

分光画像を用いた古文書の重なった表裏文字の分離

袁 苑^{1,a)} 藤村 友貴¹ 船富 卓哉^{1,2} 向川 康博¹

概要

古文書の解析は、文学・歴史・文化に関する情報を読み解くうえで重要である。一方、古文書は薄い紙の表と裏の両側に文字が書かれていることが多く、表裏の文字が重なって観測されるため、内容理解を妨げる要因となる。そのため、表裏文字を分離することが課題となる。そこで本研究では、反射光と透過光の混合が波長に依存することを考慮した光学モデルに基づいて、分光画像を用いた古文書の表裏文字分離手法を提案する。実験により、各波長でモデルを解くことで表裏文字を分離でき、特定の波長が表裏文字分離に有効であることを確認した。

1. はじめに

古文書は文学・歴史研究における重要な資料であり、多くの歴史的事実や文学作品の情報が保存されている。日本の古文書は、図 1 に示すように薄い和紙の両面に記されたものが多く、裏側文字が紙を透過して表側にも現れることがある。このような古文書に対して、光学解析によって混在した表裏文字を分離することは、古文書解析における前処理として重要な課題である。

文書画像における表裏文字の重なりに対しては、これまでにさまざまな解析・処理手法が提案されてきた。両面印刷文書における裏写り現象に対しては、物理モデルに基づいて反射光の混合成画像過程を解析した研究がある [2][3]。また、反射光と透過光の混合モデルに基づき、土台の反射率の違いを利用して成分分離を行う手法も提案されている [4]。しかし、従来法の多くはモノクロ画像や RGB 画像を対象としており、表裏文字の混合の比率が波長によって変化することを十分に考慮していない。実際には、紙および墨の光学特性は波長によって異なるため、表裏文字の混合状態も波長に応じて変化する [1]。さらに、本研究が対象とする古文書では、裏写りには裏側文字の情報が含まれており、裏側文字を除去対象とみなすのではなく、表裏文字を分離して両方を可視化することが求められる。

そこで本研究では、反射光と透過光の混合を表現する光

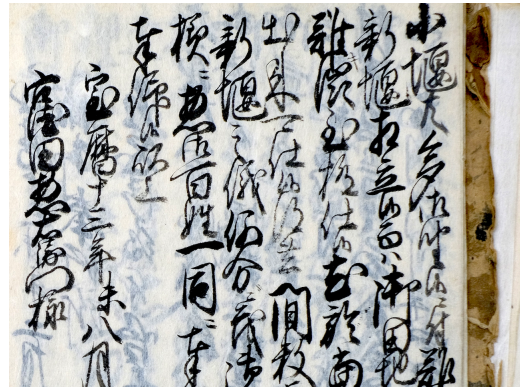


図 1 古文書「御奉行役人 道心書上文書」

学モデルに基づき、分光画像を用いた古文書の表裏文字分離手法を提案する。具体的には、分光画像を用い、各波長において表側文字成分と残差成分を求めることで、波長ごとの表裏文字分離を行う。さらに、零平均正規化相互相関を用いて各波長における分離効果を評価し、分離に最適な波長を求める。実験結果により、特定の波長においてより有効な表裏文字分離が可能となることを示す。

2. 反射透過混合モデルに基づく裏写り除去 [4]

本章では、提案手法の元となる反射透過混合モデルに基づいた裏写り除去手法 [4] について概説する。

2.1 反射透過混合モデル

薄い紙を正面から観測すると、得られる画像には表側文字だけでなく、裏側文字に由来する成分も含まれる。これは、紙の薄さにより光が透過し、裏側文字の情報が正面観測画像に影響を与えるためである。その結果、正面観測画像には表裏文字の情報が重なって現れる。

図 2 に示すように、古文書画像 $I(x, y)$ は近似的に二つの光線の重ね合わせとして表される。一方は正面反射率 $R_f(x, y)$ に対応する反射光であり、もう一方は紙を透過して土台で反射され、再び紙を透過してカメラに到達する透過光である。後者は裏側文字が正面画像上に現れる成分に対応する。反射率および透過率は、墨の減衰によって決定される。この透過過程は、紙正面の透過率 $T_f(x, y)$ 、繊維層の減衰 $f(x, y)$ 、紙背面の透過率 $T_b(x, y)$ 、および土台反

