

A-10. 測光法による油彩画の表面復元

凸版印刷株式会社総合研究所
○長谷川隆行 飯野浩一

千葉大学大学院融合科学研究科
津村徳道

千葉大学大学院工学研究科
中口俊哉

1 緒言

美術品や文化財のデジタルアーカイブにおいては、資料の色や形状の正確な記録が求められる。また、物体の見えは観察方向や照明方向によっても変化するため、より詳細な記録のためには、見えの要素として、対象物の表面の光沢特性や微細凹凸も記録することが有用となる。本稿では、油彩画をアーカイブの対象とし、撮影によって色とともにこれらの情報を記録する手法を提案する。

油彩画は巨視的には平面物体として扱うことができるが、その表面にはキャンバス地や筆のタッチによる凹凸が存在する。また、一般に、貴重な作品には表面保護のためにニスが塗布されており、強い光沢特性を持つ。本研究では、油彩画の巨視的形狀は平面とみなし、表面の微細な幾何情報を各点における法線として求める。また、色と光沢特性については、それぞれ双方向反射率分布関数 (BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function)^[1]の拡散成分、鏡面成分によって決定されるため、これらの反射特性をモデルによって数式化し、画素単位でモデルパラメータを導出する。

画像から画素単位でBRDFと法線を求めるためには、被写体に対する光の入射方向や観察方向が異なる複数の画像を用いる必要がある。本研究では、複数の光源位置から被写体を順次照射して撮影を行い、得られた画像群から非線形最適化によってBRDFと法線を導出する。観察方向に関しては、絵画を正面から鑑賞することを前提とし、カメラは被写体面に対して垂直方向に固定して撮影を行なう。

2 関連研究

Gardnerら^[2]は、カメラと平面被写体は固定した状態で光源（ネオンチューブとラインレーザー）を移動させながら順次撮影を行なうスキャニングシステムを開発した。このシステムでは、被写体と照明装置との距離が近く、装置が資料の上方に設置され

るため、貴重な絵画に適用するには安全面で課題が残る。本研究では、カメラ及び照明光源を被写体から水平方向に離れた位置に設置して撮影を行なう。

Chenら^[3]は、油彩画の表面復元を行なうためのフレームワークを構築した。実験では、カメラを固定し、油彩画を中心とした円弧上に密な間隔で光源を移動させて撮影を行った。ニスが塗られた油彩画表面では光の屈折率は位置によらず一定であると仮定し、非線形最適化によってBRDFパラメータと法線を推定した。BRDFのモデルとしてPhongモデルとTorrance-Sparrowモデル^[4]（以下、T-Sモデル）を比較し、後者の方が実際の撮影データとの一致度が高いことを示した。本稿で述べる表面復元手法では、この実験結果に基づき、油彩画表面のBRDFを表すモデルとしてT-Sモデルを採用する。

Chenらの手法では、全ての未知パラメータを非線形最適化における最適化パラメータとしているため、計算負荷が大きく、高解像度画像への適用は実用的ではない。本研究では、BRDFの拡散成分を他の最適化パラメータの従属パラメータとすることによって計算負荷を軽減した非線形最適化アルゴリズムを提案する。

TominagaとTanaka^[5]は、多方向照明によるマルチバンド撮影システムを用い、油彩画の分光BRDFと法線を取得した。この手法ではまず、フォトメトリックステレオ法^[6]によってBRDFの拡散成分と法線を推定する。次に、BRDFの鏡面成分については、絵画表面全体での均一性を仮定し、推定された法線を用いて非線形最適化によってパラメータを決定する。この手法では、法線推定の際、撮影データから鏡面反射を含むものを除外する必要がある。しかし、鈍い光沢特性を持つ被写体に対しては、BRDFと法線が未知の時点でそれを厳密に判別することは困難である。この場合、法線推定に誤差が生じ、法線推定結果を用いて推定されるBRDFの鏡面成分の精度もまた低下する。本稿で述べる提案手法では、BRDF

