

修士論文

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

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 向川 康博 教授

光メディアインタフェース研究室 (情報科学領域)

令和3年3月17日提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士(工学)授与の要件として提出した修士論文である。

渡辺 佳宏

審査委員：

向川 康博 教授	(主指導教員, 情報科学領域)
清川 清 教授	(副指導教員, 情報科学領域)
船富 卓哉 准教授	(副指導教員, 情報科学領域)
田中 賢一郎 助教	(副指導教員, 情報科学領域)
久保 尋之 客員准教授	(副指導教員, 情報科学領域)

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

内容梗概

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、提案手法の有効性を確認した。実環境実験において、模擬写真乾板と貼り付いた写真乾板の見えの分離の評価を行った。

キーワード

多視点撮影, 視差, 線形モデル, 貼り付いた写真乾板, 見えの分離

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 修士論文, 令和3年3月17日.

Appearance Separation of Pasted Photographic Plate using Multi-View Photography *

Yoshihiro Watanabe

Abstract

Photographic plate was affected damage such as pasted by flood disaster. A non-destructive visualization method is required without forcibly peeling off, because the photographic plate has high historical value. In this study, by using the disparity of images photographed from multi-viewpoint, the method to separate the appearance of the pasted two photographic plate is proposed. The appearance of each plate is estimated by describing multi-viewpoint images with linear model and solving it as an optimization problem. From simulation experiment, effectiveness of the proposed method is confirmed. In real-world environment experiment, appearance separation of simulated photographic plate and pasted photographic plate is evaluated.

Keywords:

Multi-View Photography, Disparity, Linear Model, Pasted Photographic Plate, Appearance Separation

*Master's Thesis, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 17, 2021.

目次

1. はじめに	1
2. 関連研究	3
2.1 プロジェクタカメラシステムを用いた手法	3
2.2 多視点画像・光線空間を用いた受動的な手法	4
3. 写真乾板の光学モデル	5
3.1 写真乾板の構造	5
3.2 貼り付いた写真乾板の構造	6
4. 提案手法	7
4.1 多視点撮影による視差を用いた見えの分離	7
4.1.1 多視点撮影による視差の発生	7
4.1.2 視差に基づく見えの分離	9
4.2 ホモグラフィ変換を用いた視差行列の生成	11
5. シミュレーション実験	14
5.1 2枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション	14
5.1.1 2視点のみの場合のシミュレーション	14
5.1.2 多視点におけるシミュレーション	16
5.2 3枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション	19
5.2.1 同じ厚みの写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション	19
5.2.2 異なる厚みの写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション	22
6. 実環境実験	25
6.1 模擬写真乾板を用いた評価実験	26
6.2 貼り付いた写真乾板の見えの分離	29
7. 奥行き視差の応用例	35
7.1 雨天時における自動運転	35

7.2 雨天時における車載カメラ映像の鮮明化	36
7.2.1 実環境実験	36
7.2.2 実験結果	37
8. まとめ	39
謝辞	40
発表リスト	41
参考文献	42

目 次

1	貼り付いた写真乾板	1
2	開口サイズ	4
3	写真乾板の構造	5
4	貼り付いた写真乾板の構造	6
5	多視点撮影による視差	8
6	輝度値の補間	12
7	視差行列の生成	13
8	2枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーションで使用する元 画像	14
9	2視点からの合成画像	15
10	2視点画像を用いた見えの分離	15
11	追加した合成画像	16
12	5視点画像を用いた見えの分離	17
13	多視点画像の枚数と分離精度の関係	18
14	3枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーションで使用する元 画像	19
15	7視点からの同じ厚みを想定した合成画像	20
16	同じ厚みを想定した7視点画像を用いた見えの分離	21
17	7視点からの異なる厚みを想定した合成画像	23
18	異なる厚みを想定した7視点画像を用いた見えの分離	24
19	撮影環境	25
20	模擬写真乾板	26
21	模擬写真乾板の見えの分離で用いた特徴点	27
22	手前画像の見えの分離	28
23	奥画像の見えの分離	28
24	貼り付いた写真乾板の見えの分離で用いた特徴点	30
25	貼り付いた写真乾板の見えの分離	31
26	貼り付いた写真乾板 表裏反転	32

27	表裏反転した貼り付いた写真乾板の見えの分離で用いた特徴点 . . .	33
28	表裏反転した貼り付いた写真乾板の見えの分離	34
29	視界不良となる雨	35
30	実環境実験	37
31	雨粒除去 実験結果	38
32	雨筋除去 実験結果	38
33	雨膜除去 実験結果	38

