

書画の質感再現を目的とした反射率と透過率を同時に再現するレプリカの作成

浅田 繁伸^{†a)} 久保 尋之[†] 船富 卓哉[†] 向川 康博[†]

Simultaneous Reproduction of Reflectance and Transmittance for Ink Paintings

Shigenobu ASADA^{†a)}, Hiroyuki KUBO[†], Takuya FUNATOMI[†],
and Yasuhiro MUKAIGAWA[†]

あらまし 古文書のように和紙に墨と筆で描かれた書画は文化遺産として保存と展示が重要であり、そのためにレプリカの作成技術の確立が求められているが、一般的なコピー機による複製では、書画がもつ光の透過性は考慮されずに独特の質感が損なわれてしまう。そこで本研究では、対象物の光学特性を忠実に再現する複製品のことを新たに光学的レプリカと呼び、その実現のためのマイルストーンとして、物体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。まず、あらかじめ複数の紙に様々なパターンを印刷して重ね、印刷パターンと反射率及び透過率との関係を計測してルックアップテーブルに記録する。更に、計測した書画の光学特性を再現するために印刷すべきパターンを、ルックアップテーブルを参照することで決定する。このようにして印刷された複数の用紙を重ねて貼り合わせることにより、書画の反射率と透過率を同時に再現できるレプリカの作成を実現する。

キーワード 反射率, 透過率, サンプルベースドレンダリング

1. ま え が き

日本は長い歴史を有する国家で、多くの重要な歴史的文化的文化財を保有しているが、その多くが経年に伴う劣化の危機にさらされている。特に書画のような紙に描かれた文化財の場合、光を直接受け続けると紙の組織が破壊され、墨で描かれた文字や絵はその独特の質感を失い、文化財としての価値が失われる恐れがある。そこで、これらの文化財を永く後世まで継承することを目的として、文化財を様々な側面から計測によってデジタルデータ化して保存する、デジタルアーカイブと呼ばれる取り組みが広く行われるようになってきている。

また、計測した文化財のデータを遠隔地から誰でも簡単に閲覧できるバーチャルミュージアムと呼ばれる取り組みも提案されている。しかしながら、あくまで

ディスプレイ上に映像や動画を表示するに過ぎず、文化財が本来有する独特の質感を誰でも手にとって直に感じられるというわけではない。そのため、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、なかでも貴重な文化財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。ただし、物体の質感は多様な要因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。しかし、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、すなわち光学特性の再現が特に重要であると考えられる。そのため、本論文では対象物の質感を光学特性による観点から議論し、匂い、手触り、形などその他の要因については論じないものとする。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新たに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、本研究では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。なお、書画は基本的に平面であるが、部分的に皺や折り目などによる凹凸を有

[†] 奈良先端科学技術大学院大学, 生駒市
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma-shi, 630-0192 Japan

a) E-mail: asada.shigenobu.an8@is.naist.jp

DOI:10.14923/transinfj.2015IUP0009

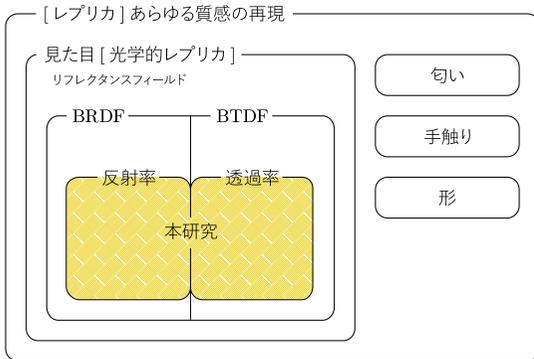


図 1 本研究で作成するレプリカの位置づけ

Fig. 1 Relationship between related replicas and ours.



(a) 書画の外観 (b) 室内光下の灯笼 (c) 点灯した灯笼

図 2 書画と灯笼の外観

Fig. 2 Appearance of ink painting and lantern.

