

近接点光源は未較正照度差ステレオにおける 形状復元の不定性を解決するか？

岡部孝弘 佐藤洋一

東京大学生産技術研究所
〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1
E-mail:{takahiro, ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし：平行光線かつ Lambert 物体を仮定した未較正照度差ステレオでは、物体の形状を一意に決定することができない。この形状の不定性は、Generalized Bas-Relief (GBR) ambiguity と呼ばれ、平行光線下の物体表面の輝度が双線形関数で表現されることに起因している。本稿では、照度が距離の二乗に逆比例する近接点光源のもたらす非線形な現象に着目して、近接点光源下において観察される陰影が未較正照度差ステレオにおける形状の不定性を解決することを示す。具体的には、形状の一意性、および、不定性を解決するための手法を示すとともに、予備実験の結果を報告する。

Does a Nearby Point Light Source Resolve the Ambiguity of Shape Recovery in Uncalibrated Photometric Stereo?

Takahiro OKABE Yoichi SATO

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
Komaba 4-6-1, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan
E-mail:{takahiro, ysato}@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract : Assuming directional light sources and a Lambertian object, uncalibrated photometric stereo cannot uniquely recover the shape of the object. This ambiguity, known as the Generalized Bas-Relief (GBR) ambiguity, results from the fact that the brightness observed on a Lambertian surface under directional light sources is represented by a bilinear function. In this paper, we show that the shading observed under an unknown nearby point light source does resolve the ambiguity in uncalibrated photometric stereo, considering the nonlinear phenomena caused by the point light source whose irradiance is inversely proportional to the square of the distance. More specifically, we show the uniqueness of shape recovery and how to disambiguate the shape reconstructed up to some GBR transform, and then report the results of preliminary experiments.

1 まえがき

照度差ステレオ [17] は、視点と物体姿勢を固定して様々な照明条件で撮影した画像列から物体表面の法線ベクトル（または物体形状）を推定するもので、コンピュータビジョンの基本的な技術の一つである。初期のアルゴリズムでは、Lambert 物体、平行投影、および、平行光線を仮定していたが、その後の発展 [16] により、光沢のある物体、透視投影、および、近接点光源 [12, 13, 4] などとも考慮されている。しかしながら、これらの古典的なアルゴリズムは、光源の明るさと方向（または位置）を既知としているため、事前に光源の較正を要するという共通の問題点を持つ。

Hayakawa [10] は、明るさと方向が未知の平行光線を用いた未較正照度差ステレオを提案し、得られる法線ベクトルが任意の 3×3 の正則な行列で表現される線形変換の不定性を持つことを示した。この不定性は、平行光線下における Lambert 表面の輝度が、法線ベクトルと光源についての**双線形関数**で表現されることに起因している。Belhumeur ら [2] と Yuille ら [18] は、表面形状が滑らかであると仮定して可積分条件を課すことにより、未較正照度差ステレオにおける形状復元の不定性が、3つの未知パラメータで表現される Generalized Bas-Relief (GBR) 変換まで削減されることを証明している。

本研究では、近接点光源下において観察される陰影が未較正照度差ステレオにおける形状復元の不定性を解決することを示す。点光源は等方的に光を放射し、その照度は距離の逆二乗則に従い減衰するため、物体表面上から見た点光源の明るさと方向は、物体表面上の位置に依存して異なる。点光源のもたらすこのような**非線形**な現象を利用して双線形性に起因する不定性を解決することが、本研究の基本的な着想である。

始めに、形状復元の一意性を証明する。平行光線を利用した未較正照度差ステレオにより GBR 不定性を持つ物体形状が推定されていると仮定して、未知の点光源下で観察される陰影を説明できる物体形状が唯一であることを示す。このことから、原理的には、未知の遠方点光源（平行光線）に加えて未知の近接点光源を用いることで、Lambert 物体の形状を一意に復元できる。

次に、不定性を解くための具体的な手法を示す。GBR 変換の自由度を残して物体形状が与えられているときに、未知の近接点光源下における陰 (attached

shadow) 領域の境界と拡散反射の輝度分布を手掛かりにして、未知の GBR 変換のパラメータを推定できることを示す。さらに、合成画像を用いた予備実験の結果を報告する。

本稿の構成は以下の通りである。まず、第 2 節で関連研究をまとめ、第 3 節で以後の議論の準備のために GBR 不定性を紹介する。次に、第 4 節で近接点光源下の陰影を説明できる物体形状の一意性を証明し、第 5 節で不定性を解決するための具体的な方法を示す。第 6 節で実験結果を報告し、最後に第 7 節で結ぶ。

