

曲面パッチに基づく画像記述を利用した 三次元曲面物体の認識†

長 田 正†† 査 紅 彬††

入力画像から特定の物体を探し出したり、その物体の位置・姿勢を求めたりすることは部品の自動操作などに欠くことのできない技術であり、物体認識の主要な目的の一つである。本論文は、この物体認識の対象物を、平面、球面、円柱面、円錐面といった基本曲面で形成されるもの限定し、対象物の姿勢変化や隠蔽問題にも対処できるモデルに基づくビジョンシステムについて論じている。これらの基本曲面で構成された対象物についての画像記述とモデルに関し、物体の認識過程は、対象物候補の選出、対象物候補の確認、対象物位置・姿勢の計算という三つの処理を含んでいる。その中で、対象物候補の選出は木の探索過程になり、複雑な画像記述の場合には探索時間が長く、これの短縮が最大の課題となる。この問題を解決するために、本手法は次のような探索戦略を採用している。まず、探索範囲をできるだけ限定するために、ただ単に曲面パッチの特徴を照合するだけでなく、曲面の接続関係をも考慮する。次に、対象物を構成する曲面の見えやすさを定量化し、その値に基づいてモデルと照合すべき曲面の選択順序を決め、認識過程の高速化を図る。普通、この見えやすさに影響を与える要因を正確に規定することは困難なので、本論文では、ファジイ集合理論を利用した可視確信度という概念を導入し、この見えやすさを定量化する方法を提案する。このような考え方に基づく具体的な認識アルゴリズムが示され、実験結果が報告される。

1. ま え が き

画像の中から特定の物体を探し出したり、その物体の位置と姿勢を求めたりすることは部品の操作を自動的に行う際にしばしば必要となる。普通、対象物の形は様々なので、デジタル画像において画像特徴を抽出しそれらを分類するといったプロセスでは、このような物体認識の目的を達成することが難しい。これに対し、対象物についての知識をその物体のモデルとしてまとめ、物体認識過程において、このモデルの機能を積極的に働かせる、いわゆるモデルに基づくビジョンシステムが能率的な手法として注目されている。この場合、対象物モデルの作成と、このモデルと照合させるべき画像記述の抽出とに必要な物体記述法の良し悪しがシステム全体の効率を大きく左右することになる。

機械部品などの表面は簡単な曲面で形成されることが多いので、これらの物体の表面を曲面パッチに分割し、対象物を曲面パッチの集合で記述することができる。このような手法は曲面パッチに基づく記述法といわれ、部品の構造的な特徴を容易に記述することができ、かつ、物体の姿勢変化を曲面パッチにおけるパラメータの変換によって簡単に求めることができるとい

う特徴を有している。また、曲面パッチの境界線は一般に曲面の不連続点からなるので、対象物の表面を曲面パッチへ一意に分割することが可能である。現在、この曲面パッチに基づく記述法は、入力画像を曲面パッチに分割し記述する手法が進む^{1)~3)}につれて、実用化への道が開けつつある。

ここで問題としている物体認識とは、画像記述にある曲面パッチ(画像曲面パッチ)を、モデルに記述された曲面(モデル曲面)と照合し、モデル曲面と一致する画像曲面パッチの集合を画像記述から抽出することになる。実際に画像や三次元センサデータからシーンの記述を求めることの複雑さも考慮して、この物体認識を次のような基本仮定を満足するものと限定する。1) 対象物は平面、球面、円柱面、円錐面といった基本曲面から形成される。2) 認識すべき対象物は既知である。3) 認識すべき対象物は他の物体に隠されて一部分見えなくても構わないが、同一物体は他の物体により分断されてはいない。なお、対象物は任意の姿勢で置かれてもよい。

一般に、この特定物体の認識過程には、1) 対象物候補と見なされる画像曲面パッチの集合を画像記述から選び出す; 2) 対象物候補の適切さを確認し、それを画像から分離し認識する; 3) 対象物の位置と姿勢を計算する、という三つの処理段階が必要となる。そのうち、対象物候補の選び出しは解釈木に従う探索過程になり^{4),5)}、複雑な入力画像と対象物の場合には必要な探索時間が長くなり、これの短縮は重要な課題だ

† Recognizing a 3-D Curved Object by Using Scene Descriptions Based on Surface Patches by TADASHI NAGATA and HONGBIN ZHA (Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University).

†† 九州大学工学部電気工学科

と考えられる。

本論文では、曲面パッチの集合で構成される画像記述の中から、モデルに基づいて対象物候補を選び出す過程に要する時間を短縮させるための一つの手法を提案する。この手法の具体的な内容は主に二つの部分からなっている。まず、探索範囲をできるだけ限定するために、単に曲面パッチそのものの特徴を照合するだけでなく、曲面間の接続関係をも照合する。次に、任意の姿勢で置かれる対象物を構成する曲面の見えやすさを定量化し、その値に基づいてモデルと照合すべき曲面の選択順序を決め、認識過程の高速化を図る。普通、この見えやすさに影響を与える要因を明確に規定することは困難なので、ここでは、ファジイ集合理論⁶⁾を利用した可視確信度を定義し、見えやすさの定量化を試みる。

さらに、ここで定義した基本曲面で形成される物体を認識するための具体的なアルゴリズムを提案する。また、実測画像から抽出された画像記述を用いて特定の物体を認識するための実験の結果について述べる。

2. 曲面パッチに基づく物体認識

t 個の曲面パッチを含む画像は曲面パッチの集合 $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in}\}$ で簡単に表される。一方、 r 個の曲面で構成される対象物に対して、曲面パッチに基づいて作成した対象物モデルも $S_m = \{s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mr}\}$ という形で表現することができる。

