

## デジタルアーカイブのための表面形状および反射率分布の推定 Estimation of Surface Shape and Reflectance Distribution for Digital Archiving

平原 壮紀†      川嶋 稔夫‡  
Souki Hirahara    Toshio Kawashima

### 1. まえがき

近年、文化資源や美術品などをデジタル画像として記録、再現しようとするデジタルアーカイブに注目が集まっている。デジタル化して保存することで、照明方法などの制限の少ない鑑賞環境を実現することが可能となる。また、データを用いることで鑑賞が可能となるため、オリジナル資料の利用回数を減らすことができ、劣化を抑制することもできる。

美術品や印刷物などは、保存中の劣化により生じた折れやたわみなどにより、陰影が生じる。また、表面の材質感によって、光の反射による陰影の出方が異なる。このように、形状や材質感、鑑賞の際の視線や照明の方向の変化に伴い見え方を変化させる。画像データとしてデジタル化するには、通常光沢などの鏡面反射がおこらないように照明を配置し、対象を正面からカメラで撮影する方法が用いられているが、この撮影方法では、反射特性の情報が失われるため、材質感を表現することができない。また、撮影で形状情報も失われることで、視線や照明の方向による見え方の違いが損なわれ、本来持っている多様な見え方を再現できなくなるという問題があった。この問題を解決する方法として、形状や材質感を再現できる3次元形状モデルとして記録する手法が提案されている。

3次元形状モデルを生成するには、色、形状、反射特性などの情報を取得する必要がある。形状情報はレーザーレンジファインダやレーザー顕微鏡を用いることで計測可能であるが、レーザーレンジファインダは拡散反射光に基づいているため、ハイライト部分の計測ができない。一方、レーザー顕微鏡では十分な精度の計測ができるが、大きな対象を計測することには適さない。一般に、大面積の3次元計測は高コストであり、色情報と形状情報の間にレジストレーションエラーが起きてしまう。そこで、色情報と形状情報を得ることのできる単一のシステムが提案することが求められる。本研究では、図1の左のような鏡面反射のある印刷物を対象として、単一の撮影システムで、より本物らしい見え方を再現できる3次元形状モデル(図1の右)を生成するシステムの作成を目標とする。

### 2. 関連研究

3次元形状モデルを推定するアルゴリズムが氏家らによって提案されている[1]。氏家らの手法では、油彩画を対象として、モノクロ CCD カメラやスライドプロジェクタ



図1 鏡面反射を含んだ印刷物と3次元形状モデル

を用いたマルチバンドカメラシステムを用いて、分光反射率、3次元形状、反射モデルを推定する。3次元形状は面の勾配情報である法線ベクトルから推定するが、積分ではなく可積分性の制約を適用している。可積分性の制約を用いた場合、自己矛盾が極めて小さくなるため、高精度での推定が可能となっている。この手法では、急勾配部分で照度差ステレオによる法線の推定精度が低いため、高さの推定精度が低くなるという課題があげられている。また、1枚の絵画における反射モデルを決めるパラメータを対象中で一定値としているため、場所に依存して変化する材質感をもった対象を扱うことができないという欠点が考えられる。

形状推定に必要な法線ベクトルを推定する照度差ステレオ法については、非ランバート拡散反射性の物体も対象とした方法が肥後らによって提案されている[2]。光源方向と物体表面の法線のなす内積に対して、単調増加性、可視性、等方性の3つの反射特性を仮定し、これらから法線の解空間をそれぞれで求める。これらの共通部分を求めることで、法線を推定する。光学的キャリブレーションなどの前処理を行うことなく、法線を推定することができ、鏡面反射性の物体に対しても応用可能である。従来の照度差ステレオと比べて、急勾配部分における推定精度が高く、環境光の影響も受けないため、実用的な手法である。

