

照明条件および反射係数未知の場合の筒状物体の形状復元*

浅 田 稔† 中 村 恭 之†

従来の明度情報からの形状復元手法では、面の反射係数や照明条件を既知としているものが多い。本論文では、明度情報と輪郭線情報から筒状物体の形状を復元する手法の1つとして、面の反射係数や照明条件（方向と照明光の強さ）の知識を必要としない手法を提案し、実験を通してその有効性を示す。一般に明度情報だけでは、面の反射係数ならびに照明条件の知識なしには、筒状物体の形状を唯一に復元できない。これに対し、輪郭線情報は、筒状物体の形状と画面上の断面形状の間の関係に1つの拘束を与える。これら明度情報と輪郭線情報を統合することにより、筒状物体の断面形状を唯一に決定できる。まず最初に、入力画像を、局所的な明度勾配分布により球面、筒面、平面に分類する。次に、筒状面上の濃度勾配から母線の方向を得て、それを基に画面上の基準座標系を設定する。最大明度母線は、明度解析および、明度と輪郭線情報統合の際の拘束式を与え、これから筒状物体の断面形状を唯一に決定できる。ただし、断面の向きと筒状物体の傾きの間に1自由度残る。本手法を合成画像と実画像に適用し、その有効性を示す。

Cylindrical Shape from Contour and Shading without Knowledge of Lighting Conditions or Surface Albedo*

MINORU ASADA† and TAKAYUKI NAKAMURA†

This paper presents an algorithm for reconstructing the shape of a cylindrical object from contour and shading without knowing the surface albedo of the object or the lighting conditions of the scene. Input image is segmented into spherical, cylindrical, or planar surfaces by analyzing local shading. The cylindrical surface is characterized with a direction of generating lines determined from spatial derivatives in the image. The brightest generating line has strong constraints on both the shading analysis on the cylindrical surface and a simplification of the equation which represents the relation between the contour shape and shading. Although there remains one degree of freedom between the surface normal of the base plane and the slant angle of the generating line, we can uniquely recover the cylindrical shape from this solution. Experimental results for both synthetic and real images are shown.

1. はじめに

明度変化は、画像から形状を知覚するときの強力な情報源である。急激な変化はエッジや輪郭線に相当し、緩やかな変化は濃淡情報に対応する。明度エッジは、表面にテクスチャなどの模様がない限り、面や距離の不連続などの元の3次元世界の幾何学的な構造の変化に対応する。これらの情報を用いたコンピュータビジョンの代表的な成果として、積木の世界の線画解釈が挙げられる^{1),2)}。これらの手法では、主に定性的

な形状復元が行われてきた。Sugihara³⁾は、濃淡やテクスチャ情報を組み合わせた定量的な形状復元手法を提案している。積木の世界以外では、面の境界や滑らかな面の場合の視点に依存した輪郭線などによる定性的な記述が得られているにすぎない^{4),5)}。面の法線ベクトルなどの定量的記述を得るためには、3次元形状に強い制限を設けている例が多い⁶⁾。

濃淡情報からの形状復元^{7),8)}は、画像生成過程における幾何光学的拘束を利用して面の属性を獲得する手法である。輪郭線情報と明度情報を用いた最初の定量的形状復元は、Horn¹⁰⁾によって開発された。彼は、反射率地図を用いて、勾配空間における積木の面の勾配を推定した。Ikeuchi and Horn¹¹⁾は、滑らかな曲面が視線と接することによって生じる境界線上の法線方向が一意に決定できることから、これを境界条件として、弛緩法を用いて、形状を復元した。これらの手法では、光源方向、照明光の強さなどの照明条件と面の

† 大阪大学工学部電子制御機械工学科
Department of Mechanical Engineering for Computer-Controlled Machinery, Faculty of Engineering, Osaka University

☆ 本研究の基本アルゴリズムは第一著者が、米国メリーランド大学に滞在中に考案したものであり、情報処理学会コンピュータビジョン研究会に発表済みである。またこの発表に対して平成元年度の研究奨励賞を受賞している。

反射係数が既知であることが前提条件となっている。

これまでの形状復元手法は、主に平面からなる物体(積木の世界)か、球面などの平面に展開できない曲面を扱ってきた。これらのクラスの物体の間に、平面に展開できる曲面のクラスが存在する。このクラスの最も代表的な物体は、円筒などの筒状の物体で、日常生活でよく見られる。筒状物体のモデルは、Binford¹²⁾が、一般円筒モデルとして多くの種類の物体の体積表現として提案して以来、よく利用されている。一般円筒モデルに関しては、距離データ^{13), 14)}や、多数の照明光を用いた拡張照度差ステレオ法¹⁵⁾のデータを利用した手法、影情報、輪郭線情報を用いて幾何学的属性を調べた研究¹⁶⁾などがあるが、単眼視画像から筒状物体の形状を復元する問題を扱っている例は少ない。

