

# カラーを考慮した書画の反射・透過率を同時再現するレプリカの作成

## Simultaneous Reproduction of Colored Reflectance and Transmittance for Ink Paintings

浅田 繁伸\*†      久保 尋之†      船富 卓哉†      向川 康博†  
Shigenobu Asada†,      Hiroyuki Kubo†,      Takuya Funatomi†      and      Yasuhiro Mukaigawa†

† 奈良先端科学技術大学院大学      † Nara Institute of Science and Technology

### 1 はじめに

近年、文化財保護の観点から物体の質感を忠実に再現する複製品の作成技術が求められており、なかでも貴重な資料として日本各地に多く存在する、書画の質感再現は重要であると言える。

物体の質感は多元的な要素によって構成されており、質感を完全に模倣するためには、見た目、匂い、手触り、形など、様々な要素を考慮する必要がある。ただし、書画のように主に視覚的に鑑賞する類の文化財においては、その見た目、すなわち光学特性に関する質感の再現が特に重要であると考えられる。そこで本論文では、対象物の光学特性を忠実に再現する複製品のことを**光学的レプリカ**と呼び、この光学的レプリカ作成のためのマイルストーンとして、物体の反射率と透過率とを同時に再現するレプリカ作成を目的とする。図1には本研究で作成するレプリカの位置づけを示す。

本研究で対象とする書画はもっぱら墨と筆によって描かれており、書家が使用した墨の濃淡や筆遣いは表面の反射率だけでなく透過率にも影響を与えるものの、通常、書画は机上や壁面に設置された状態で鑑賞される(図2-(a))ため、書画とは基本的に反射光を観察する作品であるといえる。しかし、書画は古来よりその透過性を活かして、内部からの明かりを印象的に演出する灯籠(図2-(b), (c))や、天空光を背に舞う和風、ねぶたの山車灯籠などに広く用いられてきており、必ずしも反射光だけでなく透過光も含めて鑑賞の対象とされている。さらに、史料編纂に関する研究分野でも透過光に多くの重要な情報が含まれていることが知られており、最近の重要文化財級の史料の修復で、反射光だけでなく透過光の撮影が標準的な工程の一部になってきている[1]。従って、レプリカを作成する上では反射率と同時に透過率を考慮することが重要であると考えられる。

本研究ではまず、書画の反射率と透過率を計測してデジタルデータ化する。さらに市販のインクジェットプリンタを用いて、計測した書画の反射率と透過率を再現可能な多層構造の印刷物を製作する。筆者らはこれまで、この多層印刷構造を用いて書画の光学特性の再現に取り組んだ[2]が、あくまでグレースケールを対象としており、色合いま

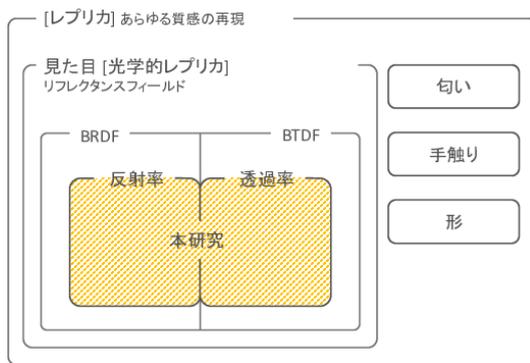


図1: 本研究で作成するレプリカの位置づけ



(a) 書画の外観      (b) 室内光下の灯籠      (c) 点灯した灯籠

図2: 書画と灯籠の外観

で再現することは出来ていなかった。本研究では、赤、青、緑の反射率と透過率をそれぞれ考慮することで、従来はグレースケールでの再現に留まっていたレプリカの作成において、対象物の反射率と透過率を同時にカラーで再現するレプリカの作成が可能となる。本稿では、多層印刷構造を用いた反射率と透過率の同時再現手法について概説し、さらにそれをカラーに応用した結果について詳述する。

### 2 関連研究

文化財がもつ様々な特徴をできるだけ正確に記録するために、これまでに様々な計測に基づくアーカイブ法が提案されている。京都府立総合資料館では、国際連合教育科学文化機関 (UNESCO) の世界記憶遺産に登録された東寺

