

弱一様乱反射仮定による筒状物体の形状及び姿勢の決定 Weak Lambertian Assumption for Determining Cylindrical Shape and Pose from Shading and Contour

中村恭之 浅田 稔 白井 良明
大阪大学 工学部

Abstract. This paper describes a method for reconstructing the shape of a cylindrical object using “Weak Lambertian Assumption” which can relax the requirements for shape from shading methods in two ways: one is that it does not strongly constrain the property of the perfectly Lambertian surface of objects, and the other is that object surfaces may include specular component in addition to diffused one. The method does not need to know the lighting conditions (illuminant strength and light source direction) or surface albedos. Input scenes include cylindrical objects each of which has a cylindrical surface and planar surface as its cross-section. First, actual lighting conditions are transformed into normalized lighting ones, and an equation which relates the cross-section contour on the image plane to the shape parameter of the cylindrical object is derived based on the Weak Lambertian Assumption. In the case of scenes including plural cylindrical objects, we can estimate an actual light direction and albedos of both diffused and specular components for each surface. Experimental results for both synthesized and real images are shown.

1 はじめに

コンピュータビジョンの中心課題の一つとして、2次元の画像から3次元のシーンにおける情報を再構成する問題がある。これに対し物体面の反射特性やセンサーの特性によって物体がどのように見えるかを、物理的モデルで記述し、定量的に再構成する手法が広く行われている [1]。反射モデルを用いた最初の定量的な解析 [2] では、勾配空間を用いて画像の輝度値と面の法線方向の関係が明らかにされた。池内とHorn[3]は、外縁線上では物体面が視線方向と直交することを境界条件として用いて、弛緩法により曲面の形状を再構成した。これらの手法では、照明条件と面の反射率は既知であるという仮定が必要であった。Asada[5]は、照明条件と面の反射率を未知とし、濃淡と輪郭線から筒状物体の形状復元を行なう手法を提案した。最近では、表面のマイクロ構造に關してある仮定を与えて、面の反射特性をモデル化する手法が提案されている [4]。また、Zheng and Chellapa[6]は、シーン中の面はすべて完全乱反射面で一様な反射係数を持つと仮定して、一枚の画像から照明方向、反射係数、面の再構成を行なう手法を提案した。しかし、現実には、各物体面はその反射係数や反射属性が異なるので、常に正しい解が得られるとは限らない。これらの要因による誤差を解消するために滑らかさ拘束を基本とした正則化の手法がよく適用されている [7]。正則化手法では、そのパラメータの設定が大きな問題となっている。このように従来からの形状復元手法では、表面特性について厳密なモデル（例えば、完全乱反射成分だけを仮定したモデルや、その成分と鏡面反射成分を混合したモデルなどがある。）を仮定する必要があった。そこで本報告では、厳密な一様乱反射面モデルを必要としない、また鏡面反射成分を含んでも良いとする「弱一様乱反射仮定」(Weak Lambertian Assumption)を示し、これを筒状物体の形状及び姿勢を定量的に復元する問題に適用した結果について述べる。

ここでは、入力画像中には筒状物体しか含まれていない

とする。画像面内の輪郭線と3次元空間内の輪郭線との間に成立する拘束式と先の仮定から導かれる拘束式から形状復元を行っている。その際には、光源方向が重要な役割を果たすので、まずその光源方向の推定を行う。実際の光源方向は、ある1つの物体に關してある1つの平面上に拘束される。これから、画像内に2つの物体が存在すれば、実際の光源方向を唯一に決定できる。また垂直断面を仮定することにより、筒状物体の3次元空間内での姿勢が唯一に決定できる。これらの手法の有効性を確認するために、合成画像と実画像を用いた実験結果を示す。

2 弱一様乱反射仮定

2.1 弱一様乱反射面

定義 物体面上の輝度値が、光源方向と面の法線方向でなす角(入射角)の単調減少関数によって記述できる様な面のとき、その面を弱一様乱反射面と呼ぶ。

弱一様乱反射面は、完全乱反射面に比べ、以下の利点を得られる。

1. γ 補正の影響を受けない。
2. 一様な明るさの周囲光を含んでいてもよい。
3. 鏡面反射成分を含んでいてもよい。(低い輝度値は、殆んど完全乱反射成分からなると仮定する。)

なお、本手法では直交射影、無限遠方光源を仮定する。

2.2 筒状物体面上での光源方向

筒状物体面上の濃淡情報と光源方向の関係を、ガウス球(図1)を用いて、明らかにする。実際の光源はガウス球の北極Aの方向無限遠方にあるとする。等輝度線は、ガウス球上にOA上に中心が位置する円群を形成する。また、筒状

物体面の法線ベクトルは、大円 P_1-B-P_2 上に存在する。表面上で最も明るい点 B は、ガウス球上において、その明るさに相当する等輝度線と大円の接点として存在する。ガウス球上の点 P_1, P_2 は、大円とある明るさに相当する等輝度線との交点である。

