

多視点撮影による貼り付いた写真乾板の見えの分離

渡辺 佳宏^{1,a)} 田中 賢一郎 船富 卓哉 向川 康博

概要: 水害等によって写真乾板が被災し、貼りついてしまうなどの被害が生じている。写真乾板は歴史的価値が高いため、無理に引き剥がすことなく非破壊で記録内容を可視化する手法が求められている。本研究では、多視点で撮影された画像の視差を利用することで貼り付いた2枚の写真乾板の見えを分離する手法を提案する。多視点画像を線形モデルで記述し、最適化問題として解くことで各乾板の見えを推定する。シミュレーション実験より、多視点画像の枚数と画像の復元品質の関係を調べた。また、実環境実験において、模擬写真乾板の見えの分離の評価を行った。

1. はじめに

歴史資料は、大切な歴史遺産を継承するために欠かせないものである。写真乾板もそのうちの一つであり、明治20年代から昭和30年代までの約80年間用いられてきた記録メディアである。そのため、写真乾板には、100年以上も昔の風景、歴史を変えた事件、庶民の生活といった歴史の風情を感じられるものが記録されている。また、写真乾板に記録されている歴史像によっては、国の重要文化財に指定されているものも存在している。例えば、2015年には、法隆寺金堂を撮影した写真乾板が、歴史的・学術的価値が評価され国の重要文化財に指定されている。2016年に国の重要文化財として指定された臨時全国宝物調査資料にも写真乾板が含まれている。このように、近年、歴史資料として、写真乾板の持つ歴史的価値が見出されている。

しかし、近年、津波や大雨による水害によって、個人宅や博物館に保管されている歴史資料の多くが被害を受けている。例えば、泥水や海水で濡れたことでカビが発生したり、被災資料同士が固着してしまった事例が各地で報告されている。写真乾板も同様であり、水害により写真乾板同士が貼り付いてしまい、剥がせなくなっているなどの被害を受け、写真乾板の歴史的価値が低下している。そのため、写真乾板の本来の記録内容を非破壊で可視化する方法が求められる。

本研究では、貼り付いた2枚の写真乾板の見えを分離することを目的とする。写真乾板は1枚あたり数mm程度の厚みがあり、これを見えの分離に活用することを試みる。異なる深さを持つ見えの分離は、高周波照明を利用するも



図1 写真乾板の構造

の [4]、照明の空間周波数の違いを利用するもの [3]、同期したプロジェクタカメラシステムの視差をゲーティングするもの [2]、Time-of-Flight カメラの計測周波数の違いを利用するもの [7] など、様々な能動的照明によるアプローチで取り組まれてきた。また、多視点画像・光線空間を用いた受動的な方法では、合成開口によるリフォーカスによって焦点を合わせて不要な層をぼかすことにより所望の層を鮮明に可視化することがあった [5], [6] が、原理上、不要な層の影響を完全に消し去ることはできなかった。

これに対し本研究では、貼り付いた写真乾板の構造を考慮し、多視点撮影による視差を利用する。そして、多視点画像を線形モデルで表現し、最適化問題として解くことで手前側と奥側の2枚の写真乾板を分離する手法を提案する。また、本手法の有効性をシミュレーション実験と実環境実験で確認する。

2. 写真乾板の光学モデル

2.1 写真乾板の構造

写真乾板は、図1に示すように、厚さ1mm~2mm程度の無色透明のガラス板の表面に感光乳剤を塗布した構造を持つ。写真乾板は平面性に優れているため、ガラス面はた

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5
^{a)} watanabe.yoshihiro.wx2@is.naist.jp



(a) ネガ画像 (b) ポジ画像

図 2 貼り付いた写真乾板

わむことなく、ほぼ理想的な平面であるとみなせる。また、写真乾板は、一般に焼き付けによって現像するため、明暗が反転したネガ像が透過率として記録されている。

2.2 貼り付いた写真乾板

本稿では、図 2 に示したような、水没して貼り付いた 2 枚の写真乾板の見えを分離することが目的である。このような写真乾板は、引き剥がせない状態となっている。また、貼り付いた写真乾板を無理に引き剥がそうとすると、剥離や亀裂といった物理的損傷が生じてしまう恐れがある。