2 関連研究

未較正照度差ステレオにおける不定性の削減、および、近接点光源を用いた照度差ステレオという二つの論点から、関連研究を整理する。

不定性の削減

形状復元の不定性が物体表面で観察される輝度の双線形性に起因していることから、表面反射や相互反射などのような双線形性から逸脱した現象に着目した研究が行われている。

Drbohlav ら [5] は、物体表面の反射特性が Lambert モデルと鏡面反射モデルの和で表現されると仮定して、鏡面反射成分から示唆される視線方向に矛盾が生じないことを要請し、最少で 4 枚の画像を用いて不定性を削減できることを示した。Georghiades [8] は、表面反射のより一般的なモデルである Torrance-Sparrow モデルを仮定して、未較正照度差ステレオにより、物体の形状を一意に決定できるだけでなく、表面反射特性も獲得できることを示している。

また、Chandraker ら [3] は、凹面で観察される相互反射に着目し、不定性が解決されることを証明した。相互反射の明るさが物体表面の 2 点間の距離に依存するのに対して、GBR 変換が距離を保存しない変換であることから、この結論は直観的にも明らかである。

表面反射や相互反射に着目したこれらの手法は、対象物体自体の光学的・幾何学的特性に依存している点で、受動的なアプローチとみなすことができる。一方、遠方点光源に加えて近接点光源も用いる我々のアプローチは、撮影条件に工夫を加えるという点で、能動的なアプローチであると言える。我々のアプローチには、対象物体の画像に不定性を解決するのに十分な表面反射や相互反射が観察されない場合でも、物

体の形状を復元できるという利点がある。

近接光源の利用

照度差ステレオの初期のアルゴリズム [17] は平行光線を仮定していたが、その後、近接光源を用いた手法も提案されている。

Iwahori ら [12] は、既知の点光源下で撮影した画像列から、一様なアルビドを持つ Lambert 物体の法線ベクトルと奥行きを獲得するための手法を提案した。この手法では、物体表面で輝度がピークとなる点における法線ベクトルの方向に光源が存在することを利用して、奥行きについての非線形方程式を解いている。Kim ら [13] は、点光源の配置と非線形方程式の解の一意性の関係について考察している。また、Clark [4] は、光源位置の微小変化に伴う物体表面の輝度の変化に着目して、運動の制御された点光源を利用した照度差ステレオを提案している。

これらの手法は、物体表面の法線ベクトルと形状（奥行き）を独立に推定できるという特長を持つ。一方、我々のアプローチには、光源の明るさと位置の較正や制御が不要であるという利点がある。さらに、遠方点光源を併用してあらかじめ GBR 変換の自由度を残して形状を復元することにより、推定すべきパラメタの数を大幅に削減している点も特長である。

最近 Frolova ら [7] は、近接光源下において撮影された画像列の低周波数成分に対して、複雑照明下における照度差ステレオ [1] を適用することにより、未知の近接光源を用いた照度差ステレオを実現している。しかしながら、この手法で得られる法線ベクトルには、Lorentz ambiguity と呼ばれる別の不定性が残る。

3 GBR 不定性

近接点光源の影響を調べる前に、未較正照度差ステレオにおける形状復元の不定性について整理する。

単一平行光線に照らされた Lambert 物体を考え、物体表面上のある点 \boldsymbol{x} におけるアルビドを ρ 、法線ベクトルを \boldsymbol{n} で表す。また、光源ベクトル \boldsymbol{s} は、光源方向を指す単位ベクトルにその明るさに比例するスカラーを掛けたものである。Lambert モデルによると、点 \boldsymbol{x} における輝度 I_d は、

$$I_d = \rho \boldsymbol{n}^T \boldsymbol{s} := \boldsymbol{b}^T \boldsymbol{s} \quad (1)$$

で与えられる。ここで、ベクトル \boldsymbol{b} はアルビドと法線ベクトルの積であるが、表記を簡潔にするために、

法線ベクトルと呼ぶことにする。法線ベクトル \boldsymbol{b} は 3 つの成分を持つため、光源ベクトル \boldsymbol{s} が既知の通常の照度差ステレオでは、最少で 3 枚の画像から法線ベクトルを決定することができる [17]。