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

² 京都大学

^{a)} yuan.yuan.zc5@naist.ac.jp

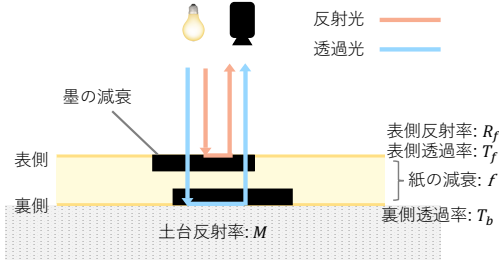


図 2 反射透過混合モデル

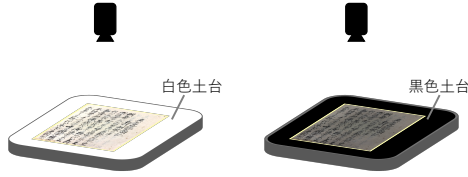


図 3 土台の反射率を変えた観測

射率 $M(x, y)$ により構成される。したがって、観測画像は次式で表される。

$$I(x, y) = R_f(x, y) + T_f(x, y)^2 f(x, y)^2 T_b(x, y)^2 M(x, y) \quad (1)$$

後続の裏書き除去を記述しやすくするため、本研究では、式 (1) における透過光成分を簡略化する。ここで、

$$P(x, y) = T_f(x, y)^2 f(x, y)^2 T_b(x, y)^2 \quad (2)$$

とおくと、式 (1) は次のように書き換えられる。

$$I(x, y) = R_f(x, y) + P(x, y)M(x, y) \quad (3)$$

ここで、 $R_f(x, y)$ は表側文字に対応する成分、 $P(x, y)$ は紙の透過特性および裏側文字の影響を含む係数、 $M(x, y)$ は土台反射率を表す。この式は、正面観測画像が表側文字成分と、土台反射率によって変化する裏側文字関連成分の和として表されることを示している。

2.2 裏書き除去

式 (3) より、1 枚の観測画像のみからは、表側文字成分 R_f と透過過程に関わる係数 $P(x, y)$ を分離することはできない。そこで、土台反射率を変えることで観測条件を増やし、表側文字成分のみを抽出する。具体的には、図 3 に示すように白色土台および黒色土台の二つの条件下で 2 枚の画像を取得する。白色土台および黒色土台の反射率をそれぞれ $M_w(x, y)$ 、 $M_b(x, y)$ 、対応する観測画像を $I_w(x, y)$ 、 $I_b(x, y)$ とすると、観測画像は次式で表される。

$$I_w(x, y) = R_f(x, y) + P(x, y)M_w(x, y) \quad (4)$$

$$I_b(x, y) = R_f(x, y) + P(x, y)M_b(x, y) \quad (5)$$

ここで、 $R_f(x, y)$ は両観測に共通な表側文字成分である。

ここで、白色土台と黒色土台の反射率の比を

$$\alpha(x, y) = \frac{M_b(x, y)}{M_w(x, y)} \quad (6)$$

とすると、式 (4) および式 (5) を連立することで、裏書きが除去された表側文字成分 $R_f(x, y)$ は次式で求められる。

$$R_f(x, y) = \frac{I_b(x, y) - \alpha(x, y)I_w(x, y)}{1 - \alpha(x, y)} \quad (7)$$

3. 分光画像を用いた表裏文字の分離

本章では、第 2 章で述べた反射透過混合モデルを分光画像に適用する。具体的には、各波長において観測方程式を構成し、波長ごとの表裏文字分離を行う。さらに、各波長における分離効果を比較するため、分離結果を評価し、表裏文字分離に適した波長を選択する。

3.1 分光画像を用いた表裏文字の分離

紙および墨の反射・透過特性は波長によって異なるため、本研究では反射透過混合モデルを波長にも拡張し、表側文字成分と残差成分を求める。波長 λ における白色土台および黒色土台の条件下の観測画像をそれぞれ $I_w(x, y, \lambda)$ 、 $I_b(x, y, \lambda)$ 、対応する土台反射率を $M_w(x, y, \lambda)$ 、 $M_b(x, y, \lambda)$ とすると、観測モデルは次式で表される。

$$I_w(x, y, \lambda) = R_f(x, y, \lambda) + P(x, y, \lambda)M_w(x, y, \lambda) \quad (8)$$

$$I_b(x, y, \lambda) = R_f(x, y, \lambda) + P(x, y, \lambda)M_b(x, y, \lambda) \quad (9)$$