手前側の写真乾板の透過率を f 、奥側の写真乾板を b とすると、貼り付いた写真乾板の透過計測による観測像 i は、2 枚の写真乾板の透過率のかけ合わせとなるため、

$$i = f \circ b \quad (1)$$

として表すことができる。ただし、 \circ はアダマール積（要素ごとの積）である。

3. 視差に基づく見えの分離

写真乾板は、表裏を揃えて重なった状態で保管されることが多い。そのため、水没して貼り付いた場合でも、感光面同士が重なることはなく、間には厚さ 1mm~2mm のガラス板が存在する。したがって、手前側と奥側の写真乾板の記録面は物理的に重なっているわけではなく、わずかな視差が生まれる。

そこで、本稿では、多視点撮影で得られた画像の視差を用いて、貼り付いた写真乾板の見えを分離する手法を提案する。まず、手前側と奥側の写真乾板とで視差が発生する条件下において、貼り付いた写真乾板を多視点撮影する。その後、多視点撮影で得られた画像を、線形モデルで定式化し、最適化問題として解くことで、手前側の写真乾板の画像と奥側の写真乾板の画像に分離する。

異なる視点から撮影すると、それぞれの層にある写真乾板の見えは、カメラからの深度に応じて視差をもって観測される。 n 番目の視点における観測画像 i_n は、

$$i_n = (F_n f) \circ (B_n b) \quad (2)$$

として表される。

ただし、 F, B は、写真乾板上の各点が視差に応じて画像

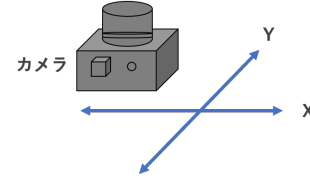
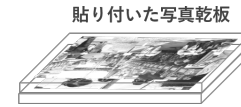


図 3 多視点撮影

上で平行移動して撮影される様子を表現する疎な正方形列である。カメラが校正されていて、かつ、写真乾板の位置が既知であれば、視差を表すこれらの行列は既知である。

ここで、観測される画像の対数を取ると、観測モデルを内積で表現することができる。対数変換された画像を \tilde{i} とすると、

$$\tilde{i}_n^T = -\log(i_n^T) \quad (3)$$

$$= [F_n \quad B_n] [\tilde{f} \quad \tilde{b}]^T \quad (4)$$

と表される。ただし、 $\tilde{f} = -\log(f)$ 、 $\tilde{b} = -\log(b)$ である。多視点で撮影された N 枚の画像を並べると、

$$\tilde{y} = A \tilde{x} \quad (5)$$

として線形モデルで表現することができる。ただし、

$$\tilde{y} = [\tilde{i}_0 \quad \dots \quad \tilde{i}_{N-1}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} F_0 & B_0 \\ \vdots & \vdots \\ F_{N-1} & B_{N-1} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{x} = [\tilde{f} \quad \tilde{b}]^T$$

である。

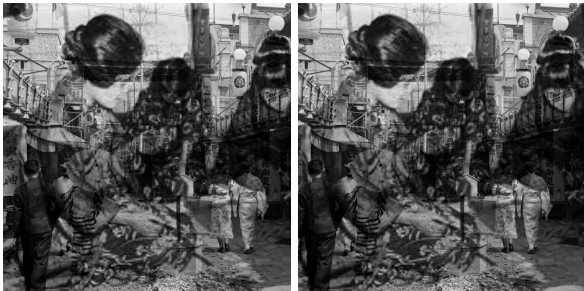
撮影画像が 2 枚だけの場合などは、未知数の数に対して観測が足りなくなる。このように、境界部分の拘束式が不足しているときは、行列 A は横長行列となるため、解は無限に存在する。この場合、 $\|\tilde{x}\|_2^2$ のような正則化を入れ、これが最小となるものを解とする。写真乾板が多視点から 3 枚以上撮影されていれば、行列 A は既知の縦長行列となるため、各層の対数透過率 \tilde{x} は最小二乗法により得ることができる。本稿では、さらに、透過率が 1 以下の値を持つという性質を利用した非負値拘束付き最小二乗法 [1] を利用している。推定される対数透過率 \hat{x} は、

$$\hat{x} = \underset{\tilde{x} \geq 0}{\operatorname{argmin}} \|\tilde{y} - A \tilde{x}\|_2^2 + \lambda \|\tilde{x}\|_2^2 \quad (6)$$