式 (1) は、法線ベクトル \boldsymbol{b} と光源ベクトル \boldsymbol{s} について双線形であるため、任意の 3×3 の正則な行列 A を用いて、

$$I_d = \boldsymbol{b}^T \boldsymbol{s} = \boldsymbol{b}^T A A^{-1} \boldsymbol{s} = (A^T \boldsymbol{b})^T (A^{-1} \boldsymbol{s}) \quad (2)$$

のように書き換えることができる。したがって、光源ベクトルが未知の未較正照度差ステレオにより得られる法線ベクトルは、線形変換の不定性を持つ [10]。

行列 $A \in GL(3)$ で表現される不定性は、表面形状が滑らかであると仮定して可積分条件を課すことにより、GBR 不定性まで削減することができる [2, 18]。GBR 不定性を持つ物体表面の法線ベクトル \boldsymbol{b}' と位置（形状） \boldsymbol{x}' は、行列 G で定義される GBR 変換を用いて、

$$\boldsymbol{b}' = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & -\mu \\ 0 & \lambda & -\nu \\ 0 & 0 & \tau \end{pmatrix} \boldsymbol{b} := G \boldsymbol{b}, \quad (3)$$

および、

$$\boldsymbol{x}' = \lambda G^{-T} \boldsymbol{x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \mu/\tau & \nu/\tau & \lambda/\tau \end{pmatrix} \boldsymbol{x} \quad (4)$$

のように表現される。ここで、 $\lambda (\neq 0)$ 、 μ 、 ν 、および $\tau (\neq 0)$ は未知パラメタである。このように、物体形状 \boldsymbol{x}' は、実質 3 つの未知パラメタで表現される不定性を持つ。一方、法線ベクトル \boldsymbol{b}' は、アルビドのスケールと光源の明るさの間の不定性に起因するパラメタも含めて、4 つの未知パラメタで表現される不定性を持つ。

4 形状復元の一意性

本節では、GBR 不定性を持つ物体形状が与えられていると仮定して、未知の点光源下で観察される拡散反射の輝度分布を説明できる物体形状が一意であることを示す。一方、陰領域や影（cast shadow）領域の境界を手掛かりにして不定性を解くことができないことも示す。以下、3 つの命題とその証明の概要を述べる。

4.1 拡散反射の輝度分布

命題 1. 物体形状を GBR 変換により変形するとき、近接点光源下の物体表面上で観察される拡散反射の輝度分布と同一の輝度分布を与えるような自明でない GBR 変換は存在しない。

証明. Lambert モデルの仮定から、近接点光源下における輝度 I_n は、

$$I_n = \frac{L}{|\mathbf{l} - \mathbf{x}|^2} \frac{\mathbf{b}^T(\mathbf{l} - \mathbf{x})}{|\mathbf{l} - \mathbf{x}|} \quad (5)$$

のように与えられる。ここで L と \mathbf{l} は、光源の明るさと位置を示す。このとき、以下の条件

$$\frac{L\mathbf{b}^T(\mathbf{l} - \mathbf{x})}{|\mathbf{l} - \mathbf{x}|^3} = \frac{L'\mathbf{b}'^T(\mathbf{l}' - \mathbf{x}')}{|\mathbf{l}' - \mathbf{x}'|^3} \quad (6)$$

を満たす自明でない GBR 変換 $G \propto \text{diag}(1, 1, 1)$ が存在するかどうかを調べる。なお、法線ベクトル \mathbf{b}' と形状 \mathbf{x}' は式 (3) と式 (4) のように変換され、 L' は任意の正のスカラー、 \mathbf{l}' は任意のベクトルである。

式 (3) と式 (4) を式 (6) に代入すると、

$$\mathbf{b}^T \left[\frac{L(\mathbf{l} - \mathbf{x})}{|\mathbf{l} - \mathbf{x}|^3} - \frac{L'G^T(\mathbf{l}' - \lambda G^{-T}\mathbf{x})}{|\mathbf{l}' - \lambda G^{-T}\mathbf{x}|^3} \right] = 0 \quad (7)$$

が得られる。この式が物体表面の任意の法線ベクトル \mathbf{b} について成り立つには、 L' 、 \mathbf{l}' 、および、 G は、

$$\frac{L(\mathbf{l} - \mathbf{x})}{|\mathbf{l} - \mathbf{x}|^3} = \frac{L'G^T(\mathbf{l}' - \lambda G^{-T}\mathbf{x})}{|\mathbf{l}' - \lambda G^{-T}\mathbf{x}|^3} \quad (8)$$