するものもある。これらの部分は平坦な部分と見た目は異なるが、それは表面の形の差異に起因するものと捉え、本研究では取り扱わないものとする。

本研究で対象とする書画は専ら墨と筆によって描かれており、書家を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笼(図 2-(b), (c)) や、天空光を背に舞う和風、ねぶたの山車灯笼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。更に、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]。したがって、レプリカを作成する上では、反射率と同時に透過率も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、書画の反射率だけではなく透過率も計測してデジタルデータ化する。更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。

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百合文書 [2] 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。また、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 [3] のデジタルアーカイブが行われている。このように、古文書類をデジタル画像として記録し保存する取り組みは既に一般的に行われるようになってきていると言える。更に、より高精度な記録の方法として、冨永ら [4]~[6] 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。また、例えば大仏のような文化財では、色だけでなく形や大きさの記録が重要であり、大石ら [7] は実際の奈良大仏の立体形状をレンジセンサによって取得した。また、近年ではアーカイブ対象は有形物に留まらず、伝統舞踊や歌舞伎のような無形文化財にも広がっている。八村 [8] は、光学式モーションキャプチャシステムを利用することで、複雑な舞踊動作をデジタルデータとして記録することを実現した。

更に、これらの文化財をリアルに再現するための取り組みも報告されている。計測した質感をコンピュータグラフィックスを用いて再現する研究として、漆工芸品の反射特性の再現 [9] や、能装束の反射特性 [10] が挙げられる。3D プリンタを用いて光学特性を再現する研究として、Rouiller et al. は svBRDF の再現 [11] に取り組んだが、透過光に対する考慮はなされていない。Dong et al. の研究では BSSRDF の再現 [12] に取り組んだが、表面下散乱現象のうち多重散乱にフォーカスしており、透過光の強い物体には適用できない。また、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 によって提示するシステムを構築している [13]。角田ら [14] は、HMD を通して飛鳥京の迫力ある映像を遺跡現場で提示することで、高い没入感を得ることができるシステムを開発した。これらはいずれもリアルな映像を様々な方法

で提示している。また、土井ら [15] は、出土遺物の 3 次元データを産業用 CT 装置を用いて取得し、オリジナルの形状を再現した複製品の作成を行うことで、複製品が実際に手にできるような形で製作した。しかしながら、反射特性などの光学特性については再現の対象とはなっていない。

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。既に述べたとおり書画は基本的に反射光を観察するもので、書画は美術館や博物館では机上や壁面に設置して展示されることが多い。透過光は表から見たときに透けて見える土台も影響するが、書画が置かれた土台を書画そのものと一体的にみなし、総合的な反射特性を再現すれば、本物と同じように見える書画の展示が可能であると考えられる。しかし、この場合には書画と土台が不可分であり、展示方法について大きな制約を与えることになるだけでなく、実際に手に取って鑑賞した場合の見た目を再現することはできない。これに対し、反射率と同時に透過率を再現する本手法では、理論的には土台の有無や種類にかかわらず一貫して再現が可能であると考えられ、この点で優位と考えられる。

3. 反射率と透過率を同時に再現するレプリカ

3.1 多層印刷構造を用いた反射率と透過率の同時再現

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、たと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。したが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、

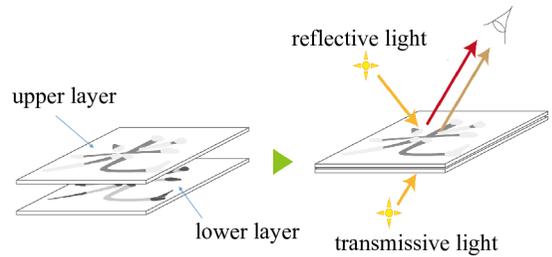


図 3 多層印刷構造による反射率と透過率の再現
Fig. 3 Multilayer printing structure for reproducing reflective and transmissive light.

これらを組み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ことを想定する。

3.2 ルックアップテーブルの作成

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 [16] 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。また、所望の反射率や透過率を導く解が、いつでも数値的に安定して解けるわけではない。

そこで我々は、詳細な物理パラメータや解の不安定性に対する懸念のない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 段階で設定する。次に、上層色 p_u 、下層色 p_l の全ての濃度の組み合わせ（ 256^2 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逆引きすることによって、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。

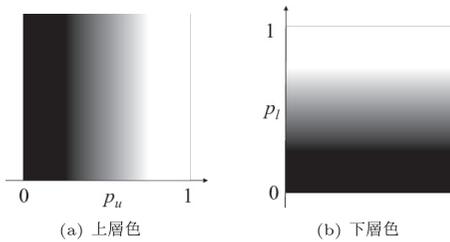


図4 ルックアップテーブル作成のためのグラデーションパターン

Fig. 4 Gradations for creating look up table.

