

形状情報に基づく相互反射補正による 照度差ステレオの高精度化

猪瀬健二^{1,a)} 川上玲^{1,b)} 向川康博^{2,c)} 池内克史^{1,d)}

1. はじめに

リバーエンジニアリングやコンテンツ制作において、実シーンを計測し、自動でモデリングすることは効率化、データの正確さの面で重要である。近年 Time of Flight 形式や三角測量法によるデプスセンシングのアプリケーションが普及しつつあり、簡易な形状情報復元が可能となっている中、SfS (Shape from Shading) や照度差ステレオのように陰影情報を利用した手法を組み合わせ、復元形状を高精度化する手法が提案されている [1], [2]。

しかしながら、SfS や照度差ステレオでは、相互反射の影響が復元精度を落としてしまう問題がある。この問題に対して、これまでにいくつか手法が提案されているが、物体の材質に制約があるもの [2] や形状が簡素なものでの実験に留まっているもの [3]、あるいは特殊なセットアップを要するなどの制約がある [4]。

そこで、本論文では、より簡易な計測構成で実現可能な手法を提案する。本手法では、既存のデプスセンシングによって得られる形状を利用し、ラジオシティ法によって相互反射の影響を考慮した処理を実現する。また、得られるデプスは照明方向に関する校正にも利用される。光源の強度に関しては、反射率が既知の物体をシーンに含めることによって校正する。これによって、単一点光源を動かしながら撮影した画像に対して、相互反射の影響を除去した照度差ステレオが可能となる。

2. 提案手法

我々の手法は、単一点光源を用いて、異なる照明条件下で撮影された画像列に対して、相互反射成分を補正することによって照度差ステレオの精度を上げる手法である。光源は無限遠点光源、対象はランバート反射物体、カメラの感度曲線は線形応答であると仮定する。本手法では、相互

反射成分を補正するために撮影シーンの相互反射も含む反射成分と直接反射のみの反射成分を推定し、その比率を利用する。ランバート反射モデル、ラジオシティ法それぞれを用いて直接反射成分と相互反射成分のレンダリングを行う。次に、そのレンダリング画像から、各画素の直接反射成分の割合を推定し、その値を撮影画像の輝度値に乗算することにより撮影画像から相互反射成分を除去する。なお、ラジオシティ法ではパッチからなる形状情報と校正済み光源情報が必要になるため、本手法では、形状情報に関しては、Jancosek らの多視点ステレオ [5] によって取得し、光源の校正に関しては、シーンに反射率の既知の物体を含めて撮影することによって実現する。図 1 は入力データとその処理手順の概要図であり、その処理手順を後述する。

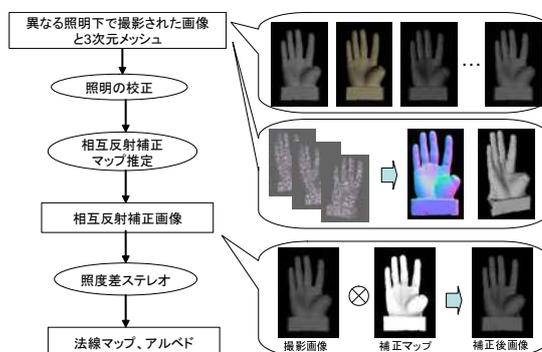


図 1 提案手法の概要図

(1) 入力 3D メッシュ取得

複数視点より対象物体を撮影し、手順 (2) 以降の処理で用いる形状情報を多視点ステレオ法により取得する。このとき、反射率が既知の物体の形状情報も取得する。

(2) 照明の校正

(2-1) 照明方向の推定

本手法では、因子分解法を利用した照明方向の推定を行う [1]。単一の無限遠点光源を用いて照明条件を変えながら複数枚撮影したとき、観測輝度値で構成される行列 I は

$$I \approx U_3 \Sigma V_3^t = \tilde{N} A A^{-1} \tilde{L} \quad (1)$$

となる。ここで I は $p \times q$ の行列、 p は画素数、 q は画像

¹ 東京大学大学院
² 奈良先端科学技術大学院大学
^{a)} inoken@cvtl.iis.u-tokyo.ac.jp
^{b)} rei@nae-lab.org
^{c)} mukaigawa@is.naist.jp
^{d)} ki@cvtl.iis.u-tokyo.ac.jp

枚数である。\$U_3, V_3\$ はそれぞれ \$p \times 3, q \times 3\$ の部分行列であり、特異値分解後の特異値の上位 3 つに対応する。\$\tilde{N} = U_3 \Sigma^{\frac{1}{2}} A^{-1}\$ は、各行が各画素の法線に関する情報を表しており、\$\tilde{L} = A \Sigma^{\frac{1}{2}} V_3^t\$ は各列が各画像の照明情報を表す。\$A\$ は任意の行列であり、多視点ステレオによって得られる形状の法線 \$N_{mvs}\$ を用いて以下の式を最適化することにより推定することができる。

$$A = \arg \min \|U_3 \Sigma^{\frac{1}{2}} A^{-1} - N_{mvs}\|_F \quad (2)$$

以上により \$A\$ が求まると \$L = A \Sigma^{\frac{1}{2}} V_3^t\$ により \$L\$ が求まる。\$L\$ の各列ベクトルを正規化したものが光線ベクトルとなる。

