

視覚特性を活用した1枚の写真からの物体形状推定

中 島 慶 人†

設備を3次元的にコンピュータ内へ取り込むため、既存の写真から設備形状を取得する作業が人手により行われており、この作業の自動化が望まれている。本稿では、上記作業を自動化するための基礎技術として、視覚の奥行き知覚特性と既存の線画解釈方式を組み合わせた物体形状推定方式を提案する。線画で描かれた頂点の相対的奥行き感は、頂点を構成する線分の角度に依存する。また、視点は頂点などの特徴部分に移動しやすく、最初に着目した部分を正当化するように周りを解釈する傾向がある。だが、この視覚特性だけでは物体の全体形状を正しく説明できない。そこで、既存の線画解釈方式を利用し上記の視覚特性を実現する形状推定方式を開発した。本方式により1枚の写真から物体のおおまかな形状が推定できる。また、既存の線画解釈方式では解釈できない線画に対しても、人の感覚に近い推定結果が得られることを実験により確認した。

An Inference Method of Three-dimensional Shape by Depth Perception from One Image

CHIKAHITO NAKAJIMA†

This paper proposes a method to make the three-dimensional shape from an image or a line drawing automatically. This method makes use of known characteristics at the depth perception of the human vision and existing methods for the line drawing analysis. The following characteristics are modeled in software: a person tends to pay more attention to vertices in the image, tries to interpret the three-dimensional shape from the first gaze vertex by using slants of lines, and analyzes the other vertices to justify the depth of the gaze vertex. It can analyze artificial objects which are expressed by straight lines. Also it can analyze inconsistent shapes such as irregular drawings which couldn't be analyzed by the existing methods.

1. はじめに

既存設備を3次元的にコンピュータ内へ取り込むため、写真から形状を復元する作業が人手により行われている¹⁾。この作業では設備の特徴抽出と形状判断、写真ごとの特徴対応付けを行う必要があり、これらの作業の自動化が望まれている。

物体の3次元形状を能動的に取得する方法として、撮影装置や照明パターンの位置、方向、配置を能動的に制御し、3次元形状を解析するアクティブビジョンがさかんに研究されている。すでに、ランダムドット、空間コード化、光切断、照度差、モアレ画像を利用する方式が製品化されている²⁾。また、多眼カメラによる3次元形状計測³⁾、連続画像のオプティカルフローを活用した形状計測⁴⁾、因子分解法を利用したTomasiらによる相対形状復元方式⁵⁾、あるいは、カメラのフォー

カスを能動的に変化させる方式⁶⁾なども提案されている。しかし、既存の写真は上記方式に不可欠な各種の前提条件を満たしていないため、これらの方式を利用することができない。

また、複数枚の写真から物体を復元する受動的な方式として、物体とカメラのおおまかな相対位置を設定し、写真間で物体の特徴を対応付け、3角測量の原理で形状を決定する方式が活用されている。あるいは、物体の幾何学的な特徴に基づく幾何学的不変量を使った形状推定の研究⁷⁾も行われている。しかし、いずれの方式も人による特徴抽出、形状判断、特徴対応付け作業を行う必要がある。

1枚の写真から形状を推定する方式として、透視投影と物体形状の制約に基づく形状推定方式が研究されている^{8),9)}。また、1980年代中ごろまでに人工知能の分野で多面体の線画解釈方式がさかんに研究され、すでに線画解釈の数理的特性が明らかにされている¹⁰⁾。現在、曲面を持つ線画の解釈方式も研究が進められている¹¹⁾。しかし、いずれの方式もラフに描かれた線

† 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

画の誤差を許容し、人の目のように線画を解釈する汎用性は実現できていない。一方、数理的な観点からではなく心理実験から線分の解釈特性が定式化されている¹²⁾。しかし、視覚特性で得られる線分解釈だけでは、物体の全体構造を正しく推定できない問題がある。

本稿では、1枚の写真から物体の3次元形状を復元するために、視覚特性と既存の線画解釈方式を組み合わせた自動形状推定方式を提案する。透視投影で撮影した物体や平行投影で作成した線画に本方式を適用した結果、人が知覚する形状に近い結果が得られている。また、既存の線画解釈方式では解釈できない線画に対しても人の感覚に近い形状推定結果が得られている。

2章では本提案方式で利用する既存の研究成果を示し、3章で視覚特性を活用した形状推定方式を提案する。4章では提案方式による実験結果と考察を示し、5章で今後の課題と展開を示す。

