

二つの光源を用いた Photometric Stereo

楊 駿 大西 昇 杉江 昇

Jun Yang Noboru Ohnishi Noboru Sugie

名古屋大学工学部

School of Engineering, Nagoya University

Abstract

In photometric stereo using multiple images obtained by varying the position of light sources, surface orientation of an object can be determined only in the area of the object where is illuminated by all light sources. So it is desirable that the number of light sources should be reduced. We propose a method for determining surface orientation along with reflectance, in which only two light sources are used. It is assumed that an object is convex and has a smooth Lambertian surface with locally constant reflectance. Two ambiguity of surface orientation at each point can be efficiently resolved by finding a specular line that is a intersection of both an object and the plane containing two vectors pointing in the direction of light sources, and separate object surface into two region. Simulations carried out under various situations yielded satisfactory results.

1 はじめに

Horn が提案した陰影から物体の形状を求める手法は Shape from Shading と呼ばれる [1]。物体表面の反射特性を仮定し、物体形状や、光源の照明を制限すると、物体表面の勾配と、物体表面の明るさおよび、入射光線との関係は簡単な式で表わすことができる。そして、物体表面の滑らかなさを拘束条件にして、表面の明るさから物体形状を復元することができる。しかし、実画像の場合、Shape from Shading の方法は必しもうまくいかない。例えば、ノイズとか、物体表面反射特性の仮定からのずれとか、データの精度などの原因で、復元精度が非常に悪くなり、復元できないこともある。さらに、解くべき方程式が非線形であるのは大きな問題である。

そこで、問題を簡単にするため、色々な条件を加えたり、制限したりする。例えば、光源の数を増やすとか、光源は平行光線を使用するとか、物体形状を制限するとか、物体表面の反射特性を制限したりする。Woodham の提案した Photometric Stereo 法 [2] は、1つの固定したカメラと3つの異なる方向からの光源でとった三枚の画像

から、物体の表面勾配と相対的奥行を決める方法である。この方法では、方程式が線形方程式となり、表面の勾配と反射率が得られる。実際の測定は、均一の near-Lambertian の表面の場合、特に滑らかな表面の領域で、精確な結果が得られる。しかし、物体形状を復元できる部分は3つの光源全てで照明される領域に限定されるので、用いる光源の数が多くなるほど物体の復元できない部分が多くなる。

本報告では、光源の数を減らして、2つの光源だけを用いる、Photometric Stereo 法で、二枚の画像から物体形状を復元し、物体表面反射率を推定する方法を提案し、シミュレーション実験の結果についても述べる。

2 物体形状復元の方法

本研究では、次のような仮定を設ける。

[仮定 1] 対象物体は Lambertian 特性 (拡散反射) を持つ滑らかな単一の凸面体である。

[仮定 2] 光源からの光は平行光線とする。

2つの光源のベクトルはそれぞれ

$$\vec{S}_1 = (x_{s1}, y_{s1}, z_{s1})$$

$$\vec{S}_2 = (x_{s2}, y_{s2}, z_{s2})$$

で、ユニットベクトル

$$|\vec{S}_1| = 1$$

$$|\vec{S}_2| = 1$$

とする。物体表面の点 (x, y) の法線ベクトルは

$$\vec{N}(x, y) = (n_x, n_y, n_z)$$

で、ユニットベクトル

$$|\vec{N}| = 1 \quad (1)$$

とする。光源 \vec{S}_1, \vec{S}_2 それぞれで照明した時の物体表面上の点 (x, y) での明るさを I_1, I_2 とする。

物体表面が Lambertian であるので、物体表面にある点の明るさは見る方向に関わらず、光源のベクトルと物体表面の法線ベクトルの内積に比例する。即ち、

$$I = \rho(\vec{S}, \vec{N}) \quad (2)$$

ここで (\vec{S}, \vec{N}) は光源のベクトル \vec{S} と物体表面の法線ベクトル \vec{N} の内積を表わす。 ρ は物体表面の反射率である。二枚の画像から次の2つの等式が得られる。

$$\begin{aligned} I_1 &= \rho(\vec{S}_1, \vec{N}) \\ I_2 &= \rho(\vec{S}_2, \vec{N}) \end{aligned} \quad (3)$$

