

# 線画解釈を用いた 相互反射のある場合の Shape from Shading

岡本 吉郎 大西 昇 杉江 昇  
Yoshiro Okamoto Noboru Ohnishi Noboru Sugie  
名古屋大学 工学部  
School of Engineering, Nagoya University

## 概要

一枚の濃淡画像を使って物体の3次元形状を復元する研究は、コンピュータビジョンの1手法として多くの研究がなされているが、従来は、単一の凸物体を主に対象としていた。しかし、対象が凹物体や複数の物体の場合には、相互反射が存在する。このとき、画像輝度は、その表面だけでなく、他の面の法線方向の影響を受ける。そのため、従来の手法では、画像輝度の相互反射成分は誤推定の原因となっている。そこで本研究では、相互反射の存在する単一の画像から、線画解釈の情報を用いて、物体の勾配を求める手法を提案する。

## 1 はじめに

一枚の濃淡画像を使って物体の3次元形状を復元する研究は、コンピュータビジョンの1手法として多くの研究がなされている。しかし、物体表面の勾配は2つの自由度があるのに対して、拘束条件としては、各画素で一つの画像放射輝度方程式を持つだけである。

Hornは、画像放射輝度方程式を、滑らかさの制約を用いて逐次的に解いて、勾配を求めた[1]。しかしこの方法は、勾配を求めるのに誤差が伝播するので、ノイズに弱い。また、IkeuchiとHornによって、外縁線や滑らかさなどの他の拘束条件を用いた反復推定法などが提案されている[2]。

これらの方法は、画像輝度がその部分の表面法線方向によって決定されると仮定している。つまり、これらの手法の適用できる状況は、光源の位置が既知としたり、簡単化のために画像の撮像系が正射影であったり、物体の表面反射特性がLambertian(乱反射性)であるなどの制約を設けることが多い。さらに、対象とする物体として単一の凸物体を主に使用している。

しかし、対象とする物体が凹物体や複数の物体の場合には、相互反射が存在する。これは、面と面との勾配と相対的な位置関係によって発生し、画像輝度はより明るくなる。反射率が大きい場合

や、鏡面反射特性を持つ場合には、画像輝度の相互反射成分の大きさは無視できない。そのため、従来の手法では、相互反射成分は誤推定の原因となっている。しかし最近では、フォトメトリックステレオを用いて、相互反射の存在する場合の物体に対して、形状を復元する方法が提案されている[3]。だが、これは、物体の勾配を求めるのに、3枚以上の画像を必要とする。

そこで本研究では、相互反射の存在する一枚の画像から、線画解釈を付加的な拘束条件として、物体の勾配を求める手法を提案する。

## 2 凸多面体の形状復元方法

### 2.1 画像輝度 [3]

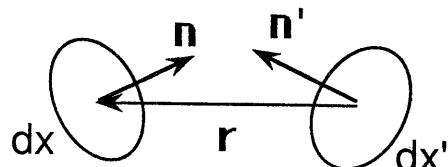


図1 相互反射の生成

物体の表面反射特性がLambertianであるとすると、観測される明るさは、面の法線と光源の方向ベクトルとの余弦に比例する。

放射照度 ( irradiance )  $E(x)$  と放射輝度 ( radiance )  $L(x)$  は次式で表される。

$$L(x) = \frac{\rho(x)}{\pi} E(x) \quad (1)$$

図 1 に示す状況を考える。ここで、 $dx, dx'$  は、それぞれ微小面素  $x, x'$  の面積であり、 $n$  と  $n'$  は、それぞれの単位法線ベクトルである。また、 $r$  は、面素  $x'$  の中心から面素  $x$  へのベクトルである。面素  $x'$  による面素  $x$  の放射照度は、

$$E(x) = \left[ \frac{[n \cdot (-r)][n' \cdot r]View(x, x')}{[r \cdot r]^2} \right] L(x') dx' \quad (2)$$

ここで、 $View(x, x')$  を、次のように定義する。

$$View(x, x') = \frac{n \cdot (-r) + |n \cdot (-r)|}{2|n \cdot (-r)|} \cdot \frac{n' \cdot r + |n' \cdot r|}{2|n' \cdot r|} \quad (3)$$