ここで、まず、 s_{ii} と s_{mj} をそれぞれ画像座標系とモデル座標系を基準にして一意に記述するものとする。もし、任意の s_{ii} を平行移動と回転で s_{mj} に変換することができたとすると、 s_{ii} と s_{mj} は同一の曲面パッチだと見なすことができる。 S_m の任意の部分集合に対して、それに属する曲面と一致する画像曲面パッチを同じ変換によって S_i から抽出することができれば、これらの画像曲面パッチは概ね対象物を構成するものと認めてもよい。しかし、現実には、曲面パッチに関する正確な情報を求めることができず、モデル作りに必要な曲面の一意的な表現形式もいまだに開発されていない。このため、曲面の照合が画像記述のモデルへの直接的な変換だけで済む場合は少ないので、対象物に関する知識を利用する top-down 式の多段階的な照合手続きが必要である。本システムで提案する曲面パッチの照合を出発点とする物体認識の過程を以下に示す。

2.1 対象物候補の選び方

同一の対象物に属する画像曲面パッチを画像から分離するためには、すべての画像曲面パッチとモデル曲面とを組み合わせる照合しなければならない。この組み合わせの過程を木構造で表すことにすれば、対象物候補を選び出すことは、モデル曲面と一致する画像曲面パッチの集合を解釈木に従って探索することにほかならない。もし画像曲面パッチの数を t 、モデル曲面の数を r とすると、可能な解釈の数は $(r+1)^t$ になり⁷⁾、 t と r の値が大きくなると、探索時間も長くなる。この探索時間を縮めるために、まず、探索範囲を制約するための拘束をより厳しくし、一致する曲面パッチが存在しにくい部分を早い段階で解釈木から切り離すことが考えられる。また、最も有望なところから探索を始め、可能な候補を見付ければ探索を打ち切り、無駄な探索を減らせることも有効な対策の一つとなる。本システムにおいては、これらの考え方は次のように具体化される。

(1) 隣接曲面の相互関係の適用 曲面の相互関係は対象物の固有な構造的特徴であり、モデルから画像への変換が既知であるか否かに関係なく、モデルにおいても画像の記述においても変わらない。したがって、ある画像曲面パッチとモデル曲面とが一致したとすると、隣接曲面との相互関係を利用することにより、対象物に属する曲面パッチの探索範囲を大幅に限定することができる。

曲面の相互関係を定義する前に、まず、各曲面パッチのパラメータを共通の基準で定義する必要がある。画像座標系を基準とし、本論文で対象とする基本曲面のパラメータはそれぞれ表1のように定義される⁸⁾。表に示されているように、視線方向への依存性という立場から見ると、定義することができないパラメータ

表1 基本曲面パッチのパラメータの定義
Table 1 Definition of primitive surfaces' parameters.

	位置 パラメータ	姿勢 パラメータ	サイズ パラメータ
平面	中心位置 P_c	法ベクトル V_p	
球面	中心 S_c		半径 R_s
円柱面	中心軸上の 一点 $Y_{c,p}$	中心軸方向 ベクトル V_p	半径 R_p
円錐面	頂点 O_c	中心軸方向 ベクトル V_o	中心軸と母 線との角度 α

も存在する。また、原点から平面までの距離のような、既に定義されているパラメータから容易に計算することができるパラメータも表に入れていない。

曲面の照合過程において、これらのパラメータで表される曲面の相互関係は次のように利用される。

i) ある画像曲面パッチと一致するモデル曲面が求められると、これらの曲面に接続する画像曲面パッチとモデル曲面との間に限って照合を行えばよい。

ii) 曲面パッチ s_i と s_j の姿勢ベクトルをそれぞれ $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3})'$ と $\mathbf{v}_j = (v_{j1}, v_{j2}, v_{j3})'$ で表示すると、曲面の姿勢関係はこの二つの方向ベクトル間の角度

$$\beta = \cos^{-1} \mathbf{v}_i' \mathbf{v}_j = \cos^{-1} (v_{i1}v_{j1} + v_{i2}v_{j2} + v_{i3}v_{j3}) \quad (1)$$

で求められる¹⁰⁾。画像曲面パッチ s_{ii} と s_{ij} との姿勢関係を β_i 、モデル曲面 s_{mu} と s_{mv} との姿勢関係を β_m で示すとき、次のような照合手続きをする。

$$\text{if } |\beta_i - \beta_m| > u_i, \text{ then } \{s_{ii}, s_{ij}\} \neq \{s_{mu}, s_{mv}\}$$

ここで、 u_i は曲面のパラメータに含まれる誤差を考慮して設けるしきい値であり、 \neq は“一致ではない”という関係を意味するものとする。

iii) 画像曲面パッチ s_{ii} を主曲面、それに対応するモデル曲面を s_{mu} とする。そして、 s_{ii} と接続する画像曲面パッチを s_{ij} 、 s_{mu} と接続するモデル曲面を s_{mv} とし、 s_{ii} と s_{ij} の寸法を l_{ii} と l_{ij} 、 s_{mu} と s_{mv} の寸法を l_{mu} と l_{mv} として、次のような照合を行う。

$$\text{if } \left| \frac{l_{ii} - l_{ij}}{l_{ii}} - \frac{l_{mu} - l_{mv}}{l_{mu}} \right| > u_r, \\ \text{then } \{s_{ii}, s_{ij}\} \neq \{s_{mu}, s_{mv}\}$$

ここで、 u_r は上で示した u_i と同じ意味を持つ。また、ここで定義されている寸法パラメータは、曲面の半径といったような曲面の部分隠蔽に関係のない特徴量なので、画像曲面パッチの一部が隠され見えなくてもよい。

(2) モデル曲面の順序付け 人間はある対象物を見るとき、どの曲面がその物体を最も特徴付けるかを知ることができるし、また、その物体を視野においたら、どの曲面が最も見えやすいかある程度予測することもできる。対象物候補の探索過程において、もし曲面の持つ特徴の重要度や、曲面の見えやすさに応じて探索手順を計画することになると、対象物に属する曲面パッチを見付ける可能性が高まると同時に、探索の範囲も限定することができる^{7), 8)}。しかし、曲面特徴の重要度や曲面の見えやすさなどに影響を与える要