2. 形状推定方式と視覚特性の既研究

2.1 透視投影を利用した形状復元

人間は透視投影により世界を見ている。このため、平行投影で作図された立体図よりも、透視投影で作図された立体図のほうが直感的に理解しやすい。透視投影効果の成り立つシーンであれば、平行線の延長線は1点に収束する。たとえば、カメラ座標系でレンズの焦点距離を f とすると、 (x, y, z) にある点の像は投影面上の $(fx/z, fy/z)$ に投影される。任意の点 (x, y, z) を通り単位ベクトル (m_1, m_2, m_3) に沿う直線上の点を、パラメータ s を用いて $(x + sm_1, y + sm_2, z + sm_3)$ と表現すると、この投影は上記と同様に投影面上で

$$\left(f \frac{x + sm_1}{z + sm_3}, f \frac{y + sm_2}{z + sm_3} \right)$$

となる。さらに $s \rightarrow \infty$ とすると、 $m_3 \neq 0$ のとき点 $(fm_1/m_3, fm_2/m_3)$ に収束する¹³⁾。この点を消失点と呼んでいる。この消失点は平行な直線であれば、直線の置かれる位置に関係なく1点に決定できる。そのため、空間中で平行な直線群は、画面上で同じ消失点を持つことになる。同様に、空間中で平行な平面群も、画面上で同じ消失点を持つことになる。

この特性と対象物体に依存する構造上の制約を利用した形状推定方式が提案されている^{8), 9)}。しかし、平行線群が投影面に平行な $m_3 = 0$ の場合、有限の距離内に消失点がなく、例外的な手続きが必要になる。

2.2 線画のラベル付けと候補選択

画像から得られた線画や図面に描かれた線画を解釈する方法として、線分の接続関係を利用する方法が提案されている。その最も代表的な方法が頂点の形に着

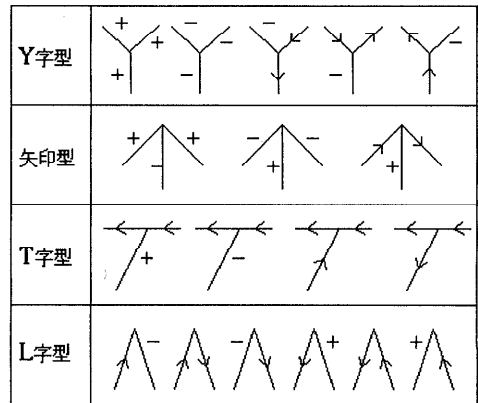


図1 ハフマンとクローの頂点辞書

Fig. 1 A fundamental class of vertices by Huffman and Clowes.

目したハフマン・クローの頂点辞書(図1)である¹⁴⁾。3枚の面が交わってできる頂点の見え方は、図1のようにY字型、矢印型、T字型、L字型の4種類に分けることができる。図1はそれぞれの頂点が形成する形を図形の幾何学的性質に基づき分類し、ラベル付けを行ったものである。図1の中で「-」は両側の面が谷をなすように交わってできた稜線であり、「+」は両側の面が尾根をなすように交わってできた稜線である。いずれも両側の面がともに見えている状態を表している。一方、矢印の向きは片方の面が裏側に隠れて見えない場合を表し、見えている側の面が矢印の右側になるように決定している。図1のラベル付けを矛盾なく満たす形状が、線画の解釈候補となる。

しかし、前述の線画のラベル付けは、描かれている線画の可能な立体構造候補を示しているにすぎない。そのため、次の作業として、どの候補が正しい解釈であるかを決定する必要がある。特に、対象世界と投影方法が限定されている世界では、線画が表現しうる立体の頂点座標と面が満たすべき線形方程式・不等式系が得られる。例として、透視投影の場合を以下に示す。透視投影の中心を原点、投影面を $f = 1$ とする。多面体の頂点 v_i の投影面における位置を $(x_i, y_i, 1)$ とし、実際の3次元位置を $(x_i/t_i, y_i/t_i, 1/t_i)$ とする。 t_i は未知数である。多面体の面 s_j が載っている平面方程式を

$$a_j x + b_j y + c_j z + 1 = 0 \quad (1)$$

とすると、頂点 v_i が面 s_j に載っていれば式(1)に $(x_i/t_i, y_i/t_i, 1/t_i)$ を代入した

$$a_j x_i + b_j y_i + c_j + t_i = 0 \quad (2)$$

が成り立たなければならない。また、立体構造であれば面 s_j 上に載っていない頂点と面 s_j との間で不等式が得られる。この線形方程式・不等式系に解が存在

することが、正しい多面体を表すための必要十分条件である^{15),16)}。

頂点数 m 、面の数 n 、各面での辺の合計本数（または、各面ごとの頂点数の合計）を r とすると変数の数から方程式の数を引いた値 μ は

$$\mu = m + 3n - r \quad (3)$$

となる。どのような線画に対しても線画から得られる式(2)の連立方程式は自由度3の平面としての解を持つ。特に、 μ が4以上ならば連立方程式が線形独立であり、頂点位置に数値誤差が含まれていても立体が構成できる。しかし、 μ が4未満ならば連立方程式の中に線形従属な方程式を持つため、頂点位置の誤差に敏感に反応し解を得にくいことが明らかにされている^{10),15)}。平行投影でも同様である。

