

書画の質感再現を目的とした光学的レプリカの試作

浅田 繁伸^{1,a)} 久保 尋之¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要: 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。一般的なコピー機による複製では、書画がもつ透過性は考慮されていない。そこで、本研究では印刷された複数の紙を重ねることにより、書画のもつ反射・透過率の再現を試みる。まず、予め紙に様々なパターンを印刷して重ね、パターンと反射・透過率との関係をテーブルとして記録する。書画の計測値からテーブル参照によって複数の紙にそれぞれ印刷すべきパターンを決定し、それぞれの印刷物を貼り合わせる。これにより書画の反射・透過率を再現できるレプリカの作成を実現した。

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. はじめに

日本には多くの歴史的文化財があるが、その多くが経年に伴う劣化にさらされており、後世までこれらの文化財を継承していくためには、管理された環境で厳重に保管しておく必要がある。特に書画のような古い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もある。そのため、文化財をデジタルデータとして保存するデジタルアーカイブが普及を始めている。デジタルデータは一般にアナログデータよりも経年に対する耐性が高いため、デジタルアーカイブは歴史的文化財を長く保管するのに適した方法の一つであるといえる。デジタルアーカイブの具体例として、京都府立総合資料館ではユネスコの世界記憶遺産候補にも挙げられている東寺百合文書 [1] や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 [2] が挙げられ、これらは歴史的な継承に大きく貢献している。

しかしながら、これらのデジタルアーカイブデータに記録されているのは文化財を写真、もしくはスキャナで書画を取り込んだ、単なるデジタル画像データとされることが多い。これに対し、実際の書画は独特の質感を有しており、図 1(a) に示すのは書画を机の上に置いた時のもので、表面上の墨字の濃淡が見られる。図 1(b) は、書画を透かした時の様子である。図 1(a) とは違い、筆遣いの“とめ”、“はね”、“払い”などによって独特な墨字の濃淡が見られ、これ



(a) 置いた時 (b) 透かした時

図 1: 書画のもつ光学的特性

らは書画自体が薄く光を通しやすい性質を持つことに起因すると考えられる。これら独特の質感は、単に 1 枚の画像データとしてアーカイブできる単純なものではない。長田ら [3] はこのような材質の物体の質感は、反射光の計測 [4] だけでなく透過光の計測が重要な要素であることを指摘している。また、実際の歴史的な文化財に相当するような古い書画を評価する際には、書画を単に机の上に置いて眺めるだけでなく、電灯や太陽光に透かして透過具合を観察されている。そこで本研究では、このような書画を対象として、反射率だけでなく透過率を計測し、デジタルデータとしてアーカイブすることに取り組む。

一方で、このような歴史的な文化財を展示し、誰でも気軽に視たり触れたり出来るような環境を作ることは、教育目的のみならず文化財研究の観点からも極めて重要である。しかしながら文化財を長期に渡り保管する観点から、私たちが気軽に視たり触れたりすることは難しいのが現状である。そこで本研究ではデジタルアーカイブ技術とともに、書画のもつ光学特性を実際に再現する印刷技術の実現を

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} asada.shigenobu.an8@is.naist.jp

目指す。このような再現物を本研究では光学的レプリカと呼ぶ。

2. 光学的レプリカの作成法

2.1 反射率と透過率の取得

本研究における光学的レプリカの作成には書画の反射率と透過率が必要である。我々は図2のような実験環境で書画の反射・透過光画像を計測し、反射率と透過率の取得を行う。

まず、反射率の取得では、CCDカメラで書画の反射光画像を撮影する。一定の光量を対象物体の表面に均一に照らすために、暗室の天井に拡散板を置いて、観測を行う。LEDライトを拡散板に照らし、光を拡散させてから床に置いた書画に照射し、その反射光をCCDカメラで撮影する。さらに、反射率が既知の標準白色板の輝度値を同じ環境で計測し、その輝度値から書画の反射率を算出する。