表側文字の分離 ここで、

$$\alpha(x, y, \lambda) = \frac{M_b(x, y, \lambda)}{M_w(x, y, \lambda)} \quad (10)$$

と定義すると、従来法と同様に表側文字成分は次式で求められる。

$$R_f(x, y, \lambda) = \frac{I_b(x, y, \lambda) - \alpha(x, y, \lambda)I_w(x, y, \lambda)}{1 - \alpha(x, y, \lambda)} \quad (11)$$

裏側文字の分離 本研究では、表側文字成分 $R_f(x, y, \lambda)$ を求めた後、白色土台条件下の観測画像からこの成分を差し引くことで、次式のように裏側文字に対応する残差成分 $R_{\text{res}}(x, y, \lambda)$ を定義する。

$$R_{\text{res}}(x, y, \lambda) = I_w(x, y, \lambda) - R_f(x, y, \lambda) \quad (12)$$

3.2 最適な波長の選択

前節の表側文字成分 $R_f(x, y, \lambda)$ と残差成分 $R_{\text{res}}(x, y, \lambda)$ の分離は、波長ごとに求めることができる。しかし、分離の効果は波長によって異なるため、各波長における表裏文字の可分離性を評価し、表裏文字分離に適した波長を選択する必要がある。

そこで、本研究では、表側文字成分と残差成分の間の零平均正規化相互相関 (zero-mean normalized cross-correlation,

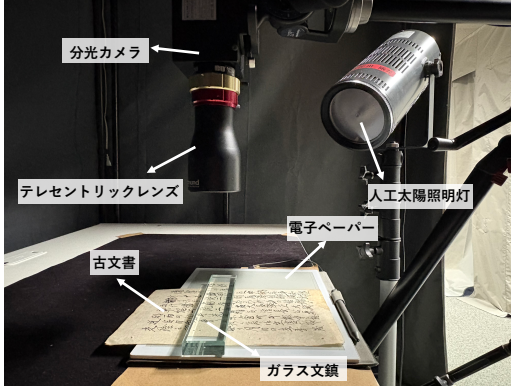


図 4 実験環境

ZNCC) を評価指標として用いる．波長 λ において，表側文字成分 $R_f(x, y, \lambda)$ および残差成分 $R_{res}(x, y, \lambda)$ をそれぞれベクトル u_λ, v_λ に展開すると，ZNCC は次式で求められる．

$$\rho(\lambda) = \frac{(u_\lambda - \bar{u}_\lambda)^\top (v_\lambda - \bar{v}_\lambda)}{\|u_\lambda - \bar{u}_\lambda\| \|v_\lambda - \bar{v}_\lambda\|} \quad (13)$$

ここで， $\bar{u}_\lambda$ および $\bar{v}_\lambda$ は，それぞれベクトル u_λ および v_λ の平均値を表す．

ZNCC の値域は $[-1, 1]$ であり，値が 1 または -1 に近い場合は，それぞれ強い正または負の相関を示し，0 に近い場合は両者の相関が低く，より独立であることを示す．すなわち，ある波長において $\rho(\lambda)$ の値が 0 に近いほど，その波長では表側文字成分と残差成分がより分離しやすいと考えられる．

したがって，本研究では，ZNCC が 0 に最も近い波長を，表裏文字分離に適した候補波長として選択する．すなわち，最適波長 λ^* は次式で与えられる．

$$\lambda^* = \arg \min_{\lambda} |\rho(\lambda)| \quad (14)$$

4. 実験

提案手法による表裏文字の波長ごとの分離効果の違いを評価するため，実際の古文書を用いて実験を行った．

4.1 実験環境

実験環境を図 4 に示す．本研究では，エバ・ジャパン製の分光カメラ NH-8 を用いて古文書の分光画像を取得した．観測波長範囲は 380–1000 nm，波長分解能は 5 nm であり，取得波長数は 125 バンドである．また，紙面に対して垂直な光線のみを記録するため，テレセントリックレンズを使用した．光源には，太陽光の分光分布を模擬した人工太陽照明灯を用いた．実験対象は，解体された古文書 1 点である．紙面の浮き上がりによる影響を低減するため，撮影時にはガラス文鎮を用いて文書表面を固定した．異なる土台反射率条件下の画像を取得する際，土台を物理的に交換すると，紙文書がわずかに移動してしまい，条件間

