。また基本図形を導く過程においては凸頂点も分割の開始点とする^[6]。

3. 1 基本図形

シルエットに対する基本図形が備えるべき条件として次のような条件を考えた。

- (1) 直感的に簡単な形である。
- (2) 数学的に定義され得るものである。

(3) 対象に依存しない。

本稿では三角形、四角形を基本図形とした。これらは上記の条件をすべて満たすが、単純すぎるため、基本図形による全体の分割は余りにも複雑に見える。そこで仮説2も考慮に入れた基本図形の併合が必要になる。

3. 2 分割処理部

分割処理部では仮説1に基づき多角形の凹点を優先した大まかな分割を行い、仮説2を考慮して面積周長比(複雑さ)により基本図形(三角形、四角形)になるまで分割を行う。分割アルゴリズムはつぎの流れ図に従う。

実際の図形処理においては、頂点の形状、凹・凸頂点・直線の判定にはいくらかの余裕を与える必要がある。この結果得られた基本図形はラベルを付け、原図形を再構成するために必要な幾何学的情報を与えておく。

3. 3 併合処理部

併合処理部では、基本図形に分割された図形を仮説Aに基づき、まとまりをもったできるだけ大きい凸図形に併合する。この併合により最終的な

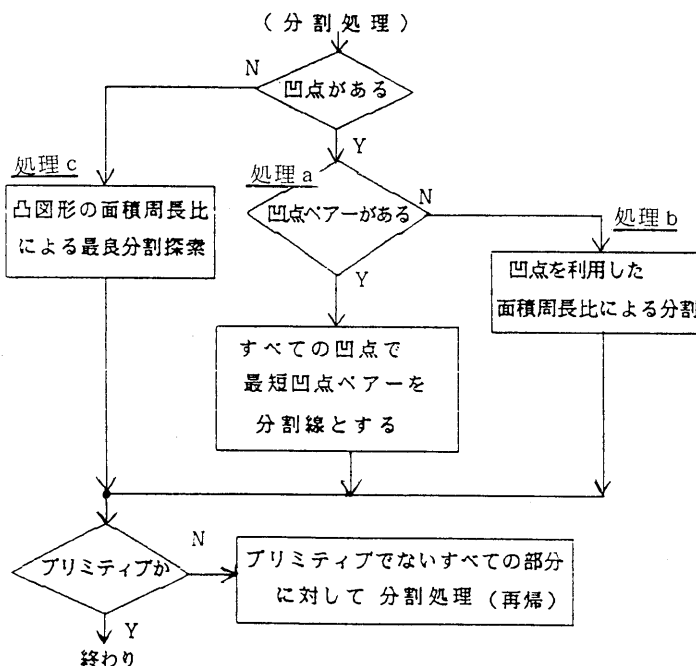


図3.1 分割処理手順

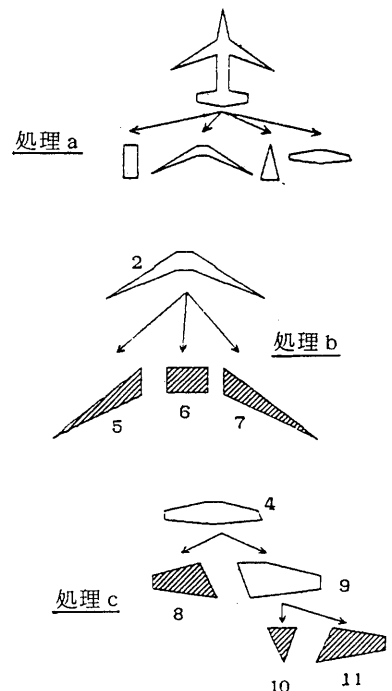


図3.2 処理例

分割パターンを生成する。併合手順はその概要を図3.3を例にとって説明する。

(1) 隣接グラフ作成

分割された各部分の隣接関係をグラフに表す。

図3.3は図3.5(a)のような隣接グラフによって表すことができる。基本図形をノードとし、番号を付与し、隣接関係にあるノード間にアークを張る。アークはその両端のノード番号の対、すなわち隣接するノード番号の対によって表す。