次に、透過光の撮影には、一定の光量を対象物体の背面から照らすために、光源としてフラットパネルディスプレイを用いる。暗室で、フラットパネルディスプレイの上に書画を設置し、背面から光を当て、その時の透過光画像を計測する。さらに、透過率が既知の標準透過板の輝度値を同じ環境で計測し、その輝度値から書画の透過率を算出する。計測した書画の反射・透過光の画像の例を、図3に示す。

2.2 反射・透過率を再現する光学的レプリカ作成法

前節で取得した反射率と透過率を用いて、書画の光学的特性を再現する方法について述べる。

本手法では、一般的に利用されるインクジェットプリンタを利用して、光学的レプリカを作成する。しかし、1枚の紙を単純に印刷するだけでは、書画の反射率と透過率を同

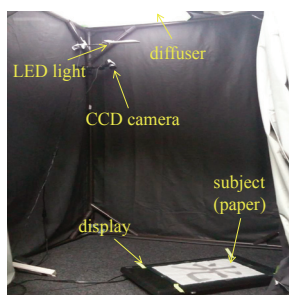


図2: 実験環境

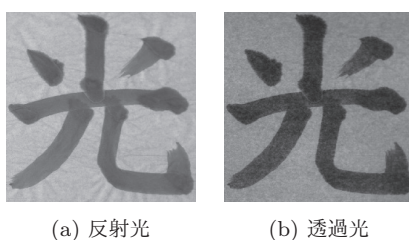


図3: 計測した書画の反射・透過画像

時に再現することが難しい。これは、書画独特の性質として同じ反射率を持っていても、透過率が異なる部分が存在するためである。

そこで、書画の反射率と透過率を同時に再現するために、図4に示すように、インクジェットプリンタによって表面に印刷されたパターンの異なる2枚の紙を組み合わせることとした。この時、使用する紙は、透過率を再現しやすいように、トレーシングペーパーを用いる。次節では、2枚それぞれの紙に印刷するインクの濃淡を決定する方法について述べる。

2.3 ルックアップテーブルによるサンプルベースドレンダリング

本手法では、異なるパターンを印刷した2枚の紙を重ねて反射率・透過率を同時に再現するため、上層色 p_1 、下層色 p_2 と、これらを重ねた時の反射率・透過率の関係が必要となる。インク色を決める方法として、例えばモデルベースドレンダリング手法であるクベルカムンク理論 [5] が考えられる。しかし、クベルカムンク理論を用いるためには、印刷対象についての物理パラメータも必要となり、モデル化が難しい。

そこで、我々はサンプルベースドレンダリングに基づくルックアップテーブル法を用いる。この手法では、上層色と下層色の全ての組み合わせについて、その反射率・透過率を計測する。これを用いれば、取得した書画の反射率と透過率から p_1 と p_2 を簡単に求められる。そのために p_1 と p_2 の反射率と透過率の関係を表したテーブルを作成する。

一般的なインクジェットプリンタでは設定可能な濃淡の階調は256あるので、全ての組み合わせは、 256^2 通りある。我々は、図5のような一方方向のグラデーションをもつ2枚の紙を用いる。図5(a)では、左から右へと変化するグラデーションパターンを示している。図5(b)では、下から上へと変化するグラデーションパターンを示している。この2枚の異なるグラデーションを重ねることで、インク色の全ての組み合わせを簡単に作成することができる。これを2.1節で述べた方法と同様に図6のような反射・透過光画

