

スクリーン物体の微細構造を利用した多重画像投影とその反射特性推定

高橋直寛 坂上文彦 佐藤淳

名古屋工業大学

1. はじめに

近年、現実世界の物体に対して画像を投影することで、様々な情報を付加するプロジェクションマッピングという技術が、エンターテインメントをはじめとした様々な分野で利用されている。多くの場合、プロジェクションマッピングの投影対象には、建物の壁など、平で単純な反射を発生させる物体が利用されている。一方で、実際には布や表面が凸凹した物体が多数存在しており、その物体に対して投影を行う場合、本来意図した画像とは異なる画像が観測されてしまう。しかし、この性質をうまく利用することで、視点ごとに観測される画像を変化させることも可能になる。このように、一回の投影で、視点ごとに異なる画像を観測させる投影技術のを、多重画像投影と呼ぶ。本研究では、この多重投影技術を実現するために、複雑な反射を発生させる物体の反射特性を推定する方法と、その物体を対象とした画像の投影方法を提案する。

2. 反射モデル

上述したとおり、本研究で対象とする細かな凹凸を持つ物体は複雑な反射特性を持つ。本研究ではこのような物体を少ないパラメータで表現するために、投影対象全体の反射特性を表すパラメトリックな反射モデルと、画素ごとの局所的な法線方向の2つを利用する。まず、本研究で用いる反射モデルについて説明する。一般的に、物体の反射特性は BRDF を用いて表現されるが、この BRDF モデルは入射光方向 \mathbf{s} と反射光方向 \mathbf{v} を入力とする 4 次元関数となる。一方で、提案する反射モデルでは、複数の仮想的な法線方向 \mathbf{n}_j を用いて観測強度 I を以下のようにパラメトリックに表現する。

$$I = E \sum_{j=1}^M (k_s^j (\mathbf{h}^T \mathbf{n}_j)^m + k_d^j \max(\mathbf{s}^T \mathbf{n}_j, 0)) \quad (1)$$

ここで、 E は光源輝度、 \mathbf{h} は $\mathbf{h} = (\mathbf{v} + \mathbf{s}) / |\mathbf{v} + \mathbf{s}|$ で得られる \mathbf{v} と \mathbf{s} 間のハーフベクトルである。また、 k_s^j と k_d^j はそれぞれ鏡面反射と拡散反射の係数である。さらに、 M は反射特性を表現するために利用する仮想法線の数である。

このモデルは、Phong モデルと呼ばれる鏡面反射を表現するモデルを複数足し合わせたものであるが、一般的な Phong モデルが物体の法線方向 \mathbf{n} を用いて表現されているのに対し、提案モデルにおける法線方向は、物体表面の法線方向を直接表すものではなく、反射特性を表現するための仮想的な法線を用いている。このような多数の仮想法線を重ね合わせることで、複雑な反射特性の表現を実現している。

次に、局所的な反射特性について考える。布のように反射特性が複雑な素材は、一見平面に見えても、様々な局所的な法線方向を持つ。そのため、このような材料の反射特性を表現するためには、画素ごとに法線方向の変化を表現する必要がある。このような画素ごとに異なる法線を表現するために、式(1)で示した反射モデルを以下のように変更する。

$$I_i = E_i \sum_{j=1}^M (k_s^j \mathbf{h}^T \mathbf{R}_i \mathbf{n}_j^m + k_d^j \max(\mathbf{s}^T \mathbf{R}_i \mathbf{n}_j, 0)) \quad (2)$$

ここで、 I_i は画素 i での観測輝度、 E_i は画素 i への光源輝度を示す。また、 \mathbf{R}_i は i 画素における回転行列であり、各画素に対応する法線方向の回転を表す。この回転行列 \mathbf{R}_i を画素ごとに算出することで、局所的な法線変動を表現することができる。

このモデルでは、全体のグローバルパラメータ k_s^j 、 k_d^j 、 \mathbf{n}_j 、 m とピクセル単位のパラメータ \mathbf{R}_i を計算することで反射パラメータを推定している。したがって、画像全体の画素数を N とすると、このモデルは $6M + 3N$ の自由度を持つ。 $N \gg M$ とすると、異なる光源下で撮影された画像が 4 枚以上あれば、各画像の反射特性を推定することができる。