1. はじめに

歴史資料は、過去を検証し未来への指針を考えるうえで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貴重な歴史像が記録されている。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[1]。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[2][3]。写真乾板も同様であり、図1に示したように、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、歴史的価値が低下しているものが存在する。2枚の写真乾板が貼り付いたことにより、異なる観測像が重なった像しか見れず、各層の見えが分からなくなっている。また、この貼り付いた写真乾板を無理に引き剥がそうとすると、物理的損傷が生じ、歴史的価値がさらに低下してしまう恐れがある。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。



(a) ネガ画像

(b) ポジ画像

図1 貼り付いた写真乾板

そこで、本研究では、水害で貼り付いた2枚の写真乾板の見えを非破壊で分離することを目的とする。写真乾板1枚あたりに数mm程度の厚みがあることを考慮し、多視点撮影による視差に基づき、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。提案手法の有効性をシミュレーション実験と模擬写真乾板を用いた実環境実験で確認し、最後に、貼り付いた写真乾板の見えを分離可能であるかを検証した。

本論文は8章から構成されている。第2章では異なる深さを持つ見えの分離について関連研究を紹介する。第3章では写真乾板と貼り付いた写真乾板の光学モデルについて述べる。第4章では貼り付いた写真乾板の構造を考慮した提案手法について述べる。第5章では合成画像を用いたシミュレーション実験を行い、提案手法の有効性について述べる。第6章では模擬写真乾板を用いた評価実験を行い、実環境における提案手法の有効性について述べる。そして、貼り付いた写真乾板の見えの分離を行い、その分離結果について述べる。第7章では奥行き視差の応用例として、合成開口法を用いた雨天時における車載カメラの鮮明化について述べる。最後に、第8章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

本章では、異なる深さを持つ見えの分離について関連研究を紹介する。2.1 節でプロジェクタカメラシステムを用いた手法、2.2 節で多視点画像・光線空間を用いた受動的な手法について述べる。

2.1 プロジェクタカメラシステムを用いた手法

プロジェクタカメラシステムは、3次元形状の復元に広く利用されているが、異なる深さを持つ見えの分離に対しても利用されている。Takatani ら [4] は、プロジェクタカメラシステムを用いて、物体内部の体積反射率を深さごとに分解する手法を提案した。正投影カメラが深さに関係なく常に同じサイズのシーンを撮影する一方で、透視投影方式のプロジェクタからの投影パターンは深くなるに伴って空間的に広がっていく。深さによって変化する空間周波数の違いを用いることにより、物体内部の体積反射率を分解している。

O'Tool ら [5] は、高速に1ライン毎の照明を行うレーザプロジェクタと、同様に1ライン毎の撮影を行うローリングシャッターカメラの照明と撮影のタイミングを同期させることで直接反射光成分と間接反射光成分に分解する時間同期式プロジェクタカメラシステムを提案した。特定の深さにある平面領域の直接反射光成分だけを取得することで、霧中にある物体の深度画像を推定している。Kubo ら [6] は、前述した時間同期式プロジェクタシステムを拡張し、照明と撮影のタイミングを決定する遅延時間を制御することで、間接反射光成分を詳細に撮り分ける手法を提案した。異なる深さを通った表面下散乱光を選択的に取得することで、特定の深さにある物体内部を可視化している。

また、プロジェクタを用いて白と黒が交互に繰り返される細かいチェッカーパターン(高周波パターン)をシーンに投影することで、観測画像を直接光成分と大域光成分に分解できる高周波照明 [7] を用いた手法も利用されている。Tanaka ら [8] は、高周波照明と観測を共に平行にすることで、直接光成分として透過光を、大域光成分として散乱光を分離する手法を提案した。透過画像から散乱光を除去することで、物体内部状態を推定している。また、Tanaka ら [9] は、空間周

波数の異なる複数の高周波照明を投影することで、複数の周波数で、深さに依存する直接光成分と大域光成分を分離する手法を提案した。分離された複数の直接光成分を、線形な式で解くことで、特定の深さのスライスの見えを復元している。

2.2 多視点画像・光線空間を用いた受動的な手法

多視点画像・光線空間を用いた受動的な方法では、合成開口法によるリフォーカスが異なる深さを持つ見えの分離に対して利用されている。図 2 に示すように、小さい開口のカメラで撮影すると被写界深度が深くなり、手前から奥まで鮮明に見える。それに対して、大きい開口のカメラで撮影すると被写界深度が狭くなり、特定の深さだけ鮮明にそれ以外はボケて見える。合成開口法 [10] [11] では、多視点画像をシーン中の任意の平面上に位置合わせし加算平均することで、疑似的に開口サイズとボケ量を後から変更できる。また、この方法により、あたかも事後に任意の平面だけに合焦し、その前後にボケを与えるような処理をリフォーカスと呼ぶ。合成開口法によるリフォーカスによって、非常に大きな開口サイズを実現でき、特定の深さのみに合焦し、それ以外は大きくボケさせることが可能である。