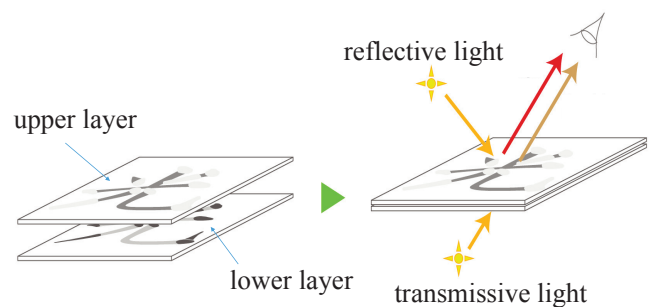


図4: レプリカ作成における2枚の紙の組み合わせ

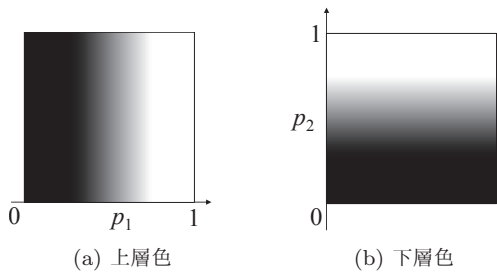


図 5: ルックアップテーブルを作るためのグラデーションパターン

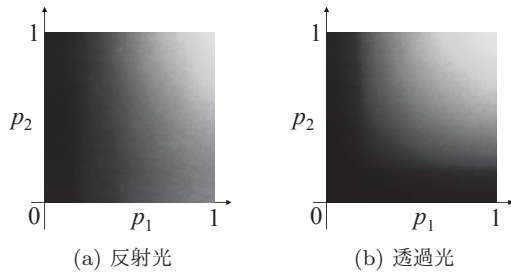


図 6: 2枚の紙から得られた画像

像を計測し、反射率と透過率のルックアップテーブルを作成した。 (p_1, p_2) と反射率・透過率の関係がこれによって表現される。

2.4 ダイナミックレンジの問題と解決法

前節の手法で作成したルックアップテーブルは印刷に用いる紙によって、反射率・透過率の値も異なる。そのため、レプリカを作る前に書画の反射・透過性を再現できるかを検証する必要がある。ここでは書画と2枚の紙のダイナミックレンジを2次元のヒストグラムとして考えていく。

書画と2枚の紙で組み合わせたレプリカのダイナミックレンジを図7に示す。実際に比較した時に、レプリカのヒストグラムが書画のヒストグラムの範囲をカバーしていないことがわかる。特にダイナミックレンジの不足している範囲は、反射率が高く、透過率が低いところであり、今回用いた紙2枚だと、これらの再現が難しいことがわかる。

そこで、我々は、このダイナミックレンジの問題を解決するために図8のように3枚目の紙として何も印刷されていないものを印刷された2枚の紙の間に挿入した。3枚の紙を使った時のヒストグラムは、図9(a)のように表されている。さらに、図9(b)は、書画、2枚の紙、3枚の紙のダイナミックレンジの比較を示している。図9(b)から、提案した3枚の紙を用いる手法が書画のダイナミックレンジを十分に満たしていることがわかる。よって、この3枚の紙で作られたルックアップテーブルは、書画の墨字部分における反射率と透過率を再現可能であると言える。

最後に、ルックアップテーブルを用いた上層・下層パターンの求め方について述べる。墨字のある位置の反射率を R ,

透過率を T とする。さらに、テーブルの反射率を $r(p_1, p_2)$ 、透過率を $t(p_1, p_2)$ と表記する。この時、誤差関数を反射率の誤差と透過率の誤差の和によって表す。この誤差関数が式(1)のように最小となるような p_1 と p_2 の組み合わせを、その位置の上層・下層色として選ぶようにする。

$$\operatorname{argmin}_{p_1, p_2} (|R - r(p_1, p_2)| + |T - t(p_1, p_2)|). \quad (1)$$

