

# 照度差ステレオのための影と鏡面反射を考慮した照明計画

谷川 央周<sup>1,a)</sup> 岡部 孝弘<sup>2,b)</sup>

**概要：**光源方向の変化に伴う物体表面の明るさの変化から法線を求める方法は照度差ステレオと呼ばれる。照度差ステレオを用いた法線推定の精度は被写体を照らす光源方向に大きく依存する。照度差ステレオではランバート拡散反射モデル、つまり、画素値が法線と光源方向の内積に比例することを仮定しているため、かげや鏡面反射は誤算の原因となる。そこで本稿では、少数の画像から頑健に法線を推定するために、かげや鏡面反射を考慮した照明計画法を提案する。提案手法では、影が物体の3次元形状に依存することから、最適な光源方向の選択、最適な光源方向の下で撮影された画像の追加、および、暫定的な3次元形状の復元を逐次的に行う。実画像を用いた予備実験を行い、かげと鏡面反射を考慮した照明計画の有効性を示す。

**キーワード：**照度差ステレオ, 形状復元, 照明計画, 影, 鏡面反射

## 1. はじめに

被写体の画像から3次元形状を復元することは、コンピュータビジョンの分野の中でも重要な研究課題である。形状復元は、ロボットの視覚技術、および拡張現実や3Dプリンタなど、様々な分野において利用されている。

形状復元の技術の1つに、照度差ステレオ [1],[2] がある。古典的な照度差ステレオではランバート拡散反射モデルを仮定し、画像の輝度から物体表面の法線推定を行う。しかし、物体表面がランバート拡散反射モデルに従うことを仮定しているため、鏡面反射の発生が誤差の要因となる。また、物体上で光が全く当たらず、画素の輝度値が0となる陰 (attached shadow) や、物体に遮られることで発生する影 (cast shadow) も古典的な照度差ステレオでは考慮されないため、誤差の要因となる。

そこで、本稿では古典的な照度差ステレオのための照明計画を提案する。具体的には、法線を少数の画像から頑健に推定するのに最適な光源方向を、かげ<sup>\*1</sup>や鏡面反射の影響を考慮しながら選択する。影は3次元形状に依存するため、最適な光源方向で撮影した画像を逐次的に追加し、3次元形状の更新を繰り返すことで、法線の高精度な推定を実現する。

## 2. 関連研究

複数枚の画像から物体の形状復元を行う方法の1つに、Woodham[1]とSilver[2]によって提案された照度差ステレオがある。古典的な照度差ステレオは、被写体およびカメラを固定し、平行光線、ランバート反射面の仮定の下で、異なる光源方向で撮影された3枚以上の画像から、各画素の法線を推定する手法である。

照度差ステレオを行う際に最適な光源を選択する照明計画の例に、Drbohlavら [3]の研究がある。Drbohlavらは、照度差ステレオを用いる際に最適な光源方向を光源数ごとに求めている。具体的には、光源数が3のとき、3個の光源ベクトルが直交するように光源を配置することを提案している。しかし、この手法では物体表面がランバートモデルに従うことを仮定しているため、鏡面反射が含まれる画素の推定精度が低下する問題点がある。また、かげも考慮されないため、かげが含まれる画素の推定精度も低下する。

また、物体の反射特性の推定 [4] および物体認識 [5] といった研究では、あらかじめ撮影した画像、および形状モデルから必要な光源を算出することで必要な画像を用いる。そのため、撮影された光源方向以外から最適な光源方向を求めることができない問題点がある。

## 3. 提案手法

### 3.1 照度差ステレオ

物体表面がランバート拡散反射モデルに従うと仮定する

<sup>1</sup> 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻

<sup>2</sup> 九州工業大学 大学院情報工学研究院 知能情報工学研究系

<sup>a)</sup> q231040h@mail.kyutech.jp

<sup>b)</sup> okabe@ai.kyutech.ac.jp

<sup>\*1</sup> かげは、陰と影の両方を指すものとする。

と、物体表面上のある画素の輝度値  $i$  は、反射率  $\rho$ 、光源強度  $s$ 、入力画像の光源方向  $\mathbf{l}$ 、物体表面の法線ベクトル  $\mathbf{n}$  を用いて、

$$i = \rho s \mathbf{l}^T \mathbf{n} \quad (1)$$

と書き表せるので、光源数  $N \geq 3$  のとき、 $k$  番目の画像の輝度値  $i_k$  を並べたベクトル  $\mathbf{i}$  は、反射率  $\rho$ 、 $k$  番目の画像の光源強度  $s_k$  および光源方向  $\mathbf{l}_k$ 、 $N$  行 3 列の行列  $\mathbf{L}$ 、物体表面の法線ベクトル  $\mathbf{n}$  を用いて、