を満たさなくてはならない。

式 (8) は、物体表面上の点 \mathbf{x} から見た光源の方向 $(\mathbf{l} - \mathbf{x})$ とベクトル $G^T(\mathbf{l}' - \lambda G^{-T}\mathbf{x})$ とが平行であることを要請している。このことから、

$$\mathbf{l}' = \lambda G^{-T}\mathbf{l} \quad (9)$$

を導くことができる。式 (9) を式 (8) に代入して両辺の大きさを比較すると、

$$|\mathbf{l} - \mathbf{x}|^2 = \left| \lambda^{\frac{2}{3}} L^{\frac{1}{3}} L'^{-\frac{1}{3}} G^{-T}(\mathbf{l} - \mathbf{x}) \right|^2 \quad (10)$$

が成立しなくてはならないことがわかる。任意の光源方向を表すベクトル $(\mathbf{l} - \mathbf{x})$ の長さが、変換 G^{-T} によって定数倍 $(\lambda^{2/3} L^{1/3} L'^{-1/3})$ を除いて保存されることから、行列 G^{-T} は直交行列 $U (UU^T = U^T U = \text{diag}(1, 1, 1))$ に比例することがわかる。式 (3) で定義される行列 G のうち、上記の性質を満たすものは、 $\mu = 0$ 、 $\nu = 0$ 、 $\tau = \pm\lambda$ のみである。このとき、式

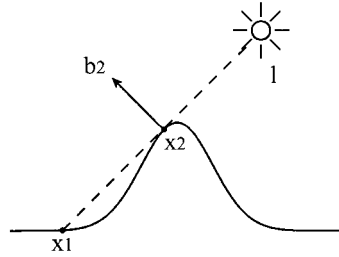


図 1: 影の境界。

(4) から $z' = \pm z$ となり、凸面と凹面の不定性が残ることが分かる。

さらに、 λ と τ の符号は一意に決まる。式 (3)、式 (4)、および、式 (9) を式 (6) に代入すると、 λ の符号は拡散反射の輝度が正となるように決まることが分かる。また、 τ の符号は、式 (3) から明らかのように、法線ベクトルが視線方向（例えば z 軸正の方向）を向くように決定される。ゆえに、式 (6) を満たす GBR 変換は、自明な変換 $G \propto \text{diag}(1, 1, 1)$ のみである。□

以上のことから、近接点光源下における拡散反射の輝度分布を手掛かりにして、GBR 不定性を解決できることがわかる。なお、アルビドのスケールと光源の明るさとの間の不定性に起因した定数倍の自由度は残る。

4.2 陰領域および影領域の境界

命題 2. 近接点光源下の物体表面上で観察される陰の分布と同一の分布を与えるような物体形状・光源位置の族が存在する。

証明. $\mathbf{b}^T(\mathbf{l} - \mathbf{x}) = 0$ を満たす点 \mathbf{x} は陰領域の境界に存在する。式 (3) と式 (4)、および、式 (9) を仮定すると、 $\mathbf{b}'^T(\mathbf{l}' - \mathbf{x}') = 0$ と $\mathbf{b}^T(\mathbf{l} - \mathbf{x}) = 0$ は同値である。したがって、GBR 変換 G により物体の法線ベクトルと形状が変化するとき、 $\lambda G^{-T}\mathbf{l}$ に位置する点光源は、同一の陰を生じる。□

命題 3. 近接点光源下の物体表面上で観察される影領域の境界と同一の境界を与えるような物体形状・光源位置の族が存在する。

証明. 図 1 に示したように、物体表面上の点 \mathbf{x}_1 は、法線ベクトル \mathbf{b}_2 を持つ点 \mathbf{x}_2 と光源位置 \mathbf{l} に対して、

$$\mathbf{b}_2^T(\mathbf{l} - \mathbf{x}_2) = 0 \quad (11)$$

が成立し、かつ、

$$\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 = c(\mathbf{l} - \mathbf{x}_1) \quad (12)$$

を満たす正の定数 c が存在するときに、影の境界に存在する。

命題 2 から明らかなように、 $\mathbf{b}'^T(\mathbf{l}' - \mathbf{x}'_2) = 0$ と第一の条件は同値である。また、GBR 変換を受けた法線ベクトルと形状は、