素材の反射特性を取得する手法は土橋らによって提案されている[3]。LCDディスプレイを光源として、スリット光を発生させ、その反射を利用して反射特性を推定する。推定に伴い、拡散反射成分と鏡面反射成分を分離し、法線を推定した上で、鏡面反射パラメータを推定する。土橋らの手法において、拡散反射成分と鏡面反射成分の閾値を用いない分離が可能となっているが、法線の推定密度が粗く、鏡面反射パラメータの推定精度が低いという課題があげられている。

### 3. 提案システム

本論文では、鏡面反射を含んだ凹凸のある印刷物を対象として、3次元形状モデルを生成するシステムを提案する。3次元形状の推定方法としては、氏家らの提案手法

†公立はこだて未来大学大学院, Graduate School of Future University – Hakodate

‡公立はこだて未来大学, Future University – Hakodate

を用い、形状測定法に肥後の提案した面法線の推定法を併用することで、形状、反射率の同時推定を行う。

### 3.1 法線ベクトル推定

法線ベクトルの推定するための照度差ステレオ法は、肥後の提案した手法を用いる。単調増加性、可視性、等方性の3つの反射特性を仮定し、それぞれで法線の解空間を求める。

3つの反射特性のそれぞれで独立に解空間が得られるため、これらの共通部分  $N$  を取ることで法線を決定する。3つの反射特性は、カメラレスポンス関数や環境光の影響を受けないため、光学キャリブレーションのような前処理をすることなく法線を推定することができる。

共通部分から法線ベクトルを効率よく推定するために、エネルギー最小化問題として解く。次のように単調増加性、可視性、等方性のそれぞれの制約にたいしてコスト関数を定義し、各ピクセルでコスト関数が最小になるような法線を推定している。

単調増加性について、 $o_i > o_l$  の組み合わせに対し、 $(\mathbf{l}_i - \mathbf{l}_j) \cdot \mathbf{n} > 0$  を満たす場合に等しく低いコストを与える関数は、式(1)のように定義する。

$$E_1(\mathbf{n}) = \frac{1}{N_1} \sum_{i,j} \frac{1 - \mathbf{k}\mathbf{n} \cdot (\mathbf{l}_i - \mathbf{l}_j)}{1 + \exp(\mathbf{m} \cdot (\mathbf{l}_i - \mathbf{l}_j))} \quad (1)$$

ここで、 $(i, j)$  は  $o_i > o_l$  を満たす組み合わせであり、 $t$  はゲイン、 $N_1$  は推定に用いる  $(i, j)$  の組み合わせの総数である。

次に、可視性の拘束より式(2)のようにコスト関数を定義する。

$$E_2(\mathbf{n}) = \frac{1}{N_2} \sum_i \frac{1 - \mathbf{k}\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_i}{1 + \exp(\mathbf{m} \cdot \mathbf{l}_i)} \quad (2)$$

$N_2$  は注目しているピクセルが光源に照らされている入力画像の枚数、つまり推定に使用する枚数の事である。

等方性からは、 $m$  個の輝度値の似たグループそれぞれにおいて、内積  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$  の分散が小さいほど低いコストを与える関数を式(3)として定義する。

$$E_3(\mathbf{n}) = \frac{1}{\sum_j |S_j|} \sum_j \sum_{i \in S_j} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}_i - \overline{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})_j})^2 \quad (3)$$

$S_j$  は  $j$  番目のグループにおける輝度値の似た観測の集合、 $|S_j|$  はその集合の要素の数、つまり光源方向の数である。 $\overline{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{l})_j}$  は  $S_j$  に含まれる内積  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{l}$  の平均値である。

3つの反射特性のそれぞれで定義したコスト関数の重み付け和に、法線が単位ベクトルであるという拘束を加えることで、全体のコスト関数は式(4)のように定義される。

$$E(\mathbf{n}) = \lambda_1 E_1(\mathbf{n}) + \lambda_2 E_2(\mathbf{n}) + \lambda_3 E_3(\mathbf{n}) + (1 - |\mathbf{n}|^2)^2 \quad (4)$$

式(4)の  $\lambda_i (i=1,2,3)$  は重み係数である。各ピクセルについて、このコスト関数を最小化する  $\mathbf{n}$  が推定された法線である。