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。図4(a)は上層に使用するグラデーションパターンであり、図4(b)は下層に使用するグラデーションパターンを示している。このように配置することで、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回ずつ撮影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。

3.3 ルックアップテーブルの逆引きによる上層色と下層色の決定

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上層色 p_u 、及び下層色 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。更に、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、これら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簡易な計測で対応可能なことが利点であると言える。

4. 再現可能なダイナミックレンジの改善

提案する多層印刷構造によって反射率と透過率を再現する場合、使用する印刷用紙やインクなどの性質に

よっては再現対象物が有する反射率と透過率を多層印刷構造ではしきれないことも考えられる。この問題を解決するために、以下の二つの手法を提案する。

4.1 ダイナミックレンジの圧縮

多層印刷構造によって再現可能な反射率と透過率の幅、すなわちダイナミックレンジが対象物に対して不十分な場合、写真で言えば黒つぶれや白飛びに相当する、再現不可能な領域がレプリカに露見することになる。これは物理的に不正確なばかりか、質感の再現性に与える悪影響も大きい。

そこで、再現対象とする書画のもつダイナミックレンジに対して、多層印刷構造で再現可能なダイナミックレンジに収まるように圧縮（スケールリング）を施す。これにより、反射率と透過率のコントラストは全体的に低下するものの、質感の再現に与える悪影響を最小限に抑えることが可能となる。

実際には、式(1)のかわりに次式に示すように再現したい所望の反射率 R に対して係数 α_r 、透過率 T に係数 α_t を用いてスケールリングすることで、上層色 p_u 、下層色 p_l を求める。

$$\operatorname{argmin}_{p_u, p_l} (|\alpha_r R - r(p_u, p_l)| + |\alpha_t T - t(p_u, p_l)|) \quad (2)$$

4.2 白紙の挿入

適切な係数 α_r 、 α_t を選択すればどのような場合も上記手法により対応できるが、これだけでは物理的な再現性の高さが一切担保されない。そこで、多層印刷構造に手を加えることで、できる限り実物に近いレプリカを作成することを目指す。

多層印刷構造に用いる印刷用紙として、比較的透過率の高いトレーシングペーパーを用いているため、再現する対象物体の性質によってはダイナミックレンジが不足する。そこで図5のように、印刷された2枚の用紙の間に更に何枚かの白紙の印刷用紙を挿入して厚みを増加させれば、多層印刷構造の光学的性質を変化させ、再現可能なダイナミックレンジを変化させることができると考えられる。

白紙を挿入することにより、半透明な印刷用紙で作られる多層印刷構造物の透過率は減少方向に変化することは容易に予想される。更に、反射率についても変化することが予想できる。つまり、不透明な物体では、物体表面に光が照射されたとき、反射は表面でのみ生じるため、反射率に変化は生じない。ただし、本研究

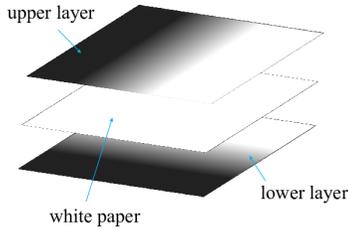


図 5 白紙を 2 枚の印刷された用紙の間に挿入

Fig. 5 Inserting one white paper between two printed papers.