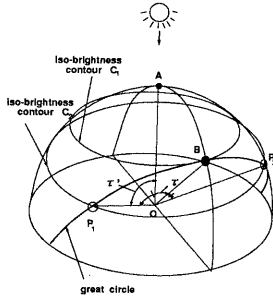


図 1: ガウス球

このとき、 $\angle AOP_1 = \angle AOP_2$ 、また点 P_1, P_2 は平面 OAB に関して対称であるので、 $\angle BOP_1 = \angle BOP_2$ 。 $\angle AOP_1 = \angle AOP_2 = \tau'$ 、 $\angle BOP_1 = \angle BOP_2 = \tau$ とすると、 $\tau' = T(\tau)$ と表せる。ここで、 $T(\tau)$ は、単調増加関数である。もし、観測される輝度値 E が τ' に関する単調減少関数 $g(\cdot)$ によって表せるのなら、同様に、 τ に関しての単調減少関数としても表せる。すなわち、

$$\begin{aligned} E &= g(\tau') = g(T(\tau)) = f(\tau) \\ \frac{dE}{d\tau} &= \frac{dg}{d\tau'} \frac{d\tau'}{d\tau} = \frac{dg}{d\tau'} \frac{dT}{d\tau} < 0 \\ \left(\frac{dg}{d\tau'} < 0 \text{ かつ } \frac{dT}{d\tau} > 0 \text{ より} \right) \end{aligned}$$

このようにして、筒状物体面上には、あたかも BO 方向から光が入射してくるように見える。この BO 方向のことを、「正規化された光源方向」(Normalized lighting direction) と呼ぶ。(以下では、正規化光源方向と呼ぶ。) なお、厳密な一様乱反射面を仮定した場合も、正規化光源による輝度値は一様乱反射則を満足する。(詳細は、[5] を参照。)

次に、この光源方向を筒状物体面上で説明する。 x_v 軸を画像内の物体の母線に平行にとり、 z_v 軸を観測方向にとった観測者中心の座標系を W_v 座標系とする。(図 2) また、

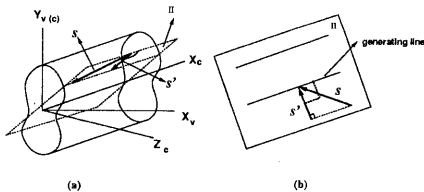


図 2: (a) 2つの座標系 (b) 正規化された光源方向

物体中心の座標系 W_c を、 x_c 軸を筒状物体の軸を平行にとり、 y_c 軸を W_v 座標系の y_v と平行にとるとする。実際の光源方向が、 W_c において $s(p_s, q_s, -1)$ であり、その強度が I であるとする。先の、正規化光源方向は、強度 $I' (< I)$ で s' 方向から入射して来ることになる。 s' 方向は、 s と物体面上の最も明るい線とで作られる平面上に載っている。正規化光源方向を考慮すると、観測される輝度値は、次のように表される。

$$E = \rho I' f(\tau),$$

$f(\tau)$ は単調減少関数で、 τ, ρ, I' は、それぞれ法線方向と正規化光源方向とでなす角度、物体面の反射係数、正規化光源の強度を表している。このようにして、実際の光源方向は正規化光源方向に変換される。この方向は、物体面が鏡面反射成分を含んでいないときの弱一様乱反射面の場合、最も輝度値の高い点での法線方向と平行である。

2.3 輪郭からの形状復元

筒状物体の形状は、その軸に対する垂直断面の形状によって特徴づけられる。垂直断面の輪郭線上の各点の法線方向は、その筒状面の法線方向と同じである。(図 3(a)) つまり、物体面の法線方向を決定するためには、その垂直断面の形状を復元すればよいことになる。

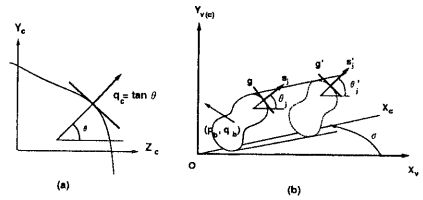


図 3: (a) 筒状物体面の形状パラメータ (b) 底面の垂直断面上への投影

画像内の底面の輪郭から、その垂直断面形状を復元する方法について述べる。底面の法線ベクトルを (p_b, q_b) 、物体の軸が画像平面となす角度を σ とする。画像内の底面の輪郭を、物体軸に垂直な平面上に投影することにより、垂直断面形状が得られる。復元された輪郭上の点の座標を (x'_j, y'_j) とすると、

$$\begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \end{pmatrix},$$

(x_j, y_j) は、画像内の輪郭上の点の座標を示している。ここで、 $\alpha = p_b \cos \sigma - \sin \sigma$ 、 $\beta = q_b \cos \sigma$ である。(詳細は [5] を参照。) 同様に、画像上の法線方向と、垂直断面上での法線方向の間に成立する関係は、

$$s'_j = -s_j \alpha + \beta,$$

$s'_j = \tan \theta'_j$ は、垂直断面についての形状パラメータ。 $s_j = \tan \theta_j$ は、画像面についての形状パラメータ。筒状物体の形状とその姿勢を決定するために、3つの未知数(底面の方向 (p_b, q_b) と物体の軸の slant 角 (σ)) が存在する。形状は、2つのパラメータ α, β を決定することにより唯一に決定さ

