

フォトメトリックステレオ法による物体形状の再構築

水永雄介*・大西洋**・徳島尚生**
原重臣**・堂菌浩**・野口義夫**

Reconstruction of the Object Shape by Photometric Stereo Method

By

Y.MIZUNAGA, H.ONISHI, H.TOKUSHIMA,
S.HARA, H.DOZONO, Y.NOGUCHI

Abstract: The purpose of this study is to make an automated system for recovering an object shape from three images taken under different lighting directions. The recovering method is called a photometric stereo method and determines orientations of surface patches based on three image irradiance equations, under assuming the surfaces being an ideal Lambertian. The automated system can recover the object shape by only touching a start button and reconstruct the shape viewed from an arbitrary direction.

Key words: photometric stereo method, Recovery of shape, planar patch, Lambertian

1. はじめに

画像の理解は、対象が2次元であるか3次元であるかにより難しさが異なる。対象を3次元的に認識する際には、見え方の変化、明るさの分布の変化、物体の重なりによるものなど、様々な要因が影響する。まず、見え方の変化とは、3次元の世界を2次元の画像に投影した時に、1次元の情報を失うことによる。次に、明るさの分布の変化とは、画像上での明るさの分布が、対象のみでなく照明環境も含んだ情報になっていることによる。そして、物体の重なりでは、実際に物体が重なっていても斜めから見ると重なって見えることが多い。2次元の対象物では、文字や図形などがある。しかし、3次元の対象でも、いつも同じ方向から見れば、2次元的な対象として扱える。この2次元的な認識は、3次元の認識に比べて容易である。視点や照明、対象の置き方の工夫により、2次元の認識から3次元の世界が理解できる。本研究では、明るさ・照明の条件に関わるフォトメトリックステレオ法⁽¹⁾⁽²⁾に注目した。

フォトメトリックステレオ法の具体的な手法では、観測者(カメラ)を固定し、光源の方向を変化させた3つの画像を取得する。画像における対応点の3つの明るさ、その光源方向の情報に基づき、対象物体の表面法線を推測し、対象物体の形状の再構築を行うというものである。

フォトメトリックステレオ法は、カメラを固定し撮影を行うので、視差を生じないという利点がある。しかし、視差が生じないということは、3枚の画像の対応点がまったく同じでなければならない。人間などを対象物体にした場合、3枚の画像を撮影し終えるまで静止していなければならない。小さな振動でカメラや対象物体が動く場合もある。対応点を一致させるためには、光源の切替えをスムーズに行いながら撮影することが大変重要である。そこで、コンピュータ制御により自動で光源を切り替え、画像の取得を行うシステムを構築した。この自動化システムでは画像の取得、物体形状の再構築までをボタン一つで処理できる。再構築した物体形状はワイヤーフレーム表示、あるいはテクスチャマッピングによる立体表示により確認することができる。本研究では、このシステムを利用し物体形状の再構築方法の検討を行った。

2. 実験方法および実験装置

2.1 フォトメトリックステレオ法

ここでは観測者(カメラ)を中心とする座標系を採用し、z軸方向を観測者(カメラ)の方向に固定する。

平成16年5月1日受理

*大学院工学系研究科生体機能システム制御工学専攻

**理工学部電気電子工学科

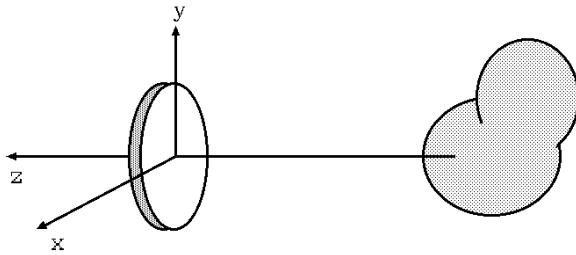


Fig. 1 A surface and the coordinates.

2.1.1 表面法線ベクトル

表面法線ベクトルを, 表面の傾き p と q を用いて表す. ここで,

δx : x 方向の微小変化量,

δy : y 方向の微小変化量,

δz : z 方向の微小変化量,

とおく.

Taylor 級数より, (1)式が得られる.

$$\delta x = \frac{\partial z}{\partial x} \delta x + e, \delta y = \frac{\partial z}{\partial y} \delta y + e \quad (1)$$

ただし e は 2 次微分項以上の量である.

