

サーフェイスフローを用いた3次元物体の質感編集

江頭 一馬¹ 土橋 宜典¹ 山本 強¹

概要: 与えられた2次元画像と一致するよう3次元物体の材質パラメータと光源情報を推定する手法を検討した。本手法では、3次元物体から生成したデプス画像と法線画像を用いてサーフェイスフローと呼ばれる手法により画像処理的に編集を施して質感を編集する。しかし、この手法では、視点を変更することができないという問題がある。そこで、サーフェイスフローにより生成した編集後の画像と一致するよう最適な材質パラメータと光源情報を計算する。これにより、視点を変更しても違和感のない画像を生成することを目的とする。光源情報を推定する手法、ヒストグラムマッチングを用いる手法、Phongのモデルを仮定して材質パラメータを推定する手法、より一般的な反射分布関数(BRDF)を推定する手法の4つの手法について検討したので報告する。

キーワード: サーフェイスフロー 環境マップ ヒストグラムマッチング BRDF

Editing appearances of 3D objects by using Surface Flow

KAZUMA EGASHIRA¹ YOSHINORI DOBASHI¹ TSUYOSHI YAMAMOTO¹

Abstract: We discuss methods for computing material and lighting information from a user-specified target image. The target image is created by using a technique called surface flow that uses a depth and a normal image computed from a 3D object. The surface flow allows us to interactively design appearances of objects. However, since the surface flow is an image-based method, the viewpoint must be fixed. We address this problem by estimating material and lighting parameters from the target image so that we can change the viewpoint by rendering the object using the estimated parameters. We develop and discuss four different methods based on inverse lighting design, histogram matching, Phong shading model, and inverse BRDF modeling.

Keywords: Surface-Flows, Environment map, Histogram-matching, BRDF

1. はじめに

映像制作において、実世界を撮影して得られる物体の質感は、ユーザが目的とした質感を必ずしも得られる保証はなく、ユーザの目的の質感を表現することは重要である。しかし、3次元物体の見え方は物体の材質と光源情報に依存するため、目的の質感を得るためには試行錯誤的な調整が必要であり、煩雑な作業を伴う。そのため、映像制作において目的の3次元物体の質感を簡単に表現する手法が求められる。3次元物体の見え方を直感的に編集するツール

として Vergne らによるサーフェイスフローを用いた手法が提案されている [1]。この手法では3次元物体のデプス画像と法線画像を用いることによって、ユーザが直感的に3次元物体の質感を編集することが可能である。しかし、この手法では物理法則とは無関係に疑似的な質感表現がなされており、視点や光源を変更することができない。そこで本稿では、サーフェイスフローでデザインした質感から材質パラメータと光源情報の生成を試みる事にする。材質と光源情報を得るために、我々は以下に述べる4つの手法を検討した。