しかし、人間はラフに描いた線画や上記 μ が4未満の線画からでも安定した奥行き知覚を行っている。さらに、ラベル付けができない線画からも形状を知覚している。そのため、人間がどのように線画を3次元的に解釈しているかを検討することが必要である。

2.3 視覚特性

奥行き知覚が反転するネッカーキューブなどの線画を使用した心理実験から、線分で構成された頂点の奥行き解釈特性として次のような定式化が村越ら¹²⁾により提案されている。なお、この定式化は線画の着目頂点をあらかじめ決めておき、線画の提示角変化にともなう奥行き知覚変化を調べた結果から得られたものである。

ネッカーキューブなどのように平行投影で描かれた線画では、各頂点の奥行き知覚を以下のように数値化できる。まず、頂点を手前に感じる強さを $t(\theta)$ 、奥に感じる強さを $r(\theta)$ とすると、

$$t(\theta) = \alpha_t |\sin(2\theta)| \quad (4)$$

$$r(\theta) = \alpha_r |\sin(2\theta)| \quad (5)$$

と表すことができる。ここで θ は x 軸と線分のなす角度である。また、 α_t 、 α_r はそれぞれ奥行きを示すパラメータであり、実験的に求められた値である。いずれも、頂点を基準に線分が2次元座標上のどこにあるかにより値を下記のように設定している。

第1,2象限： $\alpha_t = 85.0$, $\alpha_r = 15.0$

第3,4象限： $\alpha_t = 7.0$, $\alpha_r = 63.0$

次に、ある頂点が k 本の線分で構成されているとする。このとき頂点で感じる奥行きを式(4)と式(5)を使い、

$$I_T = \sum_{i=1}^k t(\theta_i)$$

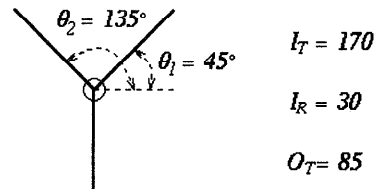


図2 奥行き値の例

Fig. 2 An example of a depth value.

$$I_R = \sum_{i=1}^k r(\theta_i)$$

と定義する。 θ_i は x 軸と i 番目の線分のなす角度である。さらに、それぞれの点での奥行き値を正規化するために、

$$O_T = \frac{I_T}{I_T + I_R} \times 100 \quad (6)$$

とする。また、 $O_R = 100 - O_T$ とする。この O_T 、 O_R が隣接している線分から得られる頂点の相対的な奥行き値となる。図2にY字型の頂点へ上記の計算を行った結果を示す。図2を手前に知覚する割合 O_T が85、奥に知覚する割合 O_R が15となり、 $O_T > O_R$ となるため図2の頂点は手前側に知覚しやすいことになる。しかし、視覚特性で得られる心理的な頂点の奥行き値は、物体の全体構造を正しく反映していない問題がある。

一方、サッケードと呼ばれている眼球運動の研究¹⁷⁾から、人の視点が顔写真であれば眼鼻口などに、線画であれば頂点に向けられることが示されている（視覚特性A）。このサッケードと人の認知過程の関連^{18),19)}についてもさかんに議論が行われているが、両者の関連はまだ明確になっていない。特に近年、脳の1次視覚野での方位選択性細胞の働きを利用したサッケードのコンピュータシミュレーションが行われだしている²⁰⁾。しかし、1次視覚野の経路を通らずにサッケードを起こす別の視覚経路²¹⁾が存在しているため、眼球運動のメカニズムはまだ研究段階である。そこで本稿では、眼球運動のメカニズムを検討せずに、すでに知られている視覚特性Aを前提として議論する。また、川端²²⁾によるネッカーキューブを使った奥行き知覚の心理実験より、線画の解釈過程として下記のBとCの結果が得られている。この結果は、ネッカーキューブの1つの頂点を構成する3線分のうち2線分に着目し、その着目位置の変化にともなう奥行き知覚変化を調べた実験から得られたものである。特に、線画の3次元解釈は局所的な特徴から全体的な構造へと逐次的