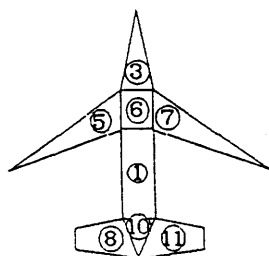


図3.3 分割結果

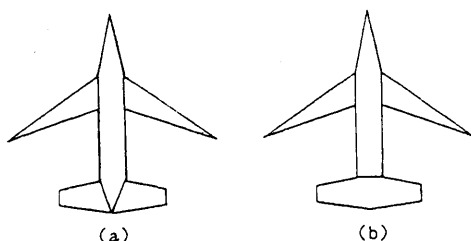


図3.4 併合結果の図示

(2) 併合可能性の検証とグループ分け

各隣接関係について、前述の複雑度によって併合可能性を調べ、併合不可能なアーク(⑤-⑥, ⑥-⑦)を除去する。このことによってノードはいくつかのグループに分けられる。

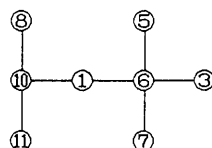
図3.5 (b)はその結果を示している。

(3) グループ内の部分の併合と凸性の検証

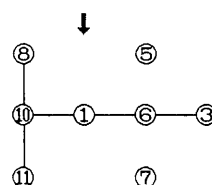
ノード⑩を含むグループは凹図形となり、その他はノード⑤, ⑦を含め凸図形である。凸図形になれば、そのグループの処理は終わる。

(4) 凹図形グループの処理後、(3)に戻る。

凹図形となったグループについてはグループ内で隣接するすべての部分の併合を試み、試行結果が凹図形になる場合双方をpivot部分候補とする。このような候補から隣接部分の多いものを、またその数が同じ場合には、面積の小さいものをpivot部分とする。



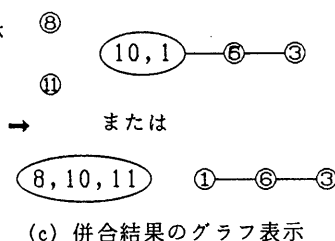
(a) 図3.3のグラフ表示



(b) 併合可能性の検証結果

図3.5

併合処理の隣接グラフによる表示



(c) 併合結果のグラフ表示

例では⑩がpivot部分である。併合可能性は二つあり、⑩と①を併合するとこれらと⑧, ⑪は併合不可能になり、(3)の処理をする。図3.5(c)のようにグループ分けされる。また⑩と⑧, ⑪を併合すると、これらと①は併合不可能になり、(3)の処理によって図3.5(d)ようになる。最終結果を線画で示すと図3.4(a), 図3.4(b)ようになる。

3.4 その他の特性

上記の仮定以外に対称性を考慮に入れることは重要である。上記の方法で分割が適切でないと判断されるものに全体的あるいは局所的対称性[3], [5]を考慮していないことによるもの、また二つの図形の重複したものも見受けられる。後者の分割については次章に詳しく述べる。

4. 輪郭線を用いた重複物体の分離

前章に述べた輪郭線の分割法は基本的に一つの物体の分解法であった。そのため付録に示した分割結果の他に、複数の物体が重なり合っていると解釈される輪郭線の分割は不自然に感じられる。

(図4.1, 4.2) 本章では、人間にとって一層自然だと感じられる分割を求めようとするが、このためには仮説2もさることながら、つぎの仮説Cが最も重要な条件であると考えられる。