Asada and Tsuji^{17), 18)}は、動画像解析の観点から、筒状物体の形状復元手法を2つ提案している。1つは、濃淡情報を解析して筒状面の法線方向を推定する手法で、これを用いると連続画面間での断面の対応が容易になる。照明条件既知のもとで、拡張反射率地図法¹⁷⁾を用いて、物体形状および画面間の運動を推定した。もう1つの手法は、画面間での断面形状の変化を解析する方法で、断面が筒状面に垂直である場合、2画面から3次元幾何を復元できる¹⁸⁾。最初の手法は照明条件が既知であること、2番目では、断面と筒状面が垂直であることが、形状復元のための条件であった。

本論文では、照明条件および面の反射係数未知のもとで、画面上の断面形状および濃淡情報を用いて、筒状物体の形状を復元する方法について述べる。明度の局所的解析⁹⁾から、画像を平面、筒面、球面に分割し、筒面を生成する母線の画面上での方向を推定する。最も明るい母線は、濃淡情報からの形状復元手法^{11), 10)}で、重要な役割を果たした特異点や境界線のように、筒面上の明度解析や、断面の形状と濃淡情報の関係に対する拘束を与える。

これらの拘束条件を利用することにより、以下の事柄が導きだせる。

(1) 実際の照明条件(照明方向および照明光の強さ)を正規化された照明条件に変換できる。正規化照明条件では、照明方向は最も明るい母線に対する法線に平行で、照明光の強さと面の反射係数の積は、その明るさに対応する。

(2) 最大明度母線の明度と円筒面上の他の点の明度比は、(1)から、それらの点に対する法線ベクトルの

なす角度の余弦を与える。

(3) 断面の法線ベクトル $(p_b, q_b, 1)$ と、母線が画像面となる傾斜角 σ の3つの未知数が存在する。拘束条件からは、これらを唯一には決定できないが、これらの間に存在する2つの拘束式を与え、これらから唯一に筒状物体の断面形状を決定できる。

以下、2章では、本手法の前提条件を述べ、3章で、明度情報による拘束を導く。次に、4章では輪郭線情報からの拘束式の導出および明度拘束との統合による形状復元手法について述べる。最後に、合成画像、実画像を用いて、本手法の有効性を示す。

2. 仮 定

本論文で述べる手法は、以下の条件を仮定する。

(1) 直交射影、無限遠方光源を仮定する。

これは、濃淡情報と物体形状との関係の解析を簡単にするもので、従来から利用されてきた。

(2) 筒状物体は、筒面と平面をもつ。

ここで、筒面は、平面上の閉曲線(断面形状を表す)を通過する平行直線(母線)群によって覆われた面と定義する。断面と筒面は垂直である必要はない。すなわち、筒状物体が任意の方向の平面で切断されている。

(3) 面は一樣乱反射面であり、その反射係数は一定(テクスチャを含まない)。筒面と断面の反射係数は同じである必要はない。

3. 明 度 解 析

3.1 局所明度解析

Pentland⁹⁾は、照明条件未知のもとでの局所的な明度解析手法を提案した。物体面が局所的には球面で近似できるという仮定のもとに、面の法線方向を推定した。原理的には、画面上の各点に対して球面近似された場合の球の中心と半径の3つの未知数に加え、反射係数と光源の強さの積、および照明方向の3つの未知数、合計6つの未知数に対し、明度 I 、その1次微分値 (I_x, I_y) 、2次微分値 (I_{xx}, I_{xy}, I_{yy}) の6つの式を用いて、法線方向を求めた。またこれに先立ち、明度の2次微分値の符号が面の曲率の符号と一致することに着目し、方向別の2次微分フィルターを利用して、物体面を平面(いずれの方向の2次微分値も0)、筒面(1つの方向のみ0、あとは非0)、球面(いずれの方向も非0)などに分類する手法を開発した。

ここでは、画像の分割および、平面と筒面の発見の

ために Pentland の方法を用いた。

3.2 筒面上の明度

ここでは、図1に示す2つの座標系、すなわち観測者中心の座標系 W_v と筒状物体中心の座標系 W_c を用いて筒面上の明度の性質を述べる。一般性を失うことなく、また簡単のために、観測者中心の座標系 W_v を画面上の母線方向が X 軸に平行に（3次元空間では実際には画像面と母線の間に傾斜角 σ が存在する）、また Z 軸が視軸に一致するように設定する。また、筒状物体中心の座標系は、 X 軸が母線に平行で、 Y 軸が観測者中心の座標系 W_v の Y 軸に一致する。（なお、以下では、添え字 c, v はそれぞれ W_v, W_c 座標系で定義された変数であることを示す。）

まず最初に、筒状物体中心の座標系 W_c で、筒面上の明度について考える。一様乱反射面を仮定しているので、 W_c の Z_c 方向から観測される明度 E_c （以下、 W_c で観測される明度と、略記）は、 W_c で観測される明度 E_c （同様）に等しい。光源方向 $L = (p_{sc}, q_{sc}, 1)$ 、 W_c における筒面上の法線 $S_c = (p_c, q_c, 1)$ を用いて、 E_c は次式で与えられる

$$E_c = \rho I \frac{\langle L, S_c \rangle}{|L||S_c|} = \rho I \frac{p_{sc}p_c + q_{sc}q_c + 1}{\sqrt{p_{sc}^2 + q_{sc}^2 + 1}\sqrt{p_c^2 + q_c^2 + 1}} \quad (1)$$