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \mathbf{l}_1^T \\ s_2 \mathbf{l}_2^T \\ \vdots \\ s_N \mathbf{l}_N^T \end{pmatrix} (\rho \mathbf{n}) = \mathbf{L} \mathbf{n} \quad (2)$$

と書き表せる。したがって、法線ベクトル  $\mathbf{n}$  は、行列  $\mathbf{L}$  の擬似逆行列  $\mathbf{L}^+$  を用いて、

$$\mathbf{n} = (\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{i} = \mathbf{L}^+ \mathbf{i} \quad (3)$$

と求めることができる。

### 3.2 照明計画

光源数  $N \geq 3$  のとき、ランバート面で影のない場合の法線の不確かさ  $\Delta \mathbf{b}$  は、行列  $\mathbf{L}$ 、カメラノイズ  $\Delta \mathbf{i}$  を用いて  $\Delta \mathbf{b} = \mathbf{L}^{-T} \Delta \mathbf{i}$  で決まる [3]。ところが、Drbohlav らの手法では、影や鏡面反射を考慮していない。そこで、本稿では、3次元形状を復元し、かげの影響を考慮することで最適な光源を逐次的に追加する。具体的には、初期値としてカメラ方向に近い光源の中から 3 個選択し、暫定的な 3次元形状を復元する。得られた 3次元形状からかげ、および鏡面反射を考慮した最適な光源を選択、追加し、復元することを繰り返す。

本研究では、鏡面反射モデルと暫定的な形状モデルから予測される影と鏡面反射に基づいた、法線の不確かさの指標を提案する。具体的には、 $M$  を画素数、 $\mathbf{L}_m$  を  $\mathbf{L}$  の中から  $m$  番目の画素を照らし、かつ、鏡面反射を起こさない光源方向のみを格納した行列とし、画素ごとに影と鏡面反射の影響がない有効な光源方向から求められる法線の不確かさの和

$$\varepsilon(\mathbf{L}) = \sum_{m=1}^M \sigma^2 \text{trace} \left[ (\mathbf{L}_m \mathbf{L}_m^T)^{-1} \right] \quad (4)$$

が最小となる光源方向を選択し、逐次的に追加する。

## 4. 実験

提案手法の有効性を確認するため、2種類の被写体を用いて予備実験を行った。具体的には、あらかじめ様々な方向の光源下で撮影した画像から、推定に最適な画像を逐次的に追加して法線を推定した。

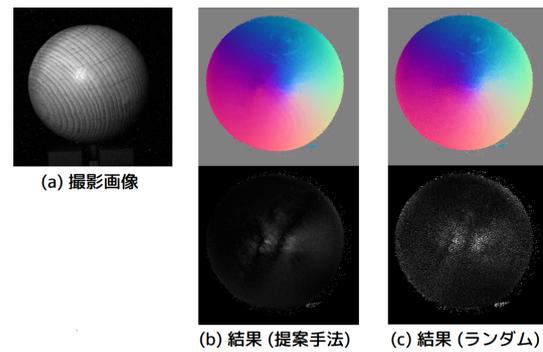


図1 推定結果(球)

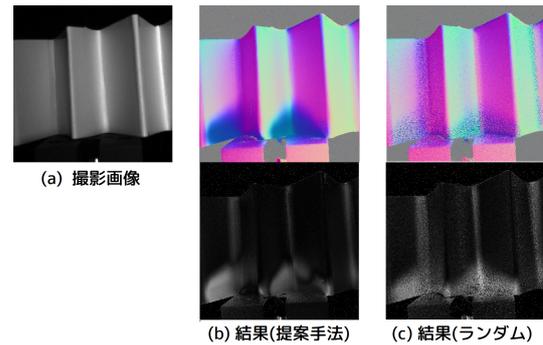


図2 推定結果(波型)

2種類の被写体として、影の生じない球、および影が生じやすい波型物体の実画像を使用した。また、比較としてランダムに光源選択を行った場合の照度差ステレオも行った。

図1(a)の球を被写体とし、初期値として用いるカメラ方向に近い3方向の光源と、初期光源以外の5方向の光源の合計8個を用意し、5方向の光源から最適な光源を選択する照明計画を行った。提案手法を用いて5光源を選択した場合に推定された法線を可視化したもの、全8光源との推定結果の差を可視化<sup>\*2</sup>したものをそれぞれ図1(b)の上下に、ランダム5光源を選択した場合に推定された法線を可視化したもの、全8光源との推定結果を可視化したものをそれぞれ図1(c)の上下に示す。提案手法を用いた場合、ランダムに選択した場合の推定結果の差から、提案手法のほうがランダムに光源を選択した場合に比べ、誤差が小さくなっていることがわかる。