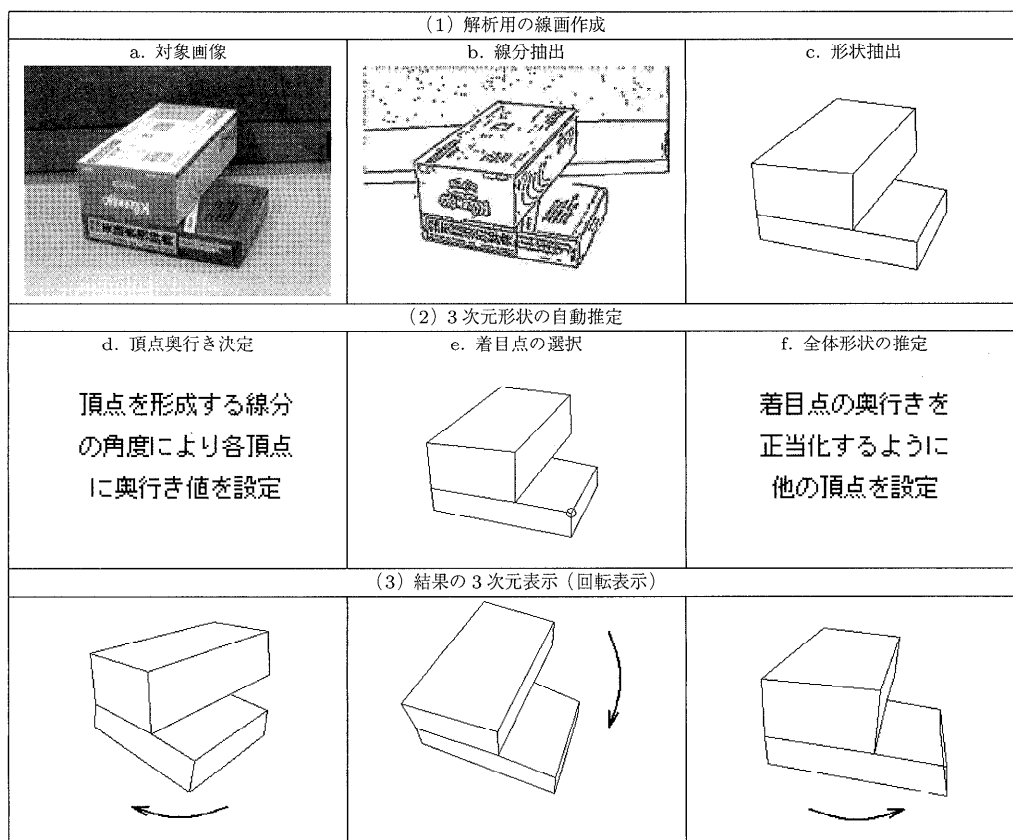


図3 1枚の写真からの形状推定手順

Fig. 3 Processes of a method to make three-dimensional shapes.

に解釈がなされている可能性が示されている。本稿で仮定する視覚特性を下記に示す。

- A. 視点は線画の頂点付近に移動する傾向がある。
- B. 最初に局所的な特徴が解釈され、次に大局的な特徴が解釈される。
- C. 最初に注目した頂点の解釈を正当化するように、他の部分を解釈する。

3. 画像からの形状推定方式

既存の線画解釈方式は数学的に厳密な解釈を行うため、視覚のような柔軟性に欠けている。一方、式(6)の視覚特性で得られる頂点の奥行き知覚は、物体の全体構造を正しく反映していない問題がある。そのため、いずれの方式も人の柔軟な形状判断を実現できていない。

ここでは人の柔軟な形状判断を実現するために、既存の線画解釈方式と前述の視覚特性を利用する物体形状推定方式を提案する。はじめに、画像から形状解析用の線分を抽出する。次に、抽出した線分をもとに、各点の奥行き値を線分の傾きから推定する。そのなか

ら着目する頂点を決定し、その頂点の奥行きを正当化するように物体の全体形状を決定する。最後に、推定された形状を透視投影により3次元的に表示する。処理の概要を図3に示す。

3.1 解析用線画の作成

図3-aから画像内の輝度変化を利用し線分を抽出した結果を図3-bに示す。一般に物体を撮影した映像から線を抽出すると、面の模様、影や照明の影響による雑音で多くの余分な線分が発生する。そのため、形状推定に必要な線分は、抽出した線画を背景とするインタフェースを利用し人手で選択している(図3-c)。

3.2 各頂点の奥行き推定

前章で示した人の視覚特性Aより物体の頂点に注意が向けられ、視覚特性Bよりその頂点から局所的な解釈が行われるものとする。そこで、処理のはじめに式(6)を使い各頂点へ奥行き値 O_T を設定する。なお、以下では各頂点 v_i ($3 \leq i \leq m$, m は頂点数) を頂点集合 V の要素とし、各面 s_j ($1 \leq j \leq n$, n は面の数) を面集合 S の要素とする。

前章で示した頂点の視覚特性による奥行き O_T は、

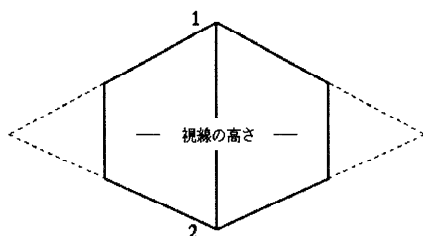


図4 立方体の見え方

Fig. 4 Perspective view of a cube.