まず1つ目の手法として、3次元シーンにおける光源情報を求める手法を試みた。光源推定として明るさの線形性

¹ 北海道大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University

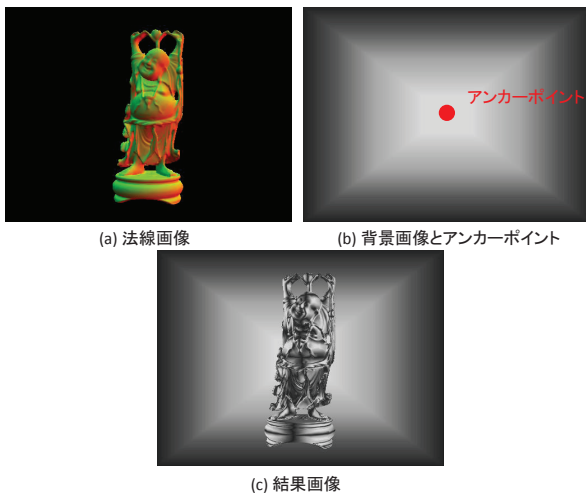


図 1 サーフフェイスフローを用いた画像編集法

を用いた手法を用いる。ここでの明るさの線形性とは、ある 3 次元シーンに置いて複数個の光源が存在するとき、空間内の物体の明るさはそれぞれの光源により照らされる明るさの総和で計算されるということを意味する。本手法では、3 次元シーンにいくつかの光源を配置し、それぞれの光源によって照らされた 3 次元物体の質感とサーフェイスフローを用いてデザインした質感の 2 乗誤差が最小になるように、それぞれの光源情報を計算する。2 つ目の手法としては、Phong のシェーディングモデルを仮定してその材質パラメータを算出する手法を試みた。3 次元物体の材質パラメータを求めるのにも物体の質感の 2 乗誤差を計算するが、ここでは単一の平行光源を用いることによって材質パラメータを計算する。3 つ目の手法として、ヒストグラムマッチングと光源情報を推定する手法を試みた。この手法は、1 つ目の手法で計算した光源情報によって照射された物体の画像と視点を変更した後の画像とのヒストグラムマッチングを行い、視点を変更する度に光源を変更することで目的の質感を表現することを目的としている。4 つ目の手法として、目的の質感に最適な BRDF を計算する手法を試みた。この手法では、BRDF を基底関数の線形和で表現し、目的の質感を表現する最適な基底関数の係数を算出する。

以降、本論文の構成は、2 節で surface flow を用いた質感編集についての解説を行い、3 節で提案手法について述べる。その後、4 節で提案手法を用いた実験結果とその考察について述べ、最後に 5 節でまとめとする。

2. サーフフェイスフローを用いた質感編集

本手法では、目的の質感を得るためにサーフェイスフロー [1] を使って質感編集した画像を入力とし、光源情報と材質パラメータの推定を行っている。そこで、以下ではこの方法について説明する。

この手法では 3 次元物体から生成したデプス画像と法線

画像を用いて物体上にサーフェイスフローと呼ばれる流れ場を計算し、ユーザがインタラクティブに目的とした質感の画像を生成することができる。デプス画像を用いた手法では編集前の画像に物体が張り付けられたかのような編集を行うことができ、法線画像を用いた手法では画像内で物体における反射と屈折が起こっているように編集できる。本手法では法線画像を用いて質感を編集する手法を適用している。以下、法線画像を用いた手法について詳しく説明する。

3 次元物体から生成した法線画像 (図 1(a)) に加えて、背景画像 (図 1(b)) を一枚用意する。その後、ユーザは、アンカーポイントと呼ばれる質感を制御するための点を指定する (図 1(b))。そして、このアンカーポイントを用いて背景画像を変形することで擬似的に質感表現を行う (図 1(c))。具体的には、背景画像の画素 \vec{q} を次式によって画素 $\vec{D}_n(\vec{q})$ にマッピングすることで編集する。

$$\vec{D}_n(\vec{q}) = \vec{q} + \sum_i \omega_i(\vec{q}) f_n(|\vec{n} - \vec{n}_i|)(\vec{n} - \vec{n}_i) \quad (1)$$

$$f_n(u) = \frac{\alpha u}{e^{-\beta} + u(1 - e^{-\beta})} \quad (2)$$

ここで、 ω_i はアンカーポイントからの距離に応じた重み、 \vec{n} は \vec{q} における法線ベクトル、 \vec{n}_i はアンカーポイントの位置の法線ベクトル、 α と β はそれぞれ制御パラメータである。アンカーポイントの位置と制御パラメータの値を変えることによってインタラクティブに質感の編集を行える。この方法では、光源情報や材質パラメータなどの情報なしに質感の編集できる。しかし、そのため、視点位置を変更した画像を作成することができない。そこで、本研究では、この方法によって生成された画像から物理的に正しい光源情報や材質パラメータを復元し、視点位置の変更を可能とすることを試みる。

3. 提案手法

本手法では 2 節で説明した手法により生成された画像から、光源情報や材質パラメータを算出することで、視点位置の変更を可能とすることを旨とする。そのため、以下に述べる 4 つの手法について検討した。すなわち、光源情報を推定する手法 (3.1 節)、光源情報の推定においてヒストグラムマッチングを併用する手法 (3.2 節)、材質パラメータを推定する手法 (3.3 節)、BRDF を推定する手法 (3.4 節) である。以降、それぞれの手法について詳しく説明する。なお、以下では、2 節の方法によって生成された画像をターゲット画像と呼ぶこととする。