A-10. Photometric Approach to Surface Reconstruction of Oil Paintings

Takayuki HASEGAWA*, Norimichi TSUMURA**, Toshiya NAKAGUCHI***, and Koichi IINO*

*Technical Research Institute, Toppan Printing Co., Ltd.
1-3-3 Suido, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8531 Japan

**Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University

***Graduate School of Engineering, Chiba University
1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 Japan

Keywords: surface reconstruction, BRDF, normal, oil painting

の拡散成分、鏡面成分、及び法線は非線形最適化によって同時に推定される。そのため、センサ応答に鏡面反射が含まれるかどうかを事前に判別する必要がない。

3 油彩画表面における光反射のモデル化

3.1 マイクロファセット理論に基づく BRDF モデル

誘電体表面における光反射の振る舞いは、二色性反射モデルによって表される⁷⁾。物体表面に入射した光の一部はフレネル反射則によって物体内部へ浸透せずに境界面で反射され、鏡面反射光となる。一方、物体内部へ浸透した光は散乱や吸収を繰り返し、拡散反射光として物体から放射される。

コンピュータグラフィックスの分野を中心に、こうした光反射の振る舞い (BRDF) の数式モデルが数多く提案されている。本研究では、T-S モデルに基づき、油彩画表面の BRDF を定式化する。

T-S モデルでは、物体表面を微小な面 (マイクロファセット) の集合とみなし、各マイクロファセットでは正反射方向にのみフレネル反射に起因する鏡面反射が生じるものとする。BRDF の鏡面成分 ρ_s は式 (1) でモデル化される。

$$\rho_s = \frac{D \cdot F \cdot G}{4(\mathbf{n}^T \mathbf{l})(\mathbf{n}^T \mathbf{v})} \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{n} は物体表面の法線ベクトル、 \mathbf{l} は物体表面から入射光方向への光源ベクトル、 \mathbf{v} は物体表面から観測者 (またはカメラ) 方向への視線ベクトルであり、 \mathbf{T} は転置を表す。全てのベクトルは単位長とする。

式 (1) の D はマイクロファセットの法線 \mathbf{a} の確率分布関数であり、本研究では式 (2) の正規分布を仮定する。

$$D(\mathbf{a}, \mathbf{n}; \sigma) = \frac{1}{\pi \sigma^2} e^{-(\alpha/\sigma)^2} \quad (2)$$

ただし、 α は \mathbf{a} と \mathbf{n} の成す角、 σ は表面粗さ (鏡面反射光の空間的広がり) を表す定数である。ベクトル \mathbf{l} と \mathbf{v} のハーフベクトルを $\mathbf{h} = (\mathbf{v} + \mathbf{l}) / |\mathbf{v} + \mathbf{l}|$ とすれば、 $\mathbf{a} = \mathbf{h}$ となるマイクロファセットのみが \mathbf{v} 方向への反射に寄与し、その比率は $D(\mathbf{h}, \mathbf{n}; \sigma)$ となる。

式 (1) の G は幾何学的減衰係数であるが、簡略化のため $G = 1$ とする。また、 F はマイクロファセットのフレネル反射率であり、 \mathbf{a} 、 \mathbf{l} 、及び、物質の屈折率 ν によって決定される。

BRDF の拡散成分 ρ_d は式 (3) の Lambert モデル⁸⁾ によって表されるものとする。

$$\rho_d = \frac{1}{\pi} A(\lambda) \quad (3)$$

ただし、 λ は光の波長、 $A(\lambda)$ は物体の拡散分光反射率を表す。

二色性反射モデルにおける BRDF ρ は、 ρ_s と ρ_d の線形和として式 (4) によって表される。

$$\rho = k_d \rho_d + \rho_s \quad (4)$$

ただし、 k_d は境界面で物体内部へ浸透する光束の入射光束に対する比率を表す係数である。各マイクロファセットにおいてフレネル反射せずに内部へ浸透する光束の比は $1 - F(\mathbf{a}, \mathbf{l}; \nu)$ であるため、

$$k_d = \int_{\Omega_a} [1 - F(\mathbf{a}, \mathbf{l}; \nu)] \cdot D(\mathbf{a}, \mathbf{n}; \sigma) d\omega_a \quad (5)$$