人が地面に対し垂直に立ち、平行投影で対象物体を斜め上から見下ろしている状況での実験結果と等価である。しかし、透視投影では見下ろしている場合と見上げている場合とで、各頂点を構成する線分の傾きが異なる問題が生じる。例として、図4に立方体の中間位置に眼の高さを設定し、消失点を2つ持つように作図した透視投影図を示す。図4で点1と点2は同じ奥行き値になるべきであるが、式(6)の結果は点1が $O_T = 10$ 、点2が $O_T = 85$ となり、それぞれの奥行きが異なってしまう。

そこで、撮影時のカメラの高さ H を入力し、その高さ H よりも下の頂点 v_i では式(6)で得られる O_T をそのまま活用する。一方、 H よりも上部では、式(4)、式(5)のパラメータ α_t 、 α_r の値を入れ替え、奥行き値 O_T を反転させている。頂点 v_i の画面内の高さを h_i とすると次のようになる。

- $h_i > H$ (視線より上部分)
 - 第1,2象限 : $\alpha_t = 7.0$, $\alpha_r = 63.0$
 - 第3,4象限 : $\alpha_t = 85.0$, $\alpha_r = 15.0$
- $h_i < H$ (視線より下部分)
 - 第1,2象限 : $\alpha_t = 85.0$, $\alpha_r = 15.0$
 - 第3,4象限 : $\alpha_t = 7.0$, $\alpha_r = 63.0$

実験では各頂点が H の上下 ($h_i \neq H$) になるように H を設定している。なお、上記の条件で式(6)を使い頂点 v_i に設定した奥行きを z_i で示し、その集合を Z とする。集合 V と集合 Z の要素は1対1対応である。

3.3 着目点の選択

図1で示した頂点形状の中から解釈を始める着目点を表1の順序で選択する。表1の中で最も優先順位の高い頂点は、3面の交わりで形成されるY字型である。なお、T字型頂点は面の隠れにより形成されている可能性が高いため、着目点候補から除外している。また、同順位の着目点候補が複数存在する場合、候補の中から任意の頂点を選択する。

3.4 全体形状の推定

人は最初に注目した頂点の解釈を正当化するように、

表1 着目点としての優先順位
Table 1 In order of attention points.

優先順位	頂点の型	可視面
1	Y字型	3
2	Y字, 矢印型	2
3	L字型	1

他の部分を解釈する傾向がある(視覚特性C)。そこで、上記で選択した頂点の奥行きを正当化するように、残りの頂点の奥行きを設定する。

頂点集合 V から選択した着目点 v_i を v'_i とし、対応する z_i を z'_i とする。着目点 v'_i を含む面 s_j から着目点 v'_i を端点とする2本の線分が得られる。この2本の線分を構成する3頂点の座標とその3頂点に対応する集合 Z の要素値を式(2)に代入し、面 s_j の方程式を求める。以降、方程式が定まった面を s' とする。面 s'_j の方程式を使い、その面 s'_j に含まれる頂点 v の奥行き値を決定し v' とするとともに、対応する z の値を更新し z' とする。着目点 v'_i を含むすべての面に対し、同様の処理を行う。次に、面の集合 S の要素の中で方程式が定まっていない面 s に対し、その面 s に含まれる頂点とその奥行きを使い、面の方程式を決定し面 s' とする。さらに、その面 s' に含まれる頂点の奥行き値を更新し v' 、 z' とする。ただし、面の方程式を決定する処理の順番に、以下のような優先順位をつけている。

- (1) v' が3点以上の面 s
3点以上の頂点 v' を持つ面 s を優先して処理を行い面 s' とする。面 s' を決定するために使う頂点 v' の優先順位は表1に従い、優先順位の高い3頂点を利用する。ただし、T字型の頂点は表1の候補が存在しない場合のみ利用する。
- (2) v' が3点未満の面 s
面 s 内で頂点 v' が3点未満の場合、頂点 v' とまだ奥行きが更新されていない頂点 v を使い面の方程式を求める。その際、面を決定するために使う頂点 v の優先順位は表1に従い、優先順位の順に利用する。また上記と同様に、T字型の頂点は表1の候補が存在しない場合のみ利用する。

処理の途中で頂点に対し複数の解釈値が存在する場合、次の順序で頂点の奥行き値を決定する。

- (1) 線分で連結している隣の頂点と、式(6)で得られた初期の相対的奥行き関係を保持する値を選択する。
- (2) 式(6)で得られた頂点の初期の奥行き値 z に最