れる。しかし、もう1つの自由度がまだ存在しているので、その姿勢については、唯一に決定できない。

2.4 弱一様乱反射仮定による形状決定

形状を決定するための新しい拘束条件式を定式化する。まず、筒状物体についての定性的特性は、

- 最も明るい輪郭上の点をはさんで、明るさの等しい輪郭上の点における法線方向は、正規化された光源方向と等しい角をなしている。(図4)

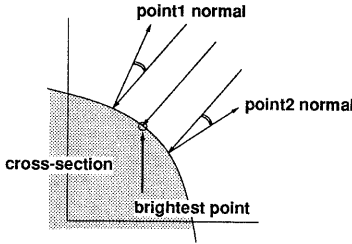


図4: 弱一様乱反射

輪郭上の2点について、次の式が成立する。

$$\tan \theta'_i = -\alpha \tan \theta_i + \beta \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

輪郭上の最も明るい点について、次の式が成立する。

$$\tan \lambda' = -\alpha \tan \lambda + \beta, \quad (2)$$

新しい拘束条件式が、先の特性から導かれる。(簡単のため、 $\theta'_1 > \lambda' > \theta'_2$ とする。)

$$\tan(\theta'_1 - \lambda') = \tan(\lambda' - \theta'_2).$$

つまり、

$$\frac{\tan \theta'_1 - \tan \lambda'}{1 + \tan \theta'_1 \tan \lambda'} = \frac{\tan \lambda' - \tan \theta'_2}{1 + \tan \theta'_2 \tan \lambda'}. \quad (3)$$

式(1)と式(2)を式(3)に代入すると、

$$A\alpha^2 + B\alpha\beta + C\beta^2 + C = 0, \quad (4)$$

ここで、

$$A = \tan^2 \lambda \tan \theta_1 + \tan^2 \lambda \tan \theta_2 - 2 \tan \lambda \tan \theta_1 \tan \theta_2,$$

$$B = 2(\tan \theta_1 \theta_2 - \tan^2 \lambda),$$

$$C = 2 \tan \lambda - \tan \theta_1 - \tan \theta_2.$$

式(4)によって、2つのパラメータ α, β がこの曲線上に拘束される。

2.5 1つの筒状物体から推定できる光源方向についての拘束

もし筒状物体面の表面特性に鏡面反射成分が含まれていると、照明方向を推定することが難しくなる。すなわち、最も明るい点での法線方向が、正規化された照明方向と平行になるとは限らない。形状復元を行う場合に、この照明方向が重要な役割を果たしているため、まず正規化された照明方向を推定しなければならない。その推定のために、再び式(4)を用いる。

$$g_i(\alpha, \beta) = (P_i \gamma^2 - 2Q_i \gamma) \alpha^2 + (2Q_i - 2\gamma^2) \alpha \beta + (2\gamma - P_i) \beta^2 + (2\gamma - P_i) = 0,$$

ここで、

$$\gamma = \tan \lambda, \quad P_i = \tan \theta_{i1} + \tan \theta_{i2}, \quad Q_i = \tan \theta_{i1} \tan \theta_{i2}.$$

この式中の γ を推定する。この式は、一様乱反射成分のみを含む輝度値の等しい2点 (i_1, i_2) 、すなわち、鏡面反射成分を含まない輝度値について成立する。他の輝度値の等しい2点 (j_1, j_2) から導かれる $g_j(\alpha, \beta)$ との関係は、

$$g_i(\alpha, \beta) = k g_j(\alpha, \beta). \quad (k : \text{constant})$$

各係数比が等しくなければならないので、

$$\frac{P_i \gamma^2 - 2Q_i \gamma}{P_j \gamma^2 - 2Q_j \gamma} = \frac{2Q_i - 2\gamma^2}{2Q_j - 2\gamma^2} = \frac{2\gamma - P_i}{2\gamma - P_j}.$$

この式は、次の式と等価である。

$$(P_j - P_i) \gamma^2 + 2(Q_i - Q_j) \gamma + (P_i Q_j - Q_i P_j) = 0.$$

2つの解の内、一方は筒面を内側から観測することに対応し、一般視点位置に反するので、棄却する。多くの (i, j) の組合せから正しい解の重心を求め、 γ の推定値とする。このようにして、形状を決定するための拘束式が得られる。しかし、このままでは物体の姿勢が唯一に決定できないので、筒状物体の底面は垂直断面になっているとする。

つまり、 $p_b = -\cot \sigma, q_b = 0$ であるので、

$$\cot \sigma \cos \sigma + \sin \sigma = -\alpha, \quad \beta = 0.$$

となるので、

$$\sigma = \sin^{-1}\left(-\frac{1}{\alpha}\right).$$

とすることにより、姿勢が決定される。

2.6 複数の筒状物体からの光源方向および反射係数の推定

2.6.1 光源方向の推定

2.2節で述べたように、実際の光源方向は図3に示されているように、ある平面 Π 上に拘束される。この平面は、ガウス球上で大円に相当する。2つの物体がシーン中に存在すると、各々の物体に対して1つの大円が決定できる。(図5における C_1 と C_2) 従って、実際の光源方向はこの2つの大円の交点の方向として求められる。