となる。ただし、 $d\omega_a$ はマイクロファセットの法線方向の微小立体角であり、積分範囲 Ω_a は物体表面の法線 \mathbf{n} を天頂角 0 度とする半球を表す。

3.2 モデルの簡略化

フレネル反射率 F はマイクロファセットに対する光の入射角に依存するが、入射角が概ね $\pi/3$ 以下では値の変化が小さく、近似的に定数と見なすことができる⁹⁾。マイクロファセットの法線の分布は物体表面の法線を中心とする正規分布となっているため、この仮定は、物体表面に対する入射角が小さい場合にも有効である。また、本研究において撮影対象とする油彩画は巨視的には平面であり、光の入射方向は被写体前面の半球域に限定される。カメラを被写体面に対して垂直方向に設置して撮影する場合、入射角が $\pi/3$ を超えるような光源方向と物体表面の法線方向の関係においては、カメラへの入射光に含まれる鏡面反射光は十分に小さく、フレネル反射率を近似することによる影響を受けない。これらのことから、本研究ではフレネル反射率を定数 $F_0 = F(\mathbf{n}, \mathbf{n}; \nu)$ とおく。

式 (5) で与えられる k_d についてもフレネル反射率の近似を適用し、

$$k_d = 1 - F_0 \quad (6)$$

とする。

以上より、本研究では、簡略化した BRDF モデルとして、

$$\rho = \frac{1}{\pi} (1 - F_0) A(\lambda) + \frac{1}{\pi} F_0 \frac{e^{-(\alpha/\sigma)^2}}{4\sigma^2 (\mathbf{n}^T \mathbf{l})(\mathbf{n}^T \mathbf{v})} \quad (7)$$

を用いる。

4 油彩画の表面復元手法

本節では、第 3 節で示した BRDF モデルに基づき、多方向照明による撮影で得られた画像群から画素単

位で BRDF と法線を推定する手法を述べる。

4.1 カメラのセンサ応答

多方向照明による撮影において、 n 番目の光源位置 ($n=1,2,\dots,N$) で撮影した画像の c チャンネルの正規化センサ応答 $p_{c,n}$ は、被写体表面の二色性反射に基づき、式 (8)-(10) で表される。

$$p_{c,n} = p_{d;c,n} + p_{s;n} \quad (8)$$

$$p_{d;c,n} = (1 - F_0)(\mathbf{n}^T \mathbf{l}_n) t_{d;c} \quad (9)$$

$$p_{s;n} = F_0 \frac{e^{-(\alpha/\sigma)^2}}{4\sigma^2(\mathbf{n}^T \mathbf{v})} \quad (10)$$

簡単のため、正規化係数は割愛した。また、式 (9) の $t_{d;c}$ (拡散アルベド) は次式で表される。

$$t_{d;c} = \frac{\int_{\lambda} L(\lambda) A(\lambda) S_c(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} L(\lambda) S_c(\lambda) d\lambda}$$

ただし、 $L(\lambda)$ は入射光の分光放射輝度、 $S_c(\lambda)$ はチャンネル c におけるカメラの分光感度を表す。

4.2 非線形最適化によるパラメータ推定

多方向照明による撮影で得られた正規化センサ応答 $p_{c,n}$ から、被写体表面の BRDF と法線を推定する提案手法について述べる。式 (8)-(10) において、 \mathbf{l}_n と \mathbf{v} は撮影系の幾何キャリブレーションによって得られるので、未知の変数は \mathbf{n} 、 $t_{d;c}$ 、 F_0 、 σ となる。