素は極めて複雑なので、それらの量的評価は難しく、それに基づいたモデル曲面の順序付けも行いにくい。我々はファジイ集合理論に基づいて曲面の見えやすさを定量化する一つの手法を開発した。これについては第4章で詳しく説明する。

そのほかに、認識過程において、まだ照合されていないモデル曲面の見え方を予測し、絶対に見えない曲面を推定することができれば、その曲面を照合する必要はなくなるので、探索時間が短くなる。また、これらの見えない曲面が対象物に存在するものと認めることができ、これらの曲面を対象物候補に追加すると、結果の信頼性はさらに改善される。

一般に、物体の見え方に大きく影響する隠蔽問題には、他の物体との重なりによる物体間隠蔽と、物体自らの姿勢変化による姿勢隠蔽の二種類がある。そのうち、曲面の姿勢隠蔽を予測するためには、判別された曲面パッチに基づいてこの対象物の姿勢を推定すればよい。本論文では、この対象物の姿勢を求める方法として、曲面の姿勢変化を表現しやすいガウス球面空間を適用する計算アルゴリズム¹¹⁾を用いている。

2.2 対象物候補の適切さの確認

曲面の探索法にヒューリスティックな戦略を用いていること、および曲面の表現法に曖昧性があることなどのため、選び出した対象物候補は誤った曲面集合を含む可能性がある。その誤りを防ぐためには、例えば、曲面重要度といった、画像曲面パッチに関するより高レベルでの特徴を用いて候補の適切さを確認しなければならない。しかし、現実には曲面重要度の定義を簡単に決めることができないので、ここでは、モデルに記述された曲面の面積だけを利用している。これに基づいた評価関数の定義は第5章に示してある。

2.3 対象物の位置、姿勢の計算

対象物候補を確認した後、画像曲面パッチのパラメータを用いて対象物の位置と姿勢を計算する。対象物の位置としては、対象物に最も重要な曲面の位置を利用してもいいし、各曲面パッチの位置から求められる中心点を用いることもできる。姿勢パラメータを計算するときには、曲面の見え方を予測するときに使った物体姿勢の計算法を利用すればよい。

3. 物体モデルの表現形式

対象物を迅速かつ正確に認識するために、各曲面パッチそのものの幾何学的な特徴と、曲面の接続関係などのより高レベルでの知識を利用することが必要で

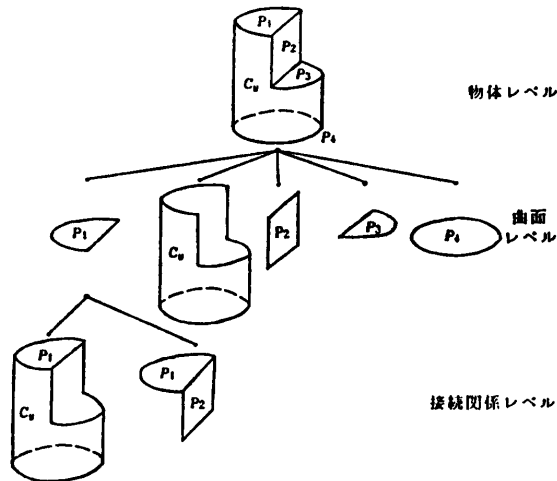


図1 対象物特徴の木構造

Fig. 1 Tree structure representing an object's features.

ある。一つの枠組の中であるべく多くの知識を記述し、しかもこれらの知識を必要に応じて効率的に取り出せるようにするために、知識をどのような構造で表現するかは極めて重要である。ここでは、階層的な知識の表現に適するフレーム型表現法¹²⁾に基づいて対象物モデルの作成を試みる。

図1に示すように、対象物の幾何学的な特徴は、物体レベル、曲面レベルおよび接続関係レベルに大別し木構造で表現することができる。この木の根節点は物体を表し、それにつながる節点は曲面を表す。次に、面の接続関係を表すために、この曲面（主曲面）と隣接する各曲面を主曲面を表す節点とつながる節点で表現する。これらの節点をそれぞれ物体節点、曲面節点および接続関係節点と呼び、一つの節点に属する特徴を一つのフレームで記述する。各節点におけるフレームの定義は次のようになる。

(1) 物体節点におけるフレーム（物体フレーム）

物体フレームは次のようなスロットからなる：物体識別名、物体座標系の基準となる曲面の識別名、物体に含まれる曲面パッチの数と各曲面パッチの識別名。

Object (Name, Coord-S, Number,
 $N_{r1}, \bullet, \bullet, \bullet, N_{rm}$)

(2) 曲面節点におけるフレーム（曲面フレーム）

曲面フレームには、曲面の識別名、タイプ、姿勢パラメータ、寸法パラメータ、面積、隣接曲面の数および各隣接曲面の識別名をスロットとして記述する。ここでは、画像記述との照合、そして曲面見えやすさの定量化の便利さを考慮して、曲面のタイプを二種類の

型で表現する。基本型 (primitive type) はその曲面が基本曲面（平面、球面、円柱面と円錐面）のいずれかを示すもので、一般型 (general type) はそれが凸面か凹面かを示すものである。曲面の大きさの記述には、曲面特徴の測定を単純化するため、および曲面の見えやすさの定量化にファジイ概念を取り入れやすくするために、寸法パラメータとともに、自然言語（英語）の表現をも利用する。ここでは、“Large”, “Small” といった基本語に “Rather”, “Very” のような修飾子を付け加えることによる六つのレベルを設けて、曲面の大きさを示す。

Surface (Name, PrmType, GenType,
Ori, Size, Area, AdjNum,
 $N_{r1}, \bullet, \bullet, \bullet, N_{rm}$)

(3) 接続関係節点におけるフレーム（接続関係フレーム）

接続関係フレームには、次のようなスロットがある。すなわち、接続関係の識別名、主曲面の識別名、隣接曲面の識別名、接続タイプ、曲面完全度と境界線の長さである。ここで、曲面の接続関係の分類を簡単にするために、すべての接続関係を次に述べる三つのタイプで表す。