で用いるトレーシングペーパーは比較的透明度の高い半透明な物体である。この半透明な物体の内部に浸入した入射光は、物体内部で生じる表面下散乱によって進行方向を変える。したがって、物体の厚みを増加させると物体内で散乱する光量は相対的に多くなり、後方散乱によって反射光方向と同一方向に出射する光量も多くなる。そのため、見かけ上の反射率は高くなることが期待される。

5. レプリカの作成と効果の検証

本章では、これまでに述べた多層印刷構造のレプリカを実際に作成し、効果を検証する。

5.1 書道作品の反射率と透過率の計測

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。その際、筆遣いによる反射率や透過率の違いをより顕著にするため、墨は通常よりやや薄めの濃度のものを使用している。

まず、書道作品に対して図 6 に示す環境で反射率と透過率の計測を行った。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 CCD カメラによって撮影し、更に同じ環境で撮影した反射率が既知の標準白色板の計測値をもとに被写体の反射率を算出した。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た。暗室でそのフラットパネルディスプレイの上に被写体を設置して、透過光の強さを同様に CCD 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した。なお、撮影し

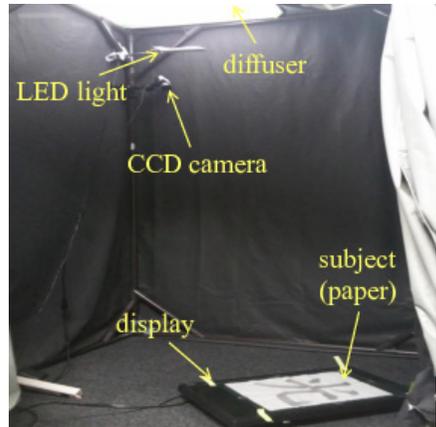
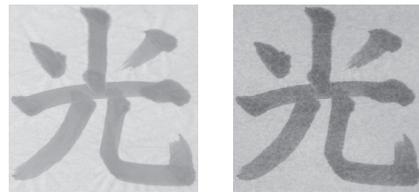


図 6 実験環境

Fig. 6 Experimental environment.



(a) 反射光

(b) 透過光

図 7 計測した書画の反射・透過画像

Fig. 7 Images of reflection and transmission of sample.

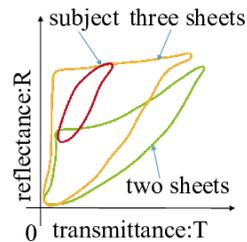


図 8 ダイナミックレンジの比較

Fig. 8 Comparison of dynamic ranges.

た書道作品の反射光画像と透過光画像を図 7 に示す。

5.2 グラデーションパターンの計測・白紙挿入によるダイナミックレンジ改善法の評価

次に、多層印刷構造によるグラデーションパターンの反射率と透過率の計測を、書道作品の計測と同じ環境で行う。

まず、図 8 に計測した書道作品 (subject) と、2 枚の印刷用紙で作成した多層印刷構造 (two sheets) からなるグラデーションパターンのダイナミックレンジを示す。書道作品 (subject) の分布から、同一の反射率

でも異なる透過率をもつ部分が存在していることが確認でき、1種類の印刷パターンでは再現できないことが示唆されている。また、この図から2枚の印刷用紙を用いて作成した場合には書道作品のダイナミックレンジをほとんどカバーできていないことが確認できる。次に、2枚の印刷用紙の間に1枚の白紙を挿入した多層印刷構造 (three sheets) からなるグラデーションパターンを作成して反射率と透過率を計測したところ、透過率が若干低下したものの反射率が全体的に増加し、対象物のダイナミックレンジをほとんどカバーできていることが確認できた。実際、2枚の印刷用紙を用いて作成したもの (two sheets) ではダイナミックレンジのカバー率は33%であったのに対し、白紙を一枚挿入したもの (three sheets) の場合は98%までカバーされていることが確認でき、白紙挿入により対象物体をほぼカバーするようにダイナミックレンジを改善できることが確認できた。

5.3 多層構造の有効性の検証

次に、反射率と透過率の再現に、複数の用紙に印刷されたパターンを組み合わせて用いることの有効性について検証する。そのために、2枚に異なるパターンを印刷する場合 (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した。このとき、積層する印刷用紙の枚数を揃えるためにいずれの手法も3枚の印刷用紙を使用することとし、提案手法として上下2層の印刷物に白紙の印刷用紙を挟み、比較のために一番上の層にのみ印刷物をおいて下の2層には白紙を用いた。また、これらの3枚の印刷用紙を組み合わせる方法とは別に、より簡易にレプリカを作成する手法として、1枚の印刷用紙の表面と裏面の両面にパターンを印刷することによってレプリカを作成した。以上の方法で作成した3通りのグラデーションパターンに対して反射率と透過率を計測により取得した。