(2-2) 照明強度の推定

無限遠点光源下でランバート反射物体の一次反射成分の観測輝度値 \$I_{direct}\$ は以下で表される。

$$I_{direct} = kL = ks \frac{\rho}{\pi} l \cdot n \quad (3)$$

ここで、\$k\$ はカメラの線形応答の係数、\$L\$ は物体からカメラに向かう放射輝度、\$s\$ は光源の強度、\$\rho\$ はアルベド、\$l, n\$ はそれぞれ光線ベクトル、法線ベクトルである。\$n, l\$ はそれぞれ手順 (1), (2-1) より求まるので、反射率が既知の物体の観測輝度値を用いて \$k \times s\$ は下式により求まる

$$ks = \frac{i\pi}{\rho l \cdot n} \quad (4)$$

(3) ラジオシティ法に基づく直接反射成分の比率推定

本手法では、直接反射成分を式 (3) により、相互反射も含めた反射成分を以下のラジオシティ法によって求める [6]。

$$L_i = L_{si} + \frac{\rho_i}{\pi} \sum_{j=1}^m L_j K_{ij} \quad (5)$$

ここで \$L_i\$ は 3D メッシュを構成するパッチ \$i\$ の放射輝度、\$K_{ij}\$ は 3D メッシュのパッチ \$i, j\$ 間のフォームファクターであり、反射成分はパッチごとに求まる。画像の画素に対応する輝度値は対応するパッチからサンプリングされる。式 (3), (4) においてアルベドが求まっている必要があり、アルベドの推定に関しては手順 (3-1) に述べる。

(3-1) アルベドの推定

式 (3) よりアルベドが既知であれば、直接反射成分を求めることができる。アルベドは以下の式で求められる [6]。

$$\rho_i = \pi L_i (E_{si} + \sum_m L_m K_{im})^{-1}, E_{si} = ksl \cdot n \quad (6)$$

(3-2) 比率マップの算出

式 (3), (5) を用いて、直接反射成分の割合は下式で求まる

$$r = \frac{I_{direct}}{I_{direct} + I_{global}} \quad (7)$$

各入力画像の各画素で比率 \$r\$ を算出し観測輝度値に乗算することによって、相互反射補正後の画像が得られる。

(4) 照度差ステレオ

上述の補正後画像を用いて照度差ステレオを実施することによって、最終的な法線マップおよびアルベドが得られる。照度差ステレオについては、式 (1), (2) と同様に相互反射補正後画像の観測輝度行列 \$I\$ に対して特異値分解した後、\$f(\tilde{N})\$ を計算し、その各行ベクトルが各画素の法線ベクトルとして求まる。また正規化する前の各行ベクトルのノルムが各画素のアルベドとして求まる。

3. 実験結果

本手法の有効性を確認するため、石膏の球を対象として、提案手法による法線推定を行った。相互反射が発生するように板を設置し、相互反射補正を適用した場合としなかった場合での法線の推定結果の比較を行った。板を設置しないときに復元した法線を真値と仮定し、それぞれの法線の推定結果との差分を可視化したものが図 2 である。提案手法の結果 (e) の方が、球の左側面の誤差が小さくなっているのが確認できた。また、真値法線との平均誤差については、相互反射補正をした場合が 2.31 度、相互反射補正しなかった場合が 2.46 度であった。平均誤差では精度わずかであるが、図 2 の (e), (g) の誤差分布を比較すると、相互反射が大きいと思われる左側面の精度が向上しているのが確認できる。

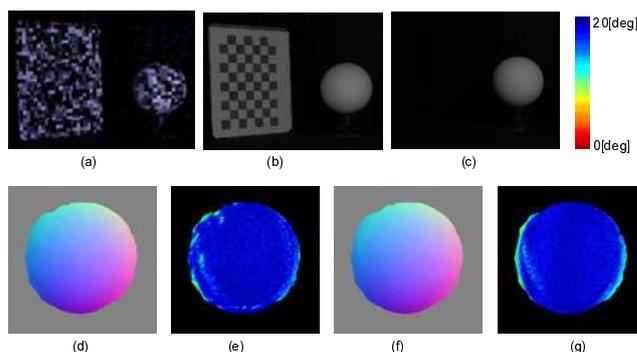


図 2 石膏の球での実験。(a) 多視点ステレオ用のシーン。(b) 相互反射が発生するときのシーン。(c) 相互反射が発生しないときのシーン (d) 提案手法による法線の推定結果 (e) 提案手法による法線の誤差。(f) 相互反射補正なしでの法線の推定結果。(g) 相互反射補正なしの法線の誤差

参考文献

- [1] Jaesik Park, Sudipta Sinha, Yasuyuki Matsushita, Yu-Wing Tai, In so Kweon, "Photometric Stereo using Planar Mesh Parameterization," ICCV, 2013.
- [2] Yudeog Han, Joon-Young Lee, In So Kweon, "High Quality Shape from a Single RGB-D Image under Uncalibrated Natural Illumination," ICCV, 2013.
- [3] Shree K. Nayar, Katsushi Ikeuchi, Takeo Kanade, "Shape from Interreflections," ICCV, 1990.
- [4] 町田貴史, 横矢直和, "相互反射を伴う物体表面反射特性の推定," 電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報, 2002, 101 巻, 652 号.
- [5] M. Jancosek, T. Pajdla. "Multi-View Reconstruction Preserving Weakly-Supported Surfaces," CVPR, 2011
- [6] Kentaro Suzuki, Rei Kawakami, Katsushi Ikeuchi. "Diffuse Reflectance Estimation Based on Sky Appearance in an LDR Outdoor Image," MIRU, 2013