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_2 - \mathbf{x}'_1 - c'(\mathbf{l}' - \mathbf{x}'_1) \\ = \lambda G^{-T}[\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1 - c(\mathbf{l} - \mathbf{x}_1)] \end{aligned} \quad (13)$$

を満たすため、第二の条件と $\mathbf{x}'_2 - \mathbf{x}'_1 = c'(\mathbf{l}' - \mathbf{x}'_1)$ を満たす正の定数 $c'(=c)$ が存在することも同値である。□

以上のことから、近接点光源下において観察される陰領域および影領域の境界を手掛かりに GBR 不定性を解くことはできない。興味深いことに、この結論は、Belhumeur ら [2] によって証明された平行光線を仮定した場合の結論と一致している。

5 不定性の解法

平行光線を利用した未較正照度差ステレオにより、GBR 不定性を持つ物体表面の法線ベクトルが得られていると仮定して、近接点光源下における物体の画像から GBR 変換の未知パラメータを推定する。なお物体形状は、滑らかであることを仮定して、法線ベクトルから計算される勾配を積分することで得られているとする。

式 (3) と式 (4) を式 (5) に代入すると、近接点光源下における物体表面の輝度は、不定性を持つ法線ベクトル \mathbf{b}' と形状 \mathbf{x}' および未知の GBR 変換 G を用いて、

$$I_n = \frac{L\mathbf{b}'^T G^{-T}(\mathbf{l} - \lambda^{-1}G^T \mathbf{x}')}{\|\mathbf{l} - \lambda^{-1}G^T \mathbf{x}'\|^3} \quad (14)$$

のように書き下される。なお、点光源の明るさ L と位置 \mathbf{l} もまた未知である。

まず、陰領域の境界に着目して、点光源の位置を推定する。式 (14) より、陰領域の境界は、

$$\mathbf{b}'^T \mathbf{x}' = \mathbf{b}'^T (\lambda G^{-T} \mathbf{l}) := \mathbf{b}'^T \mathbf{l}' \quad (15)$$

を満たす。画像中に陰領域の境界が観察され、かつ、その境界が線形独立な法線ベクトルを持つ 3 つ以上の画素で構成されているとき、既知の法線ベクトル

\mathbf{b}' と形状 \mathbf{x}' から、点光源の位置 $\mathbf{l}' (= \lambda G^{-T} \mathbf{l})$ を求めることができる。

こうして得られた点光源の位置を用いて、式 (14) を、

$$p^2 + q^2 + \left(-\frac{\mu}{\lambda}p - \frac{\nu}{\lambda}q + \frac{\tau}{\lambda}r\right)^2 = L^{\frac{2}{3}}|\lambda|^{-\frac{2}{3}} \quad (16)$$

のように整理することができる。ここで $\mathbf{p} = (p, q, r)^T$ は、

$$\mathbf{p} := \frac{\mathbf{l}' - \mathbf{x}'}{\|\mathbf{b}'^T(\mathbf{l}' - \mathbf{x}')I_n^{-1}\|^{\frac{1}{3}}} \quad (17)$$

である。なお、アルビドのスケールと点光源の明るさとの間の不定性に起因する GBR 変換の定数倍の自由度のため、 $L = 1$ としても一般性を失わない。

この式は、物体表面で観察される輝度、および、不定性を持つベクトルから式 (17) のように計算される任意の 3 次元ベクトルが、式 (16) で定義される楕円体の表面上に存在することを意味している。したがって、第 4.1 節で述べたように λ と τ の符号が唯一に決まることも考慮すると、GBR 変換の未知パラメータを推定する問題は、 λ と τ に関する制約条件付の楕円体のあてはめ問題に帰着する。

6 実験

実装の概要を述べたあとで、合成画像を用いた予備実験の結果を報告する。

6.1 実装の概要

始めに、以下のようにして、未知の遠方点光源下における物体の画像列から、GBR 不定性を持つ物体の法線ベクトルと形状を推定した。

- (1a) 画像列に対して Singular Value Decomposition with Missing Data (SVDMD) [15] を適用して、物体表面の法線ベクトルを線形変換 $A \in GL(3)$ の自由度を残して推定する。
- (1b) 推定された法線ベクトルに、Georghiades ら [9] と Yuille ら [18] と同様の手法で可積分条件を課し、法線ベクトルを GBR 変換の自由度を残して求める。
- (1c) 法線ベクトルから計算される物体表面の勾配を、緩和法 [11] を用いて積分し、物体の形状を得る。