で画像位置ずれが生じ，位置合わせ処理が必要となる．この問題を避けるため，本研究では Sony 製の電子ペーパー DPTRP1 を土台として用いた．表示内容を切り替えることで，物理的な交換を避け，反射率条件を容易に変更できる．さらに，電子ペーパーは自発光しないため，余計な光の影響を考慮する必要がない．

4.2 実験結果

まず，撮影した分光画像に対して，白色標準反射板を用いた反射率補正を行い，各波長における反射率画像を得た．短波長側と長波長側ではノイズの影響が大きかったため，以降の解析では 450–900 nm の波長範囲を用いた．その後，白色土台および黒色土台の反射率 M_w, M_b ，ならびにそれぞれの条件下で観測された古文書画像の反射率 I_w, I_b を求めた．図 5 に，500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 nm の 8 波長における M_w, M_b, I_w, I_b の可視化結果を示す．白色土台と黒色土台では反射率が大きく異なり，それに対応して観測画像 I_w と I_b にも差が生じていることが分かる．これは，土台反射率の変化が透過過程に関連する成分の正面画像上での現れ方に影響を与えることを示しており，後続の表側文字成分と残差成分の分離に利用可能な情報を与える．

これを基に，第 3 章で述べた方法に従い，式 (11)–(13) を用いて各波長における表側文字成分 R_f と残差成分 R_{res} を求めた．図 6 に，500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 nm の 8 波長における R_f と R_{res} の可視化結果を示す．また，各波長における ZNCC の値も併せて示している．結果より，正面観測画像中で混在していた表裏文字情報は，分離後には R_f と R_{res} においてより明瞭に表現されることが確認できる．特に， R_f には主として表側文字の構造が残り， R_{res} には裏側文字に起因する残留成分が主として現れている．さらに，異なる波長における分離結果を比較すると，表側文字成分と残差成分の現れ方は波長によって異なることが分かる．このことは，紙および墨の反射・透過特性の波長依存性が，表裏文字の可分離性に直接影響することを示している．

各波長における分離効果を定量的に評価するため，さらに式 (14) に基づいて R_f と R_{res} の ZNCC を計算した．図 7 に，各波長ごとの ZNCC の変化を示す．この結果より，ZNCC は 745 nm において 0 に最も近い値を示していることから，分離に適した波長であることがわかる．そこで，745 nm における表裏文字の分離結果を図 8 に示す．表側文字成分と残差成分の相関が最も低くなっていることから，両者がより区別しやすいことが分かる．

5. まとめ

本研究では，分光画像を用いた古文書の表裏文字分離手法を提案した．まず，反射透過混合モデルに基づき，白黒

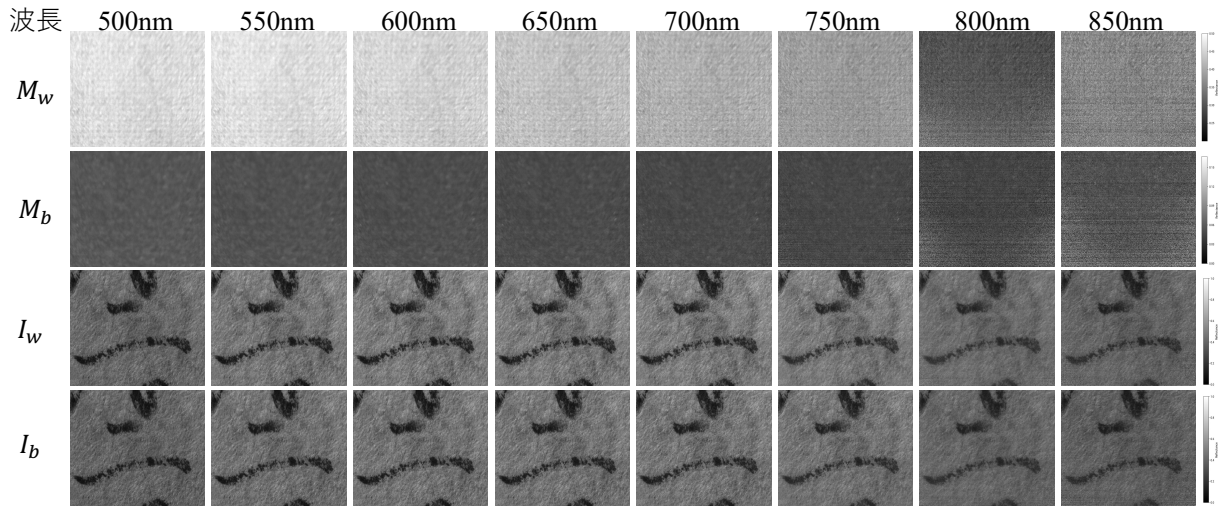


図 5 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 nm の 8 波長における M_w , M_b , I_w , I_b の可視化結果