光源数ごとの提案手法による法線推定結果、およびランダムな光源選択による法線推定結果を定量的に比較するために、8光源すべてを照らしたときに推定された法線を真値とみなし、光源数ごとに真値との法線の角度の誤差の平均を取ったグラフを図3に示す。図3より、すべての光源数において、提案手法のほうがランダムに光源を選択した場合よりも誤差が小さくなっていることがわかる。

図2(a)の波型物体を被写体とし、初期値として用いるカメラ方向に近い3方向の光源と、初期光源以外の10方向の光源の合計13個を用意し、10方向の光源から最適な光

<sup>\*2</sup> 白部分が誤差  $20^\circ$  に相当する。

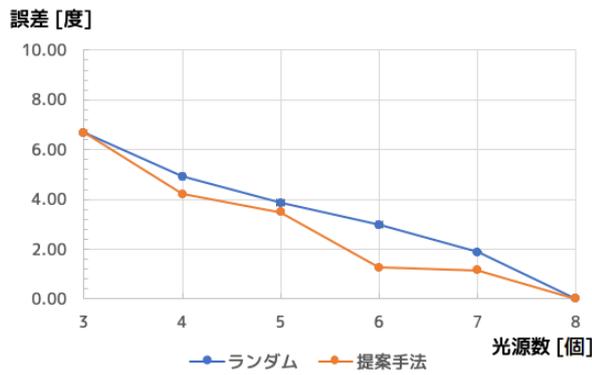


図3 球の法線の推定誤差

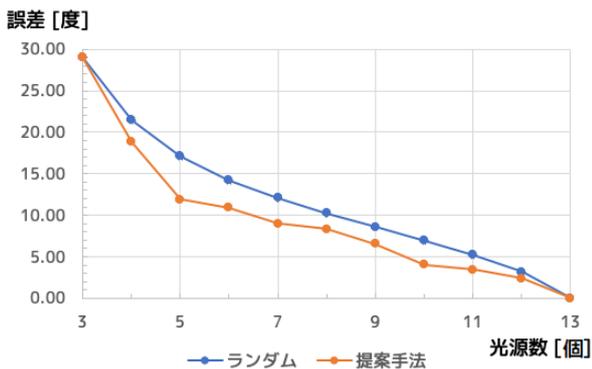


図4 波型物体の法線の推定誤差

源を選択する照明計画を球と同じように行った。提案手法を用いて5光源を選択した場合に推定された法線を可視化したもの、全13光源との推定結果の差を可視化したものをそれぞれ図2(b)の上下に、ランダム5光源を選択した場合に推定された法線を可視化したもの、全13光源との推定結果の差を可視化したものをそれぞれ図2(c)の上下に示す。提案手法を用いた場合、ランダムに選択した場合の推定結果の差から、提案手法のほうがランダムに光源を選択した場合に比べ、誤差が小さくなっていることがわかる。

定量的に比較するために、13光源すべてを照らしたときに推定された法線を真値とし、光源数ごとに真値との法線の角度の誤差の平均を取ったグラフを図4に示す。図4より、すべての光源数において、提案手法のほうがランダムに光源を選択した場合よりも誤差が小さくなっていることがわかる。

## 5. おわりに

本稿ではかげ、鏡面反射の影響を考慮した高精度な物体の法線推定手法について提案した。また、あらかじめ撮影した画像を逐次的に追加する予備実験から、かげ、鏡面反射の影響を考慮した照明計画の提案手法の有効性を確認した。今後は、光源選択、画像撮影のオンライン化、およびより複雑な形状の被写体を用いた照明計画を考えている。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766 および JP17H00744 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] R. Woodham, "Photometric method for determining surface orientation from multiple images", *Optical Engineering*, Vol.19, No.1, pp.139–144, 1980.
- [2] W. Silver. "Determining shape and reflectance using multiple images", Technical report, Master thesis, MIT, 1980.
- [3] O. Drbohlav and M. Chantler, "On optimal light configurations in photometric stereo", In *Proc. IEEE ICCV2005*, Vol.II, pp.1707–1712, 2005.
- [4] A. Ali, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Efficient modeling of objects BRDF with planned sampling", *ISPJ Trans. CVA*, Vol.5, pp.114–118, 2013.
- [5] H. Murase and S. Nayar, "Illumination planning for object recognition using parametric eigenspaces", *IEEE Trans. PAMI*, Vol.16, No.12, pp.1219–1227, 1994.