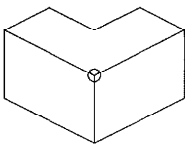
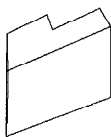
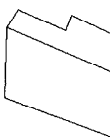
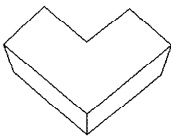
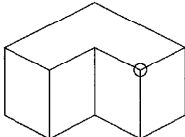
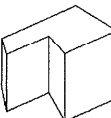
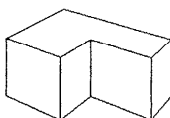
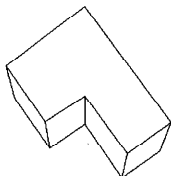
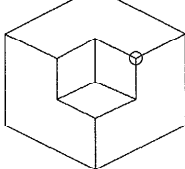
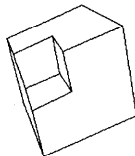
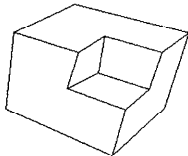
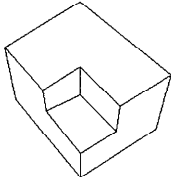
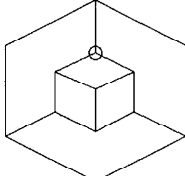
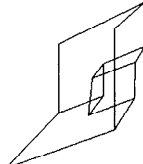
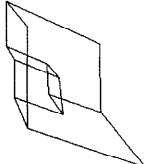
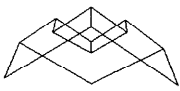
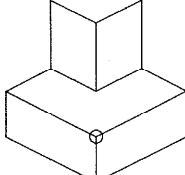
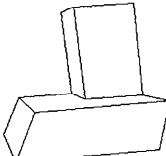
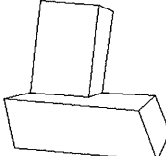
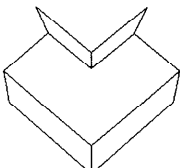
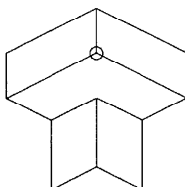
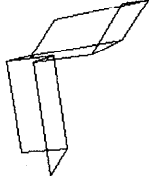
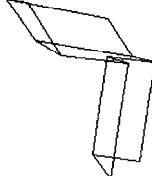
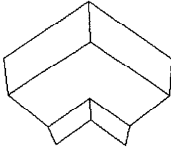
No	入力線画 $(\theta_x, \theta_y, M_z)$	右側 $(0, 25, 1.2)$	左側 $(0, -25, 1.2)$	上側 $(60, 0, 1.2)$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

図5 透視投影効果を含まない線画への実験結果
Fig. 5 Extracted shapes from line drawings.

も近い値を選択する。

上記処理を繰り返し、すべての面の集合 S の要素がすべて s から s' となった状態、あるいは、頂点の奥行き値に変化がなくなった状態を処理の終了としている。

3.5 結果の確認方法

自動推定した3次元形状を確認するために、形状確

認用インタフェースを利用する。この形状確認用インタフェースでは得られた形状の中心に原点を置き、 x 軸、 y 軸、 z 軸にそれぞれ透視投影効果を導入した回転表示を行っている。なお、 z 軸の奥行き表示倍率はインタラクティブに変化させている。図3の回転表示例は、実験結果で得られた形状へ上記表示倍率を2倍

に設定し、回転をかけた結果である。

4. 実験結果と考察

図5に透視投影効果の含まれていない線画から、3次元形状を推定した結果を示す。図5の中で θ_x , θ_y はそれぞれ x 軸, y 軸を中心に形状を回転させた角度を示し、 M_z は z 軸方向の表示倍率を示す。また、入力画像に付いている丸は形状推定の着目点であり、コンピュータが指定した最優先点の1つである。

図5の入力線画は透視投影効果が含まれていないため、消失点を利用した線画解釈方式が不可能な線画である。図5-3と図5-4は大小2つの立方体から構成されていると解釈することもできるが、ここでは入力

線画が多面体で構成される1つの物体であると仮定する。すると、既存の線画解釈方式では図5の各入力線画に対し図6のように、着目点が手前と奥に位置する2種類のラベル付けが可能である。また、ラベル付け結果を立体形状として表現する多面体は、立体形状の奥行きの違いや線画面からの傾きの違いにより無限に存在し、視覚的印象に合わない立体形状も実現可能である。このような線画に対し、本方式による図5の結果は人の知覚する形状印象を表現できている。なお、図5-3、図5-4は式(3)の μ の値が4未満であるため、頂点の位置誤差に敏感に反応し平面の方程式を求めにくい線画である。

また、図7に平面だけでは構成できない形状に対する実験結果を示す。既存の線画解釈方式では図7-1、図7-2ともに形状を特定できない例である。図7-1は線画にラベル付けが可能だが、線画解釈の方程式群を満足させる立体構造が存在しない線画である。一方、図7-2はラベル付けを行うと矛盾が生じる線画である。例として、図7-2にラベル付けを行った例を図8に示す。図8では頂点 v で頂点辞書と矛盾を生じている。