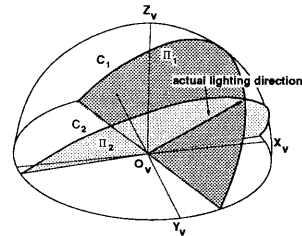


図5: 実際の光源方向

2.6.2 反射係数の推定

まず、前節のように光源方向を推定してからその推定量を用いて、物体面の反射特性の推定する。画像内の輝度値は次の方程式を満たしているとする。

$$I = I_a k_a + \frac{I_l}{d + K} (k_d \cos \theta + k_s \cos^n \phi), \quad (n : \text{const})$$

この式は、Phong のシェーディングモデルを表している。ここで、 $I_a k_a$, I_l , $I_l k_d$, $I_l k_s$ はそれぞれ、周囲光の強度値、入射光強度、拡散光成分の強度、鏡面反射光成分の強度を示している。ここでは、次の3つのパラメーターを推定する。

$$\sigma_0 = I_a k_a, \quad \eta_d = I_l k_d, \quad \eta_s = I_l k_s.$$

各ピクセルに対して次の式が成立しているとする。

$$I(x, y) = \sigma_0 + \eta_d \cos \theta(x, y) + \eta_s \cos^n \phi(x, y)$$

最小2乗法を用いて、3つのパラメーターの推定を行う。次の式を最小化することにより求められる。

$$E = \sum \{I(x, y) - \sigma_0 + \eta_d \cos \theta(x, y) + \eta_s \cos^n \phi(x, y)\}^2.$$

こうして、 σ_0 , η_d , η_s の推定値を得ることができる。

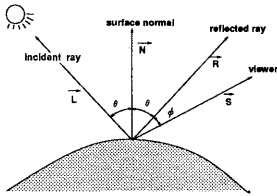


図 6: Phong のシェーディングモデル

3 実験結果

ここでは、物体面を完全乱反射面であると仮定して、復元を行う方法 [5] と、弱一様乱反射仮定により復元を行う方法との結果を比較するために実験を行った。

3.1 完全乱反射仮定 [5] による推定法

比較のために、Lambert の余弦則に依存する方法について述べる。この方法においては、最も明るい点の輝度値 E_{max} と各点での輝度値 E との比が、正規化光源方向 γ と各点での法線方向 θ のなす角度の余弦になることに着目して、次式の拘束式を得る。

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

ここで、

$$\begin{aligned} A_i &= \mp R_i \tan \theta \tan \lambda & B_i &= \pm R_i (\tan \theta + \tan \lambda) \\ C_i &= R_i & D_i &= -\tan \theta + \tan \lambda \\ E_i &= \pm R_i & R_i &= \sqrt{\left(\frac{E_{max}}{E_i}\right)^2 - 1}. \end{aligned}$$

である。次の評価関数を最小化するものをパラメータ (α, β) の推定値とする。

$$S(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^n \{d_i(\alpha, \beta)\}^2, \quad (5)$$

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

これを最小化する問題は、次のオイラー方程式を解く問題と等価である。

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

3.2 弱一様乱反射仮定による推定法

もし、物体面の反射特性の中に、鏡面反射成分が含まれていなければ、光源方向の推定に最も明るい点の法線方向を用いることができるが、一般的に、物体面の反射成分の中には、鏡面反射成分が含まれている。従って、ここではまず光源方向の推定を行ってから形状の復元を行う。弱一様乱反射仮定の場合の拘束式は、式 (4) のようになる。この式は、本来輪郭上の各点について同一の方程式になるはずであるが、誤差の影響により一致しないので、先ほどと同様に、次の評価関数を最小化するものを拘束式の係数の推定値として求めて、1つの拘束式を求める。

$$S(A, B, C) = \sum_{i=1}^n \{d(\alpha_i, \beta_i)\}^2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで、} \quad \{d(\alpha_i, \beta_i)\}^2 &= \frac{|f(\alpha_i, \beta_i)|^2}{\left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)^2}, \\ f(\alpha_i, \beta_i) &= A\alpha_i^2 + B\alpha_i\beta_i + C\beta_i^2 + C. \end{aligned}$$

式 (6) の最小化問題は次のオイラー方程式を解く問題と等価である。

$$\frac{\partial S}{\partial A} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial B} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C} = 0.$$

このようにして求められた拘束式を用いてパラメータを推定する。

3.3 筒状物体の形状および姿勢の推定

まずはじめに本手法の有効性を検証するために合成画像を利用する。入力画像は、(256 × 240 画素、各点 8-bit) である。表面の反射特性は、2つの成分 (拡散反射、鏡面反射) からなっている。合成画像は、Phong のシェーディングモデルを用いて作られている。(実験 1 ~ 3) 次に実画像についても同様の実験を行っている。(実験 4, 5)