3. 多重画像投影

多重画像投影では、複数の光源から画像を投影し、その画像を重ねる事で目的とした画像の提示する。そのため、視点で観測される輝度は、各プロジェクタから投影され物体に反射した光のうち、視点方向への反射光の足し合わせになる。したがって、 L 個のプロジェクタから投影した場合の視点 \mathbf{v}_k での観測強度は式(2)で示したモデルに従って、以下のように記述できる。

$$I_i^k = \sum_{l=1}^L E_i^l \sum_{j=1}^M (k_s^j \mathbf{h}_k^{lT} R_i \mathbf{n}_j^m + k_d^j \max(\mathbf{s}^{lT} R_i \mathbf{n}_j, 0)) \quad (3)$$

ここで、 I_i^k は視点 k から観測される画素 i の観測輝度、 E_i^l は画素 i におけるプロジェクタ l からの投影画像の輝度、 \mathbf{h}_k^l は視点 k とプロジェクタ l 間のハーフベクトル、 \mathbf{s}^l はプロジェクタ l の光源方向である。式(3)で示される反射モデルでは、視点方向 \mathbf{v} によって観測される輝度が増減するため、このモデルで表されるスクリーンに映像を投影すると、観測者の位置によって観測される映像が変化する。これを利用すれば、視点ごとに異なる様々な画像を観測させることができる。したがって、視点 k における画素 i で観測させたい画像を \hat{I}_i^k とした場合、投影画像 E_i^l は以下の ϵ_i を最小化することで決定できる。

$$\epsilon_i = \sum_k (\hat{I}_i^k - I_i^k)^2 \quad (4)$$

このようにして推定された画像を対象物体に対して投影することで、視点ごとに異なる画像を観測させる多重画像投影を実現できる。

4. 実験

提案手法を用いて、複雑な反射を発生させるスクリーンの反射特性の推定を行なった。実験環境は図1に示すとおりであり、スクリーンにはベロア生地を利用した。反射特性の推定には、光源位置を変えて撮影した20枚の画像を利用した。図2に推定に利用した画像の一部を示す。

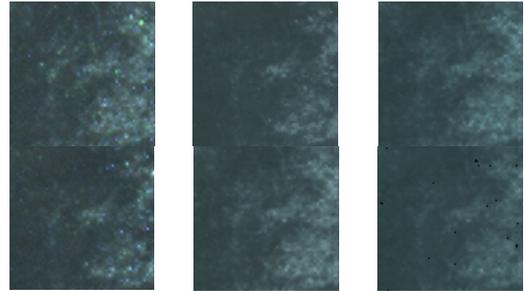
図3に提案法により推定したパラメタから画像を再構成した結果を示す。また、比較のために



図1. 実験管環境



図2 推定画像



(a) 正解画像 (b) 提案モデル (c) Phong モデル

図3. ベロア生地の反射特性推定結果

仮想法線の数をもとにした Phong モデルを利用して再構成した画像を併せて示す。この結果を見ると、提案法を用いることで、布の細部の輝度をより正確に表現できていることが確認できる。また、正解画像との RMSE を比較した結果、提案モデルが 3.04、Phong モデルが 4.86 となり、複数の仮想法線を利用することで、より正確な画像表現が実現できていることがわかる。以上により、提案手法の有効性が確認できる。

5. 多重画像投影実験

推定したベロア生地の反射特性を利用し、多重画像投影のシミュレーション実験を行った。シミュレーション環境は図4に示すとおりであり、視点数2、光源数5とし、投影対象の反射特性は、ベロア生地と同じ特性を持つものとした。

図5(左)の画像をそれぞれの視点に観測させるように投影画像を推定し、図6の投影画像を得た。さらに、これを対象物体に投影することで、図5(右)に示す観測結果を得た。この結果を見ると、視点ごとに目標画像に近い画像が観測できており、提案法により多重画像投影が実現できていることがわかる。以上により提案法の有効性を確認できた。

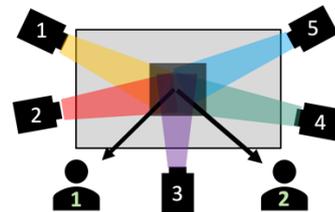


図4. シミュレーション環境

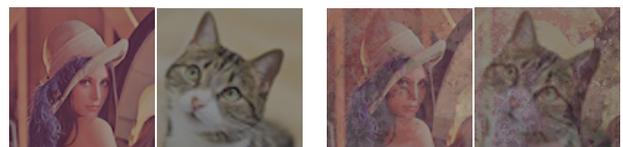


図5. 目標画像 (左) 観測結果 (右)

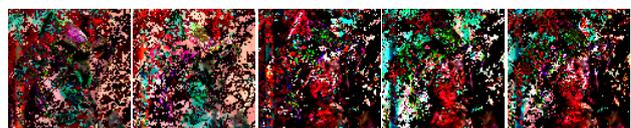


図6. 投影画像