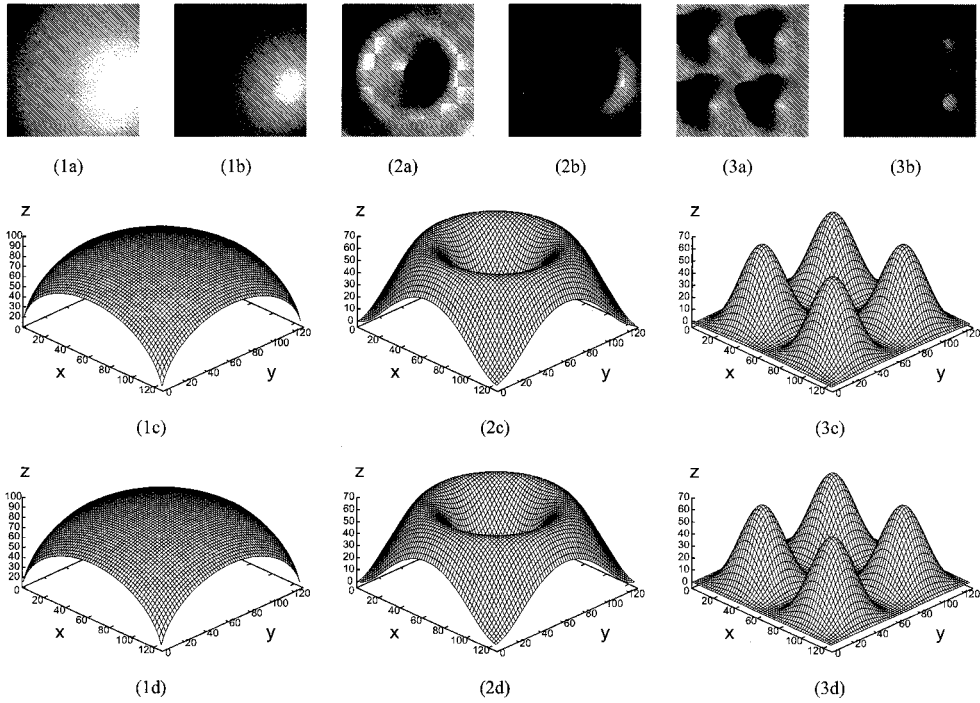


図 2: 合成画像を用いた実験結果.

こうして得られる法線ベクトルと形状は、GBR 変換の 4 つの未知パラメタの影響により歪んでいる。これらのパラメタは原理的には任意の値を取りうるため、例えば法線ベクトルの x 成分と z 成分の典型的な値の桁が著しく異なることがあると、以後の光源位置の推定などの数値計算が不安定になる可能性がある。この問題を軽減するために、一般性を失うことなく、法線ベクトルと形状を正規化できることを付記する（補遺 A 参照）。

次に、単一の点光源を異なる位置に動かしたときの物体の画像列を用いて、不定性を解決した。式 (16) と式 (17) より、明るさ L が等しく位置の異なる点光源下における画像から、同一の GBR 変換パラメタが得られることに注意が必要である。GBR 不定性を解決する手順は以下の通りである。

(2a) 画像ごとに陰領域の境界を検出し（補遺 B 参照）、式 (15) から点光源の位置を推定する。

(2b) 式 (17) に従って、物体表面で観察される輝度から 3 次元ベクトルを計算する。

(2c) 得られた 3 次元データに楕円体をあてはめ、GBR 変換の未知パラメタを得る。

楕円体のあてはめは、次の評価関数

$$\sum_{ij} [p_{ij}^2 + q_{ij}^2 + (\mu' p_{ij} + \nu' q_{ij} + \tau' r_{ij})^2 - \lambda']^2 \quad (18)$$

を、 λ' と τ' に関する制約条件を考慮しながら最小化することにより行った。ここで、 $\lambda' = |\lambda|^{-2/3}$ 、 $\mu' = -\mu/\lambda$ 、 $\nu' = -\nu/\lambda$ 、および、 $\tau' = \tau/\lambda$ である。添え字 i と j は各々、画像と画素の番号を指す。なお、 λ と τ の符号は、 $\mathbf{b}'^T(\mathbf{l}' - \mathbf{x}')$ と \mathbf{b}' の z 成分の符号に等しいことは明らかである。

上記の評価関数を最小化するために、MATLAB optimization toolkit の *lsqnonlin* を用いた。さらに、陰領域の境界の誤検出やランク落ちにより光源位置の推定に失敗すると外れ値が生じる可能性があるため、Random Sample Consensus (RANSAC) [6] を利用した。

Shape	Height	Albedo	RMS error
Sphere	$64\sqrt{2}$	Uniform	0.93
		Checker	1.09
		Sine	0.94
Crater	64	Uniform	1.02
		Checker	1.01
		Sine	0.81
Mountains and valleys	64	Uniform	0.79
		Checker	0.81
		Sine	0.77

表 1: 形状の RMS 誤差.