$x$  と  $x'$  が互いに見えるときは、この関数の値は 1 となるが、それ以外では値は零となる。

以上の式より、面素  $x'$  による面素  $x$  の放射輝度は次式で表される。

$$L(x) = \frac{\rho(x)}{\pi} \left[ \frac{[n \cdot (-r)][n' \cdot r]View(x, x')}{[r \cdot r]^2} \right] L(x') dx' \quad (4)$$

$$L(x) = \frac{\rho(x)}{\pi} K(x, x') L(x') dx' \quad (5)$$

ここで、 $K(x, x')$  は、以下で表される。

$$K(x, x') = \left[ \frac{[n \cdot (-r)][n' \cdot r]View(x, x')}{[r \cdot r]^2} \right] \quad (6)$$

よって、観測される画像の輝度は、次式で表される。つまり、面素  $x$  での放射輝度は、光源による放射輝度と他の面素による放射輝度の総量の和である。

$$L(x) = L_s(x) + \frac{\rho(x)}{\pi} \int K(x, x') L(x') dx' \quad (7)$$

## 2.2 線画解釈と勾配空間による面勾配の決定

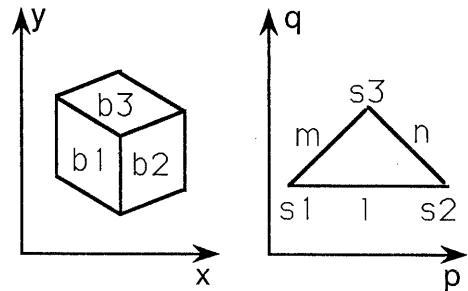


図 2 画像空間と勾配空間

よく知られているように、線にラベルを付けることによって、線画で描かれた多面体やあるクラスの多面体を解釈することができる。

しかし、このようなラベル付けによる線画の解釈は、描かれている多面体が存在するための必要条件であって十分条件でない。

ここで勾配空間を用いて、ラベル付けされた線画が存在可能かどうかを調べることができる [6]。図 2 のように、面の法線方向を 2 つのパラメータで表すことによって、1 つの平面は、勾配空間で 1 つの点で示される。また、画像上の 2 つの平面が交差してできる稜線は、勾配空間ではそれらの平面を示す 2 つの点を結ぶ線分に対応する。このとき、稜線が凸の時は画像上の平面の位置関係は勾配空間でも保たれるが、凹の場合は逆になる。そして、画像上の稜線と対応する勾配空間での線分は直交することが知られている。この条件を満たすように、各稜線に対応する線分を勾配空間に作図していくことで、この多面体が存在可能かどうかを調べることができる。ところが、この方法も十分条件でないために、存在しない多面体をすべて取り除くことはできない。しかし、凸物体で、3 つ以上の面の交わりによって生じる頂点のまわりでは、面の画像輝度からその勾配を求める方法が知られている [4]。以下では、別の方針を提案する。

3 面頂点では、各平面の勾配 ( $p, q$ ) の合計 6 つの未知数があるのでに対して、拘束条件は、各平面について、画像放射輝度方程式  $E(x, y) =$

$R(p, q)$  が 3 つと線画からの拘束条件である  $(q_i - q_j) = n(p_i - p_j)$  が 3 つある。しかし、線画の拘束条件は線形方程式であるが、画像放射輝度方程式は一般に 2 次方程式であるので、各平面の勾配は解析的に求めることができない。そこで、反射率地図から、探索的に求める方法を用いる。

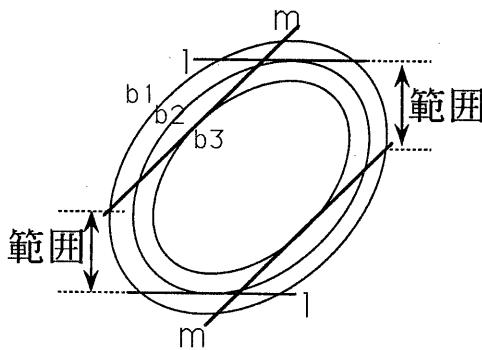


図 3 反射率地図の探索範囲

図 3 を用いてその方法を説明する。三面頂点に注目し、頂点をなす平面の画像輝度を比較する。ここで、平面  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  の画像輝度をそれぞれ  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  とし、一般性を失うことなく、 $b_1 \leq b_2 \leq b_3$  であるものとする。

画像中の  $s_1$  と  $s_2$ 、 $s_1$  と  $s_3$ 、 $s_2$  と  $s_3$  が接する稜線から、それぞれ勾配空間で対応する線分の傾き、 $l$ 、 $m$ 、 $n$  を得る。