実験 1 点光源、完全乱反射面 (合成画像)

実験 2 平行光線、完全乱反射面、 γ 補正を施したもの (合成画像)

実験 3 平行光線、反射特性中に拡散反射成分と鏡面反射成分を Phong のモデルにおいて次のようなレベルで合んでいるもの
 $n = 20, \frac{k_s}{k_d} = 9.0, 4.0, 2.3, 1.5, 1.0$ (合成画像)

実験 4 直円筒 (実画像)

実験 5 切断されたバナナ (実画像)

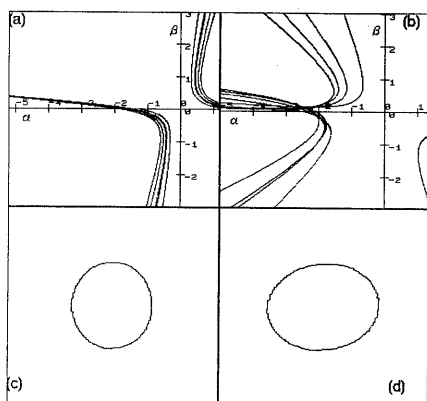


図 7: 実験 1 の実験結果 (a) 弱一様乱反射仮定にもとづく拘束曲線 (b) 完全乱反射仮定にもとづく拘束曲線 (c) 弱一様乱反射仮定にもとづく復元結果 (d) 完全乱反射仮定にもとづく復元結果 (正解の形状は円)

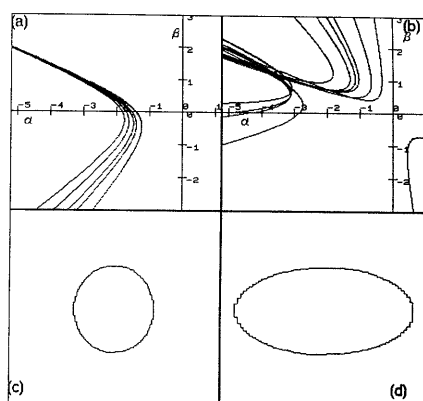


図 8: 実験 2 の実験結果 (a) 弱一様乱反射仮定にもとづく拘束曲線 (b) 完全乱反射仮定にもとづく拘束曲線 (c) 弱一様乱反射仮定にもとづく復元結果 (d) 完全乱反射仮定にもとづく復元結果

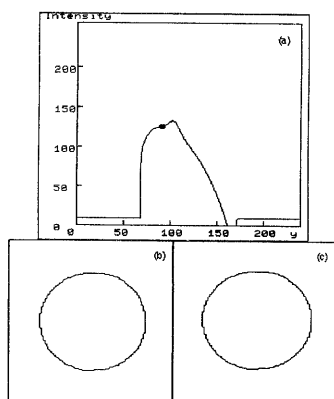


図 9: 実験 3 の推定された光源方向と復元形状 ($\frac{k_d}{k_s} = 1.0$ のレベルにおける) (a) 筒状物体面の明るさの変化曲線、曲線上の小さな○は、推定された光源方向の画像面上での位置を示している。 (b) 弱一様乱反射仮定にもとづく復元結果 (c) 完全乱反射仮定にもとづく復元結果

表 1: 実験 1: 推定された slant 角

	弱一様乱反射仮定	完全乱反射仮定	正解
推定値 (度)	38.3	26.4	35.0

表 2: 実験 2: 推定された slant 角

	弱一様乱反射仮定	完全乱反射仮定	正解
推定値 (度)	38.6	16.1	35.0

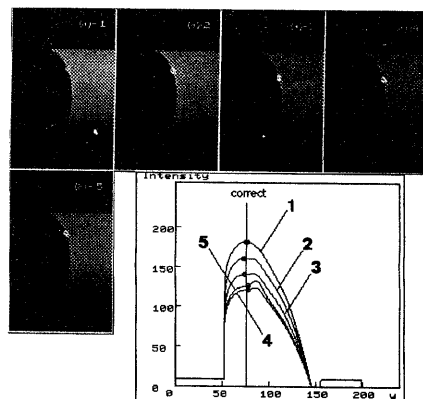


図 10: 画像面上での光源方向の推定結果 (a)1-5 各画像における光源方向の推定結果 (b) 5つのレベルにおける明るさの変化曲線この画像中の小さな○は、推定された光源方向を示している。

表 3: 実験 3: 正規化光源方向の推定

$\frac{k_d}{k_s}$	9.0	4.0	2.3	1.5	1.0	正解
推定値 (度)	-21.5	-20.6	-20.1	-19.3	-19.0	-22.3

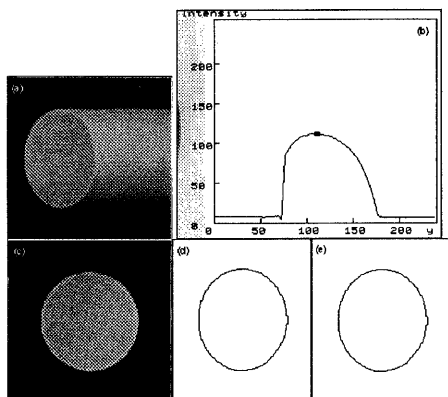


図 11: 実験 4 : 入力画像と推定結果 (a) 入力画像 (円筒物体) (b) 筒状物体面の明るさの変化曲線、曲線上の小さな○は、推定された光源方向の画像面上での位置を示している。(c) 真の垂直断面 (d) 弱一様乱反射仮定にもとづく復元結果 (e) 完全乱反射仮定にもとづく復元結果