Vaish ら [12] は、合成開口法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ボカすことにより所望の層を鮮明に可視化している。Mihara ら [13] は、光線空間中から不要な層に対応する光線の除去を行うことで、不要な層が除去されたリフォーカス画像を生成している。しかし、原理上、双方ともに不要な層の影響を完全に消し去ることはできなかった。

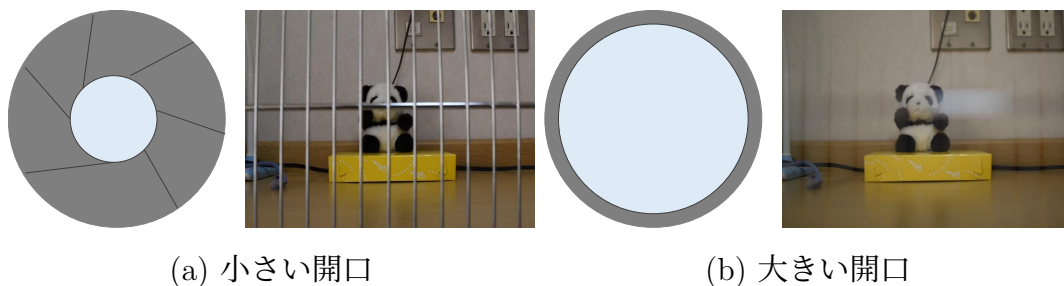


図 2 開口サイズ

3. 写真乾板の光学モデル

本章では、写真乾板の光学モデルについて説明し、貼り付いた写真乾板がどのような構造を持つのか、どのように観測されるかについて示す。3.1節では写真乾板の構造について述べ、3.2節では本研究で取り扱う貼り付いた写真乾板の構造について述べる。

3.1 写真乾板の構造

写真乾板は、図3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。

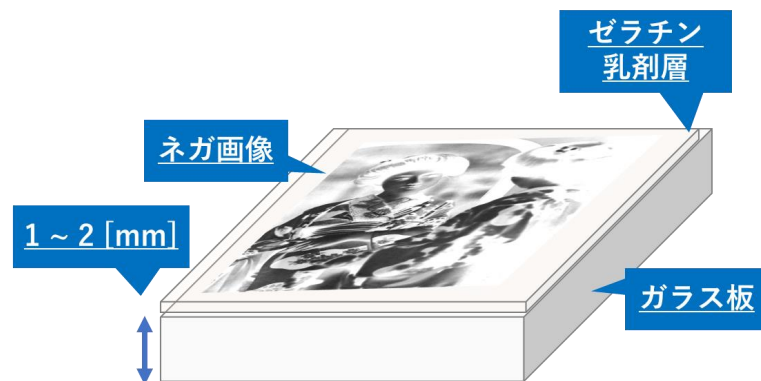


図3 写真乾板の構造

3.2 貼り付いた写真乾板の構造

本研究では、図1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。

貼り付いた写真乾板は、図4に示すように、手前側の写真乾板と奥側の写真乾板の記録面の上にガラス板が挟まれた構造を持つ。手前側の写真乾板の透過率を f 、奥側の写真乾板の透過率を b とすると、貼り付いた写真乾板の透過計測による観測画像 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。

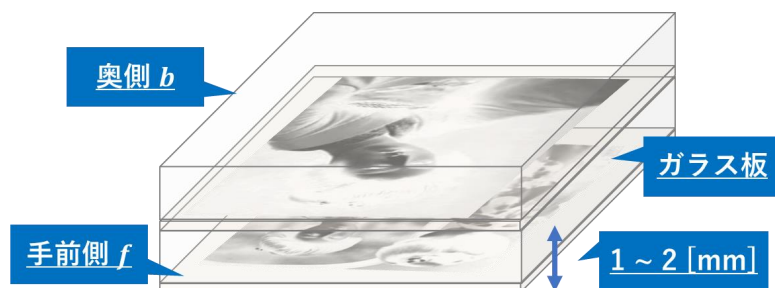


図4 貼り付いた写真乾板の構造

4. 提案手法

本章では、貼り付いた2枚の写真乾板の見えをそれぞれ分離する提案手法について説明する。まず、4.1節で、多視点撮影による視差を用いて、手前側の写真乾板と奥側の写真乾板の見えに分離する手法について述べる。次に、4.2節で、見えを分離する手法の際に必要な視差行列の求め方について述べる。

4.1 多視点撮影による視差を用いた見えの分離

この節では、まず、4.1.1項で、貼り付いた写真乾板を多視点撮影すると視差が発生することを述べる。そして、4.1.2項で、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手法について述べる。

4.1.1 多視点撮影による視差の発生

貼り付いた写真乾板の観測画像は、3.2節でも述べたように、式(1)で表される。しかし、観測画像が1枚だけでは、不良設定問題となり2枚の写真乾板の画像を求められない。そこで、本研究では、貼り付いた写真乾板を多視点撮影すると、視差が発生する点に着目した。