更に、このグラデーションパターンの反射率と透過率の計測結果をルックアップテーブルとし、テーブルの逆引きによって光学特性を再現するためのインク濃度を求めることができる。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、誤差関数として反射率と透過率の両方を考慮する場合を one-RT と呼び、次式に基づいて決定する。

$$\operatorname{argmin}_{p_u} (|R - r_1(p_u)| + |T - t_1(p_u)|) \quad (3)$$

また、反射率だけを考慮する場合を one-R と呼び、次式に基づいて決定する。

$$\operatorname{argmin}_{p_u} |R - r_1(p_u)| \quad (4)$$

更に、透過率だけを考慮する場合を one-T と呼び、次式に基づいて決定する。

$$\operatorname{argmin}_{p_u} |T - t_1(p_u)| \quad (5)$$

なお、 $r_1(p_u)$ 及び $t_1(p_u)$ は1枚にのみ印刷する方法で作成した多層印刷構造の反射率と透過率である。また、両面印刷を用いる手法を duplex printing と呼び、表面と裏面との印刷濃度は式 (1) に基づいて決定する。なお、この場合では p_u が表面、 p_l が裏面の印刷濃度に相当する。

それぞれの式で求められた p_u 及び p_l を図 9 に示す。なお、(b)–(d) では下層色は制御しないため、図に掲載されていない。また、(e) における上・下層色はそれぞれ表面・裏面への印刷濃度を示している。

更に、求めたインクの濃度パターンを用いて実際に多層印刷構造によるレプリカを作成し、図 6 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 10 に、書道作品 (subject) とレプリカの誤差の擬似カラー表示を図 11 に示す。

この結果から、提案手法である図 11 (a) は (b)–(e) のいずれと比較しても反射率と透過率の再現性に勝つ

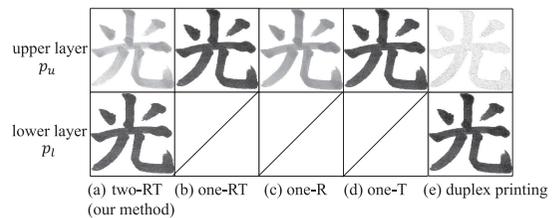


図 9 求められた上層色と下層色の濃度
Fig. 9 Calculated ink density of upper and lower layers.

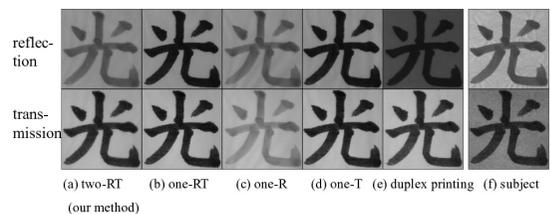


図 10 再現された反射光と透過光の画像
Fig. 10 Reproduced reflective and transmissive images.

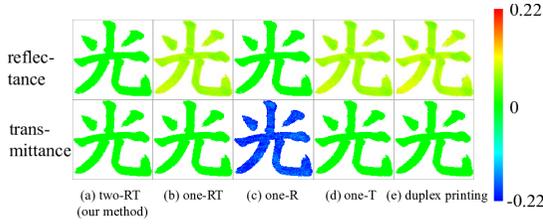


図 11 反射率と透過率の誤差マップ

Fig. 11 Error maps of reflectance and transmittance.

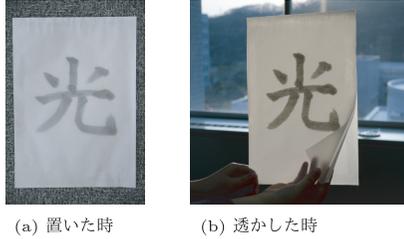


図 12 作成されたレプリカによる再現

Fig. 12 Reproducing appearance by the replica.