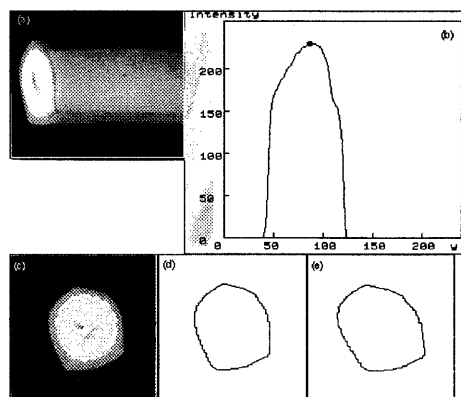


図 12: 実験 5 : 入力画像と推定結果 (a) 入力画像 (切断されたバナナ) (b) 筒状物体面の明るさの変化曲線、曲線上の小さな○は、推定された光源方向の画像面上での位置を示している。(c) 真の垂直断面 (d) 弱一様乱反射仮定にもとづく復元結果 (e) 完全乱反射仮定にもとづく復元結果

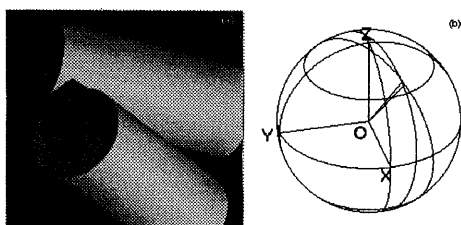


図 13: 実験 6 の推定結果 (推定した結果をガウス球を用いて表したもの) OZ 方向は観測者方向を示す。X,Y 軸は画像面の X,Y 軸方向と一致する。(a) 入力画像 (b) 赤い棒は正解の方向、黄色の棒は推定された方向を示している。緑の大円は上の円筒から、紫の大円は下の円筒から得られる。

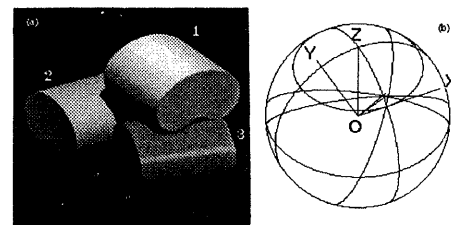


図 14: 実験 7(a) の推定結果 (推定した結果をガウス球を用いて表したもの) (a) 入力画像 (b) 赤い棒は正解の方向、黄色の棒は推定された方向を示している。ピンクの大円は物体 1、緑の大円は物体 2、紫の大円は物体 3 から得られる。

表 4: 実験 6,7(a) : 実際の光源方向の推定結果

	推定された方向	実際の方向	誤差角 (度)
実験 6	(0.584,-0.340,0.737)	(0.577,-0.258,0.775)	3.29
実験 7(a)	(0.036,-0.618,0.786)	(0.033,-0.594,0.804)	2.53

表 5: 実験 7(b) : 反射係数の推定結果

	物体 1		物体 2		物体 3	
	推定値	正解値	推定値	正解値	推定値	正解値
σ_0	14	25	7	25	36	25
η_d	258	230	225	186	117	115
η_s	-1938	0	-48	46	14	115

図7,8,9と10は、それぞれ実験1,2,3の結果を示している。表1,2は、推定されたslant角と正解のものを示している。表3は、実験3の正規化光源方向の推定結果を示している。図11,12は実験4,5の結果を示している。

実験1においては、点光源を想定しており、仮定と異なるが弱一様乱反射仮定にもとづく復元結果は正解に近い形状となっている。実験2においては、 γ 補正によってLambertの余弦則は成り立たなくなるので、完全乱反射仮定にもとづく結果は、正解とかなり違ってくる。

実験3においては、 $k_d/k_s = 1.5, 1.0$ の場合は、データのダイナミックレンジが小さいために他とは多少違った結果になっているが、すべての場合について正解に近い推定結果となっている。

3.4 複数の筒状物体を含んだシーンでの光源および反射係数の推定

実験6 シーン中に完全乱反射面を持つ2つの筒状物体が存在した場合の光源方向の推定

実験7(a) シーン中にいろいろな反射成分を含んだ3つの筒状物体が存在した場合の光源方向の推定
Phongのモデルにおいて $n = 20$, $k_s/k_d = 0.0, 0.25, 0.5$ で、それぞれを物体1,2,3とする。

実験7(b) 実験7(a)に含まれる物体の表面反射係数の推定

図13,14は、それぞれ実験6,7(a)の結果を示している。表4は、実験6,7(a)における推定された光源方向と正解のものを示している。表5は、実験7(b)の推定結果を示している。