\*2016年4月より三菱電機(株)所属

百合文書 [3], 奈良国立博物館では重要文化財に指定されている法華経 [4] などの古文書を膨大な数のデジタル画像として記録し, 保存に取り組んでいる. さらに, より高精度な記録の方法として田中 [5] は絵画をマルチスペクトル撮影を行うことで, 絵画が本来有する分光特性の照明環境に依存しない記録を実現した. 色だけでなく形や大きさの記録が重要とされている有形文化財では, 大石ら [6] はレンジセンサによる奈良大仏の立体形状の取得を行った. 舞踊などの無形文化財では, 八村 [7] は光学式モーションキャプチャで踊りをアーカイブしている.

また, 計測したデータをもとに文化財をリアルに再現する技術も多く提案されており, 例えば宮田らは漆と金箔素材の質感の計測と CG による再現に取り組んだ [8][9]. VR 技術を用いた再現法としては, 凸版印刷株式会社では重要文化財である“洛中洛外図屏風”のデジタルデータを VR によって提示することで, 細部まで確認できるシステムを構築している [10]. 角田らは HMD を通して飛鳥京の迫力ある映像を遺跡現地で提示することで, 高い没入感を得ることができるシステムを開発した [11]. さらに, 3D プリンタを用いて光学特性を再現する研究として, Dong らは表面下散乱の再現に取り組んだ [12] が, 透過光に対する考慮は十分になされていない.

そこで本研究では, 重要な文化財として多く残されている書画を複製の対象とし, その反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成を目的とする.

### 3 反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成法

#### 3.1 多層印刷構造

書画のような紙に描かれた絵や文字を複製する方法として, 最も単純にはイメージスキャナやデジタルカメラなどにより被写体を撮影し, 得られた画像をプリンタで印刷する方法が考えられる. しかしながら, 単なる印刷では印刷物の表面に塗布するトナーやインク濃度の制御に留まり, 主に表面での反射率を再現しているに過ぎない.

書画では, 紙への墨の染みこみ具合などに応じて, 例え同じ反射率でも異なる透過率を有することがあるため, 表面の反射率だけでなくその透過率が質感を再現する上で重要な意味をもつ. 従って反射率と同時に透過率を制御しない限りこのような違いを再現することはできず, プリンタによる通常の印刷での実現は難しい.

そこで本研究では, 書画の反射率と透過率を同時に再現するために, 図 3 に示すように, インクジェットプリンタによって複数の紙に異なるパターンを印刷し, これらを層状に貼り合わせてレプリカを作成する. 本研究ではこのような造りを多層印刷構造と呼び, 実際には上層と下層の 2 層

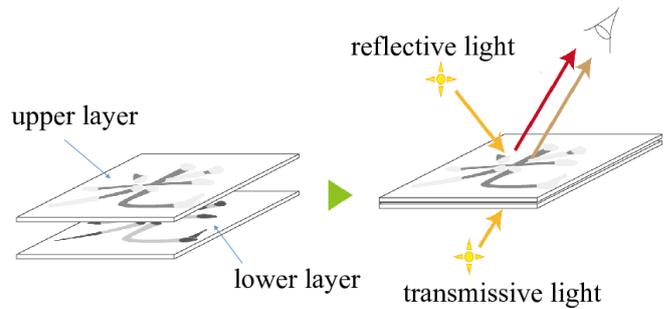


図 3: 多層印刷構造による反射率と透過率の再現

の印刷レイヤからなる多層印刷構造のレプリカを作成する. 多層印刷構造の上層と下層のそれぞれの用紙に塗布するインク濃度を制御することで, 反射率だけでなく透過率を同時に再現することが可能であると考えられる. なお, 印刷用紙を多層重ねることで透過率は低くなる傾向にあると考えられるため, 高い透過率を再現しやすくなるように, 印刷用紙としては比較的透過率の高いトレーシングペーパーを用いる.