以降、3.1 節では光源情報の推定方法し、3.2 節では最適な材質パラメータの算出方法、3.3 節ではヒストグラムマッチング、3.4 節では最適な BRDF の算出方法についてそれぞれ説明する。

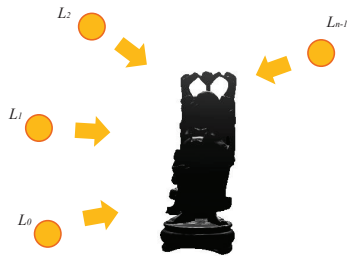


図 2 光源の配置

3.1 光源情報の推定

光源情報を推定するため、図(2)に示すように3次元シーンに n 個の光源を配置する。 i 番目の光源の明るさをそれぞれ L_i とし、光源 i によって照射された時の物体の輝度を $I_i(p)$ とする。 p は画素を表す。このとき、画素 p での物体の明るさ $I(p)$ は以下の式で表せる。

$$I(p) = \sum_{i=0}^{n-1} L_i I_i(p) \quad (3)$$

L_i は式(3)を用いて生成した画像とターゲット画像との輝度差の2乗和を最小とするよう算出する。すなわち、ターゲット画像の画素 p の輝度を $I_t(p)$ としたとき、次式で表される誤差関数 S を最小とする L_i を求める。

$$S = \sum_p (I_t(p) - I(p))^2 \quad (4)$$

誤差関数 S を L_j で微分して0とおくと、次式を得る。

$$\sum_p (I_t(p) - \sum_{i=0}^{n-1} L_i I_i(p)) L_j = 0 \quad (5)$$

この式を L_i について解くことによりターゲット画像を再現する最適な光源情報を得ることができる。

3.2 材質パラメータの算出

ターゲット画像の物体の質感と一致するよう最適な3次元物体の材質パラメータを算出する。物体の材質は拡散反射と鏡面反射の和で表現されるものとする。また、光源は視線方向の反対方向から照射する単一の平行光源を仮定する。拡散反射光の強さ I_d を求める式は以下の式となる。

$$I_d = k_d I_i \cos \alpha \quad (6)$$

ここで、 k_d は拡散反射率、 I_i は入射光の強さ、 α は光の入射方向と面の法線のなす角である。

鏡面反射の計算には Phong のモデルを用いる。このモデルにおける鏡面反射光の強さ I_s は以下の式で与えられる。

$$I_s = k_s I_i (\cos \gamma)^n \quad (7)$$

ここで、 k_s は鏡面反射率であり、 I_i は入射光の強さ、 n はハイライトの大きさを制御するパラメータである。画素 p

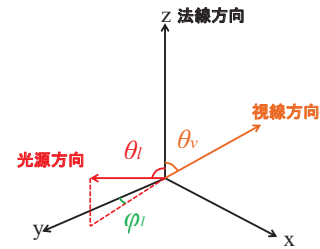


図 3 局所座標系

に対応する物体表面上の点の輝度は、拡散反射光の強さと鏡面反射光の強さの和で求まる。すなわち、

$$I(p) = I_s(p) + I_d(p) \quad (8)$$

本手法では、ターゲット画像 $I_t(p)$ との2乗誤差が最小になるように k_d , k_s , n を計算する。具体的には、それぞれのパラメータを指定された間隔でサンプリングするという全探索を行うことで最適な材質パラメータを算出する。

3.3 ヒストグラムマッチング

ターゲット画像における質感は物理的に計算されたものではなく、ユーザが直感的にデザインしたものである。そのため、ターゲット画像の質感を再現する3.1の手法で計算した光源情報では、ターゲット画像での視点においては違和感ない結果を得られるが、視点を変更した場合に物体の質感がターゲット画像と異なるものになってしまう。そのため、我々は視点を変更した際も、ターゲット画像における物体の質感と一致する質感を得るために、ヒストグラムマッチングを適用する。ヒストグラムマッチングとは画像のヒストグラムを任意のものに変換できる手法である。視点を変更する度にヒストグラムマッチングを行った画像を用いて光源情報を再計算することにより、目的とする質感を得る。具体的な手順は以下のとおりである。まず、3.1節の手法で光源情報の推定を行い、2次元画像として保存する。その後、視点を変更してから、保存した画像とヒストグラムマッチングをおこないその結果画像を用いて、再び3.1節の手法により光源情報の推定を行う。これらを繰り返すことによって、様々な視点からみてもターゲット画像の質感に一致するような質感を得ることができる。