仮説C 分割線は凹頂点における輪郭線と接線を共有する^[8]。

さらに後に述べる議論の根拠としてつぎの仮説をおく。

仮説D 交差する分割線でも交点までの部分を分割線として用いることができる。

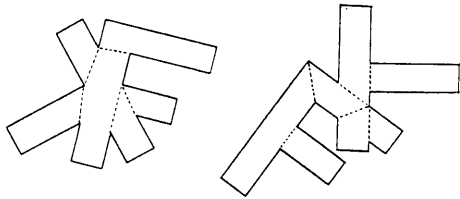


図 4.1 分割例 1

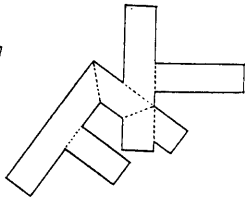


図 4.2 分割例 2

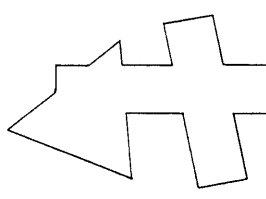


図 4.3 重複物体の輪郭線

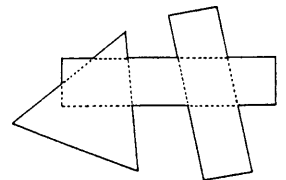


図 4.4 同左の分離線

これら 2 つの仮説は 3 章の議論と本章の議論との相違を表している。

4. 1 重なりあった物体の輪郭線の幾つの性質
重複物体の輪郭線として図 4. 3 を考える。この画像を見た場合、人間は図 4. 4 のような分離を直観にあう分離と考える。(画像の輪郭線は — で表し、分離線は ---- で表す。)

いくつかの前提をおく。

前提 1 対象となる物体は多角形で表され、それ自身が本章で考察する輪郭線に基づく方法によっては複数の物体に分離されないものとする。(これを自己分離不能と呼ぶことにする。)

前提 2 重複する物体が二つに限られる最も単純な場合に限定する。

したがって、本章で取り扱う重複図形は、重複する二つの図形がいずれも自己分離不能であり、図形の交わり方は一般的であるものとする。交わりが一般的であるとは、二つの図形が交わるとき、一方の図形の辺が他方の図形の頂点を通らず、かつ、頂点同士が重ならないことを言う。この条件は両図形の小さな移動や変形は分割結果においても小さな変化に留まることを意味する。

ここでは輪郭線の分割ではなく、輪郭線から二つの物体を分離することが主眼となるため、以下では分割線ではなく分離線および分離候補線という用語をつぎのように定義して用い、前章との差異を明確にする。分離線および分離候補線は、分割線と同様に 2 章の仮説 1 を満足するが、前章のとは異なり、仮説 C を重視する。

定義 4. 1 分離線：輪郭線上の凹頂点を挟む辺の延長線を互いに共有する凹頂点が存在するとき、これらを端点とする線分を分離線と呼ぶ。条件を満たす凹頂点がいくつも存在するとき、最も離れたものを結ぶものとする。この場合、分離線の一部として輪郭線を断片的に含むことが許される。(限定不足)

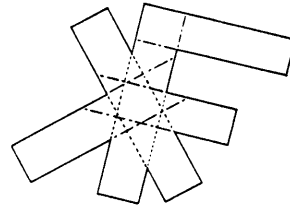


図 4.5 重複物体の分離線と分離候補線

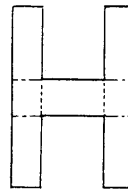


図 4.6

単一物体の輪郭線における
分離線 (----) と
分離候補線 (.....)

定義 4. 2 分離候補線：輪郭線上の凹頂点を挟む辺の延長線を共有する他の凹頂点が存在しないとき、はじめての輪郭線との交点までの線分線を分離候補線と呼ぶ。(— — — で表す。)

分離線および分離候補線の例は図 4. 5 — 図 4. 8 に多数示されている。分離候補線が別の分離候補線あるいは分離線と交わるとき、仮説 3 および仮説 D により、交点までの線分全体が輪郭線内部にあれば、分離線になる可能性をもつ。(図 4. 4 左)

以上の準備の下に議論の対象となる局所的な重複の形態は、交差する場合・端部が隠された場合・端点同士が隠し合う場合の三通りである。ここでは主として第一の場合について考察する。

4. 1 交差する場合

交差する場合を形式的に述べたとすれば、つぎのようになろうが、以下に論ずるようにこの記述がすべてを拘束することになる。

前提3 重複する部分は互いに他の一部を隠すが、一方を包含はしない。しかも重複部分における形状の不連続的な変化は一過性のものであり、基本的形状は重複部分以外の箇所に現れる。