ていることがわかる．また，(b)–(e)ではいずれも反射率若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 12 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，手にも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．

5.4 古文書の再現検証

更に，実際の古文書を対象として検証するために，個人の所有する三つの古文書(図 13)を用意してレプリカの作成を行った．まず，古文書の反射光と透過光を図 6 と同様の環境で計測し，反射率と透過率を算出する．

多層印刷構造には白紙を挿入しないもの (two layers), 1枚挿入するもの (three layers), 2枚挿入するもの (four layers) の3通りを作成し，再現対象の古文書とのダイナミックレンジの比較を行った．表 1 はそれぞれのダイナミックレンジのカバー率を示している．

この結果から，白紙を1枚挿入した場合 (three layers) がどのサンプルに対しても適していることがわかったものの，必ずしも十分なカバー率ではない．そ



図 13 レプリカを作成する古文書

Fig. 13 Old documents to create the replica.

表 1 ダイナミックレンジのカバー率
Table 1 Coverage ratio of dynamic range.

method	sample1	sample2	sample3
two layers	46%	64%	14%
three layers	92%	84%	80%
four layers	60%	39%	60%

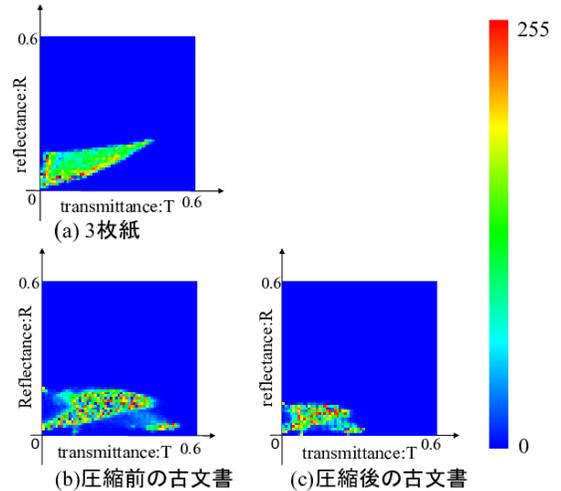


図 14 ダイナミックレンジの比較

Fig. 14 Comparison of dynamic ranges.

こで，図 13 の sample1 に対して，白紙を1枚挿入した多層印刷構造で再現可能なダイナミックレンジに収まるように， $\alpha_r = 0.7$, $\alpha_t = 0.6$ にて反射率と透過率にスケールリングを施し，ダイナミックレンジの圧縮を行った．このとき得られたヒストグラムを図 14 に示す．圧縮後の古文書のヒストグラム (c) は，圧縮前 (b) と比較してダイナミックレンジが小さくなっているものの，(a) に示す白紙を1枚挿入した多層印刷構造のダイナミックレンジがカバーできていることがわかる．

更に，圧縮した反射率と透過率を用いて再現した結果を図 15 に示す．(a) には古文書の圧縮前の反射光と透過光の画像，(b) にはルックアップテーブルを用

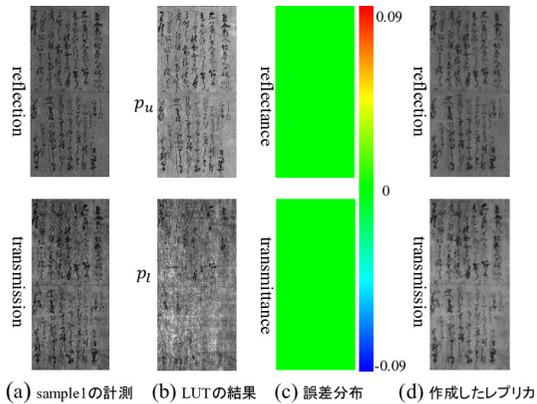


図 15 古文書の再現結果
Fig. 15 Reproduction result of old document.

いて求めた上層色 p_u 及び下層色 p_l を示す。更に (c) に再現した反射率と透過率の誤差分布を示し、反射率と透過率を圧縮すればどちらもほぼ再現できていることがわかった。なお、(d) には実際に作成したレプリカの反射光と透過光を撮影した画像を示す。(a) と比較したところ若干コントラストが低下していることがわかった。また、作成したレプリカを目視で確認したところ、皺や折り目の部分などで違いが顕著であった。皺や折り目による効果は本研究では対象としていないものの、書画の質感を再現を目的とする上では今後取り組むべき課題であると言える。