3.4 最適な BRDF の算出

画素 p に対応する物体表面上の点の法線ベクトルを z 軸とする局所座標系を考える。光源として、単一の平行光源を仮定すると、画素 p の輝度 $I(p)$ は次式のように表せる。

$$I(p) = f_r(\theta_v, \theta_l, \phi_v, \phi_l) I_l \quad (9)$$

ここで図3に示すように、 θ_v と ϕ_v は視線方向と z 軸のなす角、 θ_l と ϕ_l は光源方向と z 軸のなす角である、 ϕ_v は視線方向、 ϕ_l は光源方向と、 I_l は光源による入射輝度、 f_r は



図 4 光源情報の推定



図 5 視点変更

BRDFである。ここで、 y 軸を z 軸と視線方向との内積で求まる単位ベクトル、 x 軸を y 軸と z 軸との内積で求まる単位ベクトルとしたとき、視線方向は xz 平面上に存在するので ϕ_v は常に0となる。そのため、BRDFは $\theta_v, \theta_l, \phi_l$ のみの関数となる。いま、画素 p に関するこれらの角度をまとめて

$$\mathbf{s} = (\theta_v(p), \theta_l(p), \phi_l(p)) \quad (10)$$

とおく。また、次式のように、 f_r を基底関数 Φ の線形和で表す。

$$f_r(\mathbf{s}(p)) = \sum_i a_i \Phi(\mathbf{s}(p) - \mathbf{s}_i) \quad (11)$$

ここで、 a_i は各基底関数の係数である。 Φ は次式に示すガウス関数を用いる。

$$\Phi(\mathbf{s}(p) - \mathbf{s}_i) = \exp(-|\mathbf{s}(p) - \mathbf{s}_i|^2) \quad (12)$$

基底関数の係数 a_i は次式を最小とするよう算出する。

$$S = \sum_p (I(p) - f_r(\mathbf{s}(p)))^2 \quad (13)$$

4. 実験結果

提案手法を適用した結果を以下に示す。実験環境はCPU: Intel Core i5, GPU: NVIDIA GeForce GTX 460, グラフィックスAPIはOpenGLである。また、実験にはターゲット画像として図4の左側の画像を用いている。

3.1節の手法を用いて光源情報を推定した結果を図4に示す。物体の材質パラメータは、拡散反射係数を0.2、鏡面反射係数を1.0、フォンの値を3.0としている。ターゲット

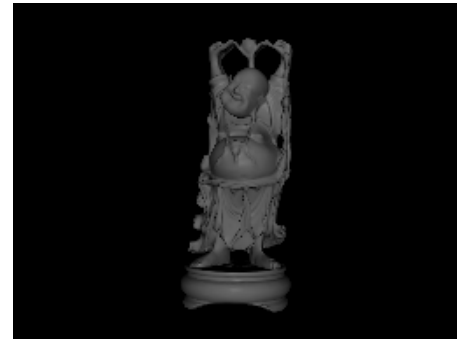


図 6 最適な材質パラメータのデザイン手法

画像を再現する光源情報が推定できていることがわかる。しかし、図5に示すように、視点を変更した場合、初期の視点での物体の明るさとは大きく異なり違和感のある結果となった。3.2節の方法を用いて材質パラメータを推定した結果を図6に示す。この手法では視線方向からの平行光源を用いており、材質パラメータのみを推定している。最適な材質パラメータは拡散反射係数が0.4、鏡面反射係数は0.1、ハイライトの値を制御するパラメータが49となった。この時、拡散反射係数と鏡面反射係数は0.1から1.0まで0.1刻み、制御パラメータは1から50までの値を1刻みでサンプリングした。この結果より、本手法では最適な材質パラメータを算出しているが、ターゲット画像とは視覚的に差がある結果となった。原因として、最適な材質パラメータを推定するために、陰影を考慮せず全画素における2乗誤差の和が最小になるようにそれぞれのパラメータを推定しているためだと考えられる。次にヒストグラムマッチングを行って光源情報を推定する手法を適用した結果を図7に示す。図7(a)は物体が正面を向いている状態であり、図7(b)は正面より60度視点を変更した際の結果であり、図7(c)は120度視点を変更した際の結果である。図7より、視点を変更した際も物体の明るさが大きく変化せず、3.1の手法に比べて違和感のない結果が得られたことがわかる。最後に適切なBRDF値を算出する手法を適用した結果を図8に示す。図8(a)は物体が正面を向いている状態であり、図8(b)は正面より60度視点を変更した際の結果であり、図8(c)は150度視点を変更した際の結果である。図からわかるように物体全体の明るさが全体的に平均をとったようなものとなりターゲット画像とは異なる結果となった。原因としては3.2と同様に、陰影を考慮せず全画素における2乗誤差の和が最小となるよう、基底関数の係数を求めていることが考えられる。