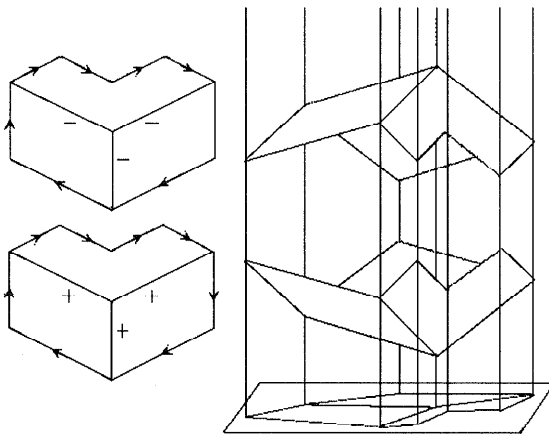


図6 既存の線画解釈方式による立体構造推定例

Fig. 6 The three-dimensional shapes by the existing line drawing analysis.

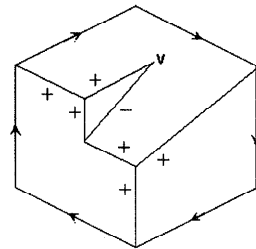


図8 矛盾が生じているラベル付けの例

Fig. 8 An example of impossible labeling.

No	入力線画 (θ_x, θ_y, M_z)	右側 (0, 50, 1.0)	左側 (0, -50, 1.0)	上側 (50, 0, 1.0)
1				
2				

図7 平面では実現できない線画に対する実験結果

Fig. 7 Extracted shapes from irregular line drawings.

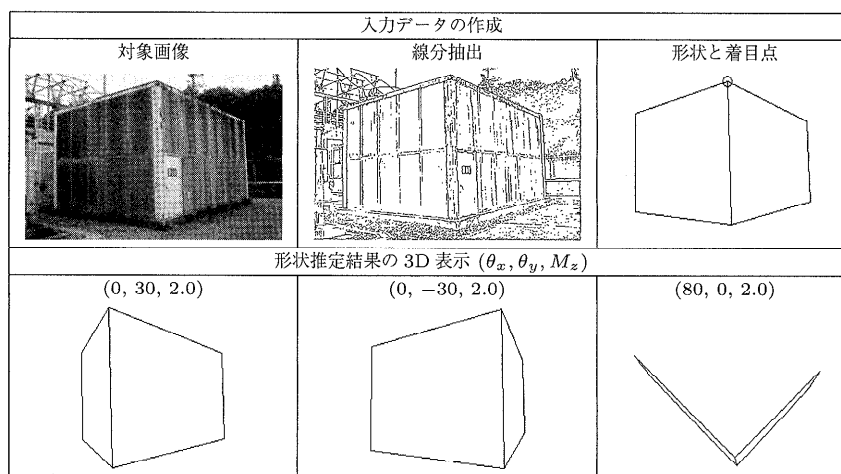


図9 設備写真(関西電力(株)平城変電所3号防音壁付き変圧器の画像: 関西電力提供)に対する実験結果

Fig.9 An extracted shapes from one image.

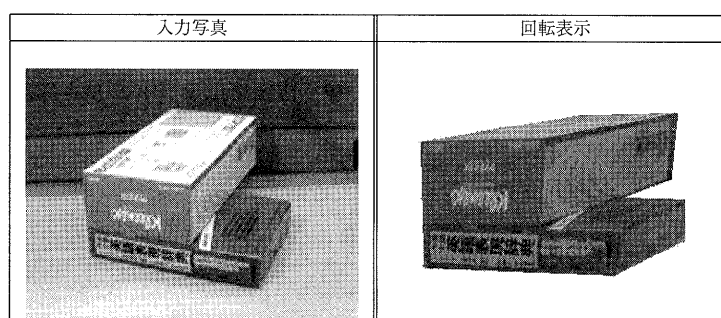


図10 推定結果にテクスチャーマッピングを行った結果

Fig.10 A result of texture mapping.

今回の提案方式では、いずれの線画に対しても視覚的印象に近い形状が得られている。

図9に既存の設備写真を使った実験結果を示す。消失点を利用した形状復元方式では物体形状に関する制約を導入しないかぎり、入力線画の中央が手前側あるいは奥側にあるかを決定することができない。このような図7に対しても視覚的判断に近い結果が得られている。なお、図3で利用した写真から形状を推定し、テクスチャーマッピングを行った結果を図10に示す。

5. おわりに

本稿では古典AIによる線画解釈に、人の視覚特性を組み合わせた物体形状推定方式を提案した。本方式により既存の線画解釈では対応できなかった線画に対しても、人の視覚的印象に近い立体形状が得られることを確認した。