5.5 光のにじみ検証

本研究では複数の印刷物を重ねた多重印刷構造によって反射率と透過率を同時に再現するが、印刷用紙を重ねることによって透過光のにじみが生じ、空間周波数特性が低下することが懸念される。そこで、本研究で用いる多重印刷構造において、光のにじみがどの程度生じるのか、計測を行う。

まず、様々な密度の縞模様パターンを印刷用紙にプリントして解像度チャートを作成し、解像度チャートを直接撮影した透過光画像と、解像度チャートに白紙の印刷用紙を2枚重ねて多重印刷構造を模擬した状態で撮影した透過光画像を取得する。これら2枚の撮影画像の正規化相互相関 (NCC) を算出することによって、NCC が高い値を示せばほとんどにじみがないことになり、逆に NCC が低い場合にはにじみによって空間解像度が低下していることになる。解像度チャートは7種類の間隔 (0.12mm, 0.24mm, 0.6mm, 1.2mm, 2.4mm, 6mm, 12mm) で黒い実線が描かれたパター

表 2 解像度チャートの間隔と正規化相互相関値との関係
Table 2 Relation between pitches of resolution charts and normalized cross-correlation values.

間隔 [mm]	0.12	0.24	0.6	1.2	2.4	6.0	12.0
NCC	0.18	0.79	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97

表 3 黒いフェルトでの選択数
Table 3 The selected numbers of black felt.

	two-RT	one-RT	one-R	one-T	合計	尺度値
two-RT	-	18-4	13-9	19-3	50	0.55
one-RT	4-18	-	4-18	6-16	14	-0.55
one-R	9-13	18-4	-	20-2	47	0.52
one-T	3-19	16-6	2-20	-	21	-0.52

ンを用意し、算出された NCC の値を表 2 に示す。

本実験環境で作成したレプリカの空間分解能は1ピクセルあたり 0.25mm であり、表 2 に基づき近傍 2 サンプルから線形内挿を用いると NCC は 0.80 に相当する。このことから、全く影響がないとは言えないまでも、本実験環境ではにじみの影響は限定的であることがわかった。ただし、レプリカ作成の解像度を高くした場合にはにじみの影響が急激に大きくなると予想される。その場合、多層印刷構造によるにじみを相殺するようにあらかじめ先鋭化されたパターンを印刷する方法が考えられるが、検証は今後の課題である。

5.6 主観的評価実験

人間の知覚の観点から提案手法で製作したレプリカの妥当性を明らかにするために、two-RT (提案手法)、及び one-RT, one-R, one-T の四つのレプリカに対して、肉眼による主観評価実験をサーストンの一対比較法に基づいて実施する。

通常の写真の展示を想定して、室内に黒いフェルトの土台の上に任意の二つのレプリカと複製元であるオリジナルの書画を設置し、オリジナルにより似通っていると感じたレプリカを申告させる。以上を四つのレプリカの全ての組み合わせ ($4C_2 = 6$ 通り) について繰り返し行い、結果を記録する。20 歳代の男女計 22 名に対して実施した結果を表 3 に示す。

この表は、例えば two-RT の行で one-R の列にある“13-9”は、two-RT と one-R を比較したとき、13 人が two-RT を支持し、9 人が one-R を支持したことを意味する。支持した合計人数から尺度値を求めたところ、two-RT の評価が最も高い結果となった。次点の one-R とは尺度値には差がわずかであったが、直接比較では 22 人中 13 人が two-RT を支持していることか

ら、提案手法に一定の有効性は認めらたと考えられる。

6. む す び

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。また、再現可能な反射率と透過率のダイナミックレンジを複製の対象とする書画の有するダイナミックレンジに適合させるため、再現対象物のダイナミックレンジを圧縮する方法と、印刷物の間に白紙を挿入することで再現可能なダイナミックレンジを拡大する方法を提案した。