すなわち基本的には重複する部分の基本的形状は分離線として現れ、分離線によって囲まれた領域が重複部分を表すことを意味し、直ちに以下の命題が導かれる。

命題4. 1 分離される部分はそれぞれ少なくとも二つの分離線をもつ。

命題4. 2 分離される部分がそれぞれにもつ対をなす分離線は他の部分の分離線と交点をもつ。

命題4. 3 分離線の交点から成る4 辺形が存在する。(図4. 5 参照)

これらの命題は前提3の内容を具体化したものであり、換言すれば、交差するというを詳細に規定しているに過ぎない。しかし、重複部分の内部構造は、外部に現れる変化以外には知る手段がない以上、ここに示した結果は止むを得ないのであり、逆説的に言えば、この制限こそが重複物体のシルエットから復元できる形状の一つの限界を与えるものとも言えよう。

したがって本章での課題は、重複部分を囲む境界線がどのような条件を満足する分離線あるいは分離候補線から成り立っているかを明らかにすることである。

命題4. 3からは、前章に述べた分割と本章に述べる分離との差異を示すこともできる。例えば、図4. 6の分離線は仮説1と2を満足するが、上記の性質を満足せず、重複部分の輪郭線ではない。図の二本の分離線は物体の部分の接合線すなわち分割線を表す。このように命題4. 3は分割線と分離線とを区別する基準を示している。

重複部分の形状の決定については、つぎのような二つのループ、実際上は多角形が重要な役割を演じる。

グラフ理論に従えば、グラフの最大ループとはグラフの無限領域^[2]を囲む辺からなるループと定義される。これを用いて以下の概念を定義する。

定義4. 3 重複部分最大ループ：分離線と分離候補線からなる最大ループを重複部分最大ループと名付ける。ただし、このとき分離線が輪郭線を断片的に含む場合には、輪郭線部分を除くものとする。(図4. 7)

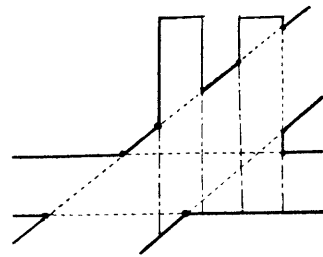


図4.7 重複部分の分離線と分離候補線

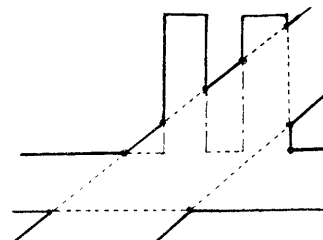


図4.8 分離線最大ループ

定義4. 4 分離線最大ループ：分離線を辺とし、重複部分最大ループの頂点のいくつかを頂点とする最大多角形を分離線最大ループと名付ける。この場合には分離線は輪郭線部分を除外しない。

したがって場合によっては重複部分最大ループに囲まれていない部分を含む。(図4. 8)

命題4. 5 重複部分最大ループが存在すれば、この内部を二つの図形の重複部分の存在可能領域と定める。

ここで定めるとしたのは外部に現れた形からする限り、これが重複部分である可能性をもつ一つの形状と範囲を与えるものと判断されるに過ぎないからである。

命題4. 6 分離線最大ループは4 辺形を成す。(これを分離線四辺形と呼ぶことにする。)

分離線四辺形が定まることから復元の際の基本部分がつぎのように定められる。

命題4. 7 分離線四辺形の外部からこの四辺形の対辺に接続する領域同士は同一物の一部である。(これを基本接続部分と呼ぶことにする。) 基本接続部分が多数存在することもある。(図4.)

