

非ランバート画像の輝度補正によるステレオ復元

Stereo Reconstruction with Intensity Correction of Non-Lambertian Images

本村 耕土[†] 原 健二[†] 井上 光平[†] 浦浜 喜一[†]
 Kouto MOTOMURA[†] Kenji HARA[†] Kohei INOUE[†] and Kiichi URAHAMA[†]

[†]九州大学
[†] Kyushu University

Abstract In the past, the diffuse reflection component has often been assumed to be Lambertian in many studies of photometric and multi-view stereo, which aim to extract 3D information from images. We propose a method to correct intensities of non-Lambertian images for directly using the existing stereo reconstruction methods. Our method obtains Lambertian images by estimating the incident angles relative to the surface normals from a single image.

1. はじめに

画像から3次元情報を抽出する技術の代表的なものとして、照度差ステレオ (Photometric Stereo)や多視点ステレオ (Multi-View Stereo)がある。これらの研究の多くで、物体の拡散反射特性はランバートモデルに従うことが仮定されている。ランバートモデルは、モデル式が非常に簡単でCG/CV分野における逆問題の解析が容易になることが多い。しかし、現実の物体表面の反射特性はランバート反射とは異なっていることが多い。一方、粗い物体表面の拡散反射モデルであるOren-Nayarモデル[1]と滑らかな物体表面の拡散反射モデルであるWolffモデル[2]を結合して簡略化を行ったOren-Nayar-Wolff簡略化モデル[3]が実際の物体表面の反射特性に最も忠実な拡散反射モデルのひとつとして広く知られている。このモデルは、ランバートモデルと異なり、視点方向に依存し、物体に干渉する複雑な物理現象を考慮するため計算量は多くなるが、実際の物の見え方とほとんど同じ見え方を実現できる。

本稿では、物体表面が粗い面から滑らかな面までの幅広い材質に対してランバート面を仮定した従来のステレオ法が適用できるように、Oren-Nayar-Wolff簡略化モデル[3]を用いて物体の表面輝度を補正する手法を提案する。この先行研究として、Raghebらの表面輝度補正手法が知られている[4]。彼らの表面輝度補正手法では、適用範囲が光源方向と視線方向が同じ場合に制限されるという問題があった。また、多視点ステレオ法では二つの視点方向の少なくともひとつが光源方向とは異なっていなければならない。そこで、本研究ではRaghebらの手法とは異なるアプローチで、上記のような制限を受けることなく高精度に輝度補正を行い、ステレオ復元する手法を提案する。

2. 提案手法

本章では、Oren-Nayar-Wolff簡略化モデル(以下、

Oren-Nayar-Wolffモデル)を微分可能近似した反射モデルを用いた表面輝度補正手法を提案する。

2.1. 解析的 Oren-Nayar-Wolff モデル

本節では、微分不可能で最適化を効率的に行うことが困難なOren-Nayar-Wolffモデルを微分可能関数によって近似した、解析的モデル(以下、解析的Oren-Nayar-Wolffモデル)を定義する。表記を簡単にするため、ひとつのチャンネルだけで記述するが、これはRGBの各チャンネルについて同様に成り立つ。Oren-Nayar-Wolffモデルを用いて画像内に存在する物体の表面の輝度値は次式で表される。

$$I(\mathbf{n}) = K \cos \theta_i(\mathbf{n}) \left\{ A \tilde{G} \tilde{H} + B \ln \left[\frac{1 + \exp[\gamma_i \cos(\phi_i(\mathbf{n}) - \phi_r(\mathbf{n}))]}{2} \right] \right\}^{\frac{1}{\gamma_i}} \sin \tilde{\alpha}(\mathbf{n}) \tan \tilde{\beta}(\mathbf{n}) \quad (1)$$

ここで、

$$K = \frac{\rho}{\pi} E_0, \quad A = 1 - 0.5 \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.33} \right), \quad \tilde{G} = 1 - 0.935 \left[\left(\frac{2}{\pi} \theta_i \right)^5 + 0.07 \right]$$

$$\tilde{H} = 1 - 0.935 \left[\left\{ \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{\sin \theta_i}{1.7} \right) \right\}^5 + 0.07 \right], \quad B = 0.45 \left(\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + 0.09} \right)$$

$$\tilde{\alpha} = \ln \left[\frac{\exp[\gamma_2 \theta_i] + \exp[\gamma_2 \theta_r]}{2} \right]^{\frac{1}{\gamma_2}}, \quad \tilde{\beta} = \ln \left[\frac{\exp[-\gamma_3 \theta_i] + \exp[-\gamma_3 \theta_r]}{2} \right]^{\frac{1}{\gamma_3}}$$

であり、 $I(\mathbf{n})$ は画像照度、 θ_i は物体表面の法線ベクトルと光源方向ベクトルのなす角、 $\phi_i - \phi_r$ は法線と垂直な平面へ射影した法線ベクトルと視線方向ベクトルのなす角、 $\mathbf{n} = (n_1, n_2)$ は物体表面の法線ベクトルを $\mathbf{N} = (n_1, n_2, 1) = (\mathbf{n}, 1)$ と表したときのXY座標を二次元ベクトルで表したものである。 ρ はアルベド、 E_0 は光源輝度、 $\sigma \in [0, 1]$ は表面の粗さを表すパラメータである。なお、Raghebらの手法と同様に、単一平行光源の方向ベクトル、 $K = \rho E_0 / \pi$ 、 σ はいずれも既知とする。