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い。つまり、図5に示すように、多視点撮影によって、手前側と奥側の写真乾板にはわずかな視差が生まれる。そこで、手前側と奥側の写真乾板の観測画像の違いとして、多視点撮影で得られた観測画像の視差を利用する。

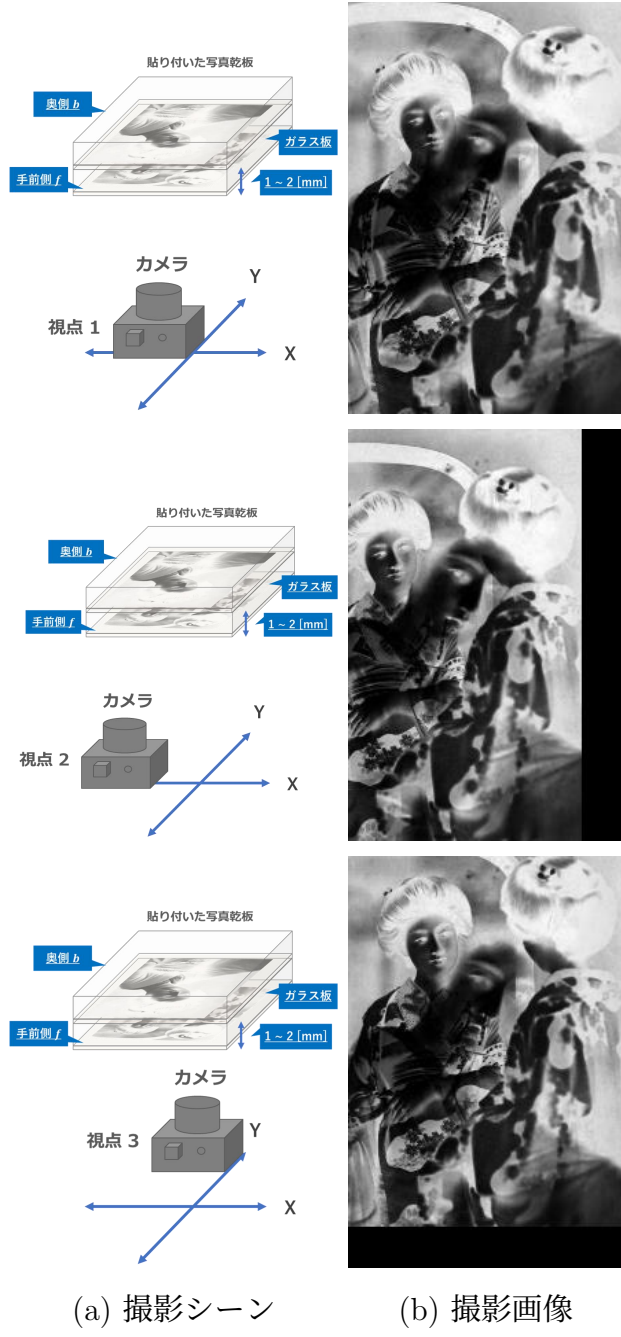


図 5 多視点撮影による視差

4.1.2 視差に基づく見えの分離

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、

$$i_n = (\mathbf{F}_n \mathbf{f}) \circ (\mathbf{B}_n \mathbf{b}) \quad (2)$$

として表される。

ただし、 \mathbf{F}, \mathbf{B} は、写真乾板上の各点が視差に応じて画像上で平行移動して撮影される様子を 1 で表現し、それ以外を 0 で表現する疎な正方行列である。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。また、 \mathbf{f}, \mathbf{b} は、初期視点 ($n=0$) で撮影された観測画像の手前側と奥側の写真乾板の見えである。

観測画像はネガ画像として観測されているので、観測画像をポジ画像に変換する。ネガポジ変換された画像を i' とすると、

$$\begin{aligned} i'_n &= i_{max} - i_n \\ &= (\mathbf{F}_n \mathbf{f}') \circ (\mathbf{B}_n \mathbf{b}') \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。ただし、 i_{max} は観測画像の階調の最大値である。

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、

$$\tilde{i}'_n{}^\top = -\log(i'_n{}^\top) \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_n & \mathbf{B}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{f}}' & \tilde{\mathbf{b}}' \end{bmatrix}^\top \quad (5)$$

と表される。ただし、 $\tilde{\mathbf{f}}' = -\log(\mathbf{f}')$ 、 $\tilde{\mathbf{b}}' = -\log(\mathbf{b}')$ である。

