

ライトフィールド履歴の類似度に基づく鏡面反射物体の法線推定

黒木 武 岡部 孝弘
九州工業大学 大学院情報工学府

1 はじめに

照度差ステレオ [1] は、光源方向の異なる複数枚の画像から、陰影の変化に基づいて物体表面上の法線を推定する技術である。古典的な手法では、物体表面は理想的な拡散反射面のモデルである Lambert モデルに従うこと、ならびに、光源は既知の平行光線であることを仮定している。

しかしながら、物体表面で観測される反射光がほとんど鏡面反射であるような鏡面反射物体の場合、鏡面反射の明るさは視線方向に依存して Lambert モデルに従わないことから、物体形状を復元することは困難である。また、古典的な照度差ステレオでは、光源の方向と明るさを事前に較正する必要がある。光源推定には鏡面球などのセットアップや、シーン中の影や明るさを利用した手法があるが、法線推定に軸に置いた場合、これらは手間となるのは明らかである。

反射特性も光源方向も未知の場合に、光源方向の変化に伴う輝度の変化、つまり、輝度履歴に基づく手法が提案されている [2]。この手法では、類似の法線ベクトルを持つ物体表面上の点が類似の輝度履歴を持つ (図 1(a),(c)) ことに着目して、多次元尺度構成法 (MDS) を用いて、輝度履歴を輝度履歴間の距離を保存するように 3 次元空間に埋め込むことで法線を推定している。

しかしながら、輝度履歴と法線ベクトルが常に先ほどの相関を示すとは限らない。鏡面反射の明るさは視線方向が正反射方向から外れると急激に暗くなる。そのため、鏡面反射物体を対象にした場合、ある単一光源下での鏡面反射はごく限られた範囲でしか観測されず、類似した法線ベクトルを持つ点であっても輝度履歴に大きな差異が生じてしまう (図 1(b),(d))。

そこで本研究では、未較正光源下においても有効な、多視点から観測した光源方向の変化に伴う輝度の変化、つまり、ライトフィールド (LF) 履歴の類似度に基づいた鏡面反射物体の法線推定手法を提案する。鏡面反射を多視点から密に捉えることで、単一視点からの輝度履歴には現れないような類似度を捉えることができる点が提案手法の特徴である。

2 提案手法

2.1 ライトフィールド履歴

本研究ではマイクロレンズアレイ型のライトフィールドカメラを仮定し、シーン中のある 1 点を異なる視線方向から見たときの画素値を記録したものを多視点画像 (図 2(a) の一部) として扱う。提案手法では、被写体に焦点が合っていること、ならびに、平行光線を仮定し、カメラと被写体を固定して、光源方向

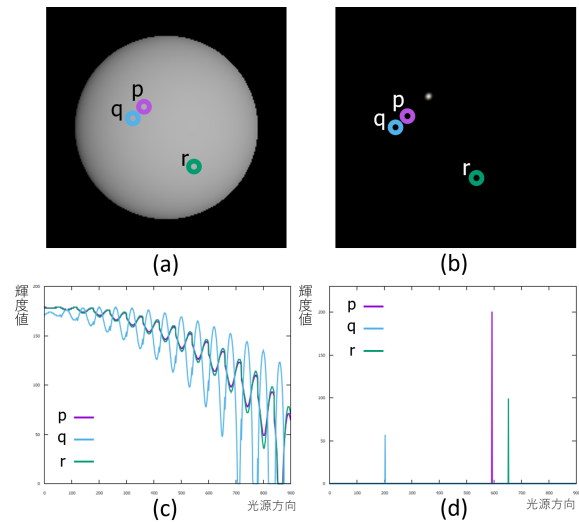


図 1. 物体表面上の点 (p, q : 類似の法線ベクトルを持つ点, r : p, q とは異なる法線ベクトルを持つ点) における、光源変動に伴う単一視点から見た輝度変化 (合成画像実験). (a),(c): 拡散反射物体の場合, (b),(d) 鏡面反射物体の場合.

を変化させながら多視点画像を撮影する。ある光源 l ($l = 1, 2, 3, \dots, L$) 下において、物体表面上のある点 p ($p = 1, 2, 3, \dots, P$) を視線方向 v ($v = 1, 2, 3, \dots, V$) から観測したときの輝度値 I_{plv} とする。これらを並べた行列

$$I_p = \begin{pmatrix} I_{p11} & I_{p12} & \dots & I_{p1V} \\ I_{p21} & I_{p22} & \dots & I_{p2V} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{pL1} & I_{pL2} & \dots & I_{pLV} \end{pmatrix} \quad (1)$$

を点 p における LF 履歴と定義する。このとき、各行の要素からなる行ベクトルは点 p でのある時刻 (ある光源下) における多視点画像の画素値を並べたものになっている。即ち、この LF 履歴は多視点画像に記録された LF の時系列の集合であると言える。

鏡面反射物体を対象にした場合、単一視点からでは鏡面反射を密に捉えることができず、類似の法線ベクトルを持つ点においても履歴に大きな差異が生じる。一方、LF 履歴は物体表面上のある 1 点を多視点画像内の画素数分の視線方向に分解し、鏡面反射の拡がりや密に捉えた多視点情報であるため、類似度を用いた本手法においては有効に働くと考えられる。