#### 3.2 各層に印刷するインク濃度の決定

多層印刷構造において, 上層に塗布するインク濃度 (上層色) を  $p_u$ , 下層に塗布するインク濃度 (下層色) を  $p_l$  とする. これらのインク濃度を決定する方法として, 例えばクベルカ=ムンク理論に基づいたモデルベースのアプローチが考えられる. しかしながら, この理論を適用するためには印刷用紙やインク濃度の物理パラメータを十分精確に計測しておく必要があり, 容易には実行できない.

そこで我々は, そうした問題を避けるためにサンプルベースのアプローチを用いる. まず, 上層色  $p_u$ , 下層色  $p_l$  の取り得る値として, 印刷可能なインク濃度の範囲を 0 から 1 まで 256 段階と設定する. 次に, 上層色  $p_u$ , 下層色  $p_l$  の全ての濃度の組み合わせ (256<sup>2</sup> 通りの組み合わせ) における多層印刷構造物を作成して反射率と透過率を計測し, ルックアップテーブルとして保持する. このルックアップテーブルを用いることで, 所望の反射率と透過率とを再現する上層色  $p_u$  と下層色  $p_l$  を導くことができる.

実際には, まず図 4 に示す一方向のグラデーションを印刷した 2 枚の用紙を貼り合わせて多層印刷構造を作成する. グラデーションの濃度は 256 段階で均一に遷移し, 2 枚のそれぞれのグラデーション方向は直交するように配置する. グラデーションパターンが印刷された正方領域は上層色  $p_u$  と下層色  $p_l$  の全ての組み合わせを網羅しており, この領域の反射率と透過率をそれぞれ 1 回ずつ計測するだけで任意の上層色  $p_u$ , 下層色  $p_l$  で実現される反射率  $r(p_u, p_l)$  と透過率  $t(p_u, p_l)$  の関係を取得することができる. 具体的には, 再現したい所望の反射率  $R$  及び透過率  $T$  が与えられたとき, 誤差関数を次式で定め, これを最小化するための

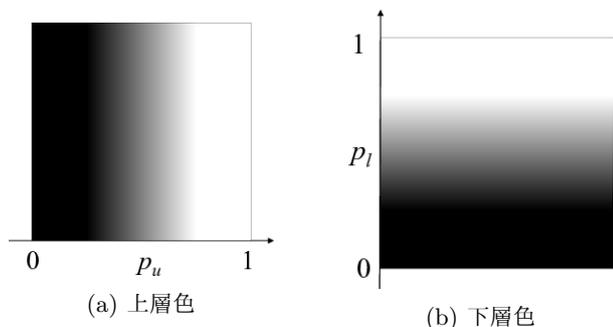


図 4: ルックアップテーブル作成のためのグラデーションパターン

上層色  $p_u$ , および下層色  $p_l$  を求める.

$$\operatorname{argmin}_{p_u, p_l} (|R - r(p_u, p_l)| + |T - t(p_u, p_l)|). \quad (1)$$

この処理を反射率と透過率を再現する対象表面の全ての点に対して実行し, 多層印刷構造に印刷する上層色  $p_u$  と下層色  $p_l$  と印刷パターンを求める. さらに, これらのパターンを印刷して貼り合わせることで, レプリカを作成する. 本手法は印刷用紙やインクに対して数理モデルを仮定していないため, インクや紙の物理パラメータの計測が不要であり, 用紙やインクの種類を変更した場合にも上述のような簡易な計測で対応可能なことが利点であると言える.

### 3.3 反射率と透過率の計測

本研究における反射率と透過率の計測環境を図 5 に示す. 計測は暗室にて実施し, 反射率の計測には光源として白色 LED ライトを使用し, 被写体の表面をできるだけ均一に照らすためにライトから発せられた光をいったん拡散板に当て, 光を満遍なく拡散させてから被写体に照射するように設置した. このときの被写体の反射光の強さをカメラで撮影する. また, 透過率の計測には一定の光量で背面から被写体を照らすために, 全面に白色を表示させた状態のフラットパネルディスプレイを光源として用い, その上に被写体を設置して, 透過光の強さを同様にカメラで計測した. また, 透過率が既知の標準透過板を同じ環境で計測することで, 標準透過板の輝度値から被写体の透過率を算出する. 以上の方法を用いて, 再現対象とする書画, 及び上述のルックアップテーブルの反射率と透過率とを計測する.