Type 1: 主曲面と隣接曲面は平滑につながり、主曲面は完全なものであり、境界線は凸稜である。

Type 2: 境界線は凸稜であるが、主曲面は接続関係によって不完全な曲面になる。

Type 3: 主曲面と隣接曲面との境界線は凹稜である。

これらの接続タイプの例を図2で示す。ここでは、基本曲面の一部が欠落し、視線方向によっては、その曲面を正しく識別することが不可能となる曲面を不完全な曲面といい、そうでない場合、すなわち、各基本曲面を正しく識別することが可能な曲面を完全な曲面

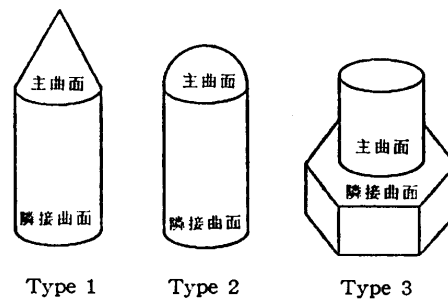


図2 接続タイプの分類

Fig. 2 Classification of connection types.

という。また、この完全さの程度を曲面の完全度と定義する。接続関係フレームにおいて、この曲面の完全度および境界線の長さを表すときには、先に述べた曲面の大きさの記述法と同様、正確な数値を入れる必要はなく、自然言語の言葉を使って記述すればよい。

Relation (Name, Ako-S, AdjName,
AdjType, Comp, BLth)

4. 可視確信度の計算

曲面の見えやすさには複雑な要素が互いに影響し合っているため、これに影響するすべての要素を見極めて分析するよりも、幾つかの重要な要素だけを取り上げ、より簡潔なモデルを導くほうが好ましい。普通、物体の幾何学的な特徴は曲面の見えやすさに最も直接的な影響を与えるものと考えられる。しかし、これだけを考えても、現実に存在する曲面形状と接続関係の多様さ、および曲面間に生じる隠蔽問題などのために、曲面の見えやすさの形式化はそう簡単ではない。そこで、次のような方法でこの問題の解決を計ることとする。

一つの曲面に対して、その見えやすさを $[0, 1]$ の間の数値で示すことにし、この数値を曲面の可視確信度と呼ぶことにする。一方、その曲面を、その持つある特定の特徴を共有する曲面の集合（あるいは、この特徴を持つ可視曲面集合）の要素と見なすことができる。したがって、もしこの集合全体の見えやすさを定量化することができれば、曲面の見えやすさも自然に計算することができる。形式的に言えば、ある特徴を持つ可視曲面集合 X に対応するファジイ集合 A に、次のようなタイプ2メンバシップ関数 $\mu_x^A(x)$ を適用することで、“見える”という特性を付ける⁶⁾。

$$\mu_x^A(x): X \rightarrow [0, 1]^{[0,1]} \quad (2)$$

個々の特徴だけを持つ曲面の集合から曲面の持つすべての特徴を同時に有する曲面の集合を求めるときには、次のような拡張原理を利用する。すなわち、 A と B をそれぞれファジイ集合 U_1 と U_2 の部分集合とし、 f は $U_1 \times U_2$ を V に射影する演算とすると、 f を介して A と B を C に射影して得られるファジイ集合 C は次のように求められる。

$$\mu_f^C(v) = \max \{ \wedge \{ \mu_{u_1}^A(z_1), \mu_{u_2}^B(z_2) \} \mid v = f(z_1, z_2) \}. \quad (3)$$

ここで、 \wedge の演算として何を選ぶかによって、各可視曲面集合の間の演算がいろいろと定義される。

本章では、最初に、対象物モデルの曲面レベルでの

各特徴を持つ可視曲面集合のメンバシップ関数を定義する。ただし、主曲面の接続関係全体の影響を考えると、個々の接続曲面がもたらす影響を総合的に分析する必要があるため、あらかじめ接続関係にある各隣接曲面を含む可視曲面集合のメンバシップ関数を定義しておかなければならない。次に、曲面のすべての特徴を同時に有する可視曲面集合を求める方法を述べる。これが求められれば、曲面の可視確信度は簡単に定義される。

4.1 曲面特徴に対応する可視曲面集合

(1) 基本型：曲面の見えやすさは、その曲面を任意の姿勢で置いたとき、それが見える方向の角度によっておおまかに表すことができる。このような角度は三次元空間に一定の立体角を形成する。現在対象としている曲面が基本曲面の場合には、その曲面のガウス写像を求めれば、この立体角の値は容易に計算される⁹⁾。ここでは、このようにして得られる値に基づいて各基本型の可視曲面集合のメンバシップ関数を定義する。後で説明する曲面集合の演算を簡単にするために、次のような $T_r(a, b, c)$ を定義式の一般形式として利用する。

$$T_r(a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{when } 0 \leq x < \max\{0, a-b\}, \\ \frac{x - (a-b)}{b} & \text{when } \max\{0, a-b\} \leq x < a, \\ \frac{(a+c) - x}{c} & \text{when } a \leq x < \min\{1, a+c\}, \\ 1 & \text{when } \min\{1, a+c\} \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (4)$$

この関数は $[0, 1]$ で定義され、もし、横軸を曲面の見えやすさを規格化して表現したものとし、縦軸を可視曲面集合のメンバシップ関数の値とすると、三つのパラメータ a, b, c が与えられれば、メンバシップ関数の値は一意に決まる。このように定義されるメンバシップ関数の一例は図3(a)で示されている。ここでは、メンバシップ関数に含まれるパラメータのうち、 a は、上述したように曲面のガウス写像に基づいて計算される曲面の見える方向を表す立体角によって定められる。例えば、平面の場合は、全空間の半分が可視空間であるという意味で 0.5、球面の場合は、どの視線方向からでも識別できるので 1、円柱面の場合 0.95、円錐面の場合は、円錐面の中心軸と母線とのなす角 α を用いて $(1 + \cos \alpha)/2$ と a の値を決めている。 b, c は、メンバシップ関数を三角形にするために設けたパラメータで、それらの値を明確に定めることは