### 3.2 3次元形状推定

ピクセルごとに求めた法線ベクトルから、氏家らの手

法を用いて3次元形状を推定する。この手法では、法線ベクトルに対して、フーリエ変換とパーセバルの定理を適用し、周波数領域での計算を行うことで一意な形状の解を推定する。各画素における法線ベクトルから得られる  $x$  方向の勾配を  $f_i(x, y)$  と  $y$  方向の勾配を  $f_j(x, y)$  とし、推定される表面の相対的な高さ情報を  $g(x, y)$  とする。このとき可積分性の制約条件は「 $g(x, y)$  は  $f_i(x, y)$  および  $f_j(x, y)$  を空間積分したものと誤差を最小にする」と表される。この条件は  $g(x, y)$  の勾配に対する制約として式のようになる。

$$J = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \left| \frac{\partial}{\partial x} g(x, y) - f_i(x, y) \right|^2 + \left| \frac{\partial}{\partial y} g(x, y) - f_j(x, y) \right|^2 \right\} dx dy \quad (5)$$

→ min

式に対して、パーセバルの定理を適用して周波数領域で表し、高さの周波数成分  $G(u, v)$  について解くことで、式(11)のように、可積分性の制約を満たす解が得られる。

$$G(u, v) = -\frac{j}{2\pi} \frac{uF_i(u, v) + vF_j(u, v)}{u^2 + v^2} \quad (6)$$

$(u, v) = (0, 0)$  は平坦な高さ成分であり、法線ベクトルから推定できないため、 $(u, v) \neq (0, 0)$  を仮定する。この高さの周波数成分  $G(u, v)$  にたいして逆フーリエ変換を行うことで、高さの分布  $g(u, v)$  が得られるため、対象と画像サイズの関係性から高さを推定することが可能となる。

### 3.3 反射率分布の推定

前節までの処理で3次元形状と法線が求められているので、各画素における反射率分布を推定することができる。反射率パラメータは、画像中の鏡面反射成分と、面法線と光源方向の関係性から推定することが可能である。そのためには、あらかじめ観測輝度値から鏡面反射成分を分離する必要がある。観測画素値から拡散反射成分と環境光成分を推定し、これらを観測輝度値から除去することで、鏡面反射成分を推定することが可能である。拡散反射成分は、Lambertの法則に基づいて、法線ベクトルと光源方向ベクトルを用いた計算によって、推定することが可能である。法線ベクトルは、先に推定した面法線によって得られており、光源方向ベクトル自体が既知であるため、拡散反射成分を推定できる。環境光成分は、対象を撮影する際に、撮影時に使用する光源以外の光のない暗室で撮影することで、環境光成分の影響を無視でき、観測輝度値から拡散反射成分を減算することで鏡面反射成分を推定できる。

推定した鏡面反射成分に Torrance-Sparrow の簡易モデルを適用することで、式(7)が得られる。

$$I_{s,c} = \frac{E_C}{d^2} \frac{K_{S,C}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式(7)において、 $C$  は  $R, G, B$  で3成分を表しており、 $I_{s,c}$  は鏡面反射成分、 $E_C$  は光源の明るさ、 $d$  は光源までの距

離,  $\mathbf{n}$  は法線,  $\mathbf{v}$  は視線方向,  $\alpha$  は視線方向と光源方向のハーフベクトルと法線のなす角で,  $K_{S,C}$  は鏡面反射の強さ,  $\sigma$  は物体表面の粗さを表すパラメータを表す. 式(7)より, 各画素で鏡面反射パラメータを求めるには, 式(7)の両辺で対数を取り,  $X = \alpha^2/2$ ,  $Y = \ln(I_{S,C} d^2 \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} / E_C)$  とおくことで, 鏡面反射成分を式(8)のように,  $XY$  平面上で直線の式として表すことができる.

$$Y = -\frac{1}{\sigma^2} X + \ln(K_{S,C}) \quad (8)$$

光源の明るさや方向などは既知で, 法線も求められているので, 各画素でのデータ点をプロットし, 式(8)のように最小二乗近似を行うことで, このようにして鏡面反射パラメータが推定できる. 各画素で推定したパラメータを用いて, 鏡面反射分布を推定する.