## 4 レプリカの作成と効果の検証

本研究では, 再現対象の書画として毛筆に熟練した人物に作成を依頼して“光”と書かれた書道作品を用意した. 複数の用紙に印刷されたパターンを組み合わせることで有効性について検証のために, 2枚に異なるパターンを印

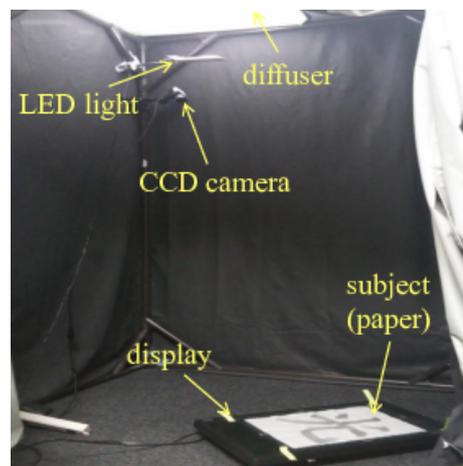


図 5: 実験環境

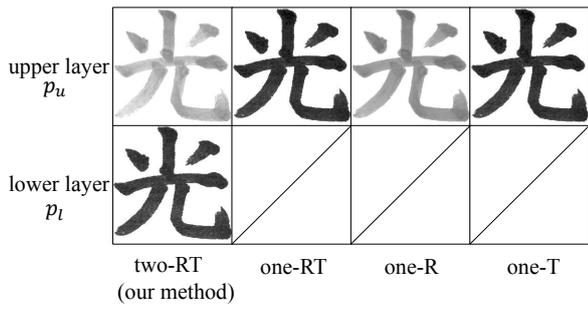
刷する場合 (提案手法) と, 1枚の印刷用紙にだけプリンタでパターンを印刷する場合で, 対象物体の反射率と透過率の再現性を評価する. 提案手法の上層色と下層色は式 (1) に基づいて決定し, これを two-RT と呼ぶ. 比較のための 1層の印刷濃度の決定には, 反射率と透過率の両方を考慮する場合を one-RT, 反射率だけを考慮する場合を one-R, 透過率だけを考慮する場合を one-T と呼ぶ.

それぞれで求められた上層色  $p_u$  および下層色  $p_l$  を図 6(a) に示す. なお, one-RT, one-R, one-T では下層色は制御しないため, 図に掲載されていない. さらに, 実際にレプリカを作成し, 図 5 と同様の計測環境にて反射光と透過光を計測した結果を図 6(b) に, 書道作品 (subject) とレプリカの誤差の擬似カラー表示を図 6(c) に示す.

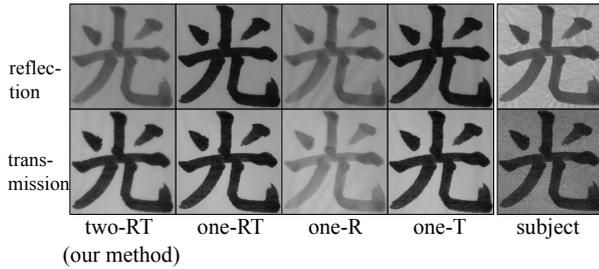
この結果から, 提案手法である two-RT は他のレプリカと比較しても反射率と透過率の同時での再現性に勝っていることがわかる. また, 提案手法以外でのレプリカはいずれも反射率もしくは透過率の一方の誤差は比較的大きいことから, 1枚の印刷物だけでは反射率と透過率を同時に再現することは難しく, 複数枚の印刷パターンを用いることの有効性が示されたといえる. また, 以上の方法を用いて作成した書道作品のレプリカを実際の環境に置いたときの様子を図 7 に示す. 床に置いて反射光が強く見えているときだけでなく, 手に持ち透かすことによって透過光の影響がある場合においても, オリジナルの書道作品の質感が再現されていることを確認した.