難しいが、見える程度の確実さを表していることから、 a の選び方によってある程度それらの値を選定することができる。これら a, b, c の具体的な値は曲面の基本タイプに応じて表2に示してある。

(2) 一般型：今までは、各基本型を持つ可視曲面集合を扱うとき、凸の曲面しか考えていなかった。しかし、凹面が凸面より隠されやすいといった直観的な考え方に基づくと、曲面集合が凸面か凹面かに応じて異なるメンバシップ関数を定義する必要がある。今の場合、再び $T_r(a, b, c)$ を用いることにし、それぞれの関数のパラメータ a, b, c の値は上述した方法と同じように凸面と凹面の見えやすさによって表3のように選ばれる。

(3) 大きさ：曲面は大きければ大きいほど見えやすい。各サイズの曲面を含む可視曲面集合を定義するとき、この事実は最も有力な手掛かりとなる。また、ここで用いる曲面大きさの表現には六つのクラスしか含まれていないので、それらに対応するメンバシップ関数の定義は簡単となる。ただし、自然言語の言葉で表される曲面の大きさにはかなりの曖昧さがあるので、ここでは、以上で定義したメンバシップ関数の一般形式とは異なって、ある幅を持つ台形の関数

$$T_1(u, v) = \begin{cases} 1 & \text{when } 0 \leq x < u, \\ \frac{v-x}{v-u} & \text{when } u \leq x < v, \\ 0 & \text{when } v \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$T_2(m, n) = \begin{cases} 0 & \text{when } 0 \leq x < m, \\ \frac{x-m}{n-m} & \text{when } m \leq x < n, \\ 1 & \text{when } n \leq x \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

を一般形式として用いることにする(図3(b))。各クラスに属する可視曲面集合のメンバシップ関数のパラメータを曲面の大きさに応じて表4で示すように選ぶ。

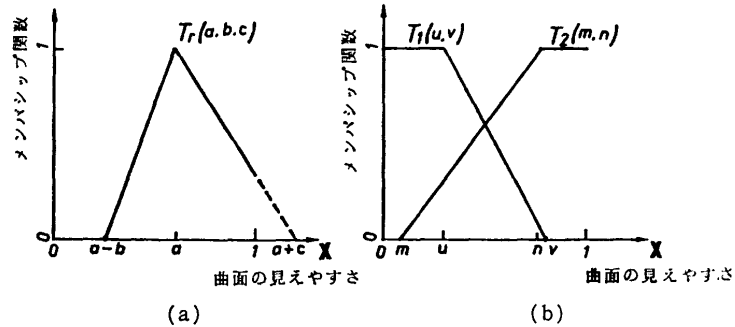


表3 (a) $T_r(a, b, c)$ の定義, (b) $T_1(u, v)$ と $T_2(m, n)$ の定義
Fig. 3 (a) Shape of function $T_r(a, b, c)$, (b) Shapes of functions $T_1(u, v)$ and $T_2(m, n)$.

表2 各基本タイプに対応する可視曲面集合のメンバシップ関数のパラメータ
Table 2 Parameters in the membership functions defined in terms of primitive types.

	平面	球面	円柱面	円錐面
(a, b, c)	(0.5, 0.2, 0.2)	(1, 0.3, 0.3)	(0.95, 0.3, 0.3)	$((1 + \cos \alpha)/2, 0.2, 0.2)$

表3 各一般タイプに対応する可視曲面集合のメンバシップ関数のパラメータ
Table 3 Parameters in the membership functions defined in terms of general types.

	凸面	凹面
(a, b, c)	(0.95, 0.3, 0.3)	(0.5, 0.35, 0.35)

(4) 接続関係タイプ:

(a) 各隣接曲面に対応する接続関係タイプ：問題を簡単化するために、ここでは、主に曲面の接続関係タイプに応じて可視曲面集合のメンバシップ関数を定義する。Type 1の接続関係を持つ主曲面に対しては、曲面の隠蔽はほとんど起こらない。Type 2の場合、その主曲面の一部がなくなっているため、その曲面の見えやすさへの影響を主曲面の完全度で表す。また、Type 3の接続関係の場合には、主曲面とその隣接曲面との間の相対的な大きさは主曲面の隠し方に影響を及ぼす重要な要素となる。これらによる具体的な定義を図4で示す。ここで、 $T_1('comp')$ と $T_2('comp')$ は、先に示した $T_1(u, v)$ と $T_2(m, n)$ の形をそのままにし、大きさの基本語を完全度の基本語に代えることによって得られる関数である。その他、 s_m と s_n は主

表4 各曲面サイズに対応する可視曲面集合のメンバシップ関数
Table 4 Parameters in the membership functions defined in terms of the surface sizes.

	Very-Small	Small	Rather-Small	Rather-Large	Large	Very-Large
メンバシップ関数	$T_1(0.1, 0.4)$	$T_1(0.2, 0.5)$	$T_1(0.4, 0.7)$	$T_2(0.4, 0.7)$	$T_2(0.5, 0.8)$	$T_2(0.6, 0.9)$

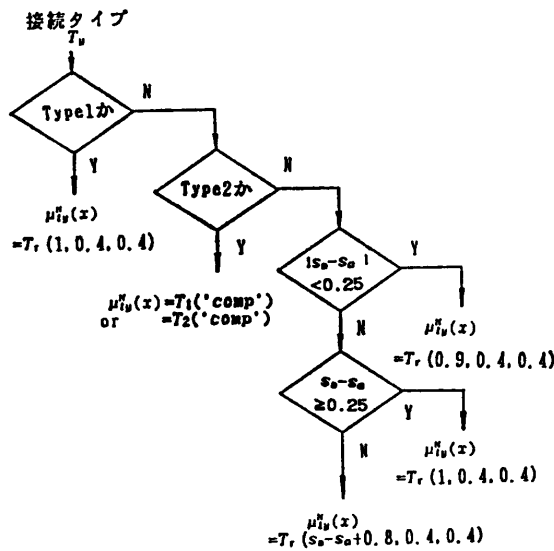


図 4 曲面の接続関係による可視曲面集合のメンバシップ関数の計算アルゴリズム
 Fig. 4 Algorithm of computing the membership functions in terms of connection relations.