#### 4. 評価実験

提案システムを実装し, 3次元形状および, 拡散反射分布, 鏡面反射分布を推定し, その精度について評価を行った.

##### 4.1 実験環境

本研究では, 図2のような鏡面反射を含んだ印刷物を対象として実験を行う. この被写体は, インクが印刷されている部分と印刷されていない部分で光の反射の特性が異なっている. さらに, 図2の右のように印刷物自体に水平方向にたわみをつけることで, 平面ではない形状とした.



図2 対象とする印刷物

実験には図3のような撮影環境を用いた.

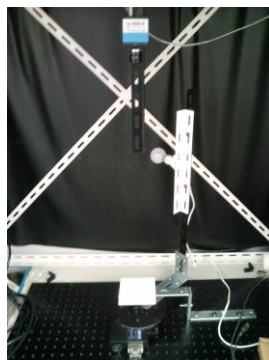


図3 撮影環境

撮影環境には回転ステージを用い, ステージ回転部分

上部に光源を取り付けた. 回転ステージ上方にテーブルを設置し, 対象をのせる. この対象の鉛直上方にカメラを固定する. カメラの絞りやシャッター速度は固定した. 撮影画像のうち, 中心部分を切り取り, 推定実験に用いる画像とした.

本研究では, すべての観測輝度値に, 光源から等距離に照らされた輝度値となるように補正をかける. これは, 光源が白熱電球で, 対象と近づいた位置に置く必要があるため, 光源までの距離による光の減衰の影響を考慮する必要があるからである. 面法線の推定では, 観測輝度値の大きさが重要で, 光源までの距離の変化による観測輝度値の増減の影響をなくす必要ためである.

面法線を推定する際に用いる画像は肥後らの論文を参考に 50 枚とする. コスト関数における係数も, 肥後らの論文と同じく,  $\lambda_1 = 8$ ,  $\lambda_2 = 1$ ,  $\lambda_3 = 300$  とする. 単調増加性と可視性のコスト関数では  $k = 5$ ,  $t = 50$  とした.

50 枚の入力画像を用いることから, 各画素の観測輝度値は 50 パターン得られる, このうち最も暗い観測輝度値をキャストシャドウとなる輝度値と判断し, 推定には使用しない. 観測輝度値の組み合わせ  $(o_i, o_j)$  は  $|o_i - o_j| < 3$  のときは等方性のコスト関数に利用し,  $|o_i - o_j| \geq 3$  の場合に単調増加性に利用する. この単調増加性に使用する観測輝度値の組み合わせは  $N_m = 8$  とする.

影となる観測輝度値は, 法線推定に用いないため, 除去する必要がある. 今回の推定実験では, 画像を撮影する際に, 影が発生しないように照明を配置している. これにより, すべての観測輝度値が影となる成分が発生しないため, すべての観測輝度値を可視性のコスト関数に使用することができる.

##### 4.2 評価方法

まず, 各画素で法線を推定する. この法線分布を用いて, 3次元形状と拡散反射分布と鏡面反射分布を推定し, それぞれの推定精度について評価する.

##### 4.3 実験結果

3次元形状の推定結果は図4に示す. 図4の左が推定された形状, 右が推定した形状の高さの分布である. 高さの分布では, 高い部分を白, 低い部分を黒で表している.