## 5 反射率と透過率を同時に再現するレプリカのカラー化

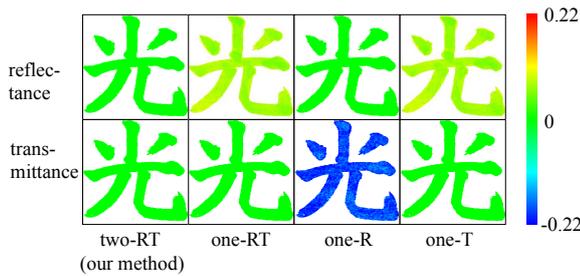
本章では, 提案手法をグレースケールだけでなく赤・青・緑の 3色カラーへ拡張し, カラーのレプリカ作成を実現する. これにより, 単なるグレースケールの反射・透過率の再現だけでなく, 書画の経年変化により生じる変色の再現



(a) 求められた上層色と下層色の濃度



(b) 再現された反射光と透過光の画像



(c) 反射率と透過率の誤差マップ

図 6: 用意した古文書の反射光・透過光画像

も可能になると考えられる。

## 5.1 カラーのルックアップテーブルの作成

まず、再現対象物の反射光と透過光を図 5 に示す環境で計測を行う。その際に、CCD センサによるカメラなどベイヤー配列を用いている撮像装置を使った場合と比較して、各色の空間分解能の低下防止を目的とし、撮像装置として赤緑青と 3 つの感色層に分けられている Foveon X3 が搭載されている SigmaSD15 を用いる。なお、再現対象物として著者らの所有する実際の古文書を用いるものとし、得られた画像を図 11(a) に示す。

さらに、サンプルベースによる 3 色カラーの再現に向けて、そのルックアップテーブルをカラー用に作り直す必要がある。本実験では、組み合わせ総数が多くなりすぎないように、赤・緑・青のそれぞれの色の取り得る値は 8 階調 (0, 36, 72, 108, 144, 180, 216, 255) に制限する。従って、



(a) 置いた時 (b) 透かした時

図 7: 作成されたレプリカによる再現。

上層色と下層色の印刷濃度の取り得る組み合わせは、 $8^3 \times 8^3 = 262,144$  通りである。グレースケールの場合、ルックアップテーブルは白から黒の単調なグラデーションになるように並べていたため、計測誤差などにより多少の参照位置ズレが発生しても、参照結果のインク色のズレはそれほど大きくはならない。しかし、3 色カラーの場合では  $8^3$  通りの色を無作為に並べると、参照位置ズレに対して参照結果のインク色は大きく誤ることが予想される。そこで、ルックアップテーブルとして作成するグラデーションパターンは、隣接画素間の色距離尺度  $\Delta L = |\Delta R| + |\Delta G| + |\Delta B|$  が一定となるように整列させる。これにより、仮にデコードミスによって参照画素位置に僅かなズレが生じたとしても、参照される画素値は本来参照されるべき画素値と極端に値がズレないようにする。

実際に、図 8(a) で示すように、色の順序をナイーブに決定すると色距離尺度にバラつきがみられ、デコードミスにより参照画素値に大きな誤差が発生しやすいことがわかる。そこでこのルックアップテーブルの色距離尺度を一定にさせるために 8 画素ごとに列を作っていく、その偶数番目に当たる列を垂直に反転させる。そのように反転させるのは、奇数番目の列の右端の画素とその隣接する偶数番目の列の左端の画素との色距離尺度が一定になっていないためである。反転させた結果、図 8(b) のように徐々に色距離尺度が一定になっていくことがわかる。図 9 でも反転前と反転後の画素の変化から色距離尺度が一定になることが確認できる。さらに、図 8(b) のルックアップテーブルを 64 画素ごとに列を作っていく、その偶数番目に当たる列を垂直に反転させた結果、図 8(c) で示されるような色距離尺度が一定のグラデーションパターンが生成されたことが確認された。以上のように作成したグラデーションパターン (図 10) を重ねた多層印刷構造の反射・透過光画像を計測する。