曲面と隣接曲面の大きさを表しており、その値は曲面の大きさによって定義された関数 $T_1(u, v)$ の u か、 $T_2(m, n)$ の n になる。

(b) 主曲面を含む可視曲面集合：普通、画像においては各隣接曲面が同時に見える可能性があるので、主曲面を含む可視曲面集合は、接続関係にある各隣接曲面を含む可視曲面集合の共通集合となる。一方、他の曲面や物体に隠されて見えない隣接曲面が存在する可能性もあるので、この集合の演算は和集合演算の性格をも持つ。これによって、我々は、共通集合演算と和集合演算の中間に位置付ける加重平均演算子をこの集合演算の定義に利用する。主曲面 s_m における隣接曲面の数を n_a とし、各隣接曲面 s_{ui} を含む曲面集合のメンバシップ関数を $\mu_{ui}^R(z_i)$ とすると、 s_m を含む曲面集合のメンバシップ関数 $\mu_m^R(v)$ を求める演算子は

$$v = f(z_1, \dots, z_{n_a}) = \sum_{i=1}^{n_a} P_i z_i \quad (7)$$

となる。一般に隣接曲面との境界線が長ければ長いほど主曲面は隠されにくいので、この境界線の長さによって P_i の値を決めればよい。つまり、先に述べた曲面のサイズを表す数値 s_m と s_a を求めたのと同じ方法を用い、境界線の長さを示す言葉をクラスに応じて数値に変換して正規化し、それを P_i に指定すればよい。

4.2 曲面の可視確信度の計算

曲面の基本型、一般型、大きさおよび接続関係全体

を特徴とする可視曲面集合のメンバシップ関数をそれぞれ S_{1p} , S_{1q} , S_{1s} および S_m とすると、主曲面を含む可視曲面集合 S_{ur} は各入力集合の共通集合であり、

$$S_{ur} = S_{1p} \wedge S_{1q} \wedge S_{1s} \wedge S_m \quad (8)$$

で求められる。この共通集合演算を

$$f(x, y) = \min\{x, y\} \quad (9)$$

で定義し、式(3)を用いると、 S_{ur} のメンバシップ関数 $\mu_{ur}^P(x)$ は簡単に求められる。曲面の可視確信度 C_i は $\mu_{ur}^P(x)$ の平均値

$$C_i = \int_{0.0}^{1.0} \mu_{ur}^P(x) dx \quad (10)$$

で与えられる。

曲面についての特徴が先に説明したモデルのフレームに納められるので、それらの取り出しは便利であり、計算の手続きも簡単である。

5. 認識アルゴリズムと実験結果

5.1 認識アルゴリズム

n_k 個の曲面パッチを含む画像記述を曲面ごとに表すと、次のようになる：

Patch 1 (N, T, PV, AP 1, ●, ●, ●, AP n_{p1})

Patch 2 (N, T, PV, AP 1, ●, ●, ●, AP n_{p2})

...

Patch n_k (N, T, PV, AP 1, ●, ●, ●, AP n_{pnk})

そのうち、各曲面パッチの識別名 N、種類 T およびパラメータ PV のほかに、それに接続する隣接曲面の識別名 AP 1, ●, ●, ●, AP n_j も含まれている。

このような画像記述に対して、対象物候補を立てる手続きは次のようなステップからなる。

Step 1: モデル曲面の中から、曲面の可視確信度の値によって指定された曲面順位に従って、最優先の位置にあるモデル曲面を選ぶ；

Step 2: 画像面を左上から右下へ走査し得られた曲面パッチを、選んだモデル曲面と次々に照合する；

Step 3: 一致する曲面パッチがあれば、それと接続関係にあるモデル曲面と画像曲面パッチとの間に限って照合を行う。隣接曲面の特徴と、判別された主曲面との接続関係ともに一致する曲面パッチは、主曲面と一緒に対象物候補を構成するものとする；

Step 4: 判別された隣接曲面を主曲面と見なして、Step 3 を繰り返す。すべての隣接曲面が照合されると、Step 2 に戻り、Step 1 で選んだモデル曲面とまだ残されている画像曲面パッチとを照合する；

Step 5: 選んだモデル曲面をすべての画像曲面パッ

チと照合した後、Step 1に戻り、次の順位にあるモデル曲面を選んで、照合手続きを行う；

Step 6: すべてのモデル曲面が選ばれ照合されると、照合手続きを終了させる。

第2章で説明したように、このアルゴリズムは次の三つの特徴を持っている。1) 曲面の見えやすさをモデル曲面の順序付けに利用することによって、モデル曲面と一致する画像曲面パッチをより早く見付けることができる。2) 曲面パッチの隣接関係を用いて解釈木に示されている探索順序を部分的に変更することによって、既に確立されている対象物候補に属する画像曲面パッチを集中的に探し出すことができる。これとともに、画像曲面パッチが識別後直ちに画像記述から除去されるので、必要な曲面パッチの照合回数は大幅に減少する。3) 曲面パッチの相対位置に基づいて探索を行うと同時に、曲面パッチの相対姿勢と大きさをも検証するので、探索範囲をより強く限定することができ、パッチ照合の際の曖昧さを減少させることが可能である。

対象物候補がすべて選ばれた後、各候補にある曲面の面積を利用して、候補の適切さを確認する。 n_i 個の曲面の集合 $\{s_1, s_2, \dots, s_{n_i}\}$ で表される対象物モデルにおいて、各曲面の面積をそれぞれ $\{A_1, A_2, \dots, A_{n_i}\}$ とすると、対象物候補 S_i に対して、次のような評価関数

$$D_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} A_i K_{ei}}{\sum_{i=1}^{n_i} A_i} \quad (11)$$