書画の墨字部分のピクセル全てに対してこの処理を行い、上層パターンと下層パターンを求め、これらを紙に印刷す

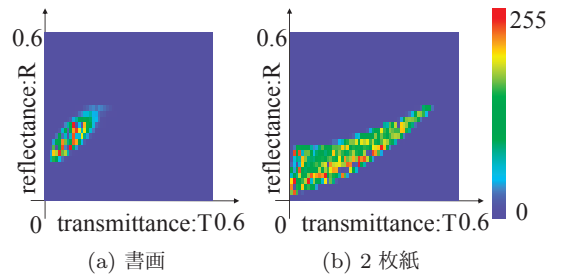


図 7: 反射率と透過率のヒストグラム

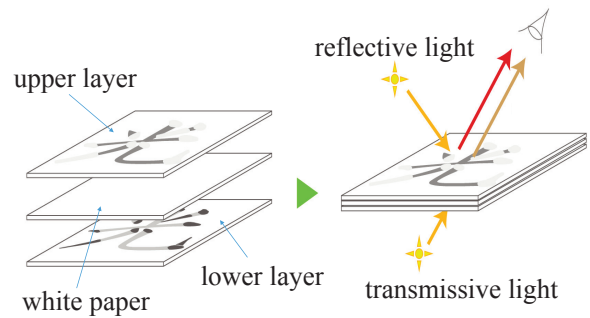


図 8: 3枚の紙の組み合わせ

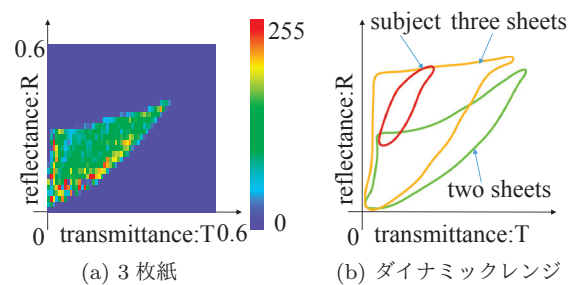


図 9: 改善したヒストグラムとダイナミックレンジの比較

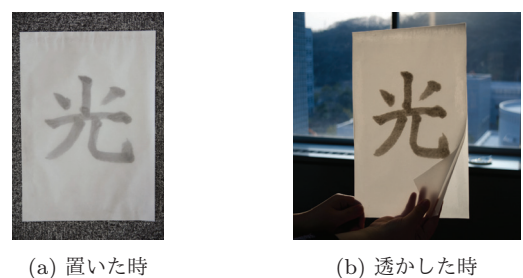


図 10: 作成された光学的レプリカによる再現

ることでレプリカを作成した. 図 10 は, 我々が提案したレプリカの反射・透過率の再現性を検証した時の様子である.

3. 実験

従来の写真やスキャナによって取得した画像データに対する提案手法の優位性を確認する定量評価を行った. 前章の手法により作成したレプリカを two-RT と呼ぶ. 比較対象として, 1 枚の印刷パターンを用いるレプリカを 3 つ作成した. これら 3 つの異なるレプリカの印刷パターンの各ピクセルの濃淡は, それぞれ以下の 3 つの式で求めていく.

$$\operatorname{argmin}_{p_1} (|R - r(p_1, 1)| + |T - t(p_1, 1)|), \quad (2)$$

$$\operatorname{argmin}_{p_1} |R - r(p_1, 1)|, \quad (3)$$

$$\operatorname{argmin}_{p_1} |T - t(p_1, 1)|. \quad (4)$$

ここで提案手法のレプリカと条件を揃えるため, これらの印刷物にはさらに 2 枚の白紙を重ねている. そのため, p_2 のインク色は, 白 ($p_2 = 1$) に固定されている. 式 (2), (3), (4) で作成されたレプリカをそれぞれ, one-RT, one-R, one-T と呼ぶ. それぞれの得られたインク色のパターンを, 図 11 に示す. これら 4 種類のレプリカを作り, それらの反射・透過光画像を 2.1 の装置によって取得した. この時, 取得した画像を図 12 に示す. これにより計測した 4 つのレプリカの反射率と透過率を書画のものと比較し, 誤差を評価した結果を図 13 に示す. 提案手法である図 13(a) では, 図 13(b), (c), (d) よりも正確に反射率と透過率が再現できていることがわかる. 図 13(b) では反射率, 図 13(c) では透過率, 図 13(d) では反射率が再現できていない. これらの結果から, 1 枚の印刷物を用いて 2 つの光学的特性を再現することは難しく, 2 枚の印刷物を利用する提案手法が, 書画の反射率と透過率を同時に再現するのに有効なものであることが示された.