傾き  $l$  の直線が、 $b_2$  の等輝度曲線と交点を持つ範囲（解の存在範囲）を求める。同様に、傾き  $m$  と  $b_3$  の等輝度曲線の場合に対しても求める。

以上で求められた 2 つに共通な範囲として、平面  $s_1$  の勾配の存在可能な範囲が決定される。よって、この範囲についてのみ探索を行なえばよい。

次に、このように決定された  $s_1$  の勾配の存在可能な範囲の上限、下限とその中間の 3 点から傾き  $l$  と傾き  $m$  の直線をひく。そして、傾き  $l$  の直線と等輝度曲線  $b_2$ 、傾き  $m$  の直線と等輝度曲線  $b_3$  の交点をそれぞれ求める。上限点、中間点、下限点に対して、この 2 つの交点を結ぶ線分の傾きを計算する。

ところで、平面 2 と平面 3 の勾配空間上の平面 2、平面 3 の点を結んだ線分の傾きは、線画の拘

束条件から、傾き  $n$  でなければならない。よって傾き  $n$  が、上限点で求めた傾きと中間点で求めた傾きの値の間に存在するならば、この範囲に平面  $s_1$  の勾配は存在可能である。また同様に、下限点で求めた傾きと中間点で求めた傾きの値の間に存在可能かどうかかも調べる。

このようにして、 $s_1$  の勾配の存在可能範囲を減らすことができる。以上の操作を繰り返して、最終的に、 $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  の勾配が得られる。

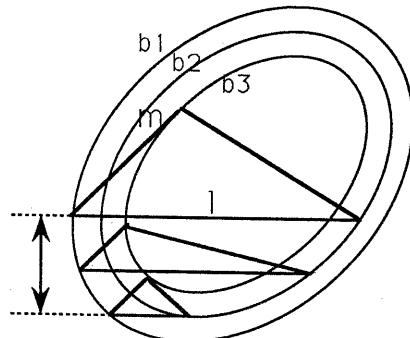


図 4 勾配の決定

### 3 相互反射を考慮した多面体の形状復元

#### 3.1 方法 1

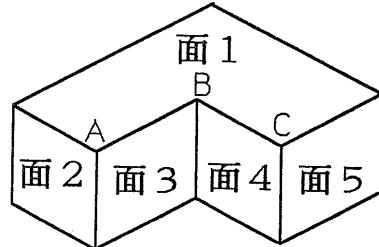


図 5 多面体 (例 1)

一例として、図 5 に示すような凹多面体を対象とする。

まず、頂点 A に注目し、前章で示したような探索範囲の中で平面 1、2、3 の勾配を決定する。ただし、相互反射成分の含まれる平面では、その平面中で最も小さい輝度値（相互反射量最小）を

その平面の輝度として用いる。

頂点Bでは、それぞれ、線画中の各稜線に直交する傾きを持ち、勾配空間で平面1、平面3に対応する点を通る直線の交点から、平面4の勾配を求めることができる。

続く頂点Cにおいても、同様にして、平面1、平面4の勾配を用いて、平面5の勾配を求めることができる。

ここで、一通り各平面の勾配が求められたが、これらは誤った推定である可能性がある。それは、頂点Aで勾配を求めるときに、相互反射成分を含む輝度値を用いたからである。その誤差は、頂点B、頂点Cで計算するときにも影響する。その結果として勾配が誤りであるならば、一次反射による輝度を計算しても、平面5で、画像輝度値とは一致しない。逆に、得られた勾配が正しければ、画像輝度値と一致するはずである。このことにより、勾配の推定値が正しいかどうか判定する。推定が誤りであるならば、平面3の輝度値を減らして、再び計算する。以上の手順により、正しい勾配を求めることができる。図6に、フローチャートで、手順を示す。

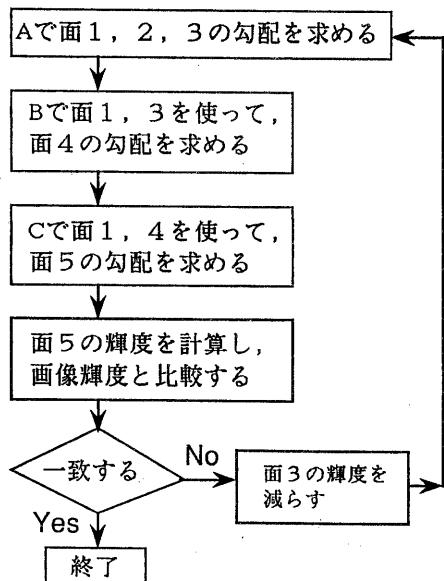


図6 形状復元手順

別な例として、図7(a)に示すような凹多面体では、一つの頂点に、相互反射成分の影響を受けている2つの平面を含む。そのため、一つの頂点で勾配を求めたときの誤差は、どちらの平面の相互反射成分から影響されたのかは特定できない。

