

絵画からの反射率分布の抽出とレンダリング

北岡 伸也[†] 乃万 司^{††}

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科, 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

^{††} 九州工業大学情報工学部知能情報工学科, 〒 820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4

E-mail: [†]kitaoka.shinya@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}noma@ai.kyutech.ac.jp

概要 本論文では, 絵画に描かれている物体の反射率分布を抽出し三次元ジオメトリに適用することでノンフォトリアリスティックレンダリング (NPR) を行う手法を提案する. 従来の NPR では絵筆のタッチやストロークを再現しようとするものが大半あり, フォトリアリスティックレンダリングで利用されているような反射率分布を考慮しているものは少ない. 本研究では, インバースレンダリングの考え方を NPR に導入し, 絵画内の物体を選択するだけで, その物体の反射率分布を球面上のデータとして抽出し, レンダリングに利用することを可能にする.

Acquisition and Use of Reflectance Distributions in Paintings

Shinya KITAOKA[†] and Tsukasa NOMA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

^{††} Department of Artificial Intelligence, Kyushu Institute of Technology
680-4 Kawazu, Iizuka, Fukuoka, 820-8502 Japan

E-mail: [†]kitaoka.shinya@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}noma@ai.kyutech.ac.jp

Abstract This article proposes a novel Non-Photorealistic Rendering (NPR) approach to acquiring reflectance distributions on specified object in paintings, and then rendering 3D objects with the obtained distributions. Compared with existing work, the approach enables us to get the shapes of objects in paintings in a much simpler fashion, and is thus useful as a NPR inverse rendering approach.

1. はじめに

近年, 絵画調の表現をコンピュータグラフィックス (CG) で実現するための NPR の研究が盛んに行われてきた. 三次元ジオメトリを絵筆のタッチでレンダリングするものや画像にある種のフィルタを適用することで絵筆のストロークを再現するものなど数多くの手法が提案されてきている ([2], [4], [5] 等).

従来の NPR の研究では, 絵筆のタッチやストロークを再現しようとするものが大半であり, フォトリアリスティックレンダリングにおいて利用される反射率分布 (環境の光源分布と物体の反射特性) を考慮しているものは少ない. しかしながら, 一般的な絵画を見るとフォトリアリスティックな反射

率分布とは異なるがそれと同等の概念を用いて描かれていることが分かる.

本研究では, 既存の絵画に描かれている物体の反射率分布を抽出し三次元ジオメトリのレンダリングに適用する手法を提案する. フォトリアリスティックレンダリングではレンダリングの逆問題であるインバースレンダリングの研究がなされており, これらの考え方を NPR に導入することで従来の絵筆のタッチやストロークだけに着目した NPR ではなく, 画家によって描かれた光の見え方を再現することのできる NPR を実現する.

2. 関連研究と本研究の目的

三次元 CG の研究では, 写実的な画像の合成を

目的とするフォトリリスティックレンダリングの研究が長年にわたって行われてきた。この研究は、物理ベースレンダリングとも呼ばれ環境の光源分布・物体の反射特性と形状の情報から光の物理的な振る舞いをシミュレートすることで写実的な画像を合成する。これは式 (1) として定式化される問題を解くための研究であるといえる。

$$\text{光源分布} + \text{反射特性} + \text{形状} \rightarrow \text{画像} \quad (1)$$

フォトリリスティックレンダリングの研究が進み優れたアルゴリズムが提案され写実的な画像を得ることが可能になってきた。しかし、写実的な画像を合成するためには、高精細な光源分布や反射特性を用意する必要があり、これらのモデリングを全て手作業で行うのは非常に難しいという問題が生じてきた。このため、これらのモデルを現実の物体を撮影した写真から獲得することを目的としたインバースレンダリングの研究が行われるようになった [7]。インバースレンダリングには 3 種類の問題がある。すなわち、環境の光源分布推定 (式 (2))・物体の反射特性推定 (式 (3))・物体の形状推定 (式 (4)) である。物体の形状推定は Sharp From Shading (SFS) と呼ばれ特にコンピュータビジョンの分野で盛んに研究されている。