4. おわりに

我々は, 複数の印刷パターンを重ねることにより, 書画の反射・透過率を再現できることを確認した. 従来, 伝統工芸品などの質感を計測し, CG 技術で再現する研究は様々に行われてきたが, 再現手段はあくまでディスプレイなどの表示装置を用いるだけであり, 実際に手にとって触れられるものではなかった. プロジェクションマッピング技術を利用することにより実際の立体物に, 実物同様の模様などを付加することは出来るようになったが, 遮蔽などの問題から, 実際に手で触れたり, 持ち上げたりすることは難しい. 提案手法では, プリンタを用いて用紙に吐出するインクを制御し, さらに複数枚の用紙を重ねて使用することで, 書画の反射率と透過率を再現する光学的レプリカを作製する. プリンタを用いる性質上, アニメーションのよう

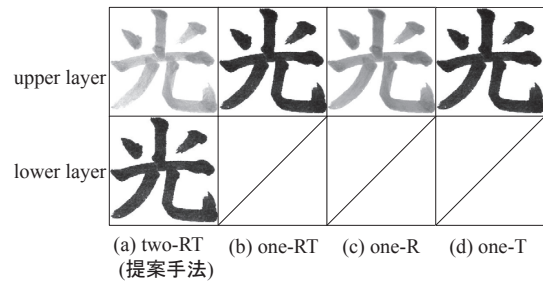


図 11: ルックアップテーブルの出力画像. 上の行は, 上層の出力画像を表している. 下の行は, 下層の出力画像を表している.

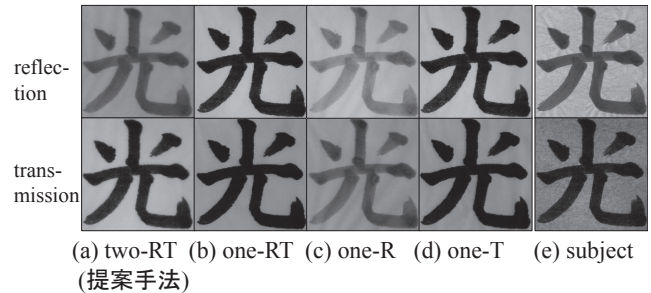


図 12: 得られた反射光と透過光の画像. 上の行は, 反射光画像を表している. 下の行は, 透過光画像を表している.

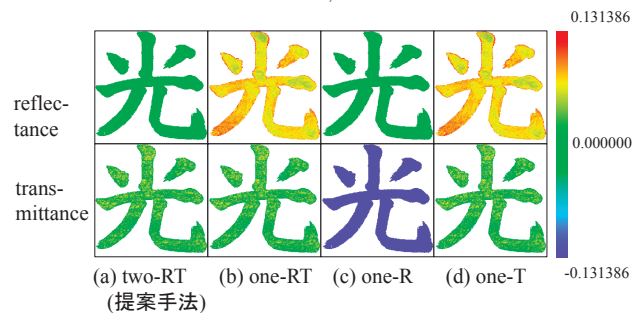


図 13: 誤差分布. 上の行は, 反射率の誤差分布を表している. 下の行は, 透過率の誤差分布を表している.

な動的に変化するコンテンツの再現は不可能なものの, 誰でも実際に手に取って自由に観察することが出来る点で優位性を有する, 新しい形のコンピュータグラフィクス表示方法であると言える. 今後の課題として, レプリカの主観的評価を行うことである. また, 墨字部分だけでなく和紙の質感再現にも取り組んでいきたい.

参考文献

- [1] <http://hyakugo.kyoto.jp/>
- [2] <http://www.narahaku.go.jp/collection/d-753-0-1.html>
- [3] Atsushi Ishida, Sosuke Kaji, Lisa Park, Kensuke Tobitani, Aya Shiraiwa, Eriko Aiba, and Noriko Nagata, "Lace Curtain: Rendering and Animating Woven Cloth Based on an Impression-Evaluation Model," Proceedings of ACM SIGGRAPH 2013, Anaheim, Jul.21-25.
- [4] W. Matusik, B. Ajdin, J. Gu, J. Lawrence, H. P. A. Lensch, F. Pellacini, and S. Rusinkiewicz, ACM Trans. Graphics, 28(5), 128:1 (2009).
- [5] Kubelka P., and Munk F., "Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche", Zeitschrift fur technische Physik. 12, 1931, 593-601.