そこで, p と q を,

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (2)$$

で表記する.

表面と平行な x 方向のベクトルと, 表面と平行な y 方向のベクトルは,

$$\mathbf{r}_x = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ p \end{pmatrix}, \mathbf{r}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ q \end{pmatrix} \quad (3)$$

であり, 表面法線ベクトル \mathbf{n} は,

$$\mathbf{n} = \mathbf{r}_x \times \mathbf{r}_y = \begin{pmatrix} -p \\ -q \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

で表される (Fig.2 参照).

表面単位法線ベクトル \mathbf{e}_n は,

$$\mathbf{e}_n = \frac{\mathbf{n}}{\|\mathbf{n}\|} = \frac{1}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \begin{pmatrix} -p \\ -q \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

となる.

2.1.2 反射率地図

反射率地図は, 表面の方向と明るさとの関係を表現することができる. 表面法線ベクトルと光源ベク

トルとの間の交角を θ_i とする.

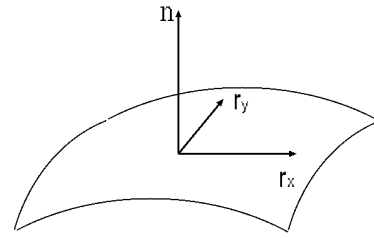


Fig. 2 Unit normal to a surface.

また, 光源方向のベクトルを

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} -p_s \\ -q_s \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

とおく. すると, 反射率地図 $R(p, q)$ は,

$$R(p, q) = \cos \theta_i = \frac{1 + pp_s + qq_s}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + p_s^2 + q_s^2}} \quad (7)$$

で与えられる.

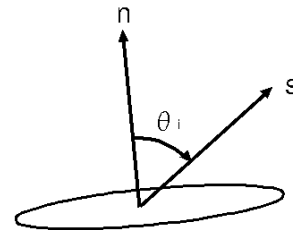


Fig. 3 Light source vector and normal vector to the surface.

2.1.3 像の放射照度方程式

画像の (x, y) 点で, 明るさ $E(x, y)$ (光源からの光を対象物体が再放出した光の量) を測定したとすると, これは光源からの光量に比例する. (x, y) 点での面の勾配 (x 方向の傾き, y 方向の傾き) が (p, q) ならば, その点での光源からの光量は $R(p, q)$ で表される. ここで比例定数を 1 とすると, $E(x, y)$ と $R(p, q)$ の関係式は,

$$E(x, y) = R(p, q) \quad (8)$$

となる. この式が, 像の放射照度方程式 (image irradiance equation) である.

2.1.4 Albedo の決定

Albedo (アルベド) とは, 入射光と反射光との比を表し, ρ で表記する. ρ は理想的な表面と比較して, どれだけ表面から光を反射するかを示し, 場所によって値が異なる. ρ は次のような範囲の値を取る.

$$0 \leq \rho \leq 1 \quad (9)$$

2.1.5 フォトメトリックステレオ法

フォトメトリックステレオ法は、3枚の画像の3つの情報 ($E_1(x, y)$, $E_2(x, y)$, $E_3(x, y)$) から、表面の傾き (p, q) とアルベド ρ を求めることができる。ただし、表面は Lambertian 表面と仮定している。

Lambertian 表面とは、以下の2条件を満たす概念上の表面である⁽¹⁾。

- ・ 物体表面の明るさは、全ての観測方向に関して等しい。
- ・ 全ての入射光を反射する表面。

\mathbf{s} : 単位光源ベクトル, \mathbf{n} : 表面単位法線ベクトルとおくと、

$$\mathbf{s}_i = \frac{1}{\sqrt{1+p_i^2+q_i^2}} \begin{pmatrix} -p_i \\ -q_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (i=1,2,3) \quad (10)$$

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \begin{pmatrix} -p \\ -q \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (12)$$

像の放射照度方程式より、3つの式が与えられる。

$$\begin{cases} E_1 = \rho \mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{n} \\ E_2 = \rho \mathbf{s}_2 \cdot \mathbf{n} \\ E_3 = \rho \mathbf{s}_3 \cdot \mathbf{n} \end{cases} \quad (13)$$