ここで ρ は、面の反射係数、 I は、照明光の強さを表す。これらのパラメータは、 W_c で表現されているので、筒面上の法線方向は、1つのパラメータ θ_c のみを用いて、図2のように表せる。

すなわち、 $p_c = 0, q_c = \tan \theta_c$ 。それゆえ(1)式は、

$$E_c = \rho I \frac{\tan \lambda \tan \theta_c + 1}{\sqrt{\tan^2 \lambda + p_{sc}^2 + 1}\sqrt{\tan^2 \theta_c + 1}} \quad (2)$$

ここで、 $\tan \lambda = q_{sc}$ 。

最大明度母線に対する法線方向は、筒面上の他の法

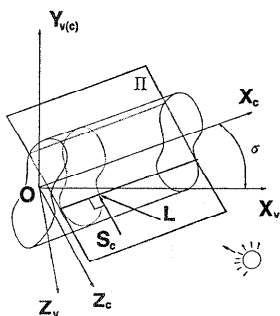


図1 筒状物体に対する2つの座標系と光源
Fig. 1 Two coordinate systems for a cylindrical object and light source.

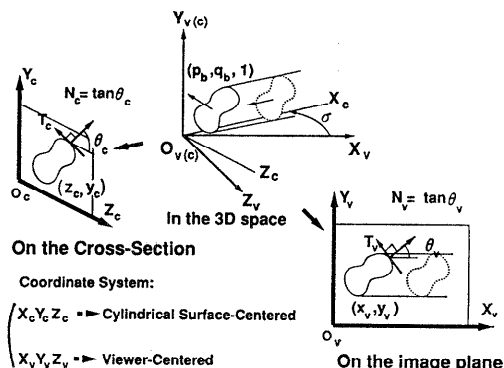


図2 2つの座標系間の幾何学的関係

Fig. 2 Geometrical relationships of cylindrical shape between the two coordinate systems.

線方向に比べ、光源方向 L に最も近い。結果として、その法線方向 S_c は、 $(0, q_{sc}, 1)$ と表せる。最大明度母線の明度 $\rho I'$ は、 $\rho I' = \rho I \cos \phi$ で表せる。ここで、 ϕ は、 L と S_c のなす角で、結局、

$$I' = I \frac{q_{sc}^2 + 1}{\sqrt{p_{sc}^2 + q_{sc}^2 + 1}\sqrt{q_{sc}^2 + 1}}$$

上式を整理して書き換えると、

$$I = I' \frac{\sqrt{\tan^2 \lambda + p_{sc}^2 + 1}}{\sqrt{\tan^2 \lambda + 1}}$$

これを(2)式に代入すると、

$$E_c = \rho I' \frac{\tan \lambda \tan \theta_c + 1}{\sqrt{\tan^2 \lambda + 1}\sqrt{\tan^2 \theta_c + 1}}$$

$$-\frac{1}{2}\pi < \lambda, \theta_c < \frac{1}{2}\pi \text{ より、}$$

$$E_c = \rho I' \cos(\theta_c - \lambda) = E_v \quad (3)$$

上式は筒面上の明度について以下の重要な事実を明らかにする。

(1) 実際の照明条件（照明光の強さ I と光源方向 $(p_{sc}, q_{sc}, 1)$ ）が未知でも、照明光の強さ I' 、光源方向 $(0, q_{sc}, 1)$ の正規化照明条件を想定できる。

(2) 最大明度 $E_{\max} = \rho I'$ であり、この時、 $\theta_c = \lambda$ 。

(3) 最大明度に対する筒面上の各点の明度比は、その点の法線方向 (θ_c) と、正規化光源方向 (λ) とのなす角の余弦を与える。

(4) 筒面上の明度分布は、筒状物体の画像面に対する傾斜角 σ に対する情報を何ら与えない。

以下では、(3)式を明度拘束式と呼ぶ。

3.3 濃淡情報からの筒状物体の形状復元

(3)式を用いて、観測者中心の座標系 W_v での筒状物体の形状復元について考える。未知パラメータは、

母線の傾斜角 σ , および筒面上の各点の法線パラメータ θ_c である. 以下の議論では光源方向 $(p_s, q_s, 1)$ は, W_v で定義されているものとする.

W_v における光源方向 $(p_s, q_s, 1)$ は, W_c での光源方向 $(p_{sc}, q_{sc}, 1)$ を Y 軸回りに角度 σ だけ回転させることにより得られる.

(1) 光源方向 $(p_s, q_s, 1)$, および, 反射係数と照明光強度の積 ρI が既知の時, 反射率地図を構成でき, 物体の形状が唯一に決定できる. (詳細は文献 17) を参照.)

(2) 反射係数と照明光強度の積 ρI が未知だが, 光源方向 $(p_s, q_s, 1)$ 既知のとき, 母線の傾斜角 σ は決定できない. σ と筒状物体の形状パラメータ θ_c の間に 1 自由度残る. 断面積や母線長の多視点での変化が観測できれば, ρI を決定でき, 結果として, 唯一に形状を決定できる. (詳細は文献 17) を参照.)