を求める。ここで、 K_{ei} は、モデル曲面 n_i に対応する画像曲面パッチが S_i に判別された場合には値が1、そうでない場合には値が0となる関数である。 D_i が十分大きければ、 $\{S_i\}$ を適切な候補と見なして、真の対象物とする。さらに、第2章で述べた方法によって、画像における対象物の位置と姿勢を計算する。

5.2 実験結果

この手法を検証するために、実測データに基づく実験を行った。実験では、まず画像記述を求めるために、次の三段階の処理を行った。

1) 改善された測光学ステレオ法⁹⁾により、法ベクトル図を求める；2) この法ベクトル図をもとにして、画像を基本曲面の曲面パッチに分割する⁹⁾；3) 分割された各曲面パッチの法ベクトル分布により、曲面パッチの種類を判別し

た上、各曲面の位置、姿勢と寸法パラメータを求める⁹⁾。

図5(a)(b)は、それぞれ入力画像と分割された画像を示し、表5は曲面パッチの識別および測定の結果を示す。認識すべき対象物は図5(c)に示されている。対象物に含まれる各曲面の可視確信度は表6のように計算されている。これらの数値は、円柱面の S_{m1} が最も見えやすく、平面の S_{m5} が最も見えにくいことを示している。また、ともに平面である S_{m4} と S_{m5} の場合、実際に S_{m4} のサイズが S_{m5} より大きいことから、計算された可視確信度の値が異なり、この物体が任意の姿勢で置かれる際に S_{m4} は S_{m5} より見えやすいことを示している。

作成されたモデルに基づいて認識アルゴリズムを実行すると、まず次のような対象物候補が選出される。

$$S_1 = \{P_1, P_3, P_4\}; S_2 = \{P_5\}; S_3 = \{P_7\}; S_4 = \{P_2\}; \\ S_5 = \{P_6\}; S_6 = \{P_8\}; S_7 = \{P_9\} \quad (12)$$

本実験での対象物候補の選出過程においては、画像

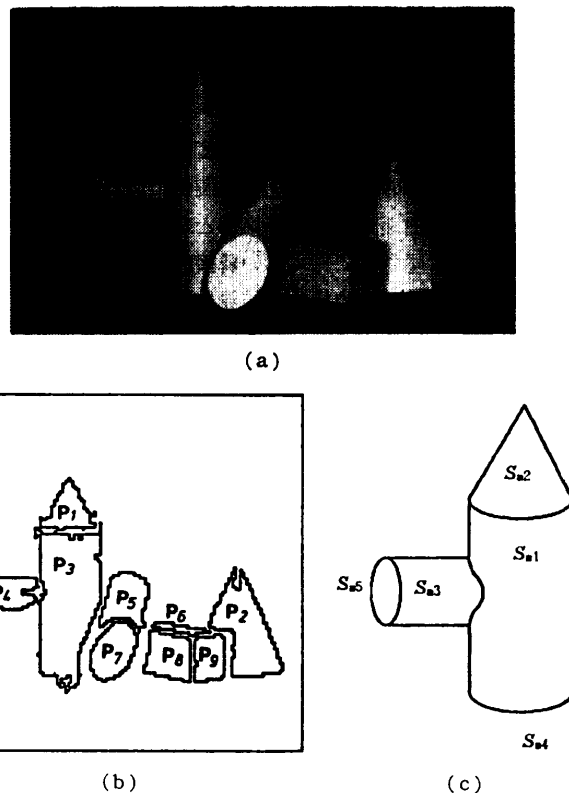


図5 実験結果: (a) 入力画像, (b) 分割された画像, (c) 認識する対象物

Fig. 5 Results of an experiment: (a) one of the input images, (b) segmented image, (c) the object to be recognized.

表 5 入力画像の記述
Table 5 The resultant scene description.

	タイプ	位置 (L_o)	姿勢 (O_{ri})	サイズ (s_i)	隣接曲面 (S_{obj})
P_1	円錐面	(89.0, 196.0)	(-0.01, 0.99, 0.16)	50°	{ P_1 }
P_2	円錐面	(219.3, 111.5)	(0.02, 0.95, 0.31)	50°	{ P_1, P_2 }
P_3	円柱面	(86.3, 83.6)	(0.0, 0.99, 0.01)	32.0	{ P_1, P_2, P_3, P_4 }
P_4	円柱面	(10.8, 109.8)	(0.99, -0.05, 0.1)	20.0	{ P_3 }
P_5	円柱面	(124.0, 84.0)	(-0.15, -0.91, 0.38)	24.0	{ P_1, P_2, P_3, P_4 }
P_6	平面	(165.7, 88.0)	(-0.03, 0.6, 0.8)	—	{ P_1, P_2, P_3, P_4 }
P_7	平面	(120.8, 71.7)	(0.41, -0.31, 0.86)	—	{ P_1, P_2, P_3 }
P_8	平面	(161.9, 67.4)	(-0.48, -0.03, 0.88)	—	{ P_1, P_2, P_3 }
P_9	平面	(187.8, 66.5)	(0.5, -0.06, 0.87)	—	{ P_1, P_2, P_3 }

表 6 各モデル曲面における可視確信度
Table 6 Confidences of surface visibility for the model surfaces.