多視点で撮影された N 枚の画像を並べると,

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} \quad (6)$$

として線形モデルで表現することができる。ただし,

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}} &= \left[\tilde{\mathbf{i}}'_0 \quad \cdots \quad \tilde{\mathbf{i}}'_{N-1} \right]^\top \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_0 & \mathbf{B}_0 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{F}_{N-1} & \mathbf{B}_{N-1} \end{bmatrix} \\ \tilde{\mathbf{x}} &= \left[\tilde{\mathbf{f}}' \quad \tilde{\mathbf{b}}' \right]^\top \end{aligned}$$

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 \mathbf{A} は横長行列となるため、解は無限に存在する。この場合、 $\|\tilde{\mathbf{x}}\|_2^2$ のように、無限に存在する解の中から、L2 ノルムが最小となるものを解とする正則化を入れている。写真乾板が多視点から3枚以上撮影されていれば、行列 \mathbf{A} は既知の縦長行列となるため、各層の対数透過率 $\tilde{\mathbf{x}}$ は最小二乗法により得ることができる。本研究では、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 [14] を利用している。ただし、撮影画像では、多視点画像との境界領域の部分が未知数の数に対して観測が足りないので、 $\|\tilde{\mathbf{x}}\|_2^2$ によって、解を推定している。推定される対数透過率 $\hat{\mathbf{x}}$ は、

$$\hat{\mathbf{x}} = \underset{\tilde{\mathbf{x}} \geq 0}{\operatorname{argmin}} \|\tilde{\mathbf{y}} - \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}\|_2^2 + \lambda \|\tilde{\mathbf{x}}\|_2^2 \quad (7)$$

により求められる。ただし、 $\operatorname{rank}(\mathbf{A})$ が未知数の数と一致する場合、 $\lambda = 0$ である。

4.2 ホモグラフィ変換を用いた視差行列の生成

実環境実験では、4.1.2項において述べた各層の視差を表す行列 F, B を、各層の観測画像の特徴点とホモグラフィ変換を用いて生成する。初期視点の観測像から各視点の観測画像への座標変換量が分かれば、写真乾板上の各点が視差に応じて画像上でどれだけ移動したのかが分かる。そこで、まず、初期視点と各視点の観測画像において、各層の4つの対応する特徴点を用いて、ホモグラフィ変換行列を求める。その後、推定したホモグラフィ変換行列を用いて、各層の観測画像の全ての点で座標を求め、視差行列に適用する。

n 番目の視点における各層の観測画像のある点 $\mathbf{p}_{nk}=(u_{nk}, v_{nk})$ は、ホモグラフィ変換行列 \mathbf{H} と初期視点の観測画像のある点 $\mathbf{p}_k=(u_k, v_k)$ を用いると、

$$\mathbf{p}_{nk} = \mathbf{H}\mathbf{p}_k \quad (8)$$

$$w \begin{bmatrix} u_{nk} \\ v_{nk} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

として同次変換で表される。ただし、

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & h_{02} \\ h_{10} & h_{11} & h_{12} \\ h_{20} & h_{21} & 1 \end{bmatrix}$$

とする。同次座標系で表現された \mathbf{p}_{nk} を、非同次座標系に変換すると、

$$\begin{bmatrix} u_{nk} \\ v_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_k & v_k & 1 & 0 & 0 & 0 & -u_{nk}u_k & -u_{nk}v_k \\ 0 & 0 & 0 & u_k & v_k & 1 & -v_{nk}u_k & -v_{nk}v_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{00} \\ h_{01} \\ \vdots \\ h_{21} \end{bmatrix} \quad (10)$$

として、線形連立方程式で表現することができる [15].

つまり、8個の未知パラメータ $h_{00}, h_{01}, \dots, h_{21}$ は、最小限4点の座標が分かれば求めることができる。各層の初期視点と n 番目の視点における観測画像の対応する4つの特徴点を用いて、ホモグラフィ変換行列 \mathbf{H} を推定する。

n 番目の視点における各層の観測画像の全ての点 $\mathbf{p}_n=(u_n, v_n)$ は，推定したホモグラフィ変換行列 \mathbf{H} と初期視点の観測画像の全ての点 $\mathbf{p}=(u, v)$ を用いると，

$$u_n = \frac{h_{00}u + h_{01}v + h_{02}}{h_{20} + h_{21} + 1} \quad (11)$$

$$v_n = \frac{h_{10}u + h_{11}v + h_{12}}{h_{20} + h_{21} + 1} \quad (12)$$

により求められる．

ホモグラフィ変換行列を推定したことにより， n 番目の視点における各層の観測画像の全ての点で，座標が分かる．つまり，推定される座標は，各層の視差に応じて画像上で平行移動して撮影される様子を示している．

画像の色情報は，基本的には整数の座標だけに保存されている．しかし，ホモグラフィ変換で推定される座標は，実数値になる．そこで，図 6 に示すように，推定される実数座標の輝度値を 4 近傍の輝度値を用いて補間する．