基本接続部分に付随する部分の取扱の任意性によって復元形状の任意性が派生する。

- (i) 分離する一対の図形が一意に定まる条件
 a) 分離線最大ループと重複部分最大ループとが一致する。(図4. 4 右)
 b) 基本接続部分以外に分離線最大ループの頂点を共有する部分が存在しない。(図4. 9)

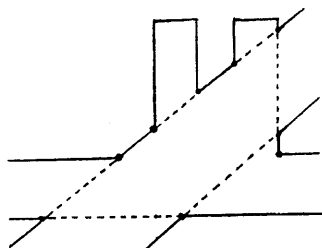


図4. 9 重複部分最大ループ

- (ii) 分離する一対の図形が複数存在する条件
 (i) b) でない場合。所属に任意性をもつ領域は分離線四辺形の頂点のうち輪郭線上にないものとその頂点を共有する領域で、輪郭線上に辺をもつものである。その所属の決定法は単純ではなく、現在考察中である。(図4. 6)

以上は互いに交差する二物体の分離に関する考察について述べた。

4. 2 その他の重複

重複する物体の形態にはこの他のものも考えられる。その一つは端点部分が重複している場合である。この場合には分離線が存在せず、分離候補線のみが存在する。しかもこれらが仮説3を満足する交点をもつ場合に限り、形状を確定できる。

また端部が他の物体に隠される場合には、単一物体の接合部と判断することにしたが、大局的に見て接続するそれぞれの部分が別々の物体であることが分かれば、部分的な重複があるものと推定できる。しかし重複部分の形状はモデルなどの助けがなければ確定できない。

これまでに述べた解析方法に関しては、いずれの場合についてもさらに詳しい考察が必要であるが、当然ながら異なる物体の分離ばかりでなく、図4. 10 に示すように構造上重複部分をもつ単一物体を構成単位に分けることにも役立ち、第3章

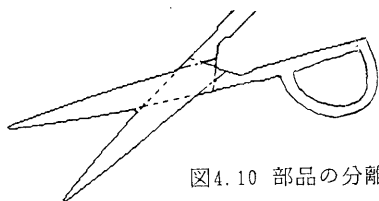
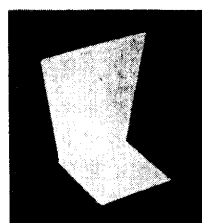


図4.10 部品の分離

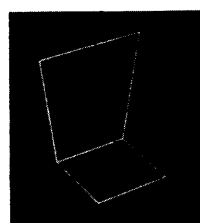
に述べた手法とは異なる分割結果を与える場合も存在すると考えられる^[6]。

5. シルエットの3次元的解釈

この章は文献[9]および[10]の一部をまとめたものであり、そこに述べられている議論のもう一つの別の観点を、本稿での議論と関連づけによって示そうとしたものである。これまで多くの場合、画像処理におけるトップダウン処理のための領域知識としては、認識すべき対象物が用いられ、認識に当たっては対象物が単位となってきた。しかし対象物が構造をもち、人工物であるとすれば、通常その外形が単純な幾何図形を単位とする構成要素の組合せで表現され、これらの図形はそれぞれ水平あるいは鉛直方向をとると想定できる^[3]。

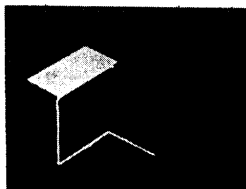


(a) 画像処理結果

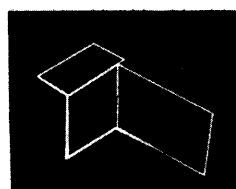


(b) 3-D 部分分割

図5. 1 シルエットの三次元解釈例1



(a) 画像処理結果



(b) 3-D 部分分割

図5. 2 シルエットの三次元解釈例2

この考えはいくつかの領域が結合したままの状態では抽出されたとみられる凹多角形領域に対しても、その部分分解と接続関係の推測による3次元形状の解釈にも応用可能である。

5. 1 凹多角形領域の三次元構造解釈

凹多角形は面方向の異なるいくつかの領域が前処理の時点で分割されずに抽出されたものと解することが可能である。仮説を適用していく過程で多角形の一部が長方形と見なせる形状の場合、