(3) 光源方向 $(p_s, q_s, 1)$, および, 反射係数と照明光強度の積 ρI が共に未知の時, 濃淡情報からは, 形状 θ_c や傾斜角 σ に関してなんの情報も得られない. 唯一の情報, 筒面上の各点の法線方向と正規化光源方向のなす角度の余弦がわかることである.

これらより, 濃淡情報だけでは形状復元は困難であり, 輪郭線などの他の拘束を必要とすることがわかる.

4. 輪郭線と明度の情報からの筒状物体の形状復元

4.1 輪郭線情報からの筒状物体の形状復元

筒状物体の形状は, その垂直断面の形状によって特徴づけられる. なぜなら, 垂直断面の輪郭線上の点の法線は, 筒面上の法線を表すからである (図 2 参照). 換言すれば, 筒面上の各点の法線方向を決定することは, 筒状物体の垂直断面の形状を復元することにほかならない.

そこで, 画面上の断面 (垂直とは限らず, 任意) の形状から垂直断面の形状を推定することを考える. 未知数として断面の法線 $(p_v, q_v, 1)$ と母線の傾斜角 σ がある. 垂直断面の形状は断面形状を母線に垂直な平面 (Y_c-Z_c 平面に平行な平面) に投影することによって得られる (図 2 参照).

定理 1: 垂直断面の輪郭線上の各点の座標 (x_c, y_c) は, 次式で与えられる.

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-p_v x_v - q_v y_v) \cos \sigma + x_v \sin \sigma \\ y_v \end{bmatrix}, \quad (4)$$

ここで, (x_v, y_v) は, 断面の画像面上での座標を表す.

証明: 直交射影を仮定しているので, 観測者中心の座標系 W_v の原点が断面上にあるとしても一般性を失わない. そうすると, W_v での断面の座標は $(x_v, y_v, -p_v x_v - q_v y_v)$ として与えられる. これらの点を Y 軸回りに角度 $(\pi/2 - \sigma)$ 回転させると (4) 式が得られ, 垂直断面形状を得る [証明終り].

定理 2: 画面上の断面の輪郭線上の各点の法線と垂直断面の輪郭線上の各点の法線との関係は次式で与えられる.

$$N_c = -N_v \alpha + \beta, \quad (5)$$

ここで, $\alpha = p_v \cos \sigma - \sin \sigma$, $\beta = q_v \cos \sigma$, $N_c = \tan \theta_c$ (垂直断面の形状パラメータ), $N_v = \tan \theta_v$ (断面の画像面上での形状パラメータ) を表す (図 2 参照).

証明: 形状パラメータ N_c , N_v は, それぞれの位置での接線方向 T_c , T_v に垂直なので (図 2 参照), 画像面上と垂直断面上でそれぞれ次式を得る.

$$\begin{aligned} N_v &= -\frac{1}{T_v} = -\frac{\Delta x_v}{\Delta y_v}, \\ N_c &= -\frac{1}{T_c} = -\frac{\Delta x_c}{\Delta y_c} \\ &= -\frac{(-p_v \Delta x_v - q_v \Delta y_v) \cos \sigma + \Delta x_v \sin \sigma}{\Delta y_v}. \end{aligned} \quad (6)$$

これらより, (5) 式を得る [証明終り].

画像面上の形状パラメータ N_v から, 実際の筒状物体の垂直断面の形状パラメータ N_c を決定するためには, 断面の法線方向 $(p_v, q_v, 1)$, および母線方向 σ の 3 つの未知数を求める必要がある. (5) 式のことを **輪郭線拘束式** と呼ぶ.

4.2 濃淡情報と輪郭線情報の統合利用

筒状物体の形状を決定するためには, 明度拘束式 (式 (3)) と輪郭線拘束式 (式 (5)) を統合利用しなければならない. 式 (3) から次式を得る.

$$\cos(\theta_c - \lambda) = \frac{E_i}{E_{\max}}. \quad (7)$$

式 (5) から,

$$\tan \theta_c = -N_v \alpha + \beta. \quad (8)$$

これらを統合するために, $N_c (= \tan \theta_c)$ を原点まわりに角度 $-\lambda$ だけ回転させると,

$$\tan(\theta_c - \lambda) = \frac{\sin \lambda + (N_v \alpha - \beta) \cos \lambda}{\cos \lambda - (N_v \alpha - \beta) \sin \lambda} \quad (9)$$

式 (7) と (9) から,

$$\begin{aligned} \sin \lambda + (N_v \alpha - \beta) \cos \lambda \\ = -R_i (\cos \lambda - (N_v \alpha - \beta) \sin \lambda), \end{aligned} \quad (10)$$

ここで,

$$R_i = \pm \sqrt{\frac{E_{\max}^2 - E_i^2}{E_i^2}}.$$

R_i の符号は $(\theta_c - \lambda)$ と対応. よって1点の観測からは R_i の値は1つしか取り得ない.

式(10)を $\cos \lambda (\neq 0)$ でわると,

$$\tan \lambda + (N_v \alpha - \beta) = -R_i(1 - (N_v \alpha - \beta) \tan \lambda). \quad (11)$$

式(11)は, 4つの未知数 $p_b, q_b, \sigma, \lambda$ に関する非線形方程式であり, これを解析的に解くのは困難にみえる. しかしながら, 最大明度母線の拘束を利用することにより, 以下を得る.