2.2. 入射角推定による輝度補正

本手法では、Raghebらの手法とは異なり、前節の解析的な反射モデルに基づいて表面法線を陽に推定して

得られた入射角を用いて、輝度補正を行う手法を提案する．ここでは、物体表面の画素 p ($p = 1, \dots, P$)に対応する表面の法線ベクトル \mathbf{n}_p ($p = 1, \dots, P$)の推定値を

$$E(\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_p) = \sum_{p=1}^P (I(\mathbf{n}_p) - d_p)^2 \quad (2)$$

を最小化することで求めることができる． $I(\mathbf{n}_p)$ は解析的 Oren-Nayar-Wolff モデルによって予測される画素 p の輝度値、 d_p は画素 p の観測値である． $E(\mathbf{n}_1, \dots, \mathbf{n}_p)$ を目的関数として勾配法を用いて局所最小解を求めることで、表面法線分布 \mathbf{n}_p ($p = 1, \dots, P$)が推定される．このようにして得られる表面法線ベクトルは必ずしも大域的最適解ではないものの、光源方向ベクトルとのなす角、すなわち入射角はほぼ正しく推定されることが予備実験で確かめられた．したがって、このようにして推定された表面法線分布をランバートモデルの式に代入することにより、表面輝度が補正される．

3. 実験

3.1. 輝度補正

実験は、均一な反射特性を仮定した顔の像を3次元空間上に仮想的に配置し、既知の単一平行光源下で Oren-Nayar-Wolff モデルの表面粗さとアルベドをそれぞれ $\sigma = 0.5$, $K = 1$ と設定してレンダリングした合成画像を入力として行った．ランバートモデルでレンダリングした反射光画像を正解画像とし、提案手法と Ragheb らの手法をそれぞれ用いて作成した輝度補正画像と正解画像との前景画素の平均誤差を算出し、視点と光源の角度を0度から55度まで5度刻みで変えながら推定精度を比較した．実験の出力画像の一例(視線と光源方向のなす角が45度)を図1に示す．また、視点と光源の角度が0度から55度までの提案手法及び Ragheb らの手法の推定誤差のプロットを図2に示す．

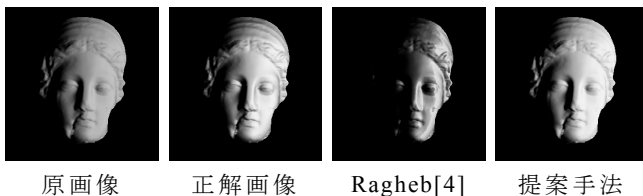


図1 従来手法との定性的な比較

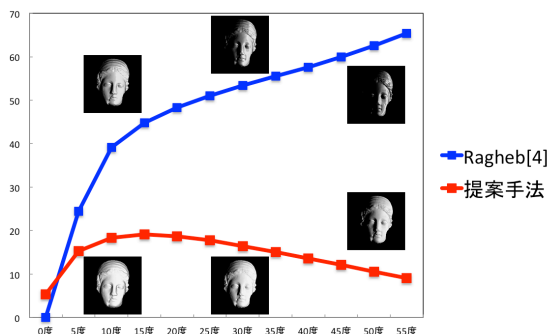


図2 従来手法との定量的な比較

図1と図2より、視点方向と光源方向が異なる場合、提案手法が Ragheb らの手法よりも、高精度に輝度補正しており、視点方向と光源方向が同じ場合においてもほとんど同じ精度が得られたことが示されている．

3.2. 対応点探索

輝度補正を行うことによって、ステレオ対応付けの精度が向上するか確認するため、補正画像に対応点探索を行った．点の対応付けは、平行化された2枚のステレオ画像の基準画像の各画素ごとに、行座標が同じで輝度値が最も近い点を参照画像から探すという手順で行った．対応点探索実験の結果を図3に示す．

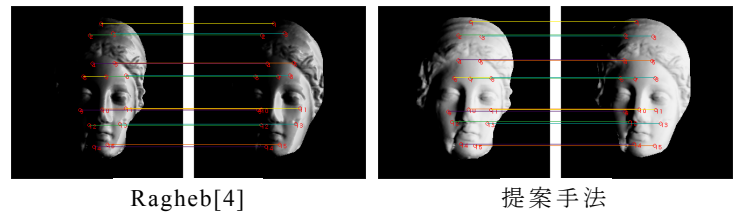


図3 従来手法との探索結果の比較

図3より、Ragheb らの手法よりも提案手法で輝度補正した方が高精度対応点探索できていることが確認できる．

4. むすび

本稿では、非ランバート画像に対するステレオ復元のため、解析的 Oren-Nayar-Wolff 簡略化モデルを用いて表面輝度補正を行う手法を提案した．光源方向が視線方向と同じになるように適用条件が制限されていた従来手法と比べ、提案手法は任意光源方向下で高精度に表面輝度補正を行えることを示した．

謝辞 本研究は、科学研究費補助金(課題番号: 15K00239)によって行われたものです．

文 献

- [1] M. Oren and S. Nayar: "Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision", *Int. J. Comput. Vis.*, vol.14, no.3, pp.227-251, 1995.
- [2] L.B.Wolff: "Diffuse reflectance model for smooth dielectric surface", *J.Opt.Soc.Am.A*, vol.11, pp.2956-2968, 1994.
- [3] L.B.Wolff, S.K.Nayar, and M.Oren: "Diffuse reflection models for computer vision", *Int. J. Comput. Vis.*, vol.30, no.1, pp.1574-1595, 2005.
- [4] H. Ragheb and E. R. Hancock: "Surface Radiance Correction for Shape-from-Shading", *Pattern Recognition*, vol.38, pp.1574-1595, 2005.

†九州大学 芸術工学研究院

〒815-8540 福岡県 福岡市南区 塩原 4-9-1

E-mail: motomura.kouto.769@s.kyushu-u.ac.jp