

4P-8

二次元濃淡情報を用いた三次元形状の 再構成アルゴリズムとその雑音特性

熱田 清明 近藤 正三

東海大学

1. はじめに

物体の二次元濃淡情報を用いた光源の方向推定および表面の勾配推定を結合したアルゴリズムを提案する。上記の2つの推定理論は既存のものだが、これらを結合した推定システムの構成および雑音特性の検討は新規である。

2. 問題の定式化

視者(カメラ)の方向を z 軸とし、視者から見える物体表面がなす曲面を \tilde{S} とする。 \tilde{S} の xy 平面への正射影を S とし、その境界を ∂S とする。 ∂S は微分可能な単一閉曲線をなすとする。 \tilde{S} は次の方程式で表されるとする；

$$z=f(x,y), \quad (\cdot, (x,y) \in S=S-\partial S) \quad (1)$$

f は連続微分可能とする。 \tilde{S} の点 $(x, y, f(x, y))$ での法線ベクトル

$$\left(-\frac{\partial f}{\partial x}, -\frac{\partial f}{\partial y}, 1\right) \quad (2)$$

は、 $p \equiv -\partial f / \partial x$, $q \equiv -\partial f / \partial y$ とすると、点 (p, q) で決まる。 (p, q) が作る空間を G とする。物体の二次元濃淡情報は、関数 $E(x, y)$, $((x, y) \in S)$ として与えられる。この論文の扱う問題は、 $E(x, y)$ を既知として、 S から G への対応を作ることである。

一般に、 S の面素が視者に与える光の強度は、

$$I = \lambda \rho k(N, \mathbb{L}) + \lambda \rho (1-k) \left[\frac{(2N\mathbb{L} - \mathbb{V}, \mathbb{L})}{\|2N\mathbb{L} - \mathbb{V}\|} \right]^{\ell} \quad (3)$$

で決まる。ここで、 N , \mathbb{L} , \mathbb{V} は面素の法線、光の方向、視者の方向を表す単位ベクトルであり、 λ , ρ , k , ℓ は光源と物体表面の材質などによって決まる定数である。この論文では $k=1$ と仮定する。いま、面素の勾配を (p, q) とすると、 $N=(p, q, 1)/\sqrt{p^2+q^2+1}$ より、

$$I(p, q) = \frac{\lambda \rho (\ell_1 p + \ell_2 q + \ell_3)}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}}, \quad (4)$$

$$(\mathbb{L} = (\ell_1, \ell_2, \ell_3)),$$

従って、この論文での問題は、 $E(x, y) = I(p, q)$ を満足する対応 $(x, y) \rightarrow (q, p)$ を決定する問題となる。

3. 光源の方向 $\mathbb{L} = (\ell_1, \ell_2, \ell_3)$ の推定

光源は単一の点光源とし、物体の大きさに比して十分遠くにあるとする。 $\ell_3 > 0$ と仮定すると、 \mathbb{L} は、 \mathbb{L} が xy 平面のなす角 σ_L ($0 \leq \sigma_L \leq \pi/2$) および \mathbb{L} の xy 平面への正射影が x 軸となす角 τ_L ($0 \leq \tau_L \leq 2\pi$) で決まる。このとき、次式がいえる；

$$\begin{aligned} \ell_1 &= \sin \sigma_L \cos \tau_L, \\ \ell_2 &= \sin \sigma_L \sin \tau_L, \\ \ell_3 &= \cos \sigma_L. \end{aligned} \quad (5)$$

文献[1]は、物体表面が凸であると仮定されるとき、

$$\frac{E\left[\frac{\partial E(x,y)}{\partial x}\right]}{E\left[\frac{\partial E(x,y)}{\partial y}\right]} = \tan \tau_L, \quad (6)$$

と算出している。ここで、 $E[\]$ は S における平均である。

次に τ_L を既知とし、 xy 平面を z 軸のまわりに τ_L だけ回転した新しい座標を (X, Y) とする。この座標変換を $x = x(X, Y)$, $y = y(X, Y)$ とし、 $\tilde{E}(X, Y) = E(x(X, Y), y(X, Y))$ とする。

$$E_x[\tilde{E}(X, Y)] = \frac{\lambda \rho}{2(1 + \cos \sigma_L)} + (\pi \cos \sigma_L - \sigma_L \cos \sigma_L + \sin \sigma_L), \quad (7)$$

$$E_x[(\tilde{E}(X, Y))^2] = \frac{\lambda^2 \rho^2}{3} (1 + \cos \sigma_L) \quad (8)$$

ここで、 $E_x[\]$ は、 X 軸上での平均を意味する。したがって、

$$\frac{(E_x[\tilde{E}(X, Y)])^2}{E_x[(\tilde{E}(X, Y))^2]} = \frac{3}{4} \frac{(\pi \cos \sigma_L - \sigma_L \cos \sigma_L + \sin \sigma_L)^2}{(1 + \cos \sigma_L)^3} \quad (9)$$

4. 勾配の逐次推定

与えられた関数 $E(x, y)$ に対して、方程式

$$E(x, y) = I(p, q), \quad (10)$$

により、 $p = p(x, y)$, $q = q(x, y)$ を得る方法を次に示す¹²⁾

Gの点(p, q)を次式によって半径2の円内Cの点(g, h)に変換する.

$$\begin{aligned} g &= \frac{2p(\sqrt{p^2+q^2+1}-1)}{\sqrt{p^2+q^2}}, \\ h &= \frac{2q(\sqrt{p^2+q^2+1}-1)}{\sqrt{p^2+q^2}}. \end{aligned} \tag{11}$$

z軸に直交する勾配はGでは無限遠点であるが, 式(11)でCの境界∂Cに変換される. 式(10)を解いて, p=p(g, h), q=q(g, h)とし, I(p(g, h), q(g, h))=Ĩ(g, h)とおけば式(10)は

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \tilde{I}(g, h), \\ (x, y) \in S, (g, h) \in C, \end{aligned} \tag{12}$$

となる. ∂Sの点(x, y)の勾配は∂Sへの接線およびz軸に直交し, ∂Cの点(g(x, y), h(x, y))が一意に決まる. このとき(g(x, y), h(x, y)), ((x, y) ∈ ∂S)を境界条件として, 式(14)を逐次的に解くことができる^[2].