定理 3: 式(11)は, 以下のような2次曲線を表す.

$$h_i(\alpha, \beta) = A_i \alpha^2 + B_i \alpha \beta + C_i \beta^2 + D_i \alpha + E_i = 0, \quad (12)$$

ここで,

$$\begin{aligned} A_i &= R_i N_v N_v^{br} & B_i &= -R_i(N_v + N_v^{br}) \\ C_i &= -R_i & D_i &= -N_v N_v^{br} \end{aligned}$$

$$R_i = \pm \sqrt{\left(\frac{E_{\max}}{E_i}\right)^2 - 1}.$$

(ただし, R_i の符号は $(\theta_c - \lambda)$ の符号に対応.)

証明: 最大明度点では, $R_i = 0$ なので,

$$\tan \lambda = -N_v^{br} \alpha + \beta, \quad (13)$$

ここで, N_v^{br} は最大明度点における断面上の形状パラメータ, 式(13)を式(11)に代入すると式(12)が得られる. 式(12)を明度と輪郭線による拘束式と呼ぶ.

4.3 形状パラメータの獲得

(α, β) を決定するためには, 最大明度母線を除く最低2箇所の観測点が必要である. そのような2点は式(12)の形の2つの2次曲線を生みだし, それらの交点は通常, 複数である. しかしながら, 理論的にはそれらの交点はただ1つである(証明は付録参照). よって, 理論的には唯一に (α, β) を決定できる.

ここでは, 非線形最小自乗法を用いて, 多数の観測点から形状パラメータ (α, β) を求める. すなわち, 求めるべきパラメータ (α, β) 空間で, 各点に対する式(12)の2次曲線までの距離の総和を最小にする点を解 (α, β) とする. これは, 以下の評価関数 S を最小化することと対応する.

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \{d_i(\alpha, \beta)\}^2,$$

$$\text{ここで } \{d_i(\alpha, \beta)\}^2 = \frac{|h_i(\alpha, \beta)|^2}{\left(\frac{\partial h_i}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_i}{\partial \beta}\right)^2}.$$

上式の最小化は, 以下のオイラー方程式を解くことと等価である.

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0$$

この連立方程式を解くことにより解 (α, β) が求まる.

5. 実験結果

合成画像と実画像に適用した例を示す. 合成画像の利用により定量的評価が可能になる.

表1は, さまざまなパラメータ(母線方向 σ , 母線回りの回転角 ω , 断面方向 τ)をもつ円筒の合成画像に対する結果を示している. 誤差の評価関数 $S(\alpha, \beta)$ の値は, 観測点の数で正規化している.

図3, 4, 5は, 表1の第1, 3, 7番目の段の結果に対応する. それぞれ, (a)合成原画像(左上: 256×240 画素, 8ビット/画素), (b)パラメータ空間 (α, β) の2次曲線群(右上)と解(⊗で表示), (c)実際の形状(左下), (d)推定断面形状(右下)を表している. これらは, 多くの実験結果から比較的良好な結果, 悪い結果, 平均的な結果を代表している. 実際の形状と推定された形状との類似性が本手法の有効性を示している.

表1 合成画像の実験結果
Table 1 Experimental results for synthesized images.

$\sigma(^{\circ})$	$\omega(^{\circ})$	$\tau(^{\circ})$	Correct		Estimated		Relative Errors (%)		$S(\alpha, \beta)/n$	Errors ($^{\circ}$) $ N_v^{br} - \hat{N}_v^{br} $
			α	β	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	$\frac{ \alpha - \hat{\alpha} }{\alpha} \times 100$	$\frac{ \beta - \hat{\beta} }{\beta} \times 100$		
30	0	70	-2.0	-0.63	-1.97	-0.59	1.5	6.3	7.4×10^{-6}	0.4
	30	70	-2.92	-0.80	-2.70	-0.79	7.5	1.25	1.3×10^{-5}	0.5
	60	70	-4.40	-0.69	-4.03	-0.52	8.4	24.6	2.3×10^{-6}	2.6
	0	60	-2.0	-1.0	-1.94	-0.98	3.0	2.0	2.5×10^{-5}	0.4
	0	50	-2.0	-1.45	-1.81	-1.31	9.5	9.7	1.4×10^{-5}	0.8
45	0	70	-1.41	-0.36	-1.36	-0.30	3.5	16.7	1.0×10^{-5}	1.1
	30	70	-1.83	-0.42	-1.60	-0.40	12.6	4.8	2.3×10^{-5}	0.8
	60	70	-2.07	-0.27	-1.86	-0.28	10.1	3.7	7.0×10^{-6}	0.9
	0	60	-1.41	-0.58	-1.35	-0.49	4.3	15.5	5.1×10^{-6}	1.4
	0	50	-1.41	-0.84	-1.36	-0.77	3.5	8.3	1.9×10^{-7}	0.8

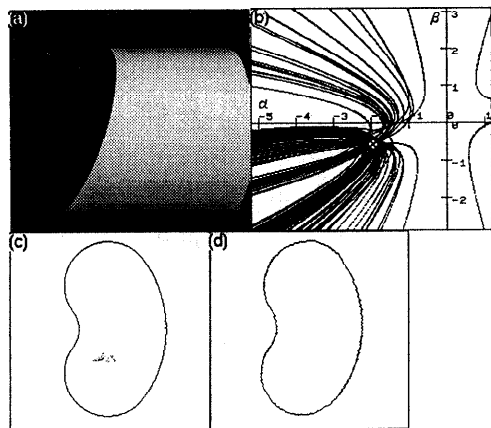


図 3 合成画像に対する結果 I (良好な結果)
Fig. 3 The results for synthesized images
(the good result).