表4より、実験7(a)の結果は、実験6の結果よりも正確に推定できている。このように、より多くの筒状物体が存在する場合は、最小2乗法などを用いて実際の光源方向をロバストに推定できると思われる。実験7(b)においては、周囲光成分や完全乱反射成分については、良い推定値が得られている。しかし、鏡面反射成分については、大きな誤差が含まれている。これは、その係数が乱反射成分の係数に比べかなり小さいことや、観測される輝度値が、鏡面反射成分の頂上部でなく、裾野の部分に相当しているために輝度値の中の鏡面反射成分は極端に小さくダイナミックレンジが低いためと考えられる。

4 終りに

本報では、筒状物体の定量的な復元を弱一様乱反射仮定を利用した定性的な原理に基づく手法で行えることを示した。また、シーン中に複数の筒状物体が存在する場合に、実際の光源方向が推定できることを示した。合成画像及び実画像に対して、良好な結果が得られた。しかし、正解とは若干の違いがある。これは、輪郭を抽出する際に引き起こされる接線方向の誤差によるものであると思われる。現在、実画像に対して光源方向の推定を行っている。

参考文献

- [1] "SPECIAL ISSUE ON PHYSICAL MODELING IN COMPUTER VISION," *IEEE Trans PAMI*, vol.13, No.7, July 1991.
- [2] B.K.P.Horn, "Hill-shading and reflectance map," *Proc of IEEE*, 69(1):14-47, January 1981.
- [3] K.Ikeuchi and B.K.P.Horn, "Numerical shape from shading and occluding boundaries," *Artificial Intelligence*, vol.17, pp.141-184, 1981
- [4] Shree K. Nayar, "Shape Recovery using Physical Models of Reflection and Interreflection," Ph.D dissertation of Electrical and Computer Engineering Carnegie Mellon University, May, 1991.
- [5] M.Asada, "Cylindrical shape from contour and shading without knowledge of lighting conditions or surface albedo," *ICCV*, pp412-416, 1987.
- [6] Q.Zheng and R.Chellappa, "Estimation of Illuminant Direction, Albedo, and Shape from Shading," *IEEE Trans PAMI*, vol.13, No.7, July 1991, pp680-702.
- [7] 坂上, 横矢, "弛緩法と正則化", *情報処理*, Vol.30, No.9, pp.1047-1057(1989).

Appendix

A 画像面上の底面輪郭の座標と垂直断面上に投影された輪郭の座標の関係

底面は観測者中心の座標系 W_o の原点を通っているとする。底面上の各点は、法線ベクトルが $(p_b, q_b, -1)$ の平面上に載っている。それゆえ、座標系 W_o における輪郭の座標 (x_j, y_j) は、 $(x_j, y_j, -p_b q_b y_j)$ と表せる。これらの点を y_o 軸周りに $\frac{\pi}{2} - \sigma$ だけ回転させると、筒状物体の軸の方向が観測者方向と一致するので、そのときの形状はちょうど筒状物体の垂直断面の形状になっている。このようにして、次の式を得る。

$$\begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \\ z'_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \sigma) & 0 & -\sin(\frac{\pi}{2} - \sigma) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \sigma) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2} - \sigma) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ -p_b x_j - q_b y_j \end{pmatrix},$$

つまり

$$\begin{pmatrix} x'_j \\ y'_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -p_b \cos \sigma + \sin \sigma & -q_b \cos \sigma \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \end{pmatrix},$$

となる。

B 画像面上での法線方向と垂直断面上での法線方向の関係

形状パラメータ s'_j, s_j は、輪郭の接線 g'_j, g_j に垂直であるので(図3(b)参照)、画像面上及び垂直断面上について、次の式を得る。

$$s_j = \frac{1}{g_j} = \frac{\Delta x_j}{\Delta y_j}, \quad s'_j = -\frac{1}{g'_j} = -\frac{\Delta x'_j}{\Delta y'_j} = -\frac{(-p_b \Delta x_j - q_b \Delta y_j) \cos \sigma + \Delta x_j \sin \sigma}{\Delta y_j}.$$

となる。

C 光源方向の計算方法

観測者中心の座標系 (O, X_v, Y_v, Z_v) をとる。(図 15(a).) 物体中心の座標系 (O_c, i, j, k) において、 O_c は、物体の軸上の点であり、 (i, j, k) は垂直断面を表す基底ベクトルである。観測者方向は、 OZ_v である。画像面は OZ_v 方向に垂直な平面である。 σ は、物体の軸が画像平面となす角度である。 τ は、画像面の OX_v 軸と物体の軸の画像面への投影とのなす角度である。

観測者中心の座標系において、物体の軸の方向はベクトル $(\cos \tau, \sin \tau, -\tan \sigma)$ と表せる。2つの円筒が画像内に存在したとき、光源方向は次のようにして求められる。(図 15(b) 参照) 各円筒の軸の方向 A_i は次のように表せる。

$$\text{cylinder } i: \quad A_i = (\cos \tau_i, \sin \tau_i, -\tan \sigma_i) \quad i = 1, 2.$$