$$\text{画像} + \text{反射特性} + \text{形状} \rightarrow \text{光源分布} \quad (2)$$

$$\text{画像} + \text{光源分布} + \text{形状} \rightarrow \text{反射特性} \quad (3)$$

$$\text{画像} + \text{光源分布} + \text{反射特性} \rightarrow \text{形状} \quad (4)$$

NPR の分野においては既存の絵画の情報を基にして三次元ジオメトリのシェーディングを行う手法が [6] にて提案された。この研究が扱う問題は式 (5) として定式化される。

$$\text{画像} \rightarrow \text{形状} + \text{反射率分布} \quad (5)$$

しかし、絵画に描かれている物体の形状を得ることは一般に困難であり、[6] では、ユーザが結果を確認しながら、絵画に描かれている物体に三角形のパッチをあわせるというアプローチを取っている。この方法では、絵画中の個々の物体の反射率分布を得るには非常に手間がかかり、結果もユーザに大きく依存してしまう。さらに、パッチを張り合わせることで反射率分布を構築しているため、抽出された反射率分布上で不連続な領域を生じる結果

となる。

そこで本研究では、より自動的なインバースレンダリングを目指す。具体的には、絵画中の物体の形状を、スケッチモデリング [1] と同様の手法で生成し、物体の輪郭を指定するだけで、反射率分布が得られるようにする。これは [6] に比べて、反射率分布を得る対象物体の形状を比較的単純なものに限定することになるが、本研究の問題では [6] のような操作が必要なほど複雑な形状では、特定の方向に面の分布が偏っていたり、また、それによって十分な反射率分布のサンプルを抽出することが困難であったりすることが考えられるため、本研究のように、形状の範囲を狭めてでも、反射率分布を抽出方法を単純化することには意味がある。また、提案手法では反射率分布を球面上のデータとして扱うため、不連続な領域のないより精細な結果を得ることが可能となる。

3. アルゴリズム

本研究の提案手法は大きく以下の 3 つのステップで処理を行う。

(1) 絵画に描かれている物体の 3 次元形状を復元し、物体の 3 次元空間での単位法線ベクトルを求める (3.1 節)。

(2) 物体の反射率分布を抽出し、欠損データの補間とノイズ除去を行う (3.2 節)。

(3) 反射率分布をテクスチャに格納し、3 次元ジオメトリの法線ベクトルとテクスチャ座標を対応付けレンダリングを行う (3.3 節)。

3.1 物体形状の復元と法線の計算

絵画に描かれている物体の形状を復元するという問題は、SFS での単一画像における陰影からの形状復元問題として定式化される。この問題は不良設定問題 (ill-posed) であるため何らかの仮定を用いない限り一意な解を得ることができない。そこで SFS では物体の反射率分布を適当なモデルで仮定することでこれを実現している。本研究では反射率分布を抽出することが目的であり、絵画に描かれている物体の反射率分布を何らかのモデルとして仮定することは好ましくない。そこで、絵画に描かれている物体の形状をスケッチモデリング [1] によって生成される形状で十分近似することができるかと仮定する。

絵画に描かれている物体の形状を復元する手順

は次の通りである．まず，ユーザが反射率分布を抽出する物体をポインティングデバイスで囲むことにより選択する(図2)．次に，入力された手書き折れ線を基に制約付きドロネ三角形分割を行うことで Chordal axis を抽出する(図3)．これは，[8]の手法に基づいている．そして，抽出された芯線を基に陰関数をフィッティングすることにより形状を復元し，最後に，復元された形状から法線を計算し法線マップとマスク画像を生成する．

フィッティングに用いる陰関数は式(6)である．

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{|\mathbf{p} - \mathbf{c}_i| - R_i^2}{R_i^2} \right)^8 - C \quad (6)$$

ここで， \mathbf{p} は手書き折れ線の点を， \mathbf{c}_i は抽出された芯線の点の一つを， R は芯線の点に関するパラメータをそれぞれあらわしている．また C は任意の定数であり通常は 0.5 を使用する．