(a) 屋内画像 (b) 屋外画像

図 4 シミュレーションで使用する元画像



(a) 視点 1 (b) 視点 2

図 5 2 視点からの合成画像

により求められる。ただし、条件が十分である場合、 $\lambda = 0$ である。

4. シミュレーション実験

まず、計測誤差のない理想的な環境で提案手法の安定性を評価するために、合成画像を用いたシミュレーションによる検証を行った。図 4 に示すように、明治時代に撮影された屋内画像と大正時代に撮影された屋外画像の 2 枚の写真乾板が貼り付いた状態を想定した。本稿では、手前側を屋内画像とし、奥側を屋外画像とする。

シミュレーション実験では、厚さ 2mm の写真乾板が貼り付いている状態を、焦点距離 18mm のカメラを用いて、写真乾板から 18cm 離れた位置から撮影することを想定し、図 5 に示す 2 枚の入力画像を合成した。(a) の合成画像は図 4 の元画像をずらすことなく乗算した画像であり、(b) は x 方向に手前側の画像を 24 画素、奥側の画像を 23 画素平行移動した後に乗算した画像である。

4.1 2 視点のみの場合のシミュレーション

図 5 に示した合成画像を用いて見えの分離を行った結果を図 6 に示す。入力が 2 視点しかない時、結果画像は、手前側と奥側ともに、真値画像に比べて横方向にアーチファクトが残っており、輝度値も暗くなっていることが分かる。これは、境界領域における拘束式が不足しており、解が正しく定まらないためである。

4.2 多視点におけるシミュレーション

次に、図 7 に示すような、多方向からの多視点画像を入力としたシミュレーションを行った。また、同じ多視点画像



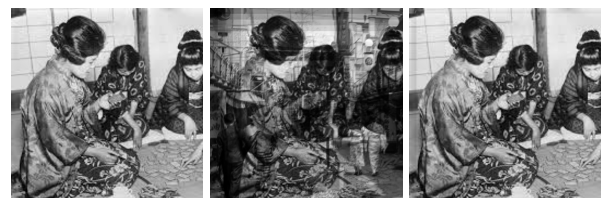
(a) 真値 (b) 推定結果

図 6 2 視点画像を用いた見えの分離



(a) 視点 3 (b) 視点 4 (c) 視点 5

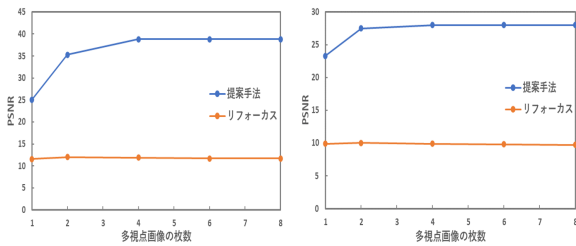
図 7 追加した合成画像



(a) 真値 (b) リフォーカス (c) 提案手法

図 8 5 視点画像を用いた見えの分離

を用いて合成開口によるリフォーカス [5] との比較も行った。図 8 に結果を示す。入力画像を十分用意したことにより、拘束数が十分確保されているため、2 視点の場合に見られていたアーチファクトが消失し、真値に近い見えの復元が行われていることが確認できる。一方で、リフォーカスによる方法では、着目層以外の影響がぼかしきれておらず、見えが分離されたとはいえない。これは、視差が小さいため、手前側の画像と奥側の画像を分離できないためである。図 9 に、入力画像の枚数に対する復元結果の PSNR



(a) 屋内画像 (b) 屋外画像
 図 9 多視点画像の枚数と復元品質の関係

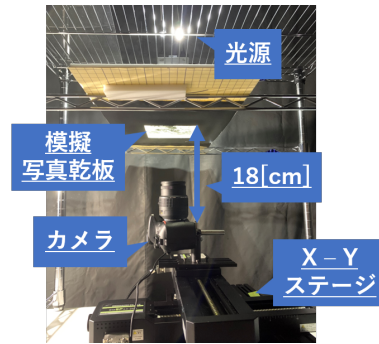


図 11 撮影環境



(a) 外観 (b) 実際に撮影された画像
 図 10 模擬写真乾板

を示す。入力枚数が少ないときは、条件式が足りない場合があり品質が下がることがあるが、十分な視点を用いると高い精度で復元できていることが確認された。

5. 実環境実験

図 10 に示した模擬写真乾板を用いて、実環境実験を行った。模擬写真乾板は、シミュレーション実験で使用した画像を OHP シートに印刷し、厚さ 2mm のアクリル板の両側に貼り合わせた構造となっている。