	S_{m1}	S_{m2}	S_{m3}	S_{m4}	S_{m5}
可視確信度	0.854	0.811	0.777	0.500	0.187

曲面パッチとモデル曲面との照合回数は 49 回であった。この数を、解釈木に従う単純な照合過程に必要な曲面パッチの照合回数 $6^2=10,077,696$ と比較すると、提案したアルゴリズムがより効率的であることが分かる。また、ファジイ集合理論に基づいたモデル曲面の順序付けの効果を調べるために、次のような比較を行った。表 6 に示されているモデル曲面の可視確信度の値によって得られるモデル曲面の序列 M_d とその逆序列 M_i

$$M_d = \{S_{m1}, S_{m2}, S_{m3}, S_{m4}, S_{m5}\};$$

$$M_i = \{S_{m5}, S_{m4}, S_{m3}, S_{m2}, S_{m1}\}$$

をそれぞれ対象物候補選出アルゴリズムに入力すると、結果が出るまで必要なパッチの照合回数は 49 と 72 となる。この二つの数字から分かるように、曲面の可視確信度に基づく探索順序の選択によって、実験で用いた簡単な例の場合でも、対象物候補の選出手続きはかなり効率的になっている。

次に、各対象物候補に含まれる画像曲面パッチの姿勢パラメータにより、これらの候補に対応する対象物インスタンスの姿勢を決めてから曲面の姿勢隠蔽を予測し、見えない曲面を対象物候補に追加する。ここでは、対象物の面でモデル曲面の S_{m4} , S_{m5} に対応する面を S_1 に、 S_{m4} に対応する面を S_4 に追加する。さらに、評価関数 D_c によって対象物候補の適切さを確認すると、 S_1 が真の対象物の一部分と分かる。最後に、画像における対象物の位置パラメータと姿勢パラメータはそれぞれ

$$x_0=62.0; y_0=129.8 \quad (13)$$

$$\alpha=9^\circ; \beta=-6^\circ; \gamma=3.2^\circ; \quad (14)$$

のように計算される。

6. 結 び

物体認識の過程を曲面パッチの集合における探索過程に変換することによって、曲面の姿勢変化や隠蔽問題などにも対処できるシステムについて論じた。本システムは、フレーム構造のモデルを利用し、画像記述とモデルとの照合手続きの効率化に工夫を凝らしており、基本曲面で構成される物体群中の特定の対象物を認識し、その位置・姿勢を精度よく計測することができることを実験で確認した。特に、ここで提案した曲面可視確信度の概念は、ビジョンシステムにおける抽象的な概念を定量化する一つのアプローチを示したもので、認識システムの柔軟性と効率化を高める上で有効だと考えられる。

なお、曲面の重要度などは、曲面の可視確信度と同じような重みを持つ概念であり、これの定量化ができれば、システムの効率がさらに上がることが予想される。さらに、認識する対象物の範囲を基本曲面のみでは形成することができない一般曲面物体まで広げるためには、距離情報などを利用して曲面の輪郭線を含む総合的な画像記述を求める必要があるし、モデル構造の改善もまた重要な課題になってくる。同じフレーム構造のモデルを使ったとしても、曲面の幾何学的な知識のみならず、物体のより抽象的な知識をモデルに取り入れ利用する効率的な手法を開発することが必要となる。

参 考 文 献

- 1) 大島, 白井: 3次元情報を用いた物体認識, 電子通信学会論文誌(D), Vol. J-65 D, No. 5, pp.

- 629-636 (1982).
- 2) Besl, P. J. and Jain, R. C.: Segmentation through Variable-Order Surface Fitting, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-10, No. 2, pp. 167-192 (1988).
 - 3) 長田, 查: 曲面の微分特徴量の抽出と法ベクトル図の分割, *情報処理学会論文誌*, Vol. 30, No. 8, pp. 954-961 (1989).
 - 4) Grimson, W. E. L. and Lozano-Perez, T.: Localizing Overlapping Parts by Searching the Interpretation Tree, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-9, No. 4, pp. 469-482 (1987).
 - 5) Skordas, T. and Horaud, R.: Planning a Strategy for Recognizing Partially Occluded Parts, *Proc. 8th IJCP*, Paris, Oct., IEEE, pp. 1080-1083 (1986).
 - 6) Zimmermann, J.: *Fuzzy Set Theory and Its Application*, Kluwer-Nijhoff Publishing (1985).
 - 7) Bolles, R. C. and Cain, R. A.: Recognizing and Locating Partially Visible Objects: The Local-Feature-Focus Method, *Int. J. Robotics Res.*, Vol. 1, pp. 57-81 (1985).
 - 8) Jain, A. K. and Hoffman, R.: Evidence-Based Recognition of 3-D Objects, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-10, No. 6, pp. 783-802 (1988).
 - 9) Nagata, T. and Zha, H. B.: Determining Orientation, Location and Size of Primitive Surfaces by a Modified Hough Transform, *Pattern Recogn.*, Vol. 21, No. 5, pp. 481-491 (1988).
 - 10) Fan, T. J., Medioni, G. and Nevatia, R.: Matching 3-D Objects Using Surface Description, *Proc. Conf. RA*, Philadelphia, Apr., IEEE, pp. 1400-1406 (1988).
 - 11) 長田, 查: ガウス写像を利用した曲面物体の姿勢の決定, 第40回日本ロボット学会学術講演会論文集, pp. 361-362 (1986).
 - 12) Minsky, M.: A Framework for Representing Knowledge, *The Psychology of Computer Vision*, Winston, P. H. (ed.), pp. 211-277, McGraw-Hill (1975).
- (平成元年7月19日受付)
(平成2年1月16日採録)
- 

長田 正 (正会員)
昭和7年生. 昭和31年九州大学工学部電気工学科卒業. 昭和34年同大学院博士課程中退. 同年工業技術院電気試験所(現電子技術総合研究所)入所. 昭和55年九州大学工学部教授, 現在に至る. ロボティクス, AI, コンピュータビジョンの研究に従事. 工学博士. 計測自動制御学会, 人工知能学会, 日本ロボット学会等の会員.



查 紅彬 (正会員)
1962年生. 1983年中国合肥工業大学卒業. 1984年中国政府派遣留学生として来日, 翌年九州大学大学院工学研究科に入学, 現在同大学院博士後期課程に在学中. 画像処理, コンピュータビジョンの研究に従事. 計測自動制御学会会員.