手書き折れ線の点でこの関数が満たされるようにパラメータ R を決定することでフィッティングを行う．これは式(7)を目的関数とする非線形最小二乗問題であるので既存の最適化手法を用いて解くことができる．

$$E = \sum_{j=0}^{M-1} f(\mathbf{p}_j)^2 \quad (7)$$

フィッティングできると直線探索によって画像上の点の高さとして図4のように形状の復元ができる．

形状が復元されると，画像の各画素の四隅から構成される正方形を二つの三角形に分け，個々の三角形の法線の和をとることでその画素に対応する法線を計算する．全ての画素に対してこの操作を適用することで，反射率分布を抽出する物体のための法線マップを作成する．同時にある画素が対象となる物体の領域であるかどうかを示すマスク画像も生成しておく．

3.2 反射率分布の抽出

本研究で扱う反射率分布は物理的な制約を一切置かず視点座標系における物体法線だけに依存する関数であるとする．つまり，BRDF を求めるのではなく，[6]と同様に，視線方向を固定し，法線方向に依存した「面の明るさ」としてこれを抽出する．これにより反射率分布は球面上で定義される関数となるので絵画からサンプリングするデータも球面上のデータとして扱われる．

本研究では，画像の輝度値をそのまま反射率分布の値として扱うため，物体の形状によっては本質的にデータの得られない領域が存在する．球面上のデータを扱う方法としては球面調和関数を利用する方法と球面ウェーブレットを利用する方法があるが，球面調和関数は球面上でのフーリエ変換に相当し局所的な誤差が大域的に球面全体に及んでしまうため，本研究では，[9]で示される Haar 基底を球面に拡張した基底による球面ウェーブレット変換を利用することで反射率分布を扱う．ここで，球面の離散化は三角形で構成された多面体を再帰的に四つに分割することで行った(図5)．

反射率分布の抽出は次のように行う．各画素ごとに物体領域のマスク画像によってその画素が物体領域かどうか判断する．物体領域でなければ何もせず，物体領域であれば画像から画素の輝度を法線マップから法線をそれぞれ取り出し，取り出した法線の対応する測地ドームの三角形に画素の輝度を加える．全ての画素に対してこの処理が完了すると，測地ドームの三角形ごとに加えられた画素数で輝度を除す．これにより，測地ドームの三角形に対応する立体角における反射率分布の積分ができる．また，測地ドームの三角形でデータが得られない領域があった場合は，球面ウェーブレット変換の分解の際に，他のデータが得られている三角形の反射率分布の平均値で置き換えることで近似する．隣接する三角形のデータも得られていないときは更に低次の三角形において適用することで実現される．

抽出された反射率分布は図6のようになる．さらに，重心座標補間することで図7のような結果が得られる．

3.3 三次元ジオメトリのレンダリング

抽出された反射率分布は視線方向の半球だけであるので，これを用いた三次元ジオメトリのシェーディングは，視点座標系における三次元ジオメトリの法線に対応する反射率分布の値を用いて行われる．しかし，レンダリングの際に毎回測地ドームから値を参照するのは速度的なコストが大きい．そこで本研究では，反射率分布をテクスチャに格納し，視点座標系における三次元ジオメトリの法線とテクスチャ座標を放物面マッピングにより対応付けることで高速なレンダリングを可能した．