6.2 実験結果

3種類の形状(球, クレータ, 山谷)と3種類のアルビド(一様, 格子, 波形)を組み合わせ, 計9つの物体を対象として実験を行った. 遠方点光源下における物体の画像20枚を用いて, 物体表面の法線ベクトルと形状をGBR変換の自由度を残して推定したのち, 近接点光源下における物体の画像30枚を用いて, 不定性を除去した. 点光源は半球面上($z > 0$)に一樣な確率でランダムに分布するものとし, 物体の中心から遠方(近接)点光源までの距離は, 物体の高さの100倍(2倍)とした. なお, 合成画像のサイズは 128×128 画素である.

図2は, (1a) 一樣なアルビドを持つ球の遠方点光源下における画像, (1b) 近接点光源下における画像, (1c) 復元された形状, および, (1d) 正しい形状を示している. 格子状のアルビドを持つクレータ, および, 波形のアルビドを持つ山谷状物体については, それぞれ(2a)から(2d), および, (3a)から(3d)に示す. 但し, 高さ方向の原点は一意に決定できないため, 比較のために適宜調整している. また, 表1に示したように, 推定された各物体の形状(z 成分)のRoot-Mean-Square (RMS) 誤差は, 各物体の高さに比べてはるかに小さかった. これらの結果は, 近接点光源下における物体表面の陰影から, GBR不定性を解けることを示している.

なお, 式(18)で定義される非線形な評価関数の最適化は, 未知パラメタの初期値の選択に対して極めて安定であることを確認している. また, 形状復元の精度は, 遠方(近接)点光源までの距離が大きく(小さく)なればなるほど向上することも確認している.

7 むすび

本稿では, 近接点光源が未較正照度差ステレオにおけるGBR不定性を解決することを理論的に示すとともに, 未知の遠方点光源および未知の近接点光源下における物体の画像から形状が復元できることを, 合成画像を用いた実験により確認した.

臨界条件に関する考察や実画像実験は, 今後の課題である.

謝辞 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金若手研究(B)「近接光源下における物体の見えの解析とその認識・モデリングへの応用」(課題番号: 18700168)の助成により行われた.

参考文献

- [1] R. Basri and D. Jacobs, “Photometric stereo with general, unknown lighting”, In *Proc. IEEE CVPR 2001*, pp.II-374–381, 2001.
- [2] P. Belhumeur, D. Kriegman, and A. Yuille, “The bas-relief ambiguity”, In *Proc. IEEE CVPR '97*, pp.1060–1066, 1997.
- [3] M. Chandraker, F. Kahl, and D. Kriegman, “Reflections on the generalized bas-relief ambiguity”, In *Proc. IEEE CVPR 2005*, pp.I-788–795, 2005.
- [4] J. Clark, “Active photometric stereo”, In *Proc. IEEE CVPR '92*, pp.29–34, 1992.
- [5] O. Drbohlav and R. Sara, “Specularities reduce ambiguity of uncalibrated photometric stereo”, In *Proc. ECCV 2002 (LNCS 2351)*, pp.46–60, 2002.
- [6] M. Fischler and R. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, *Communications of the ACM*, 24(6), pp.381–395, 1981.
- [7] D. Frolova, D. Simakov, and R. Basri, “Accuracy of spherical harmonics approximations for images of Lambertian objects under far and near lighting”, In *Proc. ECCV 2004 (LNCS 3021)*, pp.574–587, 2004.
- [8] A. Georghiadis, “Incorporating the Torrance and Sparrow model of reflectance in uncalibrated photometric stereo”, In *Proc. IEEE ICCV 2003*, pp.816–823, 2003.
- [9] A. Georghiadis, D. Kriegman, and P. Belhumeur, “Illumination cones for recognition under variable lighting: faces”, In *Proc. IEEE CVPR '98*, pp.52–58, 1998.
- [10] H. Hayakawa, “Photometric stereo under a light source with arbitrary motion”, *J. Opt. Soc. Am. A*, 11(11), pp.3079–3089, 1994.
- [11] B. Horn, *Robot vision*, MIT Press, 1986.