物体表面の法線ベクトル \vec{N} がユニットベクトルであるという条件を加えると、2次方程式が得られる。ここで、未知数は $\vec{N} = (n_x, n_y, n_z)$ の n_x, n_y, n_z と反射率 ρ の四つであるが、方程式は式(1)と(3)の計三つしかない。 ρ が既知の場合、2次方程式となり、2つの根の内のどちらかが解となる。一方、 ρ が未知の場合、式の数より未知数が多いが、“分界線”(2.1で述べる)の存在条件を利用することで解が得られる。

以下で、物体表面の反射率が

- 1) 既知の場合
- 2) 反射率が一樣で未知の場合
- 3) 反射率が幾つかの領域で一様で未知の場合のそれぞれについて解の決め方を述べる。

2.1 反射率既知の場合

反射率が既知の場合、方程式の未知数が n_x, n_y, n_z の3つで、二次方程式も3つあるので、方程式から2つの根 $(a \pm \sqrt{b})$ が得られる。この方程式の2つの根の中のどちらが真のものかが問題である。

まず、方程式の2つの根の関係について調べる。図1の Reflectance Map に示したように、方程式の2つの根(図1中の n_1, n_2) は等放射輝度曲線の交点である。二本の曲線が接する場合、

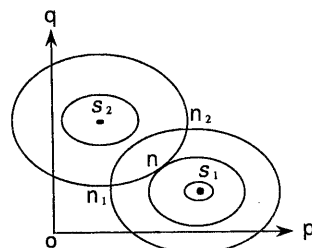


図1 二つの光源に対応した Reflectance Map

方程式の根は重根となる。三次元空間で言えば、図2で示したように、物体表面が Lambertian で

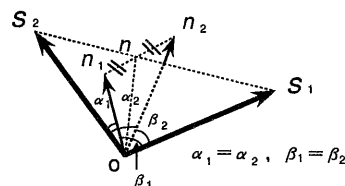


図2 方程式の二つの解の関係

あるので、式(2)により、明るさは (\vec{S}_i, \vec{N}) (\vec{S}_i と \vec{N} の内積) に比例する。 \vec{S}_i, \vec{N} はユニットベクトルであるので、明るさは光源ベクトル \vec{S}_i と法線ベクトル \vec{N} で構成される角度の COS 値に比例する。図2に示したように、二本の法線ベクトル n_1, n_2 が2つの光源ベクトル \vec{S}_1, \vec{S}_2 で構成される平面に対して対称であれば、各法線ベクトルと光源ベクトルで構成される角度が同じである。即ち、方程式の2つの根は2つの光源ベクトルで構成される平面に対称な2つのベクトルに対応する。2つのベクトルがその平面上にある場合、2つのベクトルは一致し、方程式の2つの根が重根になる。以上の解析から、次の結論

が得られた。

●方程式の2つの根は Reflectance Map の2本の曲線の交点と対応する。曲線が接する場合、方程式の根が重根になる。

●方程式の2つの根は2つの光源ベクトルで構成される平面に対称な2つのベクトルに対応する。2つのベクトルが2つの光源ベクトルで構成される平面上にある場合、方程式の根が重根になる。

物体表面が滑らかであるので、方程式の根が重根となる点の近傍に、重根になる点が必ず存在する。そして、画像中で重根を持つ画素は線分を構成する。この線は物体表面を2つの領域に分ける(図3)。各領域内部の各画素での方程式の根は

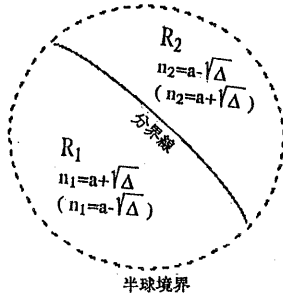


図3 半球面で求めた分界線

すべて $a + \sqrt{\delta}$ (あるいは $a - \sqrt{\delta}$) の形になる。そして一方の領域の根が $a + \sqrt{\delta}$ の形なら、他方の領域の根は $a - \sqrt{\delta}$ の根になる。よって、この線を”分界線”と呼ぶ。