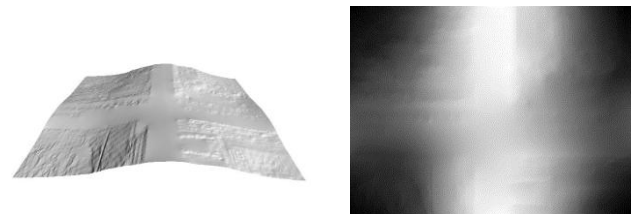


図4 3次元形状推定結果

高さの推定は, 面法線の推定精度に依存している. 面法線の推定については, 解析的手法ではなく, コスト関数の最適化によって行うため, 同じ平面を対象とした場合でも, 推定される面法線にわずかなずれが生まることが多い. これより, 推定される形状について, 同一平面上でもわずかな起伏が生じる. また, インクの印刷され



ている面と印刷されていない面の境界のような、大きな色の变化を観測する部分では誤差が生じやすいことが分かる。

推定した法線情報と撮影時の光源環境をもとに拡散反射成分を復元した画像を図 5 に示す。



図5 拡散反射成分の復元結果

図 5 は、左が実際に撮影した画像であり、右が拡散反射成分を復元した画像である。二つを比較した際に、表面での鏡面反射成分が無くなっていることがわかる。

図 6 に、鏡面反射成分の推定結果を示す。鏡面反射成分は、図 5 の左に示した実際に撮影した画像と拡散反射成分の差によって求めている。



図6 鏡面反射成分の復元結果

図 6 の左の推定した鏡面反射成分と図 5 の左の実際の画像を比較することで、鏡面反射成分を取得できていることがわかる。

## 5. まとめ

本論文では、対象を 3 次元形状モデルとしてデジタル化することで、形状や材質感を保存できるデジタルアーカイブの手法を提案した。その上で、面法線、3 次元形状、拡散反射分布、鏡面反射分布、鏡面反射グラフの同時推定を行った。実験結果より、3 次元形状、拡散反射分布の推定については、高精度の推定結果が得られている。また、鏡面反射成分の取得も可能であるため、画素毎に鏡面反射パラメータを求めた鏡面反射分布を推定する。この鏡面反射分布を用いて、鏡面反射成分を復元することで、本来の見え方を再現できるようになり、本手法が 3 次元形状モデルを生成する手法として有効になると考えられる。

今後の方針として、面法線の推定精度を向上させる必要がある。色の变化の大きい部分では、撮影時のカメラがわずかな揺れによって、同一画素において複数の色を観測してしまうからだと考えられる。そこで、入力画像において、濃淡の変化によって色の变化の境目を判断す

る。この境目部分では、周囲の法線データから、面法線を推定する方法を検討している。この方法により、形状を復元した際に、色の变化の大きい部分での推定誤差が生まれにくくなると考えられる。同一平面における面法線の推定精度を向上させる方法としては、撮影時のカメラのパラメータを変更させることを検討している。面法線の推定において、光源方向の変化に伴う、面の明るさの変化が重要となる。そこで、面の色によって、撮影時のカメラのパラメータを変化させることで、色の变化を生じやすくすることで、同一平面上での推定精度を上げることができると考えられる。

本手法では、3 次元形状、拡散反射分布を推定している。今後は鏡面反射分布の推定が未実装である。また、これらを組み合わせた、3 次元形状モデルによる見え方の再現部分が未実装である。今後はこれらの部分を実装する必要がある。

また、今回対象とした印刷物は、なだらかな水平のゆがみのような単純な形状であったが、折れなどの急勾配な面を含んだ形状の印刷物を対象とした場合について検証する必要があると考えられる。この複雑な形状を対象とした場合の結果を踏まえて、どのような形状の印刷物に対しても、高精度で 3 次元形状モデルを推定することのできる光源の配置方法について検討したい。

## 参考文献

- [1] 氏家 広之, 齊藤 了一, 堀内 隆彦, 富永 昌治, 来海 暁, "デジタルアーカイブのための油彩画の表面形状推定", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2009), 2009 年 7 月.
- [2] 肥後 智昭, 松下 康之, 池内 克史, "非ランバート拡散反射に対する照度差ステレオ", 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2010), 2010 年 2 月.
- [3] 土橋 雅紀, "印刷物アーカイブのための反射率特性の計測", 公立はこだて未来大学大学院 修士論文, 2010 年 2 月.