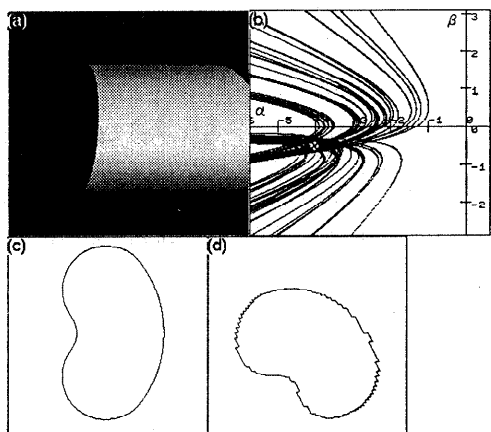


図 4 合成画像に対する結果 II (悪い結果)
Fig. 4 The results for synthesized images
(the bad result).

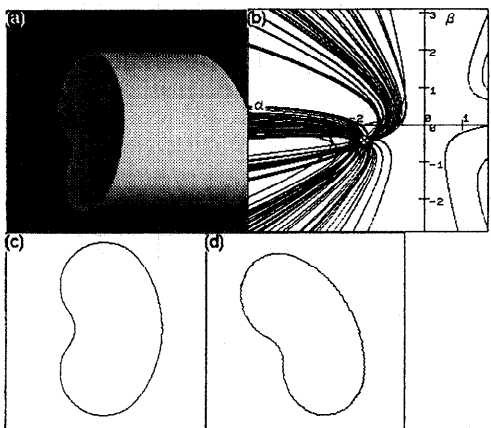


図 5 合成画像に対する結果 III (平均的な結果)
Fig. 5 The results for synthesized images
(the moderate result).

表 2 実画像の実験結果

Table 2 Experimental results for real images.

Object	Estimated		$S(\alpha, \beta)/n$
	$\hat{\alpha}$	$\hat{\beta}$	
right cylinder	-1.22	-0.05	9.3×10^{-6}
slant cylinder	-1.61	-0.32	3.3×10^{-6}
slant banana	-1.92	-0.93	1.3×10^{-6}

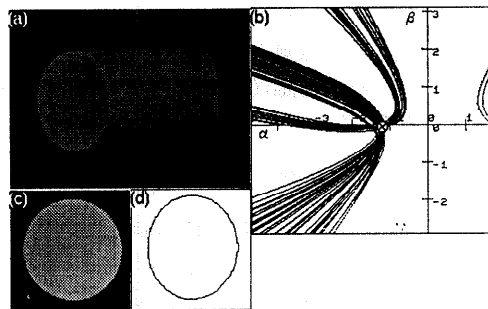


図 6 実画像に対する結果 I (垂直断面を持つ直円筒)
Fig. 6 The right cylinder with perpendicularly
cut section.

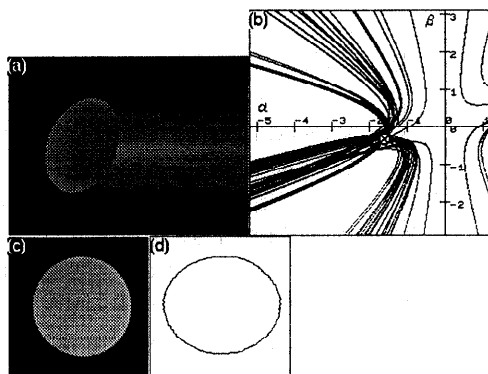


図 7 実画像に対する結果 II (斜めの断面を持つ円筒)
Fig. 7 The right cylinder with diagonally cut
section.

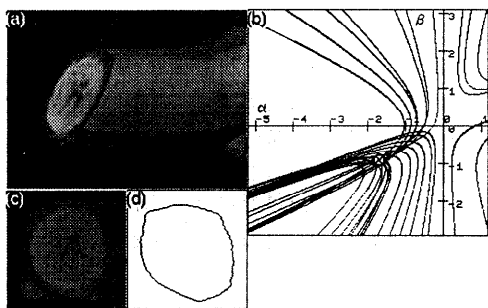


図 8 実画像に対する結果 III (斜めの断面を持つバナナ)
(底面輪郭線は対話的に抽出)
Fig. 8 The banana with diagonally cut section
(the base contour was iteratively extracted).