単位長の法線 \mathbf{n} の自由度は 2 であり、RGB カメラを用いた場合 ($c=R,G,B$) の拡散アルベド $t_{d;c}$ の自由度は 3 であるため、未知パラメータ数は 7 となる。これらのパラメータの最適値を決定するためには非線形最適化が必要となるが、7 個のパラメータをそれぞれ独立に扱った場合、計算コストが大きく、また、局所解に陥りやすいことが問題となる。

本研究では、これら 7 個のパラメータを高速かつ安定的に決定するため、図 1 に示すアルゴリズムを用いる。以下に、各処理の詳細を示す。

Step 1: 変数 \mathbf{n} 、 F_0 、 σ に初期値を与える。初期値の決定方法については、第 4.3 節で述べる。

Step 2: 式 (10) より、正規化センサ応答の鏡面反射成分を算出し、これを $\hat{p}_{s;n}$ とする。

Step 3: 実際の撮影で得られた正規化センサ応答 $p_{c,n}$ から $\hat{p}_{s;n}$ を引き、正規化センサ応答の残差拡散反射成分 $\tilde{p}_{d;c,n}$ とする。変数 \mathbf{n} 、 F_0 、 σ の値が最適値に近いほど、 $\tilde{p}_{d;c,n}$ の値は正規化センサ応答の拡散反射成分の実際の値に近いものとなる。

Step 4: 光源位置 $n=1,2,\dots,N$ について式 (9) の $p_{d;c,n}$ に $\tilde{p}_{d;c,n}$ を代入し、拡散アルベド $t_{d;c}$ を最小二乗法によって計算する。

Step 5: Step 4 で決定された拡散アルベド $t_{d;c}$ と、 \mathbf{n} 、 F_0 を用いて、全ての c 及び n について式 (9) で与えられる正規化センサ応答の拡散反射成分 $p_{d;c,n}$ を計算し、 $\hat{p}_{d;c,n}$ とする。

Step 6: Step 3 で得られた $\tilde{p}_{d;c,n}$ と Step 5 で得られた $\hat{p}_{d;c,n}$ との一致度を基準に、非線形最適化における評価関数 O を、式 (11) により計算する。

$$O(\mathbf{n}; F_0, \sigma) = \sum_n \sum_c (\tilde{p}_{d;c,n} - \hat{p}_{d;c,n})^2 + \sum_c \max(|t_{d;c} - 0.5| - 0.5, 0)^2 \quad (11)$$

右辺第二項は、拡散アルベド $t_{d;c}$ の値を $[0,1]$ に制限するためのペナルティである。

以上の手順に従い、 O を最小化するパラメータ \mathbf{n} 、 F_0 、及び σ を非線形最適化によって決定する。本研究では、評価関数の勾配を計算することなく非線形最適化を行なう Nelder-Mead の滑降 simplex 法^[10]を用いる。

提案手法では、自由度 3 の未知変数 $t_{d;c}$ は最適化の過程で \mathbf{n} 、 F_0 、 σ に従属して一意に決定されるため、最適化パラメータ数は 4 となり、7 個全てのパラメータを独立して最適化する場合と比較して、より小さい計算負荷で、安定的に最適解を求めることが可能となる。