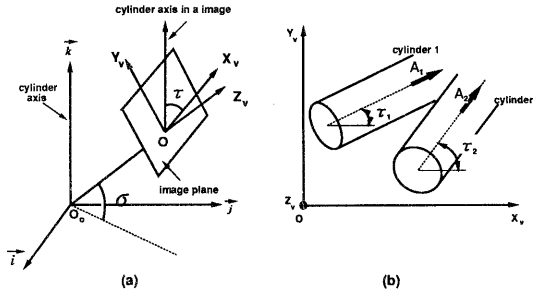


図 15: (a) 物体中心の座標系と観測者中心の座標系の関係
(b) 画像内の 2 つの円筒

ここで、形状パラメータ (α_i, β_i) $i = 1, 2$ 、slant 角 (σ_i) $i = 1, 2$ 、正規化光源方向 (λ_i) $i = 1, 2$ は既知のものとする。 $X_v Y_v$ 平面上で、正規化光源方向はベクトル $B\mathbf{r}_i(p_i, q_i, 0)$ $i = 1, 2$ と表せる。ここで、

$$\tan \lambda' = -\alpha \tan \lambda, \quad p_i = \cos \lambda', \quad q_i = \sin \lambda'.$$

このベクトル $B\mathbf{r}_i$ を (O, X_v, Y_v, Z_v) 座標系内のベクトル $B\mathbf{r}'_i(p_{vi}, q_{vi}, r_{vi})$ に変換する。変換式は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} p_{vi} \\ q_{vi} \\ r_{vi} \end{pmatrix} = \mathbf{R}_i \mathbf{R}_1 \begin{pmatrix} p_i \\ q_i \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_i \sin \sigma_i \cos \tau_i - q_i \sin \tau_i \\ p_i \sin \sigma_i \sin \tau_i + q_i \cos \tau_i \\ p_i \cos \sigma_i \end{pmatrix},$$

ここで、 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ は回転マトリックスで、それぞれ次のように表せる。

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} \cos(\frac{\pi}{2} - \sigma_i) & 0 & -\sin(\frac{\pi}{2} - \sigma_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\frac{\pi}{2} - \sigma_i) & 0 & \cos(\frac{\pi}{2} - \sigma_i) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} \cos \tau_i & -\sin \tau_i & 0 \\ \sin \tau_i & \cos \tau_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

正規化光源方向を表すベクトルは拘束平面 Π_i 上になければならない。(図 2 参照) この拘束平面の法線ベクトル N_i は次のように表わす。

$$N_i = (a_i, b_i, c_i)$$

N_i は次のように表せる。

$$N_i = B\mathbf{r}_i \otimes A_i$$

各拘束平面 Π_i の関係をガウス球を用いて考えると(図 5 参照)、拘束平面の方程式は次のようになる。

$$a_i x + b_i y + c_i z = 0 \quad (i = 1, 2).$$

図 5 において、大円 (C_i $i = 1, 2$) は拘束平面とガウス球の交線として形成される。そして、これらの大円の交点が実際の光源方向を示している。すなわち、実際の光源方向 $L(l, m, n)$ は次のように表せる。

$$N_i \cdot L = 0 \quad (i = 1, 2).$$

$$l = \frac{1}{w}, \quad m = \frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{b_1 c_2 - b_2 c_1} \frac{1}{w}, \quad n = \frac{a_1 b_2 - a_2 c_1}{b_1 c_2 - b_2 c_1} \frac{1}{w}$$

ここで

$$w = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a_2 c_1 - a_1 c_2}{b_1 c_2 - b_2 c_1} \right)^2 + \left(\frac{a_1 b_2 - a_2 c_1}{b_1 c_2 - b_2 c_1} \right)^2}}$$

D 鏡面反射方向と反射角 ϕ の計算方法

N, L, R はそれぞれ、法線ベクトル、光源方向ベクトル、鏡面反射方向ベクトルを示している。それぞれの成分を次のように表す。

$$N = (n_x, n_y, n_z), \quad L = (l_x, l_y, l_z), \quad R = (r_x, r_y, r_z). \quad (7)$$

それぞれの間には次のような関係がある。

1. N, L, R は同一平面上にある。
2. 入射角と反射角は等しい。

次の式は条件 1 から導かれる。

$$N \otimes L = R \otimes N \quad (8)$$

同様に条件 2 から次の式が成立する。

$$N \cdot L = N \cdot R \quad (9)$$

式 (8) と式 (9) を整理して、マトリックス表現すると

$$\begin{pmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \\ n_x & n_y & n_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_z l_y - n_y l_z \\ n_x l_z - n_z l_x \\ n_y l_x - n_x l_y \\ n_x l_x + n_y l_y + n_z l_z \end{pmatrix} \quad (10)$$

つまり、

$$[T][R] = [B] \quad (11)$$

R は次のようにして求められる。

$$[R] = ([T]^t [T])^{-1} [T]^t [B] \quad (12)$$

次に、反射角 ϕ は次の式から求められる。

$$\cos \phi = \frac{R \cdot L}{|R| |L|} \quad (13)$$