## 5.2 カラー色の誤差関数とレプリカの作成

カラーレプリカの上層色と下層色を決定するための誤差関数として人間の知覚に基づくように CIE-L\*a\*b\*色空間

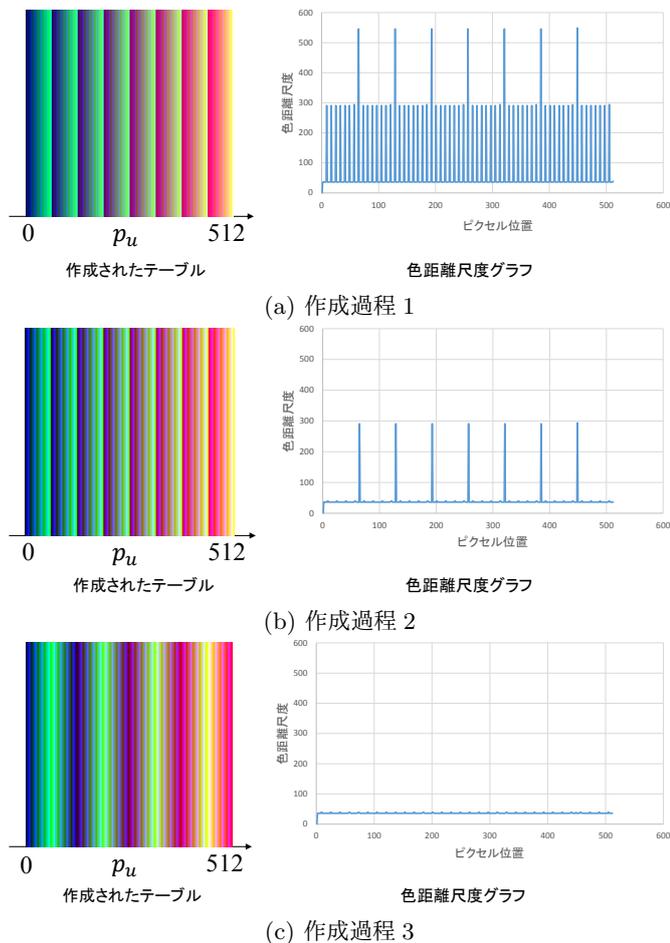


図 8: ルックアップテーブルの作成過程

による色差を用い、これを最小化する上層色  $p_u$ 、および下層色  $p_l$  を求める。

$$\operatorname{argmin}_{p_u, p_l} (\Delta E_r + \Delta E_t). \quad (2)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}. \quad (3)$$

多層印刷構造によって作成したレプリカの反射光画像と透過光画像を図 11(b) に、多層印刷構造にプリントした上層色と下層色の印刷パターンをそれぞれ図 11(c) に示す。また、そのときの反射光及び透過光それぞれの  $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$  の分布及び、反射光色差  $\Delta E_r$ 、透過光色差  $\Delta E_t$  と  $\Delta E$  の分布を図 12 に示す。実際に作成したレプリカを観察したところ、字が書かれている部分の再現と和紙の色の再現は良好であったが、透過光を観察したときには和紙の繊維のムラらしさが感じられなかった。これは図 12 の誤差分布からも明らかである。

以上から、提案するカラーを考慮した多層印刷構造によって墨字の部分及び和紙の色の再現はなされたが、透過光で見られる繊維のムラの再現には課題が残ることが明らかとなった。また、以上の方法を用いて作成した古文書のカラーレプリカを実際の環境に置いたときの様子を図 13 に示す。