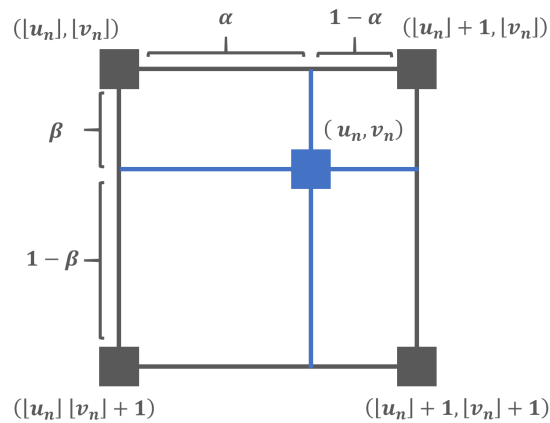


図 6 輝度値の補間

推定される全ての点 \mathbf{p}_n の整数部分を $\lfloor \mathbf{p}_n \rfloor$ とすると，実数部分は，

$$\alpha = u_n - \lfloor u_n \rfloor \quad (13)$$

$$\beta = v_n - \lfloor v_n \rfloor \quad (14)$$

と表される．

n 番目の視点における各層の観測画像 f_n, b_n の輝度値は、初期視点における各層の観測画像 f, b の 4 近傍からの距離による加重平均で、

$$\begin{aligned} f_n(u_n, v_n) = & f(\lfloor u_n \rfloor, \lfloor v_n \rfloor)(1 - \alpha)(1 - \beta) + f(\lfloor u_n \rfloor + 1, \lfloor v_n \rfloor)\alpha(1 - \beta) \\ & + f(\lfloor u_n \rfloor, \lfloor v_n \rfloor + 1)(1 - \alpha)\beta + f(\lfloor u_n \rfloor + 1, \lfloor v_n \rfloor + 1)\alpha\beta \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} b_n(u_n, v_n) = & b(\lfloor u_n \rfloor, \lfloor v_n \rfloor)(1 - \alpha)(1 - \beta) + b(\lfloor u_n \rfloor + 1, \lfloor v_n \rfloor)\alpha(1 - \beta) \\ & + b(\lfloor u_n \rfloor, \lfloor v_n \rfloor + 1)(1 - \alpha)\beta + b(\lfloor u_n \rfloor + 1, \lfloor v_n \rfloor + 1)\alpha\beta \end{aligned} \quad (16)$$

と表される。

図 7 に示したように、4 近傍の座標とそれに対応する重み付けの値を、疎な正方行列に適用することにより、各層の視差を表す行列 F, B が求められる。4.1.2 項で述べたように、観測画像は、視差行列と初期視点における各層の観測画像のベクトルとの内積で表現される。つまり、観測画像の幅を W とすると、初期視点における各層の観測画像のベクトル座標は、 $u + (v \times W)$ と表され、視差行列の列方向に対応する。視差行列の行方向は、初期視点における各層の観測画像の輝度値が変化する座標を示しているので、 $u_n + (v_n \times W)$ で表され、その実数座標に対応する 4 近傍座標に重み付けの値がそれぞれ格納される。

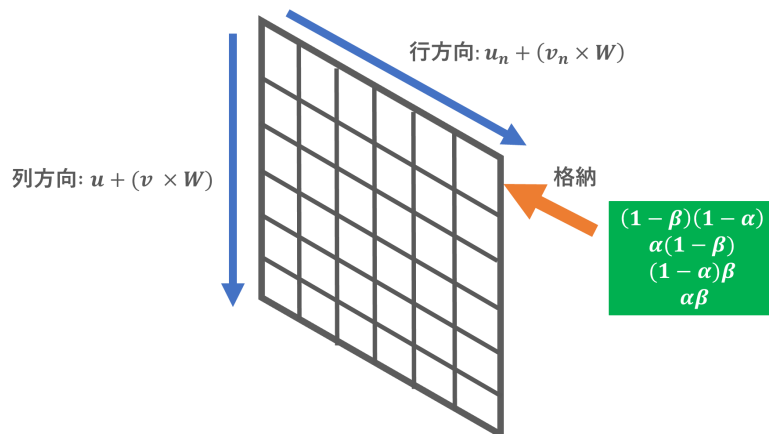


図 7 視差行列の生成

5. シミュレーション実験

本章では、計測誤差のない理想的な環境で提案手法の有効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う。まず、5.1節において、2枚の写真乾板が貼り付いた状態を想定して、見えの分離を行い、提案手法の有効性を評価する。次に、5.2節において、3枚の写真乾板が貼り付いた状態を想定した場合でも、見えの分離が行えるかを検証する。

5.1 2枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション

2枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション実験では、図8に示した手前画像と奥画像の2枚の写真乾板が貼り付いた状態を想定した。また、評価のしやすさを考慮し、ポジ画像を使用した。



