

見かけの点拡がり関数の歪みに基づく法線推定

井手 優希 川原 僚 岡部 孝弘
九州工業大学情報工学部

1 はじめに

物体やシーンの形状を画像から復元する3次元復元技術は、コンピュータビジョンの重要なテーマの一つである。不透明物体に対しては、複数の異なる光源下で撮影されたシーンの画像から反射光の明るさに基づいて法線を推定する照度差ステレオや、複数の異なる視点で撮影されたシーンの画像から対応点に基づいて深度を復元する多視点ステレオ等が提案されている。

半透明物体では、表面下散乱のために入射した光がにじむ。不透明に近い半透明物体においては、物体表面上の1点への入射光に対する出射光が周囲に拡がる様子は、点拡がり関数 (PSF) で記述されることが知られている [1]。表面下散乱によって、照度差ステレオでは推定した法線が平滑化されてしまうこと、多視点ステレオでは特徴点の対応付けが容易ではないことから、半透明物体の形状復元は困難である。

Inoshita ら [2] は、平滑化された法線を、PSF を既知として逆畳み込みにより鮮鋭化する手法を提案している。ところが、物体表面上の各点の PSF を正確に推定するのは容易ではない。柴田ら [3] は、プロジェクタ-カメラシステムを用いて、見かけの PSF の歪みに基づいた法線推定と奥行き推定を組み合わせた半透明物体の法線推定手法を提案している。しかし、照射方向による投影光の歪みが考慮されてないため、法線の推定精度が低いという問題があった。

そこで本稿では、照射方向と視線方向による見かけの PSF の歪みに基づいた、半透明物体の法線推定手法を提案する。具体的には、表面下散乱が等方的であることを仮定し、法線を基準とした座標系において照射方向ベクトルと視線方向ベクトルを用いて表現される見かけの PSF と撮影画像から得られる見かけの PSF を比較することで法線を推定する。

2 提案手法

プロジェクタで半透明物体上の任意の点を照らし、その様子をカメラで撮影する。ここで、半透明物体の表面下散乱が等方的であること、つまり、同心円状に光が拡がることを仮定する。また、カメラおよびプロジェクタは幾何的に較正済みであるとし、カメラ、プロジェクタ、投影点の3次元座標、および、投影点から見たカメラ方向ベクトルとプロジェクタ方向ベクトルは既知であるとする。

プロジェクタの画像平面において円状の光が、プロジェクタ投影中心からシーンに円錐状に拡がるとする。このとき、投影光は図1のように、プロジェクタ

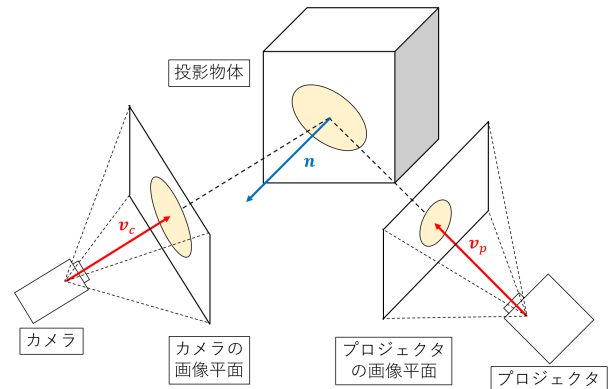


図1: 投影光の歪み

に対する面の向きに依存して照射範囲が伸長する。したがって、表面下散乱による出射光もまた歪み、楕円状となる。ここで、法線 $\mathbf{n}$ を z 軸正方向とした座標系において、照射方向ベクトルの天頂角を θ_p 、方位角を ϕ_p とすると、プロジェクタの照射方向により歪んだ PSF を表す楕円上の点 (x_p, y_p) は、単位円上の点 (x, y) を用いて、

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = R(\phi_p) \begin{pmatrix} \frac{1}{\cos \theta_p} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} R(-\phi_p) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (1)$$

と表される。 $R(\phi_p)$ は xy 平面上における、原点を中心とした回転角 ϕ_p の回転を表す。

また、プロジェクタの照射方向により歪んだ PSF をカメラから見ると、図1のようにカメラに対する面の向きに依存して収縮する。ここで、法線 $\mathbf{n}$ を z 軸正方向とした座標系において、視線方向ベクトルの天頂角を θ_c 、方位角を ϕ_c とすると、視線方向により歪んだ PSF を表す楕円上の点 (x_c, y_c) は、

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix} = R(\phi_c) \begin{pmatrix} \cos \theta_c & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} R(-\phi_c) \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表される。法線が既知であるとき、式 (1) と式 (2) を用いることで見かけの PSF の歪みを得ることができる。

撮影したカメラ画像から取得した投影光の見かけの PSF を表す楕円と、法線を既知として式 (1) と式 (2) を用いて生成した楕円を比較することで法線を推定する。撮影したカメラ画像における投影光の画素値を重みとして主成分分析を行い、得られた固有値と固有ベクトルから楕円の特徴量を求める。生成した楕円と画像から取得した楕円を、長軸短軸比の差および長軸方向と x 軸とのなす角度の差を用いて比較を行う。それぞれの差の絶対値の和が最も小さくなる