2.2 物体形状の再構築

ここでは、物体形状の再構築方法を述べる。

2.2.1 条件仮定

- (1) 光源方向ベクトルが既知である。
- (2) 対象物体の表面はなめらかである。
- (3) 光源は遠方光源、平行光線照明、直交投影である。
- (4) 対象物体の表面は、Lambertian 表面である。

2.2.2 自動化システム

フォトメトリックステレオ法で物体形状の再構築を行う場合、通常暗室などが必要になるが、本システムでは暗箱 (H: 470mm, W: 900mm, D: 570mm) を使用した。カメラには USB カメラ (Logicool QV-4000) を使用し、制御コンピュータ (PC) にはノートパソコン (DELL INSPIRON 2650), OS には Windows2000 を使用した。ソフトウェアは VisualC++6.0, DirectX, OpenGL を使用して開発した。光源制御装置とのインターフェースは、PC のパラレルポートを使用し、光

源 (50W 白色電球) をリレー等で制御する回路を作成した。ソフトウェア上で任意に光源を制御することができ、画像を確認後、スタートボタンを押すことによって、光源を順番に切り替えながら画像を取得し、フォトメトリックステレオ法によって再構築されたデータが出力される。このデータを基に、ワイヤフレーム表示や、ワイヤフレームにテクスチャを貼り付けて表示させ、画面上の3次元空間で任意に視点を切り替えて見ることができる。

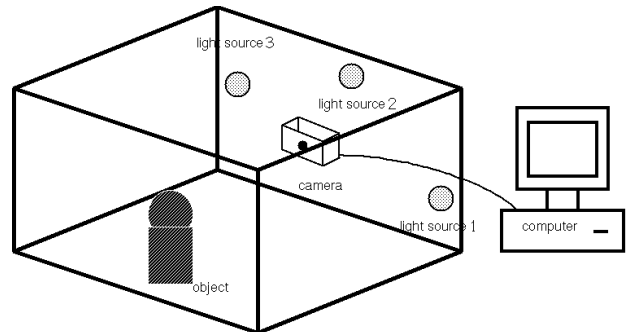


Fig. 4 Schematic figure of the automated system.

2.2.3 傾き補正

本研究では、対象物体以外の部分を背景 (高さ 0) としている。撮影された3枚の画像のいずれにおいても、その明るさが閾値 T を越えていない部分を背景とみなした。背景とした部分は、法線ベクトルの傾き (p, q) を (0,0) とする。

$$E_1(x, y) < T \ \& \ E_2(x, y) < T \ \& \ E_3(x, y) < T, \\ p(x, y) = q(x, y) = 0. \quad (14)$$

また、背景点 1 (高さ 0) から、背景点 2 までの傾きの総和は、どのようなルートを通っても 0 となる。この傾きの総和が 0 となることを利用して対象物体の傾きの補正を行った。傾きの総和の値を e (error) として以下の式で補正した。

$$\sum_{\text{背景点1}}^{\text{背景点2}} p(x, y) = e_x, \quad \sum_{\text{背景点1}}^{\text{背景点2}} q(x, y) = e_y \quad (15)$$

$$p_{new}(x, y) = p(x, y) - \bar{e}_x \\ q_{new}(x, y) = q(x, y) - \bar{e}_y \quad (16)$$

但し、 \bar{e} は足し合わせた総数で割った平均。

2.2.4 物体形状の再構築方法

x 軸方向の傾き p と、 y 軸方向の傾き q を利用して、対象物体の形状の再構築を行うことが可能となる。 p と q から (17), (18) 式を用いて対象物体の形状を再構築する⁽²⁾。誤差を小さくするために、着目点の前後の傾きの平均を求める。

z : z 軸方向の高さ.

$$\begin{aligned} z_1 &= z(x-1, y-1) + p(x-1, y-1) + q(x-1, y-1), \\ z_2 &= z(x-1, y) + p(x-1, y), \\ z_3 &= z(x_i, y-1) + q(x_i, y-1), \\ z_4 &= z(x+1, y-1) + p(x+1, y-1) + q(x+1, y-1). \end{aligned} \quad (17)$$

$$z(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^4 z_k}{4} \quad (18)$$

3. 実験結果

今回は人形の顔を対象物体とした。光源方向を左下, 中央上, 右下に設定した時に, 前述した自動システムにより取得した画像を Fig.5 に示している。取得した画像からフォトメトリックステレオ法によって, 法線ベクトルを計算する。その法線ベクトルから上記アルゴリズムにより立体構造を復元した結果を Fig.6 に示す。Fig.6 は, 復元された立体構造のワイヤーフレーム像である。さらに Fig.7 では, 立体構造にテクスチャを貼り付けた場合の図を示している。