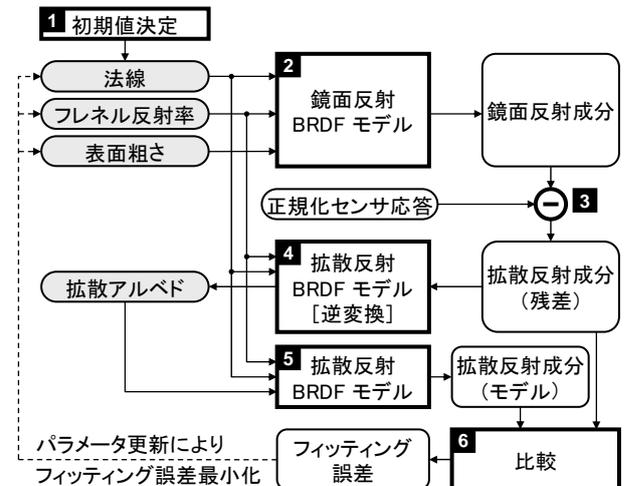


図 1 BRDF 及び法線を推定する非線形最適化アルゴリズム (提案手法)。

4.3 初期値

前節で述べた非線形最適化手法では、 \mathbf{n} 、 F_0 、 σ の各パラメータに対して適当な初期値が必要となる。

法線 \mathbf{n} については、Lambertモデルに基づくフォトメトリックステレオ法⁶⁾により初期値を決定する。この方法では、センサ応答に鏡面反射成分が含まれていないことが前提となるが、光源位置によっては鏡面反射成分が含まれている可能性があるため、適当な閾値処理によりこれらを除外する。

BRDFの鏡面成分パラメータ F_0 と σ の初期値は、全画素に共通の固定値 $F_0 = 0.05$ 、 $\sigma = 0.4$ とする。これらの値は誘電体表面の光反射特性から経験的に定めた。

5 実験

提案手法により油彩画のBRDFと法線を画素単位で推定する実験を行なった。被写体としては、図2(a)に示す油彩画を使用し、図中の白枠内の領域について処理を行なった。この絵画は光沢の鋭い領域と鈍い領域とを併せ持っており、異なる表面状態に対する提案手法の有効性を検証するために選択した。

5.1 撮影

撮影用機材としては、コンピュータ制御されたRGB型デジタルカメラと16個の白色LEDランプを使用した。カメラは被写体面に対して垂直方向に設置し、LEDランプはカメラと被写体の間に配置した。撮影システムの外観を図3示す。カメラの内部パラメータ、外部パラメータはカメラキャリブレーション手法¹¹⁾によって事前に取得した。撮影は多段階露出により行い、光源毎にHDR画像を生成した¹²⁾。

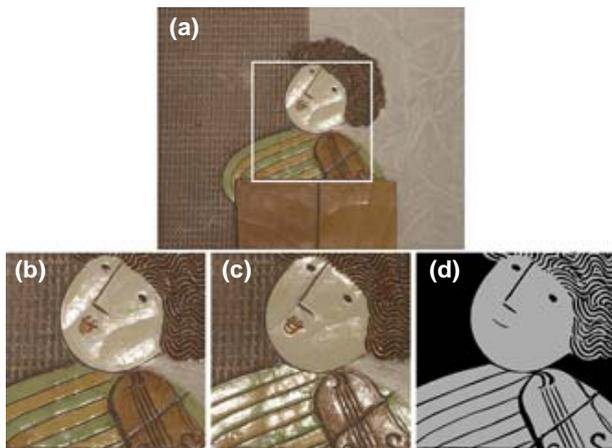


図2 実験で使用した油彩画。(a) 絵画全体、(b) 解析に使用した領域(画像(a)の白枠内)、(c) 異なる照明方向での撮影画像、(d) 光沢特性の違いを示すマスク(グレイ: 鋭い光沢特性、黒: 鈍い光沢特性)。



図3 撮影システムのプロトタイプ。デジタル一眼レフカメラと16個の白色LEDランプにより構成。

5.2 パラメータ推定結果

各パラメータの推定結果を図4に示す。図4(a)は拡散アルベド $t_{d,c}$ を可視化したマップである。図2の撮影画像と比較して、鏡面反射や表面の凹凸の影響が消え、絵具顔料の色のみが抽出されていることが分かる。図4(b)は法線 \mathbf{n} を可視化したマップである。絵具の厚みの変化やキャンバス地のパターンが確認できる。図4(c)と(d)はそれぞれフレネル反射率 F_0 と表面粗さ ρ のマップであり、グレイスケール画像の明るさをパラメータの値に割り当てた。