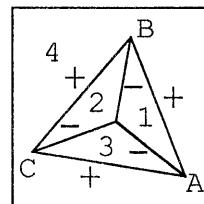


図7 (a) 例2

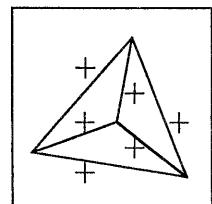


図7 (b) 例3

そこで例えばまず、平面1に注目し、平面1を含む頂点A、Bで、勾配を求める。しかし、この2つの頂点で計算された勾配は、平面1の相互反射成分により、誤差を含むと考えられる。

そのため、誤差があれば、勾配から各平面の一次反射による輝度を計算したときに、平面4では画像輝度と一致しない。そこで、輝度の誤差が最小になるように平面1の画像輝度を減らす。同様に、平面2、3に対しても、行なう。しかし、このようにして求められた輝度であるが、一つの頂点で勾配を求めたときには、もう一方の平面の相互反射成分の影響を受けているので、さらにこの手順を繰り返し、相互反射の影響を減らすことができる。

図7(b)は、どの頂点においても、3つの平面の全てに、相互反射成分を含む。これらの例では、どのような手順で、相互反射成分を減らしていくかが、課題である。解の一意性やlocal minimumの有無についての検討も必要である。

### 3.2 方法2

各頂点で、相互反射成分のないものとして、逐次、関連する面の勾配を決定する。そして、全ての勾配を決定し終わったら、その値を用いて、相互反射量を求める。その分を、その頂点周りの面

の画像輝度から減らし、得られた輝度を用いて、再び、各面の勾配を求める。このような操作を繰り返し、勾配の値が収束するまで続ける。以上の手順を図 8 に示す。

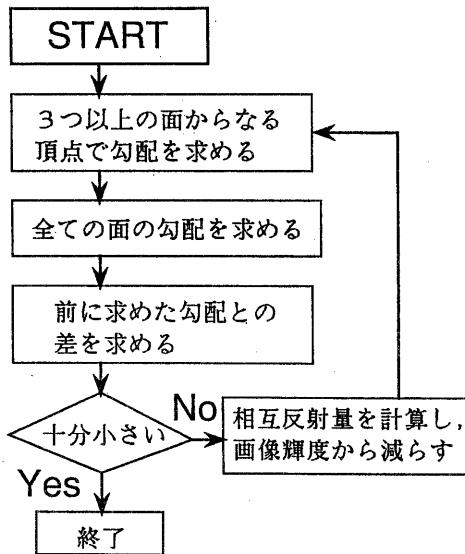


図 8 方法 2 の手順

### 3.3 複数の物体が存在する場合

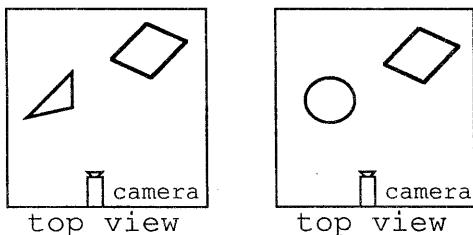


図 9 複数物体からなるシーンの top view  
(a) 距離推定の可能な場合、(b) 不可能な場合

複数の物体が存在する場合にも、相互反射は発生する。しかし、物体の勾配が求められるならば、その形状から、相互反射量を計算することができる。この相互反射量より、物体間の距離を求めることができる。ただし、これは、画像上

に見えない面からの相互反射がある場合には、この方法は適用できない。図 9 (a) は、この方法が適用できる場合であるが、図 9 (b) では適用できない。

### 4 シミュレーション実験結果

光源の位置は既知で、画像撮像系は正射影を仮定する。また、表面反射特性も Lambertian とし、反射率も一様であり、既知であるとする。画像は、ワークステーションにより作成した 256 階調の濃淡画像を使用した。