その部分をもとの多角形から切り取って「長方形」
としての解釈を与えることを考える。

その方法として、ここではまず凸状頂点が隣接する部分について形状解釈を行い、長方形という最優先の形状解釈が可能な場合にのみその部分を切り取り、残りの部分に対して同様の処理を繰り返し適用する。このとき、第2章に述べた輪郭線の分割において、第一の分割点候補である凹形頂点を、切り取る長方形の分割開始点とする。

上に述べた手法に従って行った実験の結果を図5.1, 5.2に示す。いずれの場合も以上の議論は3次元構造の解釈を目指しながらも、立体ではなく面としての理解であり、いわば物体表面の構造が対象になっているところに限界がある。

5.2 ニューラルネットワークの利用

以上に述べた統括的解釈が自己帰還形のニューラルネットワークによっても実現可能であることを示すことができる。すなわち、形状・姿勢に関する仮説をエネルギー関数の形で表現し、どの仮説を画像中のどの領域に適用するかということに応じて加えあわせたものをHopfield型のニューラルネットワークによって最小化するという形で、適用された仮説を同時に満足する解釈を並列的処理により効率的に求めることができる。このような枠組みを別の報告で詳しく述べている。^[10]

6. まとめ

以上、輪郭線あるいはシルエットが表す三つの様相、すなわち

- (i) 単一の物体シルエットの部分分解
- (ii) 重複した物体シルエットの分離
- (iii) 単一物体シルエットの3次元形状解釈

についてそれぞれ議論をした。その結果、それぞれの様相についていくつかの新しい結果または問題を示した。また輪郭線解釈の多様な側面を取り上げ、その共通点と相違点を設定した仮説を通じて明らかにした。しかし多くの議論の余地を残しており、関連する研究の展開が期待される。

謝辞

筆者らの研究室での議論、何守杰君の示唆が第4章の定義4.4などの背景にある。また本研究の一部は文部省科学研究費（重点領域研究 No.01633517）による。

参考文献

- [1] 伊東幸俊, 阿部圭一, Carle Arcelli: "二値画像の形状記述のための部分構造への分解の一手法", 「画像理解の高度化と高速化」シンポジウム講演論文集, 191-196(1989).
- [2] 山岸健太郎, 坂上勝彦, 山本和彦, 松原仁: "輪郭図形からの注目候補点の検出方法", 信学論D-II, Vol.J72-D-II, No.5, 750-759(1989).
- [3] 米沢比呂志, 松山隆司, 長尾真: "平均化操作を用いた閉曲線図形の特徴抽出と分割パターンの生成", 情処全大・S 61前期, 1365-1366(1986).
- [4] 松山隆司, 米沢比呂志, 東圭三: "平均化操作を用いた閉曲線図形の特徴抽出と階層的分割", 情処学会, CV研資料, 36-4(1985).
- [5] 麻田治男: "Smoothed Local Symmetries による2次元図形の階層的記述", 情処学会, CV研資料, 32-5(1984).
- [6] C.Guerra, G.G.Pieronni: "A Graph-Theoretic Method for Decomposing Two-Dimensional Polygonal Shapes into Meaningful Parts", IEEE Trans.on PAMI, Vol.PAMI-4, No.4(1982).
- [6] L.G.Shapiro, R.M.Haralick: "Decomposition of 2-D Shapes by Graph-Theoretic Clustering" IEEE Trans. PAMI, Vol.PAMI-1, No.1(1979).
- [7] 中村裕一, 長尾真: "重なりあった二次元形状の認識", 人工知能学会誌, 3,4, 65-77(1988).
- [8] 大西昇, 安田浩之, 安藤和久, 杉江昇: "物理的に存在しない輪郭線の抽出"「画像理解の高度化と高速化」シンポジウム論文集, 185-190(1989).
- [9] 渡辺佳映, 安部憲広, 北橋忠宏: "優先順序付き仮説による画像領域の三次元解釈", 信学会, PRU研資料, PRU88-148(1989).
- [10] 角所, 淡, 安部, 北橋, 三宅: "エネルギー最小化原理による画像の3次元解釈", 信学会, PRU研資料, (1990-01)

付録 分割・併合処理の結果