法物面マッピングによる uv 値は次式で求められ



図 1 元 画 像



図 2 物体の選択



図 3 制約付きドロネー三角形分割

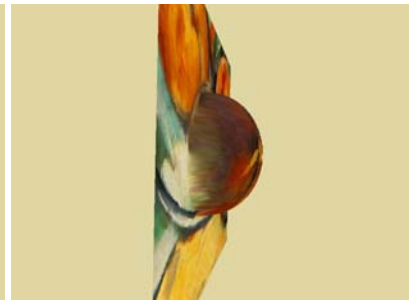
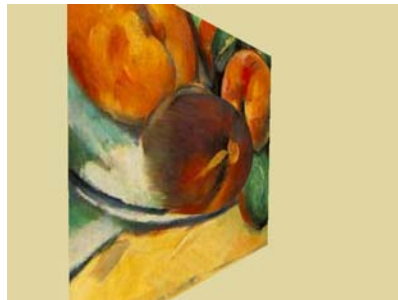
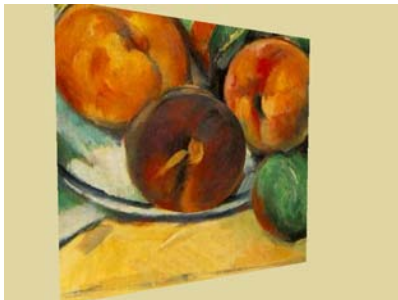


図 4 復元された形状

る [3].

$$u = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_x}{1 + n_z} \right) \quad (8)$$

$$v = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{n_y}{1 + n_z} \right) \quad (9)$$

ここで $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ は視点座標系における三次元ジオメトリの法線である.

これに基づいて生成されたテクスチャは, 図 9 および 10 のようになる. 反射率分布と同様に, 前者は離散かされた反射率分布をそのままテクスチャに落とししたものであり, 後者は重心座標補間により補間しテクスチャに落とししたものである.

4. 結 果

本手法により実際の絵画に描かれている物体から反射率分布を抽出し三次元ジオメトリをレンダリングした結果を図 11 に示す (左列が絵画中の物体, 中列がその反射率分布を用いたレンダリング結果). 対象とする絵画中の物体の輪郭を指定することで, 物体の形状を復元し反射率分布を抽出するために利用するマスク画像と法線マップを得た. そして画像の画素に対応する輝度値と法線情報を元に反射率分布を抽出し三次元ジオメトリのレン

ダリングに利用した. この結果から, うまく反射率分布を抽出し三次元ジオメトリのレンダリングができていることが分かる.

また, 本研究で提案した手法と, 従来の絵筆のタッチやストロークを再現する手法を組み合わせることで, NPR な反射率分布で描かれた絵をレンダリングすることができる. 本研究を用いて反射率分布を抽出し三次元ジオメトリをレンダリングした結果に油絵調のフィルタを適用した結果を図 11 の右列に示す.

5. 結 論

本論文では, 絵画から反射率分布を抽出し三次元ジオメトリに適用してレンダリングする新しい手法を提案した. 静物画に描かれている物体の形状がスケッチモデリングにより生成される形状で十分近似できるという仮定を導入することによって簡単に絵画の反射率分布を利用することを可能にし, 実際の絵画に対して処理を行うことでその有用性を確認した. そして, 本研究で提案した手法によりレンダリングされた画像に対して, 既存の絵筆のタッチやストロークを再現するフィルタを適用することで NPR な反射率分布で描かれた絵をレンダリングできることを確認した. この結果

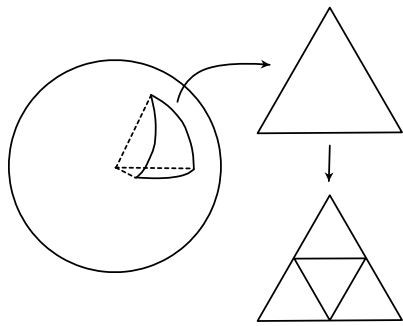


図 5 球面の離散化

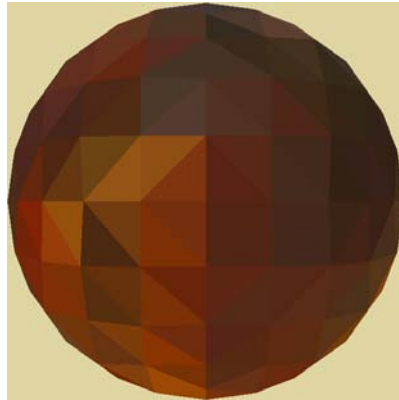


図 6 反射率分布 (フラット)