図5に、推定されたパラメータに基づく画像レンダリング結果の一例を示す。図5(a)は多方向照明撮影で得られた画像のひとつである。同一照明条件下での提案手法によるレンダリング結果を図5(b)に、撮影画像とレンダリング結果との差分画像を図5(c)に示す。従来のフォトメトリックステレオ法によって法線と拡散アルベドを推定し、それらを用いて非線形最適化によりフレネル反射率と表面粗さを推定した結果を、提案手法との比較として図5(d)に示す。図5(e)は図5(a)と(d)の差分画像である。他の照明光源についても同様の結果が得られた。

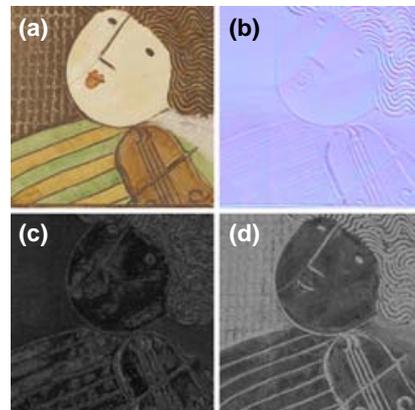


図4 BRDF、法線の推定結果(可視化マップ)。(a) 拡散アルベド、(b) 法線、(c) フレネル反射率、(d) 表面粗さ。

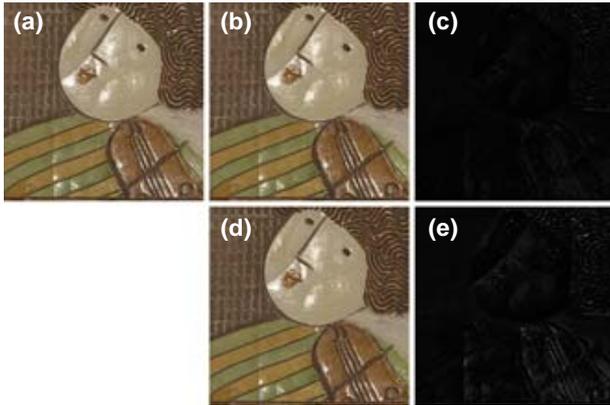


図 5 画像レンダリング結果. (a) 撮影画像, (b) 提案手法に基づくレンダリング画像, (c) 画像 (a) と (b) の差分, (d) 従来のフォトメトリックステレオ法に基づくレンダリング画像, (e) 画像 (a) と (d) の差分.

従来のフォトメトリックステレオ法による結果では提案手法と比較して撮影画像との差がより大きいことが確認できる. 拡散アルベド, フレネル反射率, 及び表面粗さは法線に依存して決定されるパラメータであるため, この差は主に, 法線の推定誤差によるものと考えられる.

図 6 に, 油彩画上の光沢の鈍い領域から抽出した 2 つの画素における推定精度を示す. カメラで観測された正規化反射輝度と, BRDF モデルにより導出された正規化反射輝度が高精度で一致していること

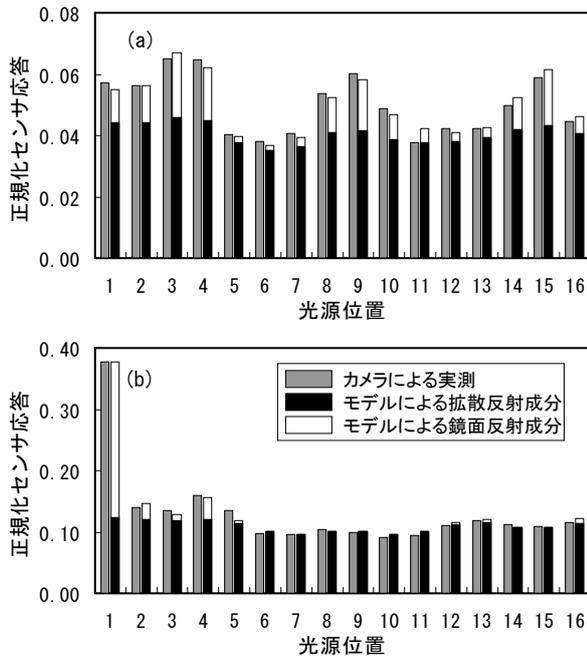


図 6 正規化センサ応答の実測値とモデル計算値の一致度の比較例. (a) 光沢の鈍い点に対応する画素, (b) 比較的光沢の鋭い点に対応する画素.