いま, xy平面を画素(i, j)で離散表現する. このとき, E_{ij}=E(i, j), g_{ij}=g(i, j), h_{ij}=h(i, j)とすると, 逐次過程g⁽ⁿ⁾(i, j), h⁽ⁿ⁾(i, j), (n=0, 1, ...)は次式となる:

$$\begin{aligned} g_{ij}^{(n+1)} &= g_{ij}^{*(n)} \\ &+ \xi [E_{ij} - I(g_{ij}^{*(n)}, h_{ij}^{*(n)})] \frac{\partial E}{\partial g}, \\ h_{ij}^{(n+1)} &= h_{ij}^{*(n)} \\ &+ \xi [E_{ij} - I(g_{ij}^{*(n)}, h_{ij}^{*(n)})] \frac{\partial E}{\partial h}. \end{aligned} \tag{13}$$

ここで, $g_{ij}^{*(n)} = \frac{1}{9} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 g_{i+k, j+l}^{(n)}$, $h_{ij}^{*(n)} = \frac{1}{9} \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 h_{i+k, j+l}^{(n)}$, $g_{ij}^{(0)} = g(i, j)$, $h_{ij}^{(0)} = h(i, j)$, ((i, j) ∈ ∂S), $g_{ij}^{(0)} = h_{ij}^{(0)} = 0$, ((i, j) ∉ ∂S)とする.

5. 推定アルゴリズムと雑音特性

図1に所与の濃淡画像E_{ij} (1 ≤ i, j ≤ 128)を示す. 画像から物体領域Sを分割し, Sの重心を座標原点とする. E_{ij}のi方向, j方向の差分を求め, 式(6)を用いてτ_Lを求める. 次に(i, j)を原点を軸としてτ_Lだけ回転し, (I, J)を定める. Ẽ_{IJ}から式(9)を得て, はさみうち法を用いてσ_Lを求める. 表1はE_{ij}に対して(a)雑音なし, (b-1)大きさ0.01E₀の雑音(ここでE₀は最大濃度を示す), (b-2)同0.05E₀, (c-1)大きさ0.01E₀の底上げ, (c-1)同0.05E₀を付加した場合の, (A)τ_L=不定, σ_L=0.0, (B)τ_L=-135.0, σ_L=35.264(単位は度)の場合の推定値を示す.

次に, Sの境界∂Sを得て, その各点での法線ベクトルを求めて境界条件を得る. 式(13)の逐次過程を用いて, Sの各点での勾配g_{ij}, h_{ij}を求める. 図2-aは真の形状であり, 図2-bは(A)-(b-2)の場合の推定形状である.

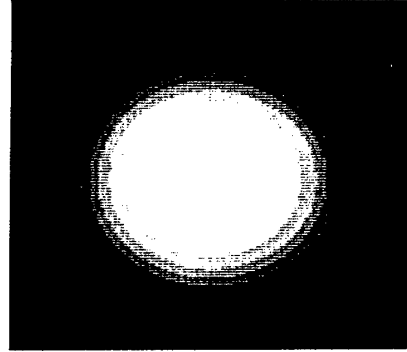


図1

表1

	(A)		(B)	
	τ _L	σ _L	τ _L	σ _L
(a)	0.00	0.00	-135.00	36.21
(b-1)	-76.00	0.00	-135.06	36.12
(b-2)	-76.87	0.00	-135.32	33.22
(c-1)	0.00	12.39	-135.00	34.89
(c-2)	0.00	5.20	-135.00	29.88

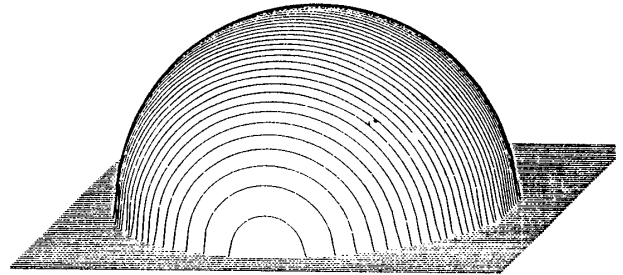


図2-a

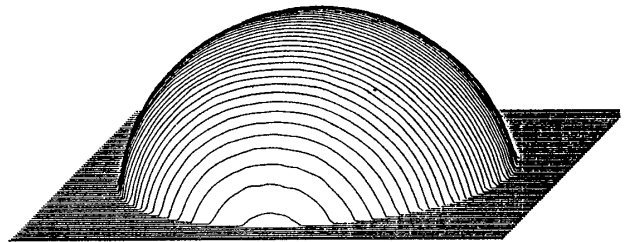


図2-b

参考文献

[1] C.H.Lee & A.Rosenfeld, "Improved Methods of Estimating Shapes from Shading Using the Light Source Coordinate System", Artificial Intelligence, Vol 26, pp125-143(1985)
 [2] K.Ikeuchi & B.K.P.Horn, "Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries", Artificial Intelligence, Vol 17, pp141-184(1981)