(a) 手前画像

(b) 奥画像

図8 2枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーションで使用する元画像

5.1.1 2視点のみの場合のシミュレーション

シミュレーション実験では、図9に示す2枚の入力画像を合成した。(a)の合成画像は図8の元画像をずらすことなく乗算した画像であり、(b)は x 方向に手前画像を24画素、奥画像を23画素平行移動した後に乗算した画像である。

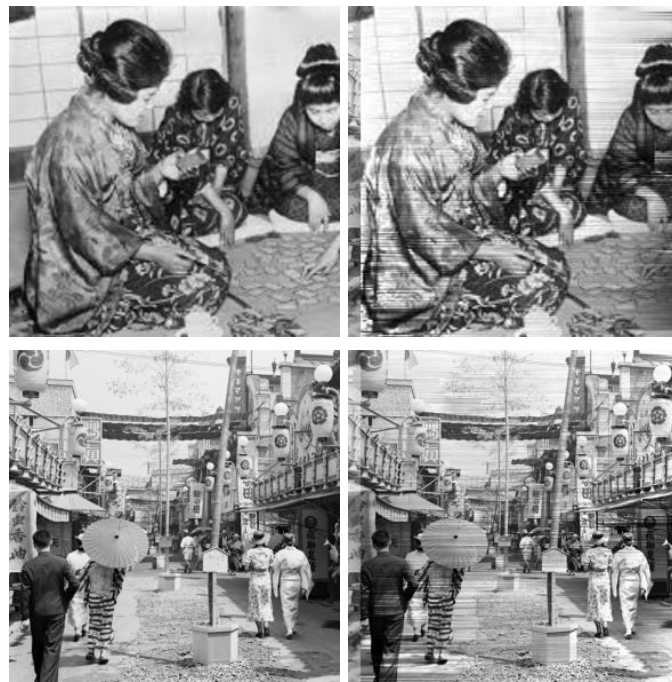
図9に示した合成画像を用いて見えの分離を行った結果を図10に示す。入力が2視点しかない時、結果画像は、手前側と奥側ともに、真値画像に比べて横方向にアーチファクトが残っており、輝度値も暗くなっていることが分かる。これは、境界領域における拘束式が不足しており、解が正しく定まらないためである。



(a) 視点1

(b) 視点2

図9 2視点からの合成画像



(a) 真値

(b) 推定結果

図10 2視点画像を用いた見えの分離

5.1.2 多視点におけるシミュレーション

次に，図 11 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実験を行った．(a) は y 方向に手前画像を 18 画素，奥画像を 17 画素平行移動した後に乗算した画像であり，(b) は x 方向に手前画像を 48 画素，奥画像を 46 画素平行移動した後に乗算した画像である．そして，(c) は y 方向に手前画像を 36 画素，奥画像を 34 画素平行移動した後に乗算した画像である．

多視点におけるシミュレーション実験では，同じ多視点画像を用いて，2.2 節に示した合成開口法によるリフォーカス [10][11] との比較も行った．合成開口法によるリフォーカスでは，多視点画像を手前画像と奥画像に視差に応じて位置合わせし，加算平均することで見えの分離を行った．また，定性的評価だけでなく，提案手法と合成開口法によるそれぞれの推定結果の PSNR を求め，定量的評価も行った．PSNR を用いた定量的評価では，多視点画像の枚数と分離精度の関係性も評価した．

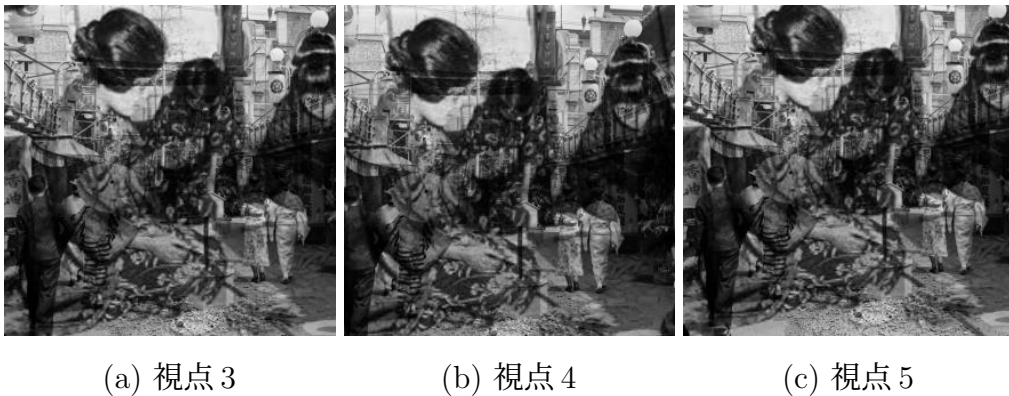


図 11 追加した合成画像

図 12 に見えの分離を行った結果を示す。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、真値に近い見えの分離が行われていることが確認できる。一方で、合成開口による方法では、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言い難い。これは、視差が小さいため、手前画像と奥画像を分離できないためである。