”分界線”で物体表面を2つの領域に分けて、方程式の根を分類したが、問題の解にはまだ次の4通りがある。 $(a + \sqrt{\delta}, a + \sqrt{\delta})$ 、 $(a + \sqrt{\delta}, a - \sqrt{\delta})$ 、 $(a - \sqrt{\delta}, a + \sqrt{\delta})$ 、 $(a - \sqrt{\delta}, a - \sqrt{\delta})$ 。そこで、物体が凸面体という条件から、次の式[3]を用いて、

$$cnv(x, x') = \frac{(\vec{N}, -\vec{r}) + |(\vec{N}, -\vec{r})|}{2 \cdot |(\vec{N}, \vec{r})|} \cdot \frac{(\vec{N}', \vec{r}) + |(\vec{N}', \vec{r})|}{2 \cdot |(\vec{N}', \vec{r})|} \quad (4)$$

物体表面が凸になる正解を決める。図4のように、 x, x' は物体表面の2つの点で、 \vec{r} は点 x から点 x' までのベクトルである。 \vec{N}, \vec{N}' はそれぞれ点 x, x' での法線ベクトルである。物体表面が

凸になるときに式(4)の値が1になり、凹になるときに0になる。従来、物体が凸という条件は物体表面が二次以上の相互反射を受けないだけの意味であるが、本研究では、方程式の解を決める条件として使用する。

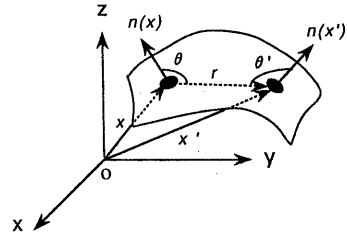


図4 凸曲面上の二つの法線ベクトル

最後に、求めた物体表面の法線ベクトルを積分して、物体形状を復元ができる。積分式は次のようである。

$$h = h_0 + \int_{(x_0, y_0)}^{(x, y)} \left(\frac{-n_x}{n_z} dx + \frac{-n_y}{n_z} dy \right) \quad (5)$$

以上整理すると：

step1 各画素について、2次方程式を解く。

その方程式の重根点を取り出し、”分界線”を求める。

step2 つぎに、”分界線”を用いて、方程式の根を分類して、物体表面の凹凸で正解を決める。

step3 最後に、求めた物体表面の法線ベクトルを積分し、物体形状を復元する。

2.2 反射率未知の場合

物体表面全体にわたって反射率が同じであると仮定する。反射率を求めれば、2.1の反射率既知の場合と同様に処理できる。問題は反射率をどう決めるかである。式(2)を変形すると、

$$I/\rho = (\vec{S}, \vec{N}) \quad (6)$$

になる。推定値が真値と同じであれば、2.1のようにうまくいく。もし、反射率の推定値が間違っていたら、どうなるだろう。推定した反射率 ρ が反射率の真値 ρ_0 より大きい場合、式(6)より、画像の明るさが暗くなることに相当する。図5の破線で示したように、Reflectance Map の

楕円（曲線）が大きくなり、本来接する点が2つの交点になってしまう。即ち、方程式の根は、本来の重根点がなくなって、2つの実数根になってしまう。逆に、推定した反射率 ρ が反射率の真値 ρ_0 より小さい場合、画像の明るさが明るくな

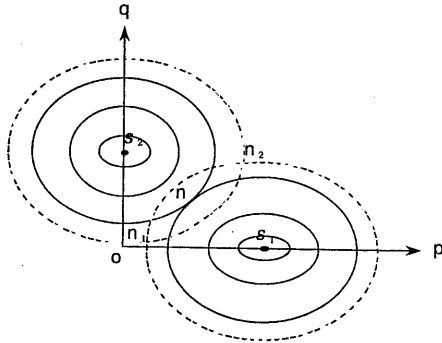


図5 $\rho > \rho_0$ 時の反射マップの影響

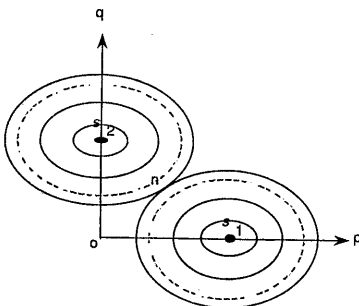


図6 $\rho < \rho_0$ 時の反射マップの影響

ることに相当する。図6の破線で示したように、Reflectance Mapの楕円（曲線）が小さくなり、本来接する点がなくなって、2本線が離れてしまう。即ち、方程式の根は、本来の重根点が2つの虚数根になってしまう。