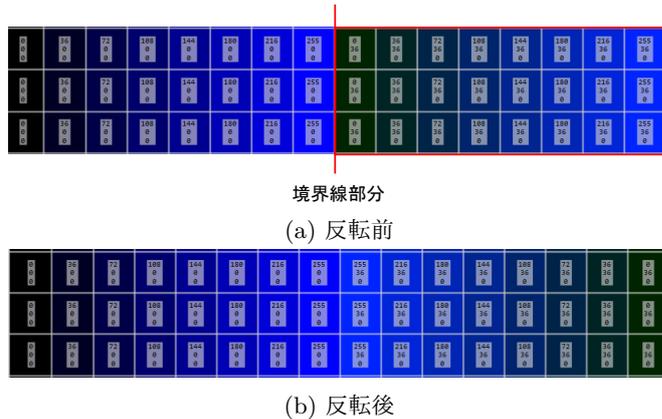


図 9: 反転前後の変化

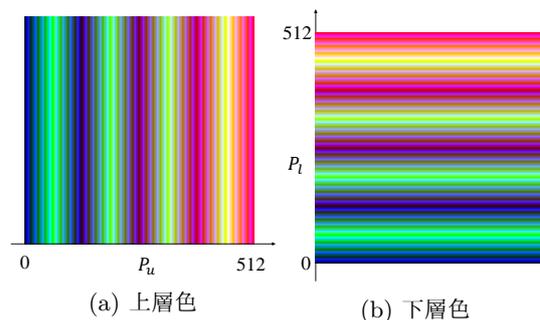


図 10: カラーのグラデーションパターン

## 6 まとめ

本研究では、複数の用紙に異なるパターンを印刷し、その印刷物を重ね合わせて用いることにより、書画の反射率と透過率を同時に再現可能な光学的レプリカを製作する手法を提案した。

従来の 1 枚の印刷物では反射率と透過率を同時に再現することが難しく、2 枚の印刷物を利用する本手法ではそれが可能となったことを実験によって示した。さらに、提案手法の拡張として和紙の繊維のムラ及び染みなどの色の再現を目的として、3 色カラーのレプリカ作成を行った。カラーを考慮した反射率・透過率の再現には一定の効果が見られたものの、透過による繊維のムラの再現は不十分であることがわかった。今後の課題として、透過光の再現の向上のために、さらに薄く透明度の高いトレーシングペーパーやクリアフィルムの導入など、最適な印刷用紙を選定することが必要である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 15H05918 (新学術領域研究「多元質感知」) の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 保立 道久, 高島 晶彦, 江前 敏晴, 韓 允熙, 山口 悟史, 松尾 美幸, 杉山 巖, 谷 昭佳, 高山 さやか “編纂と文化

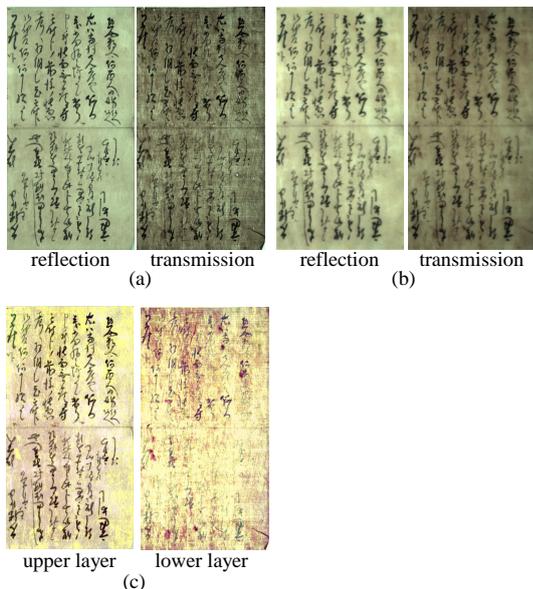


図 11: 古文書をカラーで再現した例. (a) 古文書の外観, (b) レプリカの外観, (c) 多層印刷構造にプリントした上層色と下層色

財科学: 大徳寺文書を中心に”, 東京大学史料編纂所研究紀要, 東京大学史料編纂所, pp.107-148, 2013.

- [2] 浅田繁伸, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, “書画の質感再現を目的とした光学的レプリカの試作”, 情処研報 GCAD 159-5, June 2015.
- [3] 京都府立総合資料館, “東寺百合文書 WEB”, <http://hyakugo.kyoto.jp/>, 2015年3月1日参照.
- [4] 奈良国立博物館, “画像データベース”, <http://www.narahaku.go.jp/collection/d-753-0-1.html>, 2015年3月1日参照.
- [5] 田中 法博, “分光的な光反射モデルに基づいた美術絵画のデジタルアーカイブ”, 日本色彩学会誌 31(4), 292-297, 2007-12-01.
- [6] 大石 岳史, 増田 智仁, 倉爪 亮, 池内 克史, “創建期奈良大仏及び大仏殿のデジタル復元”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.3, pp.429-436, 2005.10.
- [7] 八村 広三郎, “モーションキャプチャ・プロジェクター 舞踊のデジタルアーカイブ”, 情報処理学会研究報告 コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM) 2007(1(2007-CVIM-157)), 1-8, 2007-01-11.
- [8] 宮田 一乗, 櫻井 快勢, 友井 俊弘, 田下 博, 今尾 公二, 坂口 嘉之, “漆工芸の質感表現” 画像電子学会研究会講演予稿, 237, 165-170, 2008-03-07.