今回の作成システムでは線分を自動抽出した後、解

析すべき主要線分の選択を手手に頼っている。この線分選択を自動化できれば、写真から3次形状を自動的に推定できることになる。そこで現在、線分選択の自動化あるいは半自動化を、領域のセグメンテーション方式を使って検討を行っている。さらに今後、得られた3次元推定形状を利用した写真間の特徴対応付けを検討する予定である。

なお、今回は面の一部分が隠れている形状を検討していない。そのため、面の隠れにより形成される仮想の面と、実際の面を区別することができていない。特に、T字型頂点では面の隠れが発生しやすいため、提案方式ではT字型頂点の利用を可能なかぎり控えている。心理的な実験からもT字型頂点が奥行き錯視を起こしやすいことが分かっており²³⁾、今後T字型頂点の特別な取扱い方法を検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 古田重信：電力設備3次元データ取得手法の研究, *R&D News Kansai*, No.12, pp.28-30 (1997).
- 2) 石原満宏, 吉澤 徹：最近の光表面形状計測技術, *O plus E*, Vol.20, No.11, pp.1251-1258 (1998).
- 3) 三輪浩史, 新保哲也, 山口博義：リアルタイム多眼ステレオシステム, *O plus E*, Vol.20, No.11, pp.1259-1264 (1998).
- 4) 三池秀敏, 古雅和利：パソコンによる動画像処理, 森北出版 (1993).
- 5) Tomasi, C. and Kanade, T.: Shape and motion from image streams under orthography: A factorization method, *Int. J. of Computer Vision*, Vol.9, No.2, pp.137-189 (1992).
- 6) 松山隆司, 浅田尚紀：多重画像の統合による多機能高精度画像計測, コンピュータビジョン：技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, pp.25-36 (1998).
- 7) 杉本晃宏：物体の見え方によらない情報の抽出—幾何学的不変量の画像理解への応用, 情報処理, Vol.37, No.12, pp.1125-1131 (1996).
- 8) Parodi, P. and Piccioli, G.: 3D shape recognition by using vanishing points, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.18, No.2, pp.221-217 (1996).
- 9) 小城浩之, 藤田 順：スケッチ画像からの立体情報抽出技術とその応用, 富士ゼロックステクニカルレポート, No.11 (1990).
- 10) 杉原厚吉：不可能物体の数理, 森北出版 (1993).
- 11) Nishida, H.: A structural approach to representation of curved objects, *Pattern Recognition*, Vol.30, No.1, pp.45-56 (1997).
- 12) 村越一支, 山口秀敏, 倉田 是：線画の立体知覚における注視点と図形提示角度の依存性, 信学論, Vol.J80-D-II, No.2, pp.634-641 (1997).
- 13) 金谷健一：画像理解—3次元認識の数理, 森北出版 (1990).
- 14) Horn, B.K.P.: *Robot vision*, MIT Press (1986).
- 15) Sugihara, K.: Mathematical structures of line drawings of polyhedrons - toward man-machine communication by means of line drawings, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.4, No.5, pp.458-469 (1982).
- 16) Sugihara, K.: A necessary and sufficient condition for a picture to represent a polyhedral scene, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.6, No.5, pp.578-586 (1984).
- 17) Yarbus, A.L.: *Eye movements and vision*, Plenum Press (1967).
- 18) Viviani, P.: Eye movements in visual search: Cognitive, perceptual and motor control aspects, *Eye movements and thier role in visual and cognitive processes*, Elsevier Science Publishers BV (1990).
- 19) Mackworth, N.H. and Bruner, J.S.: How adults and chiladern search and recognize pictures, *Human Develop.*, Vol.13, pp.149-177 (1970).
- 20) Rybak, I., Gusakova, V., Golovan, A. and Podladchikova, L.: A model of attention-guided visual perception and recognition, *Vision research*, Vol.38, pp.2387-2400 (1998).
- 21) Schiller, P.H.: The neural control of visually guided eye movements, *Cognitive neuroscience of attention*, Lawrence Erlbaum Associates (1998).
- 22) 川端信男：線画の奥行解釈過程, 信学論, Vol.J69-D, No.12, pp.1923-1928 (1986).
- 23) Watanabe, T. and Cavanagh, P.: Transparent surfaces defined by implicate X junction, *Vision research*, Vol.33, No.16, pp.2339-2346 (1993).

(平成 10 年 12 月 24 日受付)

(平成 11 年 6 月 3 日採録)

中島 慶人 (正会員)



昭和 38 年生。平成元年東京電機大学大学院修士課程システム工学専攻修了。同年 (財) 電力中央研究所入所。図面認識の研究に従事。平成 11 年度, マサチューセッツ工科大学

CBCLにて画像処理と学習の研究に従事。現在, 電力中央研究所主任研究員。人工知能学会, 電子情報通信学会各会員。