提案手法では、プリンタを用いる性質上、アニメーションのように動的に変化するコンテンツの再現は不可能なもの、書画のような静的コンテンツの複製は容易であり、誰でも実際に手に取って自由に観察することができる。これは、従来はディスプレイ上に表示するに留まっていた質感の再現を、実際のファブリケーションに応用した研究とも捉えることができ、すなわち新しい形のコンピュータグラフィックス表示方法であると言える。また、ダイナミックレンジを圧縮するために反射率と透過率を別々の係数を用いてスケーリングしたが、人間の知覚の観点から妥当性について評価することも必要である。更に、グレースケールだけでなくカラーで描かれた書画の再現方法を検討することが今後の課題である。また、古文書の再現検証を試みたところ、反射率と透過率をそのまま再現するには再現可能なダイナミックレンジが不足していることが明らかになった。本研究では、多層印刷構造で再現可能なダイナミックレンジに収まるようにスケーリングを施すことで解決したが、再現可能なダイナミックレンジを更に拡大する手法の確立が今後は必要である。例えば、更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、印刷用紙の最適化が今後の課題である。ダイナミックレンジを十分に拡大した上で、古文書などを対象として再現検証実験の実施が更なる課題といえる。

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。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, vol.31, no.4, pp.292-297, Dec. 2007.
- [5] 田中法博, 駒田隆之, 富永昌治, “マルチバンドカメラを用いた油彩画の計測とレンダリング,” Visual ComputingグラフィックスとCAD合同シンポジウム2003セッション, ID:31-28, 2003.
- [6] 富永昌治, 田中法博, “カラーカメラを用いた美術絵画の計測とレンダリング,” 情処学論, vol.45, no.1, pp.350-361, Jan. 2004.
- [7] 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, Oct. 2005.
- [8] 八村広三郎, “モーションキャプチャ・プロジェクト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)), pp.1-8, Jan. 2007.
- [9] 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, vol.237, pp.165-170, March 2008.
- [10] 脇田 航, 田中士郎, 古川耕平, 八村広三郎, 田中弘美, “反射光解析に基づく薪能における能装束の質感再現,” 情報処理学会研究報告. CVIM, [コンピュータビジョンとイメージメディア] 2015-CVIM-195(12), pp.1-6, Jan. 2015.
- [11] O. Rouiller, B. Bickel, J. Kautz, W. Matusik, and M. Alexa, “3D-printing spatially varying BRDFs. IEEE Computer Graphics and Applications,” vol.33, no.6, pp.48-57, 2013.
- [12] Y. Dong, J. Wang, F. Pellacini, X. Tong, and B. Guo, “Fabricating spatially-varying subsurface scattering,” ACM Trans. Graph., vol.29, no.4, p.1, 2013.
- [13] 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.
- [14] 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,” 映情学誌, vol.62, no.9, pp.1466-1473, Sept. 2008.
- [15] 土井章男, “縄文式土器に対する工業用 CT 装置を用いたデジタル・アーカイブ方式の提案,” 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Jan. 2010.
- [16] P. Kubelka and F. Munk, “Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche,” Zeitschrift für technische Physik, vol.12, pp.593-601, 1931.

(平成 27 年 10 月 15 日受付, 28 年 2 月 22 日再受付, 5 月 6 日早期公開)



浅田 繁伸

2014年大阪教育大学・教育学部・教養学科卒。2016年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了，同年より三菱電機株式会社に勤務。



久保 尋之 (正員)

2006年早稲田大学理工学部卒業。2008年同大学院博士前期課程修了。2011年同大学院博士後期課程単位取得退学，翌年，博士(工学)取得。2008年より3年間，日本学術振興会特別研究員(DC1)。2011年より1年間早稲田大学理工学術院助手。2012年より2年間キャノン株式会社勤務。2014年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教，現在に至る。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



船富 卓哉 (正員)

2002年京大・工・情報卒。2004年京都大学大学院情報学研究科修士課程修了。2006年日本学術振興会特別研究員DC2。2007年京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了。2007年京都大学学術情報メディアセンター助教。2014年Stanford University, Computer Science Department 客員助教。2015年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授，現在に至る。3次元モデル，Computational photographyに関する研究に従事。博士(情報学)ACM, IEEE, 電子情報通信学会会員。



向川 康博 (正員)

1997年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年～2002年岡山大学助手。2003～2004年10月筑波大学講師。大阪大学助教授を経て2007年4月～2014年1月同大学准教授。現在，奈良先端科学技術大学院大学教授。コンピュータビジョンの研究に従事。博士(工学)，情報処理学会，日本バーチャルリアリティ学会，IEEE各会員。