が確認できる. 図 6 (a) は, 物体表面の反射特性によっては, 有意な大きさを持つ鏡面反射光が多数の光源位置に対して観測され得ることを示している. このような場合, パラメータ推定を行なう前に, 観測されたセンサ応答から拡散反射成分を抽出することは困難であり, フォトメトリックステレオ法のみでは正確に法線を導出することはできない. 提案手法では, 拡散反射光と鏡面反射光の両方を用いて非線形最適化を行なうため, このような物体に対しても法線をより正確に推定することが可能である. 比較的鈍い光沢特性を持つ別の油彩画に対する結果を図 7 に示す.

5.3 パラメータ補正

本実験で使用した油彩画は, 特定の領域で鋭い光沢特性を持ち, それ以外の領域では比較的鈍い光沢特性を持っている. 図 2 (d) は, これら 2 つの領域を示すために, 人手で作成したマスク画像である. グレイで示した領域は, 絵の具が厚く塗られ, ニスが塗布されている. この領域では, 図 2 (b) 及び (c) の撮影画像に見られるように, 強い光沢が確認された. 一方, 黒で示した領域では絵の具が薄く塗られ, ニスは塗布されておらず, 光沢は比較的弱いことが視認された.

光沢の鋭い領域 (図 2 (d) のグレイのマスクで示した領域) では, 位置による光沢特性の大きな変化は視認できず, BRDF の鏡面パラメータ F_0 と ρ の値は空間的にほぼ一様であると考えられる. しかし, 図 4 (c) と (d) に示す結果では, これらのパラメータに空間的不均一性が現れており, 推定結果に誤差が含まれていることを意味している. 本実験のように比較的少数の光源を用いた場合, 鋭い光沢特性を持つ物体表面については, 法線によってはいずれの

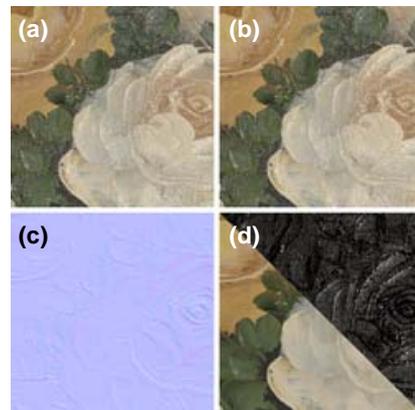


図 7 比較的鈍い光沢特性を持つ別の油彩画に対する実験結果. (a) 撮影画像, (b) レンダリング画像, (c) 法線マップ, (d) 画像 (b) の鏡面反射成分 (右上) と拡散反射成分 (左下).

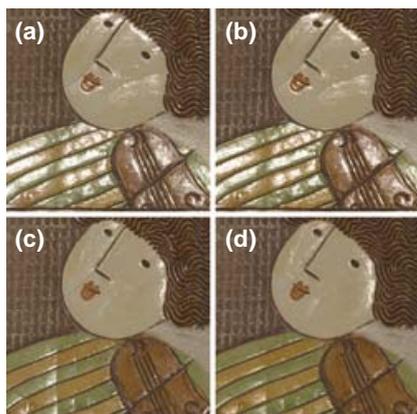


図 8 パラメータ補正後の画像レンダリング結果. (a) 撮影画像 (パラメータ推定に使用), (b) 画像 (a) と同一照明条件下でのレンダリング画像, (c) 撮影画像 (パラメータ推定では不使用), (d) 画像 (c) と同一照明条件下でのレンダリング画像.

光源位置においてもカメラ方向への鏡面反射が生じない可能性がある. その場合, BRDF の鏡面成分の推定精度は著しく低下する. そこで, 鋭い光沢特性を持つ被写体に対して, より信頼度の高い BRDF パラメータを得るための補正を行なった.