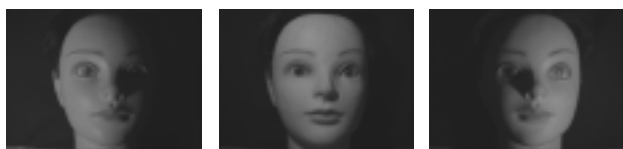


Fig. 5 Three pictures of a mannequin.

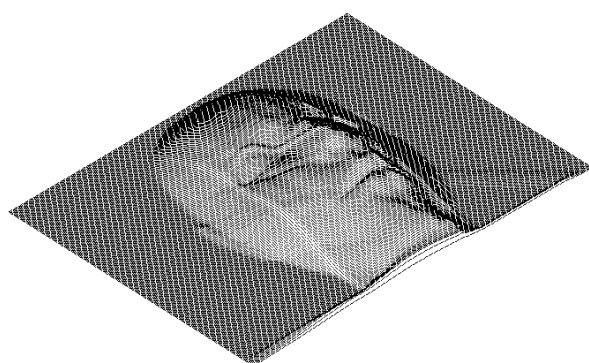


Fig. 6 Reconstruction of the mannequin.

4. まとめ

本研究では, フォトメトリックステレオ法による物体形状の再構築を行った。最初に自動化システムの構築を行うことで, 画像取得から解析までの効率を改善した。また, 三次元に復元されたものにテク

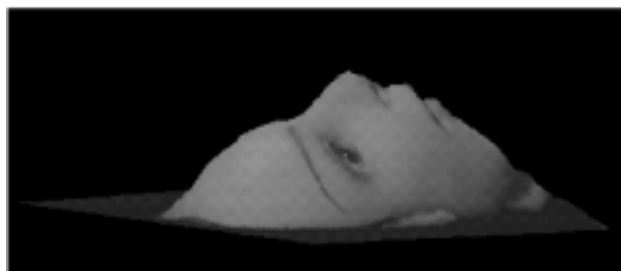


Fig. 7 Texture mapped on the reconstructed mannequin.

スチャを貼り付けることにより, 復元の程度を物体の特徴と比較して評価することが可能となった。復元方法に関しては, フォトメトリックステレオ法によって求められた法線ベクトルから, 立体構造を復元する際に, 傾き補正を加えることで復元誤差を抑えることができた。

今後の課題は, 復元された立体構造と実際の物体構造との対応を数値的に評価し, どの程度の精度で復元可能であるかを検討して行きたい。また, 物体表面の色の違いによって反射率が異なるため, 復元結果に影響を与える。色に依存しないような物体形状の再構築法の検討も挙げられる。また, 時間的に変動する物体に対するフォトメトリックステレオ法の研究も必要と思われる。

フォトメトリックステレオ法は原理も簡単で計算量も少なくすむ。そこで, 人の顔や手など体の一部分の画像から立体化し, その特徴を基にした認証システム等に応用できると思われる。画像の撮影を行うことが可能であれば, 対象物体の大小に関わらず表面法線ベクトルの推定を行うことが可能であるので, 特に小さな部品の生産ライン等に, フォトメトリックステレオ法を導入することにより, 検査機能の役割を果たすことができると思われる。あらかじめ人によって検査された製品の表面法線ベクトルを, データベースに登録し, その登録された表面法線ベクトルと対象物体の表面法線ベクトルとの照合を行うことにより, 製品の表面上の欠陥を見つけることができる。もちろん他の方法と組み合わせることにより, ロボットの目がもつ機能の1つとしての役割を, 果たすことも可能であると考えられる。

参 考 文 献

- (1) Horn.B.K.P, Robot Vision, The MIT Press, Massachusetts (1986).
- (2) R.Klette, K.Schluns and A.Koschan, Three Dimensional Data from Images, Springer, Singapore, (1998).
- (3) Oliver Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision, The MIT Press, Massachusetts, (1993).