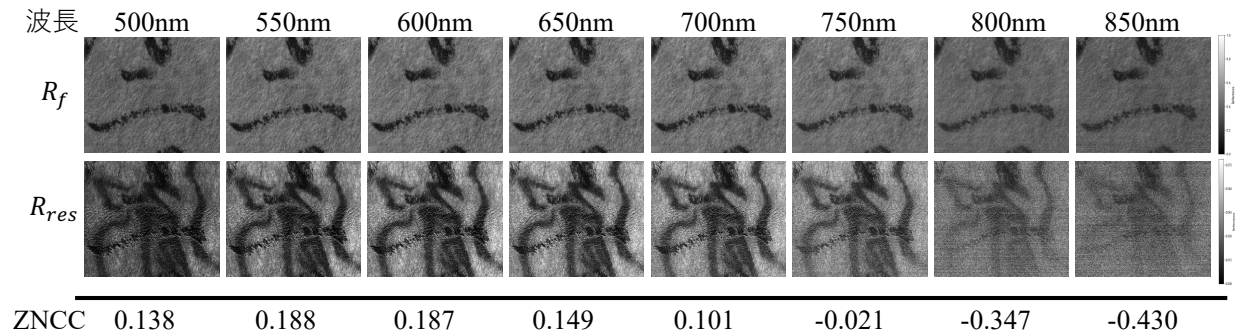


図 6 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 nm の 8 波長における R_f と R_{res} の可視化結果

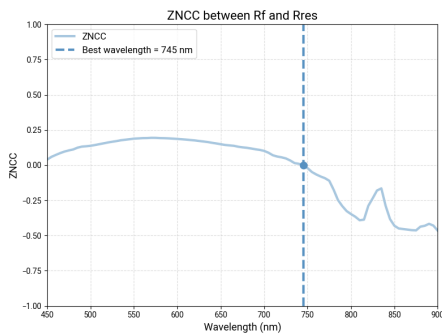


図 7 最適な波長の選択

土台の観測画像から表側文字成分 R_f を求め、さらに残差成分 R_{res} を定義した。次に、この分離法を各波長に適用することで、波長ごとの表裏文字分離を行った。さらに、表側文字成分と残差成分の ZNCC を用いて分離効果の評価し、表裏文字分離に適した波長を検討した。実験結果より、提案手法によって正面観測画像中に混在する表裏文字情報を R_f と R_{res} として分離できることを確認した。また、ZNCC による評価の結果、本実験条件では 745 nm 付

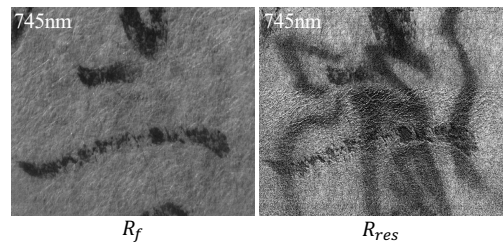


図 8 最適波長 (745nm) の R_f と R_{res} の可視化結果

近が表裏文字分離に適した候補波長であることを示した。今後は、より多様な古文書データに対して本手法を適用し、分離性能の評価を進めるとともに、波長選択手法の改良についても検討する予定である。

謝辞

実験対象の古文書および貴重なご助言をご提供いただいた国文学研究資料館の山本和明氏、松原哲子氏、大和あすか氏に感謝する。本研究は JSPS 科研費 23H00499 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ciortan, I., Deborah, H., George, S. and Hardeberg, J. Y.: Color and hyperspectral image segmentation for historical documents, *2015 Digital Heritage*, pp. 199–206 (2015).
- [2] Ophir, B. and Malah, D.: Show-Through Cancellation in Scanned Images using Blind Source Separation Techniques, *2007 IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 233–236 (2007).
- [3] Sharma, G.: Show-through cancellation in scans of duplex printed documents, *Trans. Img. Proc.*, Vol. 10, No. 5, pp. 736–754 (2001).
- [4] Ueno, Y., Tanaka, K., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: An Optical Model for Show-through Cancellation in Ancient Document Imaging with Dark and Bright Mounts, *2021 17th International Conference on Machine Vision and Applications (MVA)*, pp. 1–5 (2021).