5. まとめ

本稿では、サーフェイスフローを用いて生成した画像より、3次元シーンにおける最適な環境マップと3次元物体の最適な材質パラメータをデザインする手法を提案した。最適な環境マップを求める手法では、2次元画像を元に最

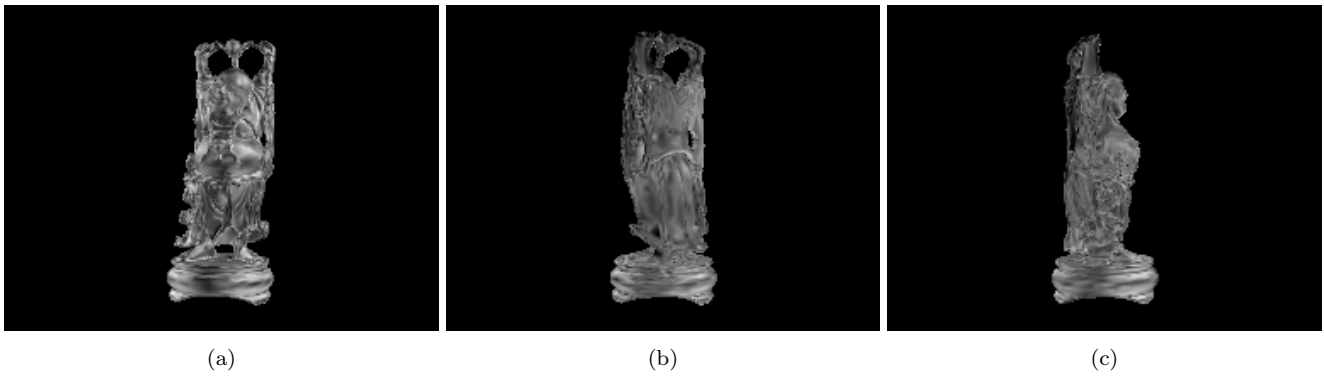


図 7 ヒストグラムマッチングを用いた光源情報の推定



図 8 最適な BRDF 値の算出法

適な環境マップをデザインすることが可能となった。また、ヒストグラムマッチングを用いた環境マップのデザイン手法では、視点変更前の環境マップに近いものをデザインすることが可能となった。しかし、最適な材質パラメータを算出する手法と最適な BRDF を算出する手法はまだ改善の余地があることもわかった。今後の課題としては、ターゲット画像の物体は一定方向の光源からの光で照射されたようになっていない物体にさらに適するように、光源方向の制限が必要である。さらに、ターゲット画像の輝度と 3 次元物体の明るさの誤差を求める新たな手法の確立も考えられる。

参考文献

- [1] R. Vergne, P. Barla, R. Fleming, X. Granier, "Surface Flows for Image-based Shading Design," ACM Transactions on Graphics (In Proceedings of SIGGRAPH 2012), vol. 31, No. 4, 2012.
- [2] M. Okabe, Y. Matsushita, T. Igarashi, "Interactive Design of Environment Map," 情報処理学会研究報告. グラフィクスと CAD 研究報告 2007, pp. 47-52, 2007.
- [3] K. Iwasaki, Y. Dobashi, T. Nishida, "Inverse Problem Approach for BRDF Modeling," 情報処理学会論文誌, vol. 50, No. 8, pp. 1917-1925, 2009