Vol.2016-CVIM-202 No.35
2016/5/12

カメラ応答関数未知の単一画像からの形状復元は可能か？

小田 武蔵[1,a)]　岡部 孝弘[2,b)]

概要：物体表面における反射光の明るさを手掛かりにして単一画像から物体形状を復元する技術は，Shape from Shading（SfS）と呼ばれる．従来の SfS では，画素値が放射輝度に比例していること，つまり，カメラ応答関数が線形であることを仮定していた．ところが，民生用カメラの応答関数は一般に非線形であるため，従来手法を適用するには，応答関数を事前に較正する必要がある．そこで本研究では，カメラ応答関数が未知の単一画像からの形状復元に取り組む．具体的には，非線形のカメラ応答関数が従来の SfS による形状復元に与える影響を調べたのち，物体表面の可積分条件に基づく物体形状とカメラ応答関数の同時推定について検討する．

キーワード：Shape from Shading，カメラ応答関数，可積分条件

1. まえがき

ヒトの視覚機能の模倣に端を発するコンピュータビジョンの研究において，単一画像の理解，つまり，1 枚の画像から形状・反射特性・光源環境などのシーンの記述を復元することは，中心的な研究課題の 1 つである．本研究では，物体表面における反射光の強度に基づいて単一画像から物体形状を復元する Shape from Shading（SfS） [3] に取り組む．

物体表面の放射輝度と画素値の関係は，カメラ応答関数により記述される．従来の SfS では，画素値が輝度に比例していること，つまり，カメラ応答関数が線形であることを仮定していた．ところが，一般に，民生用カメラの応答関数は未知で非線形であるため [2]，従来手法を用いるには，カメラ応答関数を事前に較正する必要があった．

そこで本研究では，カメラ応答関数が未知の単一画像からの形状復元に取り組む．具体的には，非線形のカメラ応答関数が従来の SfS による形状復元に与える影響を調べたのち，物体表面の可積分条件 [1] に基づく物体形状とカメラ応答関数の同時推定について検討する．

2. カメラ応答関数の形状復元への影響

平行投影を仮定して，画像平面上の位置 (x, y) における物体表面の奥行きを $z(x, y)$ と表す．物体表面の反射特性とシーンの光源環境が既知のとき，物体表面の輝度 E は面の勾配 $(p, q) = (\partial z/\partial x, \partial z/\partial y)$ の関数になる．SfS では，観測される輝度 $E(x, y)$ が未知の勾配から決まる輝度に一致すること

$$E(x, y) = R(p(x, y), q(x, y)) \tag{1}$$

に加えて，滑らかさ拘束や遮蔽輪郭線における法線も利用して形状を復元する．ここで関数 R は反射率地図と呼ばれる．

従来手法では，画素値 I が輝度 E に等しい，つまり，$I = E$ を仮定して形状復元を行っていた．ところが，一般に，民生用カメラは非線形な応答関数を持つことが知られている [2]．例えば，カメラ応答関数としてガンマ補正を仮定すると，画素値と輝度の関係は $I = E^\gamma$ となる [*1]．したがって，$\gamma \neq 1$ のときに $I \neq E$ となるため，従来の SfS により復元された形状は正確ではないことが予想される．

本稿では，物体表面の反射特性として Lambert モデルを，シーンの光源環境としてカメラ方向から被写体を照らす平行光線を仮定する．図 1 と図 2 に，γ の値を変えたときの球と楕円体の画像（上段），および，SfS による形状復元結果（下段）を示す．$\gamma = 1$ のときに概ね正しい形状が得られるのに対して，$\gamma < 1$ のときは画素値が大きくなり，物体表面がより光源（＝カメラ）方向を向いているとみなされるために，高さ方向に縮んだ形状が得られる．逆に，$\gamma > 1$ のときは，画素値が小さくなり，物体表面の勾配がより大きいとみなされるために，高さ方向に伸びた形状が得られる．このように，従来の SfS は非線形の応答関数の

1 九州工業大学 大学院情報工学府 先端情報工学専攻
2 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
a) m_oda@pluto.ai.kyutech.ac.jp
b) okabe@ai.kyutech.ac.jp