本実験では、図 11 に示すように、Nikon 製のカメラ D5500 と焦点距離 18mm のレンズを用いて、模擬写真乾板から 18cm 離れた位置で撮影する。また、多視点画像を撮影するために、OptoSigma 製の X-Y 移動ステージを用いている。カメラを、初期位置から X 方向に 4mm ずつ計 5 回移動させ撮影したものと、初期位置から Y 方向に 3mm ずつ計 5 回移動させ撮影したものの計 11 枚を入力画像に用いた。

模擬写真乾板を用いた実環境実験の実験結果を、図 12 に示す。ある程度の傾向は出ているものの、強いアーチファクトが残っており、見えの分離が正確にできていないことが分かる。この原因の理由として、視差行列が正しく求まっていない可能性がある。システムのアライメントやキャリブレーション等により、視差行列を正しく求めていく必要があるものと考えられる。

6. おわりに

本研究では、水害等によって貼り付いた写真乾板の見えを分離する手法を提案した。まず、貼り付いた写真乾板に視差が発生するように、多視点撮影を行った。次に、多視点撮影で得られた画像を、線形なモデルで表し、最適化問



(a) 目標画像 (b) 撮影画像 (c) 推定結果
 図 12 実環境実験の結果

題として解くことで、手前側の写真乾板の画像と奥側の写真乾板の画像に分離した。この提案手法を検証するため、シミュレーション実験と実環境実験を行った。

本手法の制限として、動く被写体に対しては、本手法による分離は適用できない問題がある。しかし、写真乾板のような歴史資料を対象としたとき、歴史資料は固定された状態で可視化される場合が多い。また、歴史資料は本来の姿をそのまま可視化することが望ましいため、本手法のように撮影された画像だけで復元する場面では有効であると考えられる。

今後の展望として、実環境実験における見えの分離の安定化が挙げられる。撮影枚数が少ないと計算が不安定になりやすいため、撮影の視点数を増加することで最適解をより真値に近い形で求める。本研究では 2 枚の写真乾板を扱ったが、実際には 3 枚以上の写真乾板が貼り付いている場合もある。提案手法は原理的には 3 枚以上に拡張することは可能であるが、現実的にはどこまで増やせるかを調査することも今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、JST CREST JPMJCR1764 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Kim, D., Sra, S. and Dhillon, I. S.: A non-monotonic method for large-scale non-negative least squares, *Optimization Methods and Software*, Vol. 28, No. 5, pp. 1012–1039 (online), DOI: 10.1080/10556788.2012.656368 (2013).
- [2] Kubo, H., Jayasuriya, S., Iwaguchi, T., Funatomi, T., Mukaigawa, Y. and Narasimhan, S. G.: Acquiring and characterizing plane-to-ray indirect light transport, *2018 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pp. 1–10 (online), DOI: 10.1109/ICCPHOT.2018.8368461 (2018).
- [3] Takatani, T., Aoto, T., Tanaka, K., Funatomi, T. and Mukaigawa, Y.: Reconstruction of Volumetric Reflectance Using Spatio-Sequential Frequency Correlation Imaging, *SIGGRAPH Asia 2018 Technical Briefs*, SA '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3283254.3283278 (2018).
- [4] Tanaka, K., Mukaigawa, Y., Kubo, H., Matsushita, Y. and Yagi, Y.: Recovering Inner Slices of Layered Translucent Objects by Multi-Frequency Illumination, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39, No. 4, pp. 746–757 (online), DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2631625 (2017).
- [5] Vaish, V., Wilburn, B., Joshi, N. and Levoy, M.: Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays, *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004.*, Vol. 1, pp. I–I (online), DOI: 10.1109/CVPR.2004.1315006 (2004).
- [6] 三原 基, 岩口堯史, 田中賢一郎, 久保尋之, 長原 一, 向川康博: 光線空間を用いた不要物体除去リフォーカス画像の生成, 情処研報 CVIM 195-52.
- [7] 石川武典, 北島大夢, 櫛田貴弘, 田中賢一郎, 久保尋之, 舩富卓哉, 向川康博: Time-of-Flight 計測における複数の変調周波数を用いた 2 層構造物体の距離推定 (2020).