表 2, 図 6, 7, 8 は, 実画像に対する実験結果を示しており, それぞれ, 直円筒, 斜めに切断された円筒, バナナの場合に相当する。

図 6 では, 推定形状と実際の形状に若干の差がある。これは, 主に, 量子化誤差と観測された明度にオフセットを生じさせる周囲光の影響と考えられる。これらに付け加え, 図 7 では, 鏡面反射成分も含まれており, 正規化光源方向が間違っ推定されている。結果的に推定形状は実際よりも若干引き延ばされている。バナナの場合も鏡面反射成分が含まれ, 推定形状は少し歪んでいる。

6. 検討および結論

照明条件や面の反射係数に関する知識を用いずに, 底面の輪郭線と筒面の明度値から, 筒状物体の形状を復元する手法について述べた。最大明度母線は, 明度拘束式や, 明度と輪郭線による拘束式の導出過程で大きな役割を果たしている。

前者では, 実際の光源方向が, 最大明度母線の方に平行な光源方向を持ち, 照明光の強さと反射係数の積が最大明度に対応する正規化光源に変換される。後者では, 4 つの未知数に対する非線形方程式が, 最大明度にたいする拘束を利用することにより, 2 つのパラメータの 2 次曲線に帰着される。

これらのことは, 本手法が最大明度に対する法線ベクトルの推定値に大きく依存することを示している。もし, この方向が最初に誤って推定されると, 他の観測点に対する 2 次曲線が正しい位置からすべてシフトし, それゆえ, 誤差の評価関数値が小さくても誤った推定を行うおそれがある。表 1 において, $\sigma=30^\circ$, $\omega=60^\circ$, $\gamma=70^\circ$ の実験例では, 誤差の評価関数値が 2.3×10^{-6} と小さいが, 最大明度に対する法線方向の推定値の誤差が 2.6° と大きいため, 最終的にパラメータ α , β に関する誤差もそれぞれ 8.4%, 24.6% と大きくなっている。

当然のことながら, 仮定に反する鏡面反射成分や周囲光の影響は, 実画像の結果に見られたように大きな誤差を生じさせる。

解 (α, β) は, 式 (4) から唯一に垂直断面形状を決定できるが, パラメータ p_b, q_b, σ の間には, 1 自由度が残されている。

図 9 (a), (b), (c) は, 同一画像にたいするさまざまな母線の奥行き方向の傾斜角 $\left(\sigma = \frac{\pi}{4}, 0, -\frac{\pi}{4}\right)$; それゆえ, それぞれ $p_b = -1, -\sqrt{2}, -3$ の解釈が可能

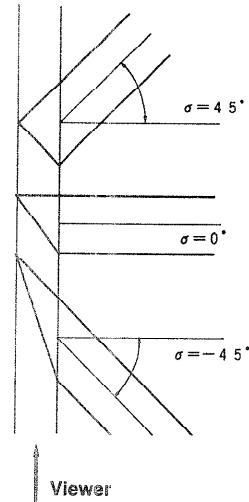


図 9 姿勢の解釈

Fig. 9 The possible interpretations of the slant angle.

であることを示している。

これからの課題として, 1 つは, 明度の絶対値に左右されない明度の定性的な性質を利用する方法, もう 1 つは姿勢や断面の方向を唯一に決定するために, 両眼立体視や運動情報を利用する手法が考えられる。

参 考 文 献

- 1) Mackworth, A.K.: Interpreting Pictures of Polyhedral Scenes, *Artif. Intell.*, Vol. 4, pp. 121-137 (1973).
- 2) Huffman, D.A.: A Duality Concept for the Analysis of Polyhedral Scenes, *Machine Intelligence*, Elcock, E.W. and Michie, D. eds., Ellis Horwood, Chichester, pp. 279-311 (1977).
- 3) Sugihara, K.: An Algebraic Approach to Shape-from Image Problems, *Artif. Intell.*, Vol. 23, pp. 59-95 (1984).
- 4) Barrow, H.G. and Tenebaum, J.M.: Interpreting Line Drawings as Three-Dimensional Surfaces, *Artif. Intell.*, Vol. 17, pp. 249-261 (1981).
- 5) Marr, D.: Analysis of Occluding Contour, *Philosophical Trans. of the Royal Society of London B*, Vol. 275, pp. 483-524 (1977).
- 6) Brady, M. and Yuille, A.: An Extremum Principle for Shape from Contour, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-6, pp. 288-301 (1984).
- 7) Horn, B.K.P.: Obtaining Shape from Shading Information, Chapter 4 in *The Psychology of Computer Vision*, Winston, P.H. ed., pp. 115-155, McGraw-Hill Book Co., New York