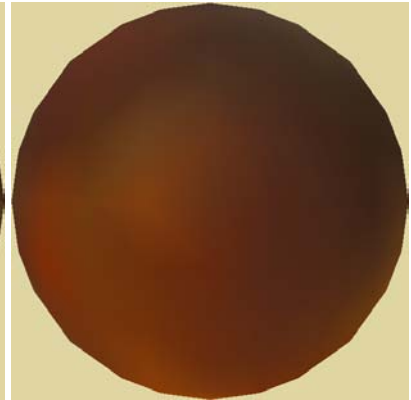


図 7 反射率分布 (スムーズ)

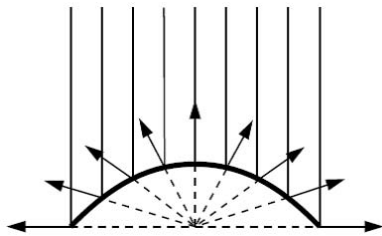


図 8 放物面マッピング



図 9 反射率分布テクスチャ(フラット)

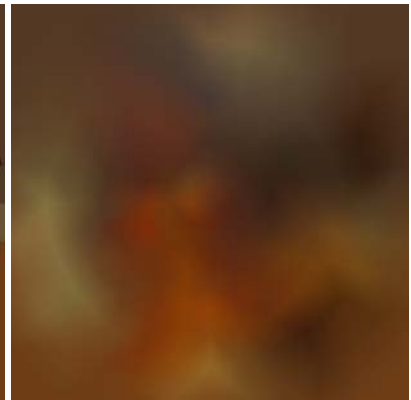


図 10 反射率分布テクスチャ(スムーズ)

は、従来の NPR に欠けていた反射率分布に対する考慮を補完している。

絵画に描かれている物体の反射率分布には、様々な画家特有の要素が含まれていると考えられる。これは絵画には、その絵画を描いた画家特有の雰囲気があることから容易に想像できる。本研究で提案した手法では、このような反射率分布の関係は全く考慮されておらず抽出された反射率分布は1つ1つ独立したものとなっている。そのような画家固有の情報を利用することで、画家の風の絵をレンダリングするといったことが可能になるのではないかと考えており、今後はこのような点についても検討していきたい。

参考文献

- [1] A. Alexe et al. Interactive modelling from sketches using spherical implicit functions. In *Proceedings of AFRIGRAPH '04*, pp. 25–34, 2004.
- [2] E. Praun et al. Real-time hatching. In *Proceedings of SIGGRAPH '01*, p. 581, 2001.
- [3] W. Heidrich and H.-P. Seidel. View-independent environment maps. In *Proceedings of HWWS '98*, pp. 39–ff., 1998.
- [4] L. Markosian et al. Real-time nonphotorealistic ren-

dering. In *Proceedings of SIGGRAPH '97*, pp. 415–420, 1997.

- [5] M. Kaplan et al. Interactive artistic rendering. In *Proceedings of NPAR '00*, pp. 67–74, 2000.
- [6] P.-P. J. Sloan et al. The lit sphere: a model for capturing npr shading from art. In *Proceedings of GRIN'01*, pp. 143–150, 2001.
- [7] R. Ramamoorthi. *A signal-processing framework for forward and inverse rendering*. PhD thesis, 2002. Adviser-Pat Hanrahan.
- [8] T. Igarashi et al. Teddy: a sketching interface for 3d freeform design. In *Proceedings of SIGGRAPH '99*, pp. 409–416, 1999.
- [9] 樋口, 高野, 苗村, 原島. 球面直交展開を用いたパノラマ全周画像の記述. 3次元画像コンファレンス'99, pp. 31–36, 1999.

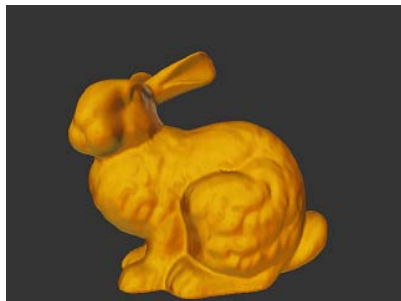


図 11 結果．元画像 (左列)，提案手法によりレンダリングした結果 (中列)，提案手法に加え油絵調フィルタを適用した結果 (右列)．