以上の解析により、物体表面の特定の部分（“分界線”上）での方程式の根の性質から、反射率を推定することができる。反射率の推定ができれば、2.1の方法で物体形状を復元することができる。反射率の推定手順は次のとおりである。

step1 まず、 $\rho = 0.5, n = 1$ として、方程式を解く。

step2 方程式の根 $(a \pm \sqrt{\delta})$ の δ の最小値が正なら、 $\rho \leftarrow \rho - 1/2^{n+1}$ 。負なら、 $\rho \leftarrow \rho + 1/2^{n+1}$ 。ゼロなら、 ρ を決定

し、ループを終了する。（ n はループの回数）

step3 $n \leftarrow n + 1$ 、step1へ。

2.3 反射率が領域毎に異なり、未知の場合

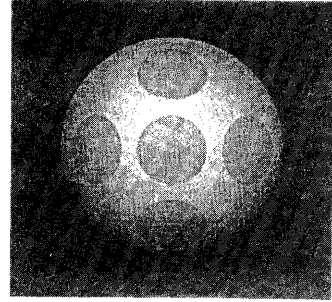


図7 模様を含む半球のシミュレーションした画像

図7のように物体表面にいくつかのブロックがある。各ブロックでの反射率は一定であるが、ブロック毎に反射率が異なる。物体表面が滑らかなので、ブロックの境界線の近傍の法線ベクトルがほぼ同じであるので、その画素の明るさは反射率に比例する。即ち、

$$I_1/I_2 = \rho_1/\rho_2 \quad (7)$$

I_1 はブロック1の画素の明るさで、 ρ_1 はブロック1の反射率である。 I_2 はブロック2の画素の明るさで、 ρ_2 はブロック2の反射率である。各ブロックの領域を決めて、隣接するブロックの反射率の比を計算できるので、それを用いて、2.2の方法で各ブロックでの反射率を推定することができ、物体形状を復元することができる。

3 シミュレーション

計算機で合成した画像を用いてシミュレーションを行なった。画像の大きさは $256 * 240$ で、256階調である。対象物体は半球である。計算を簡単にするため、2つの光源をそれぞれ $\vec{S}_1 = (x_{s1}, 0, z_{s1})$ 、と $\vec{S}_2 = (0, y_{s2}, z_{s2})$ とし、 $x_{s1} = y_{s2}, z_{s1} = z_{s2}$ である。カメラを z 軸 $(0, 0, z_c)$ に設定した。ノイズがない場合、ノイズ（ランダムノイズ）がある場合、及び模様がある場合につい

て、2つの光源それぞれでの画像 I_1, I_2 を作成した。その2枚の画像を用いて、物体表面の反射率を推定し、物体形状を復元した。

3.1 量子化誤差の影響

2の解析から、ノイズがない場合、“分界線”がきれいな一本線になるはずだが、実際に計算した結果は図8に示すように、一本線ではなく、幅がある。これは量子化誤差の影響である。そこ

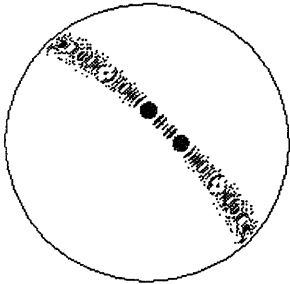


図8 量子化誤差の“分界線”への影響

で、Y軸（画像中の縦方向）での幅の中心を、すべてのX座標値について求める。そして、得られた点が8近傍の意味で連結しない場合、連結するように補正をして、幅が画素1のきれいな“分界線”を求めた。この“分界線”を用いて、物体形状を正確に復元できた。

3.2 ランダムノイズの影響

2の解析により、ノイズがない場合、反射率の推定がうまくできた。しかし、実画像には種々の原因によるノイズが含まれる。ノイズが含まれる場合、“分界線”上の画像での方程式の根は必ずしも重根とはならず、二つの実数根になったり、虚数根になったりする。その結果、反射率の推定が難しくなる。そこで考えたのは、統計的な方法で、“分界線”上の全ての画素での方程式の解の平均は重根になるという考えである。即ち、方程式の根 $(a \pm \sqrt{\delta})$ は、その δ の平均が $\delta = 0$ になるというものである。

もちろん、ノイズがある場合、画素の明るさの平均をとり、スムージングをする。ここで注意しなければならないことは、物体の画素と背景の画

表1: 推定した反射率と復元誤差

ノイズ	0%	5%	10%	15%
ρ_0 真値	0.503	0.503	0.503	0.503
ρ 推定値	0.504	0.503	0.501	0.498
ρ の誤差	0.2%	0.1%	0.4%	1.0%
相対奥行の最大誤差	3.0%	6.9%	10%	17%