- (1975).
- 8) Woodham, R. J.: A Cooperative Algorithm for Determining Surface Orientation from a Single View, *Proc. 5th IJCAI*, pp. 635-641 (1977).
 - 9) Pentland, A. P.: Local Shading Analysis, *IEEE Trans. PAMI*, Vol. PAMI-6, pp. 170-187 (1984).
 - 10) Horn, B. K. P.: Understanding Image Intensities, *Artif. Intell.*, Vol. 8, pp. 201-231 (1977).
 - 11) Ikeuchi, K. and Horn, B. K. P.: Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries, *Artif. Intell.*, Vol. 17, pp. 141-184 (1981).
 - 12) Binford, T. O.: Visual Perception by Computer, *IEEE Conference on Systems and Controls*, Miami, FL (Dec. 1971).
 - 13) Nevatia, R. and Binford, T. O.: Description and Recognition of Complex Curved Objects, *Artif. Intell.*, Vol. 8, pp. 77-98 (1977).
 - 14) Rao, K. and Nevatia, R.: Generalized Cone Description from Sparse 3-d Data, *Proc. CVPR '86*, pp. 256-263 (1986).
 - 15) Nayar, S. K., Ikeuchi, K. and Kanade, T.: Determining Shape and Reflectance of Lambertian, Specular, and Hybrid Surfaces Using Extended Sources, *Proc. of IEEE Int. Workshop on Industrial Applications of Machine Intelligence and Vision*, pp. 169-175 (1989).
 - 16) Shafer, S. A.: Shadow Geometry and Occluding Contours of Generalized Cylinders, Tech. Report CS-83-131, Carnegie-Mellon University (May 1983).
 - 17) Asada, M. and Tsuji, S.: Inferring Motion of Cylindrical Object from Shading, *Proc. CVPR '83*, pp. 240-245 (1983).
 - 18) Asada, M. and Tsuji, S.: Inferring Motion of Cylindrical Object from Shape Information, *Proc. 8th IJCAI*, pp. 1032-1034 (1983).
 - 19) Brooks, M. J. and Horn, B. K. P.: Shape and Source from Shading, *Proc. 9th IJCAI*, pp. 932-936 (1985).

付 録

定理: 式(12)で表される2次曲線同士は1点でしか交わらない。

証明: これらの2つの2次曲線を以下のように与えたとする。

$$f_i(\alpha, \beta) = A_i\alpha^2 + B_i\alpha\beta + C_i\beta^2 + D_i\alpha + C_i = 0, \quad (i=1, 2), \quad (\text{A.1})$$

ここで、

$$A_i = R_i \tan \theta_i \tan \lambda$$

$$B_i = -R_i(\tan \theta_i + \tan \lambda)$$

$$C_i = R_i$$

$$D_i = -\tan \theta_i + \tan \lambda$$

$$R_i = \pm \sqrt{\left(\frac{E_{\max}}{E_i}\right)^2 - 1}.$$

(ただし符号は $(\theta_i - \lambda)$ の符号に対応.)

f_1 から、

$$\beta^2 = -\frac{A_1}{C_1}\alpha^2 - \frac{B_1}{C_1}\alpha\beta - \frac{D_1}{C_1}\alpha - 1, \quad (\text{A.2})$$

式(A.2)を f_2 に代入して、

$$A_2\alpha^2 + B_2\alpha\beta + C_2\left(-\frac{A_1}{C_1}\alpha^2 - \frac{B_1}{C_1}\alpha\beta - \frac{D_1}{C_1}\alpha - 1\right) + D_2\alpha + C_2 = 0. \quad (\text{A.3})$$

式(A.3)を整理して、

$$\left(A_2 - \frac{C_2A_1}{C_1}\right)\alpha^2 + \left(B_2 - \frac{C_2B_1}{C_1}\right)\alpha\beta + \left(D_2 - \frac{C_2D_1}{C_1}\right)\alpha + (E_2 - C_2) = 0. \quad (\text{A.4})$$

$\alpha \neq 0$ より、

$$\beta = \frac{A_1C_2 - A_2C_1}{B_2C_1 - B_1C_2}\alpha + \frac{C_2D_1 - C_1D_2}{B_2C_1 - B_1C_2}. \quad (\text{A.5})$$

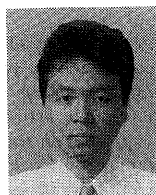
式(A.5)を f_1 に代入すると、 α に関する2次方程式が得られ、その2次の係数 G は、

$$G = \frac{1}{(B_2C_1 - B_1C_2)^2} \{A_1(B_2C_1 - B_1C_2)^2 + B_1(A_1C_2 - A_2C_1)(B_2C_1 - B_1C_2) + C_1(A_1C_2 - A_2C_1)^2\}$$

G の分子は、整理すると零となり、結局 α に関する2次方程式は1次の方程式に帰着される。このことは、式(A.1)で表される2つの異なる2次曲線 f_1, f_2 は、高々1点でしか交わらないことを示している。

(平成4年10月6日受付)

(平成5年3月11日採録)



浅田 稔 (正会員)

昭和28年生。昭和52年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。昭和57年同大学院基礎工学研究科後期課程修了。同年同大学基礎工学部助手。

昭和63年同大学工学部講師。平成元年度同大学助教授となり現在に至る。この間昭和61年より1年間米国メリーランド大学自動化研究センタにて客員研究員。コンピュータビジョンの研究に従事。人工知能、ロボティクスに興味を持つ。本会平成元年度研究賞。電子情報通信学会、日本ロボット学会、IEEE Computer Society 各会員。



中村 恭之

平成2年大阪大学工学部機械卒業。平成4年同大学院工学研究科電子制御機械工学専攻修士課程修了。現在、同博士課程在学中。濃淡画像からの形状復元の研究に従事。