現在方法 1 についてのみ、シミュレーションを行なっている。

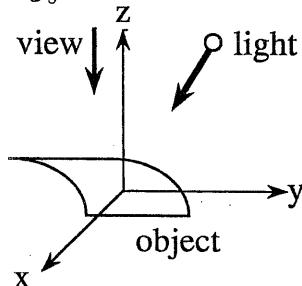


図 10 画像撮像系

光源方向は、 $(x,y,z)$  座標で、 $(10,15,100)$  方向に設定した。

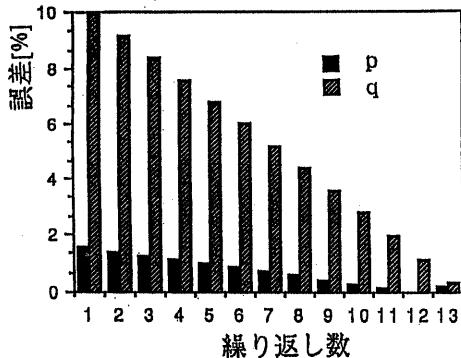
各面の画像輝度は、面 1、2、3、4、5 でそれぞれ、159、78、197 以上、159、109 以上、185 であった。そのうち、相互反射量は、平面 3 で 12 以上、平面 4 で 31 以上であった。そして、13 回の繰り返しで終了した。この結果を表 1、2 に示す。

表 1: 頂点 A の勾配値

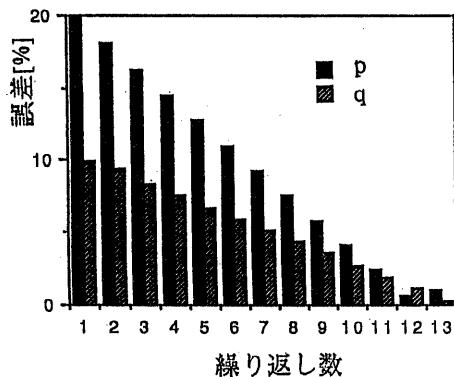
	面 1 (p,q)	面 2 (p,q)	面 3 (p,q)
真値	(0.000, 1.732)	(-2.000, -0.577)	(0.667, -0.577)
初期値	(-0.128, 1.687)	(-2.030, -0.520)	(0.535, -0.520)
最終値	(-0.016, 1.722)	(-1.997, -0.576)	(0.673, -0.576)

表 2: 頂点 C の勾配値

	面 1 (p,q)	面 4 (p,q)	面 5 (p,q)
真値	(0.000, 1.732)	(-2.000, -0.577)	(0.667, -0.577)
初期値	(-0.128, 1.687)	(-2.030, -0.520)	(0.535, -0.520)
最終値	(-0.016, 1.722)	(-1.997, -0.576)	(0.673, -0.576)



グラフ 1 面 2 の勾配の誤差



グラフ 2 面 3 の勾配の誤差

## 5 おわりに

単一の濃淡画像から線画解釈による拘束条件を用いて、相互反射の存在する凹多面体に対して形状復元する方法を提案した。方法 1 については一例につき、その有効性を確かめた。

これまでに、凹多面体に対して、形状復元を行なったが、今後、凹曲面体に対しても、この手法を応用して形状を復元する予定である [5]。今回は、相互反射の存在する面をあらかじめ特定して実験を行なったが、今後は、線画から選択できるようにする必要がある。

また複数の物体が存在する場合では、表面の勾配を求めるだけでなく、逆に得られた形状から相互反射量を計算することによって物体間の距離も

求めることができる。

末筆ながら、本研究に対して日頃様々な御指導、御助言を頂いている名古屋大学杉江研究室の皆様に感謝致します。なお、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。

## 参考文献

- [1] B.K.P.Horn:  
"Obtaining Shape from Shading Information", The Psychology of Computer Vision, P.H.Winston ed., McGraw-Hill, pp.392-421 (1980)
- [2] K.Ikeuchi,B.K.P.Horn:  
"Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries", Artificial Intelligence, Vol.17, No.1-3, pp.141-184 (1981)
- [3] S.K.Nayar,K.Ikeuchi,T.Kanade:  
"Shape from Interreflections", Proc.IEEE Computer Society, Third International Conference on Computer Vision(Osaka) pp.2-11 (1990)
- [4] K.Sugihara :  
"An Algebraic Approach to Shape from Image Problems", Artificial Intelligence, Vo23, pp.59-95 (1984)
- [5] Jitendra Malik and Dror Maydan:  
"Recovering Three Dimensional Shape from a Single Image of Curved Objects", IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (1989) Vol.11, No.6
- [6] 白井良明:  
"コンピュータビジョン", 昭晃堂 (1980)