*1 画素値 I も輝度 E も $[0, 1]$ の値を取るものとする．

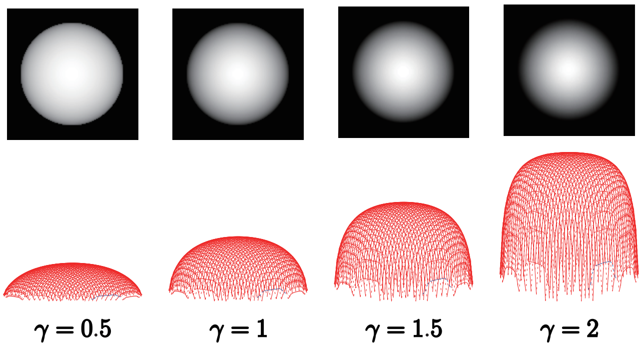

図 1 γ の値を変えたときの球の画像（上段），および，SfS による形状復元結果（下段）．

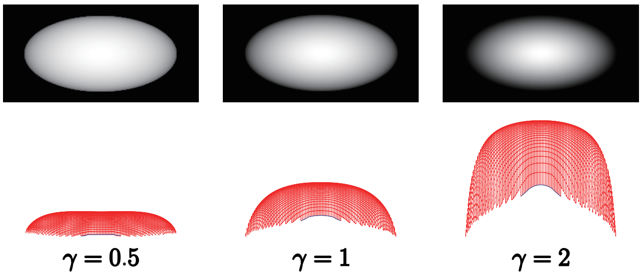

図 2 γ の値を変えたときの楕円体の画像（上段），および，SfS による形状復元結果（下段）．

影響を受けることが分かる．

また，楕円体に関しては，$\gamma \neq 1$ のときに，楕円体の遮蔽輪郭線の高さが一定ではないことが分かる．これは，非線形のカメラ応答関数の影響を受けた勾配は正確ではないために，勾配を長径方向および短径方向に沿って積分したときに差が生じるからであると考えられる [*2]．

3. 可積分条件に基づく同時推定

物体表面上の点 A から点 B に向かって勾配を積分するときに，どのような経路を通っても積分結果が一定になるような滑らかな物体表面は，可積分条件 [1] を満たす．可積分条件は，勾配の微分を用いて，

$$\mathrm{curl}(p, q) = \frac{\partial p(x, y)}{\partial y} - \frac{\partial p(x, y)}{\partial x} \tag{2}$$

と表すことができる．

本研究では，非線形のカメラ応答関数の影響で歪んだ形状は可積分条件を満たさないという予想のもと，SfS で復元された物体形状の可積分条件からのずれ

$$\sum_{x,y} [\mathrm{curl}(p, q)]^2 \tag{3}$$

を調べた．

その結果，図 3 と図 4 に示すように，可積分条件からのずれは γ について単調増加となった．つまり，可積分条件からのずれに基づいて物体形状とカメラ応答関数を同時に

*2 数値計算の誤差がなければ，$\gamma = 1$ のときは遮蔽輪郭線の高さが一定になると考えられる．

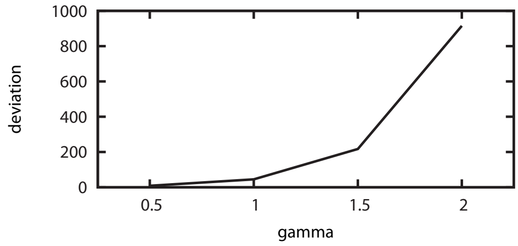

図 3 可積分条件からのずれ（球）．

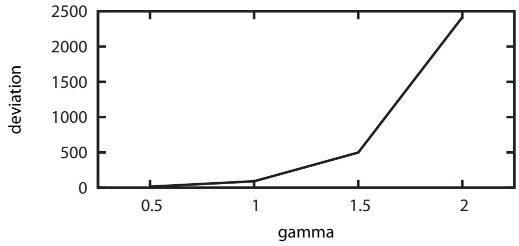

図 4 可積分条件からのずれ（楕円体）．

推定することが困難であることが分かった．これは，高さ方向に伸びれば伸びるほど，可積分条件からのずれを求める際に必要な勾配の微分を計算するときの離散化誤差もまた大きくなるためであると考えられる．

4. むすび

本稿では，カメラ応答関数が未知の単一画像からの形状復元について議論した．具体的には，非線形のカメラ応答関数が SfS による形状復元に与える影響を調べるとともに，可積分条件に基づく物体形状とカメラ応答関数の同時推定についても検討した．離散化誤差の考慮や事前知識を利用した物体形状とカメラ応答関数の同時推定は今後の課題である．

謝辞 本研究の一部は，JSPS 科研費（No. 26540088）の助成を受けた．

参考文献

[1] P. Belhumeur, D. Kriegman, and A. Yuille, "The bas-relief ambiguity", In Proc. CVPR1997, pp.1060–1066, 1997.
[2] M. Grossberg and S. Nayar, "What is space of camera response functions?," In Proc. IEEE CVPR2003, pp.602–609, 2003.
[3] K. Ikeuchi and B. Horn, "Numerical shape from shading and occluding boundaries", AI, 17(1-3), pp.141–184, 1981.