2.2 LF 履歴間距離の定義

法線ベクトルの向きが類似していれば、同一光源下における多視点画像は類似した明るさを持つので、物

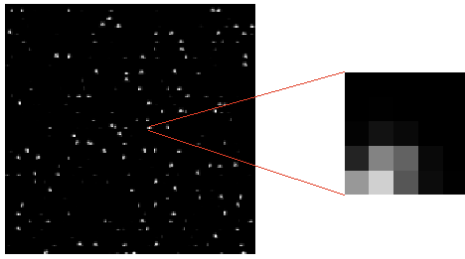


図 2. 入力画像の例とその拡大

体表面上の異なる 2 点 p, q において、同一光源下でそれぞれの多視点画像内に鏡面反射が観測できた場合にのみ、多視点画像内の画素値におけるユークリッド距離 d_l を計算する。

$$d_l = \begin{cases} \|I_{pl} - I_{ql}\| & (\sum_{v=1}^V I_{plv} > 0 \text{ かつ} \\ & \sum_{v=1}^V I_{qlv} > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

これを距離が 0 でない d_l の要素数で平均化し、物体表面上の異なる 2 点 p, q における LF 履歴間の距離 D を

$$D = \begin{cases} \frac{\sum_{l=1}^L d_l}{n(d_l)} & (\sum_{l=1}^L d_l \neq 0) \\ \infty & (\sum_{l=1}^L d_l = 0) \end{cases} \quad (3)$$

のように定義する。ここで、全てのパターンの同一光源下における 2 点で鏡面反射が観測出来ない場合、対応する法線ベクトルは大きく異なると考えられるので距離は無限大に置き換える。 $n(d_l)$ は距離が 0 でない d_l の要素を数える演算を表す。

2.3 次元削減と射影

物体表面上の全ての 2 点間について、前節で定義した LF 履歴間距離の最短距離を求めたものを距離行列とする。距離行列に対して、距離を保存する次元削減法として知られている MDS(多次元尺度構成法)[3] を用いて、3 次元空間への埋め込みを行う。これにより得られる 3 次元空間内の点間の距離は、それぞれに対応した法線ベクトルの相対的な角度のみを表していると考えられる [2]。そこで、最終的には MDS により得られた点群を単位球面上に中心射影することにより、法線ベクトルを決定する。また、MDS による射影では原点と座標軸が不定なので、4 つの光源方向が既知と仮定してそれらを求める。

3 合成画像を用いた実験

提案手法の有効性を確認するために、シミュレーションにより生成した入力画像を用いて実験を行った。法線方向は天頂角 $\theta (0 \leq \theta \leq 30)$ の範囲内で一様な確率で分布させた。光源数は $L = 300$ とし、ある点の周りに一様な確率で分布させた (うち 4 方向は、単位球の中心推定のために既知)。また、物体表面上のある一点を視線方向数 $V = 25$ に分解して観測しているものとする。物体表面の反射モデルには Phong モデルを仮定し、鏡面反射のみが観測される入力画像を生成し

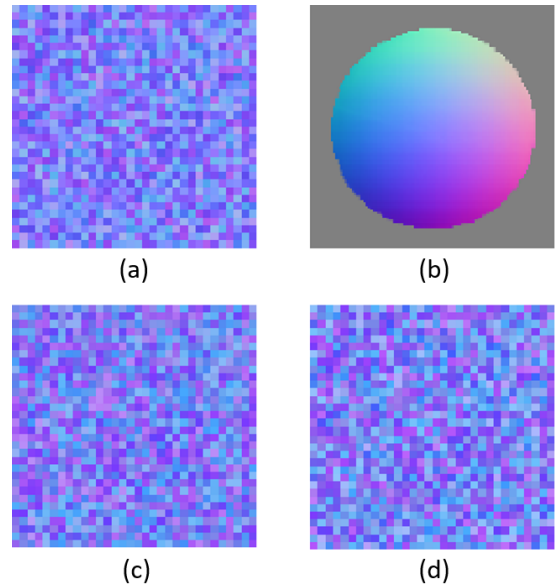


図 3. 合成画像実験の結果

た。図 2 がその入力画像の例とその拡大である。入力画像は 5×5 の小画像の集合になっており、この小画像は物体表面上のある点を異なる視点方向から観測したときの画素値が記録されている。また、図 3 に (a) 法線ベクトルの真値、(b) 球の法線マップ、(c) 単一視点からの見えを用いて推定した法線ベクトル、及び、(d) 提案手法を用いて推定した法線ベクトルを可視化したもの示す。(c) と (d) それぞれについて (a) と比較してみると、(c) の方が部分的に正しく法線が推定できていない点が目立っているのが分かる。また真値との平均二乗誤差 ($^{\circ}$) を求めたところ、(c) では 16.7, (d) では 7.2 となっていることから、定量的にも、鋭い鏡面反射を有する物体に対して提案手法が有効であることが確認できた。

4 むすび

本稿では、未校正光源下における LF 履歴の類似度に基づいて鏡面反射物体の法線を推定する手法を提案した。また、合成画像を用いて実験を行い、LF 履歴を用いた提案手法が鏡面反射物体に対して有効に働くことを確認した。今後は、ライトフィールドカメラを用いた実画像での実験や鏡面反射モデルに基づいた LF 履歴間の距離についても検討したい。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766 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*, 19(1), pp.139-144, 1980.
- [2] I. Sato, T. Okabe, Q. Yu and Y. Sato, “Shape reconstruction based on similarity in radiance changes under varying illumination”, in *Proc. IEEE ICCV07*, pp.1-8, 2007.
- [3] K. Mardia, J. Kent, and J. Bibby, *Multivariate analysis*, Academic Press, 1979.