- [12] Y. Iwahori, H. Sugie, and N. Ishii, "Reconstructing shape from shading images under point light source illumination", In *Proc. IEEE ICPR '90*, pp.1-83-87, 1990.
- [13] B. Kim and P. Burger, "Depth and shape from shading using the photometric stereo method", *CVGIP: Image Understanding*, 54(3), pp.416-427, 1991.
- [14] A. Shashua, "On photometric issues in 3D visual recognition from a single 2D image", *Int'l. J. Computer Vision*, 21(1/2), pp.99-122, 1997.
- [15] H.-Y. Shum, K. Ikeuchi, and R. Reddy, "Principal component analysis with missing data and its application to polyhedral object modeling", *IEEE Trans. PAMI*, 17(9), pp.854-867, 1995.
- [16] L. Wolff, S. Shafer, and G. Healey, *Physics-based vision: principles and practice, Shape recovery*, Jones and Bartlett Publishers, 1992.
- [17] R. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", *Optical Engineering*, 19(1), pp.139-144, 1980.
- [18] A. Yuille and D. Snow, "Shape and albedo from multiple images using integrability", In *Proc. IEEE CVPR '97*, pp.158-164, 1997.

補遺 A

式(3)で定義される GBR 変換の集合を \mathcal{G} とし、ある GBR 変換 $G_1 \in \mathcal{G}$ の自由度を残して推定された法線ベクトル $\mathbf{b}' (= G_1 \mathbf{b})$ を考える。GBR 変換は群の性質を満たすため、 $G_1 \in \mathcal{G}$ 、かつ、 $G_2 \in \mathcal{G}$ ならば $G_3 = G_2 G_1 \in \mathcal{G}$ である。そのため、法線ベクトル \mathbf{b}' に G_2 を掛けて得られる \mathbf{b}'' は、 $\mathbf{b}'' = G_2 G_1 \mathbf{b} = G_3 \mathbf{b}$ のように表現できる。したがって、 $\mathbf{b}' = G_1 \mathbf{b}$ の代わりに $\mathbf{b}'' = G_3 \mathbf{b}$ の関係にある法線ベクトルの不定性を解いても良い。

ゆえに、ある GBR 変換 G_1 によって著しく歪んだ法線ベクトルを正規化するために、

$$\mathbf{b}'' = G_2 \mathbf{b}' := \begin{pmatrix} \alpha & 0 & \beta \\ 0 & \alpha & -\beta \\ 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \mathbf{b}' \quad (19)$$

のように人為的に G_2 を掛けて、法線ベクトルを変換することができる。この GBR 変換 G_2 のパラメタは、例えば、 n を総画素数として $\sum_{i=1}^n b''_{xi}/n = 1$ などから決定することができる。

補遺 B

陰と影を画素値のみから区別するのは困難であるため、以下の二つの考察に基づいて陰領域の境界を検出した。

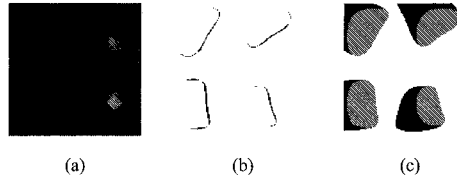


図 3: 陰領域の境界の検出。

- 光源ベクトル \mathbf{s} で表される平行光線下において物体表面を観察したときに、光の当たっていない領域において、法線ベクトル \mathbf{b} が $\mathbf{b}^T \mathbf{s} < 0$ を満たす点は陰、満たさない点は影に属する [14]。
- 物体が近接点光源に照らされている場合でも、物体表面の微小領域に注目すると、平行光線の仮定が近似的に成り立つ。

具体的には、注目する画素の近傍の拡散反射の輝度分布から光源ベクトル \mathbf{s} を推定し、 $\mathbf{b}^T \mathbf{s}$ の符号を調べることで、その画素が陰と影のどちらに属しているかを判定した。図3は、(a) 格子状のアルビドを持つ山谷状物体の近接点光源下における合成画像、(b) 検出された陰領域の境界、および、(c) 正解画像を示している。なお、正解画像では、陰領域を灰色で、影領域を黒色で表示している。