提案手法によって求めた F_0 と σ は, 観測されたセンサ応答に鏡面反射成分が含まれている画素においては適当な値が最適解として得られている. そこで, BRDF モデルから算出される正規化センサ応答に十分な大きさの鏡面反射成分が含まれる画素を抽出し, それらの画素で得られた F_0 と σ の平均値 \bar{F}_0 , $\bar{\sigma}$ を求め, 領域全体に適用した. 更に, 第 4.2 節で示した非線形最適化アルゴリズムにおいて F_0 と σ の値を \bar{F}_0 , $\bar{\sigma}$ に固定し, \mathbf{n} のみを最適化することにより, 法線 \mathbf{n} , 及び拡散アルベド $t_{d,c}$ の補正を行なった ($t_{d,c}$ は \mathbf{n} , \bar{F}_0 , $\bar{\sigma}$ から従属的に最適値が決定される).

図 2 の油彩画について, 図 2 (d) のグレイのマスク領域に対してパラメータ補正を適用した. 図 8 に補正後のパラメータを用いたレンダリング画像の例を示す. 図 8 (a) はパラメータ推定用の多方向照明撮影で得られた 16 枚の画像のひとつである. 図 8 (b) は図 8 (a) と同一照明条件下でのレンダリング結果であり, 図 8 (a) との高い一致度が確認できる.

撮影に使用しない新規光源下でのレンダリング結果を検証するため, 16 個の光源の中のいずれか一つで得られた画像を除外してパラメータ推定を行い, この除外した光源で被写体を照射したときのレンダ

リング画像を生成した. 図 8 (c) 及び (d) に撮影画像とレンダリング結果をそれぞれ示す. 誤差は見られるものの, レンダリング画像における鏡面反射光の位置や強さは撮影画像と近似していることが分かる. 他の光源についても, 同様の傾向が得られた.

6 結語

多方向照明による撮影で得られた画像群から, 画像の各画素における被写体の BRDF と法線を算出する手法を提案した. 提案手法では, BRDF と法線を推定する非線形最適化において, 拡散アルベドを他の推定パラメータから従属的, かつ一意に決定されるパラメータとすることにより, 処理の高速化, 及び安定化を実現した. 油彩画の撮影から画像レンダリングまでを通した実験を行ない, 推定手法の有効性を確認した. 提案手法では, 事前にセンサ応答を鏡面反射成分と拡散反射成分とに分離する必要が無いため, 鈍い光沢特性を持つ被写体に対しても適用できることを示した. 課題としては, 相互反射の除去や陰影の再現, 撮影時の照明条件の最適化等が挙げられる.

参考文献

- [1] F. E. Nicodemus, *Appl. Opt.*, **4**(7), 767 (1965).
- [2] A. Gardner, C. Tchou, T. Hawkins, and P. Debevec, *ACM Trans. on Graphics* **22**(3), 749 (2003).
- [3] Y. Chen, R. S. Berns, and L. A. Taplin, In *Proc. of 14th Color Imaging Conference*, 54 (2007).
- [4] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, *J. Opt. Soc. Am.*, **57**(9), 1105 (1967).
- [5] S. Tominaga and N. Tanaka, *J. Electron. Imaging*, **17**(4), 043022 (2008).
- [6] R. J. Woodham, *Opt. Eng.*, **19**(1), 139 (1980).
- [7] S. A. Shafer, *Color Res. Appl.*, **10**(4), 210 (1985).
- [8] D. L. DiLaura, The Illuminating Engineering Society of North America (2001).
- [9] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, **13**(7), 611 (1991).
- [10] J. A. Nelder and R. Mead, *Comput. J.*, **7**(4), 308 (1965).
- [11] Z. Zhang, in *Proc. of International Conference on Computer Vision*, 666 (1999).
- [12] P. Debevec and J. Malik, in *Proc. of SIGGRAPH*, 369 (1997).