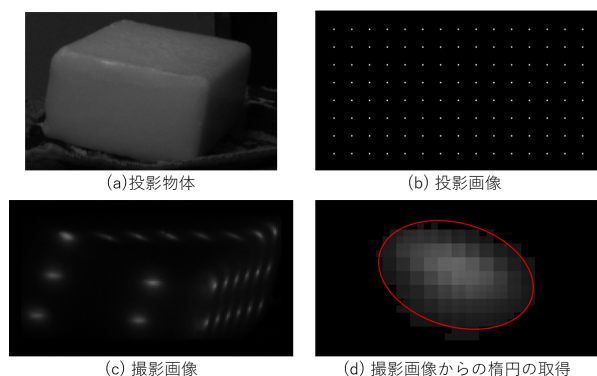


図 2: 半透明物体への投影

楕円を生成するとき用いた法線を投影点の法線とする。

3 実験

幾何的に較正済みのカメラおよびプロジェクタを用いて、不透明に近い半透明物体である直方体状の石鹼に対してプロジェクタから光を投影し、その様子をカメラで撮影した。図 2(a) に投影物体の画像を、図 2(b) に投影画像を、図 2(c) に撮影画像を示す。

まず、撮影画像から各投影点の周囲を切り出して、画素値を重みとした主成分分析を行うことで楕円を取得した。図 2(d) に切り出したある投影点の周囲、および、当てはめた楕円を示す。また、取得した画素値を元に各投影点の重心を求め、カメラとプロジェクタを用いた投影点の三角測量により、3次元座標の推定を行った。

次に、カメラとプロジェクタの外部パラメータ、および、式 (1) と式 (2) を用いて、方位角および天頂角を 1° 刻みとした 32,400 個の法線に対応する楕円を生成した。また、投影歪みに基づいて生成した楕円と撮影画像から取得した楕円の長軸短軸比の差および x 軸と長軸のなす角度の差について比較を行い、それぞれの差の絶対値の和が最も小さい楕円を選択した。図 3 に各々の誤差マップを示す。作成した誤差マップでは、円周方向を方位角 ($0^\circ - 360^\circ$)、半径方向を天頂角 ($0^\circ - 90^\circ$) として誤差を描画しており、暗い／明るいほど各々の誤差が小さい／大きいことを表す。

最後に、選択した法線を投影点と共に描画した。図 4(a) に提案手法により推定した法線を示す。また、従来手法 [3] と同様に、視線方向による見かけの PSF の歪みのみに基づいて生成した楕円を用いて推定した法線を図 4(b) に示す。図 4(a) より、投影点に対する法線は、図 2(a)、図 2(c) との比較、および、図 4(b) との比較から、比較的良好に推定できていることが定性的に確認できる。

4 まとめ

本稿では、光源方向と視線方向による見かけの PSF の歪みに基づく、半透明物体の法線推定手法を提案した。具体的には、半透明物体に対するプロジェクタからの投影光をカメラで撮影し、撮影画像から取得した

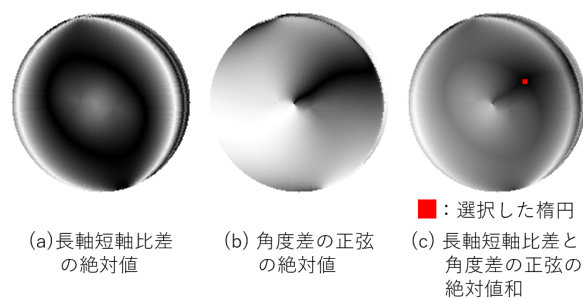
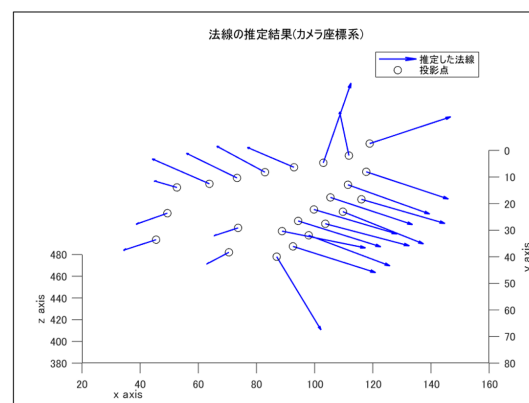
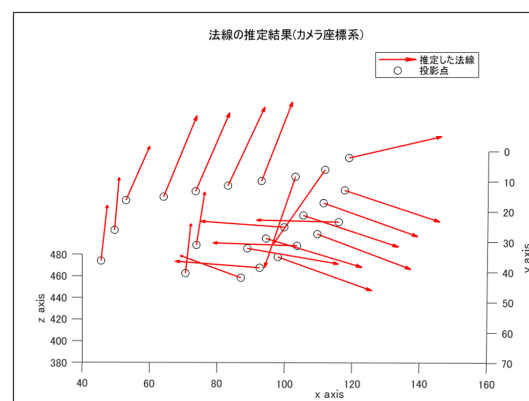


図 3: 生成した楕円の誤差マップ



(a) 提案手法



(b) 従来手法

図 4: 法線の推定

楕円およびカメラとプロジェクタの外部パラメータから法線を既知として生成した楕円を比較することで法線を推定した。先行研究 [3] で指摘されている法線推定における不定性の解析および密な推定は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] A. Munoz, J. Echevarria, F. Seron, and D. Gutierrez, "Convolution-based simulation of homogeneous subsurface scattering", Computer Graphics Forum, Vol.30, No.8, pp.2279-2287, 2011.
- [2] C. Inoshita, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi, "Surface normal deconvolution: photometric stereo for optically thick translucent objects", In Proc. ECCV2014, pp.346-359, 2014.
- [3] 柴田 青, 岡部 孝弘, "点拡がり関数に基づく半透明物体の法線推定", 情報処理学会研究報告, Vol.2021-CVIM-225, No.26, 2021.