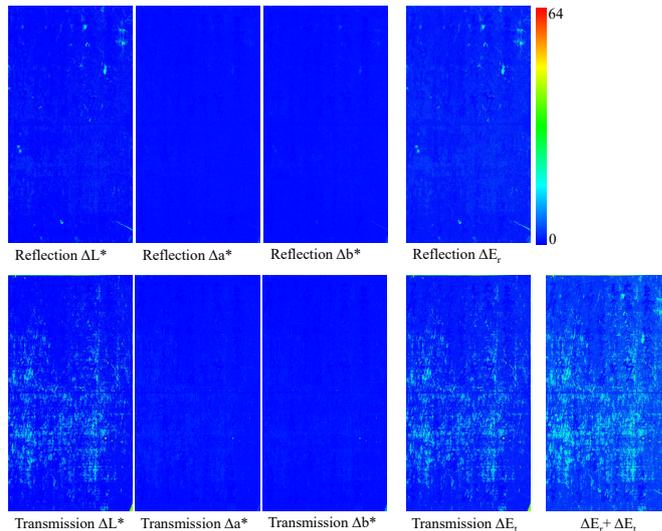


図 12: 古文書の再現における誤差分布

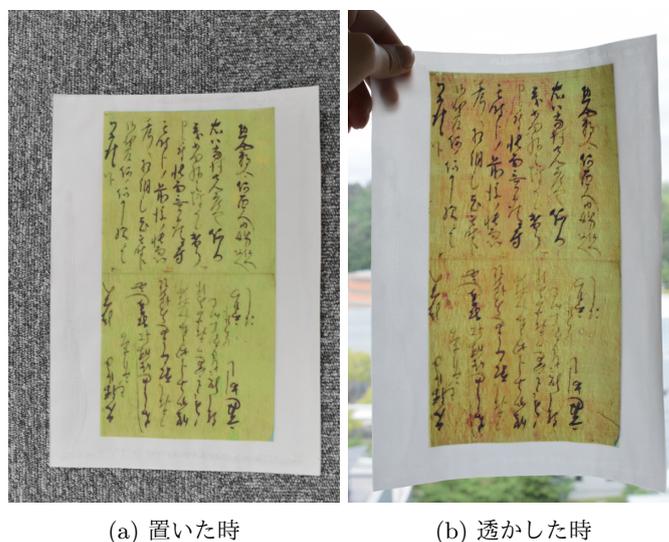


図 13: 作成したカラーのレプリカによる再現

- [9] 宮田 一乗, 光武 真意, 友井 俊弘, 田下 博, 今尾 公二, 坂口 嘉之, “BRDF とハイトマップデータを用いた金箔素材の CG 表現法”, 画像電子学会第 231 回研究会講演予稿 Vol.06-06, pp.55-60, 2007.
- [10] 凸版印刷株式会社 “洛中洛外図屏風 舟木本”, <http://www.toppan-vr.jp/bunka/da/tokyo.shtml>, 2015年8月1日参照.
- [11] 角田 哲也, 大石 岳史, 池内 克史, “高速陰影表現手法を用いた飛鳥京 MR コンテンツの開発とその評価”, 映像情報メディア学会誌, Vol.62, No.9, pp.1466-1473, 2008-9.
- [12] Dong, Y., Wang, J., Pellacini, F., Tong, X., Guo, B. “Fabricating spatially-varying subsurface scattering”. ACM Transactions on Graphics, 29(4), 1.