表2: 各ブロックでの反射率

ブロック	1	2	3	4	5	6
ρ_0 真値	0.503	0.402	0.402	0.402	0.402	0.402
ρ 推定値	0.503	0.406	0.406	0.404	0.407	0.407
ρ の誤差	0.0%	0.9%	0.9%	0.5%	1.1%	1.1%

素との平均をしてはいけないことである。

以上の処理の結果を表1に示す。表中のノイズの%はノイズの最大値の256に対する割合を表す。復元した半球の形状を図9に示す。

図10は復元した結果の誤差である。このように、物体表面の反射率の推定は、ノイズに対し

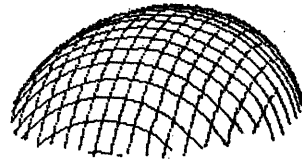


図9 10%のノイズがある場合復元した半球

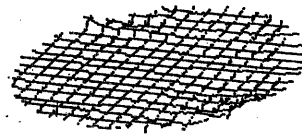


図10 10%のノイズがある場合復元した半球の誤差

て、非常にロバストである。

3.3 模様がある場合

反射率がブロック毎に異なり、模様がある場合、まず2次微分して、反射率が違うブロック間の境界線を抽出する。そして、各ブロックにラベルをつけて、分けれるようにする。ついで、隣接する2つのブロックの反射率の比を求める。最後に、2.2で述べた方法で反射率を推定し、物体形状を復元した。隣接するブロックの反射率の比を求める時、物体表面が平面ではないので、各画素

の明るさが変化する。よって、一つの画素で求めた反射率の比は誤差が大きいので、ブロックの境界線での全ての画素を用いて、反射率の比を求めた。推定した反射率を表2に示す。入力画像は図7のように模様がある半球の画像である。

図11は復元した半球である。

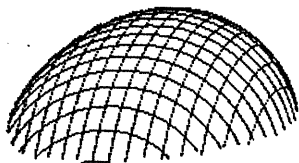


図11 模様がある場合復元した半球

4 考察

3のシミュレーションの結果を見ると、物体表面の反射率の推定は良い結果が得られたが、物体形状の復元はまだ誤差が大きい。原因としては、“分界線”を精確に抽出できないことがあげられる。特にノイズがある場合、本研究では、“分界線”をY軸方向の幅の midpoint として求めたが、本来は“分界線”に垂直な方向での幅の midpoint を求めるべきである。このことが誤差の原因の一つと言える。復元された相対奥行の誤差が大きいなもう一つ原因は、積分による誤差の累積である。求めた法線ベクトルの誤差が0.1%であれば、百点を積分したら、10%になるかも知れない。

本研究では、模様がある場合の画像にはまだノイズがない。ノイズがある場合、境界線の抽出が難しくなる。今後、それを考えなければならない。

5 おわりに

以上、2つの光源を用いた Photometric Stereo 法を提案した。その方法を用いて、表面が Lambertian で、滑らかな単一凸物体を対象にして、反射率が一定、或は幾つかのブロック毎に反射率が異なる場合について、物体表面の反射率を推定し、物体形状を復元する方法を述べた。シミュレーションでは、良好な結果が得られ、2つ

の光源を用いた Photometric Stereo 法の有効性を示した。

本研究の条件設定は、物体表面が滑らかで、Lambertian であるという条件であるが、今後、実画像の場合、物体が多面体である場合、物体表面反射特性が鏡面反射も含む場合、多数(あるいは凹)物体のように相互反射のある場合などについて、考察するつもりである。

6 謝辞

本研究は、文部省科学研究費重点領域研究「脳の高次機能」(#03251105)によるものである。

参考文献

- [1] B.K.P. Horn: "Robot Vision", Cambridge, MA, MIT Press (1986).
- [2] R.J. Woodham: "Reflectance Map Techniques for Analyzing Surface Defects in Metal Casting.", M.I.T. AI-TR 457, (1987.6)
- [3] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, & T. Kanade: "Shape from Interreflections", Proc. IEEE Computer Society, Third International Conference on Computer Vision(Osaka), pp. 1-11, (1990.12).