図 13 に、多視点画像の入力枚数に対する推定結果の PSNR を示す。提案手法は、合成開口による方法と比較すると、高い精度で分離が行われていることが確認できる。また、提案手法は、入力枚数が少ないときは、条件式が足りない場合があり分離精度が下がることもあるが、十分な視点を用いると高い精度で分離が行われていることも確認できる。

シミュレーション実験の結果より、多視点画像を用いた提案手法は、2 枚の貼り付いた写真乾板の見えの分離に対して有効性が高いことが分かった。

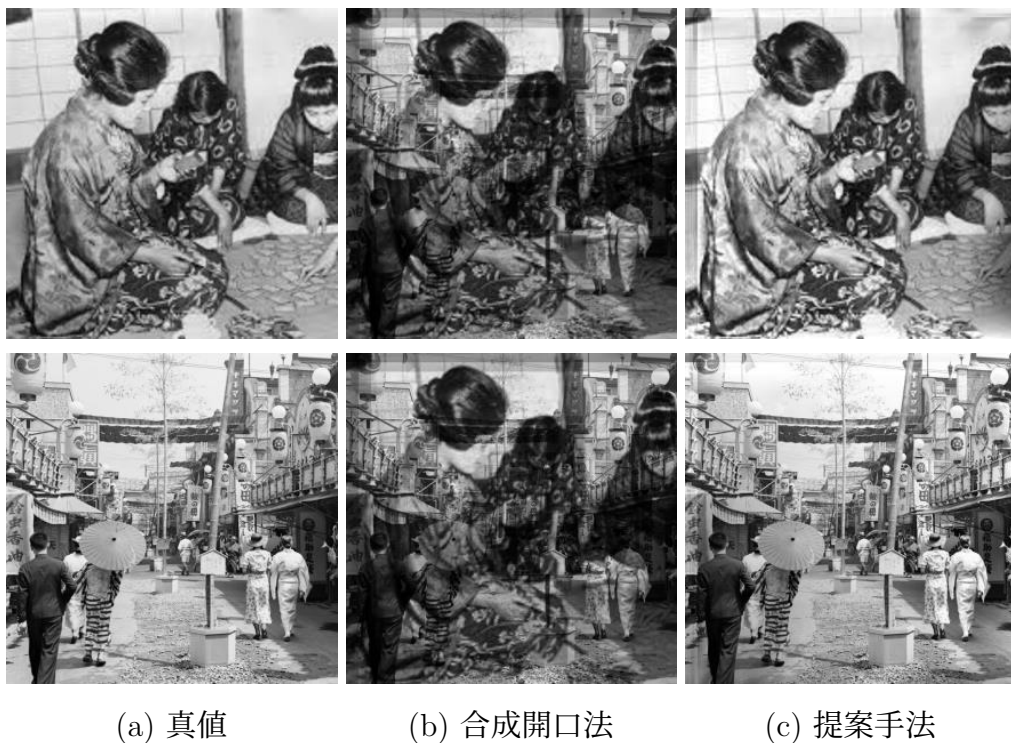
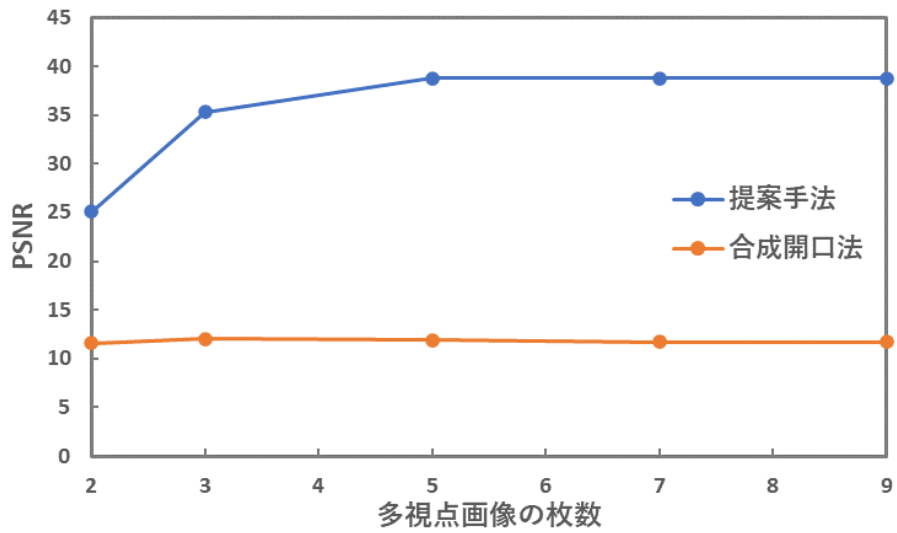
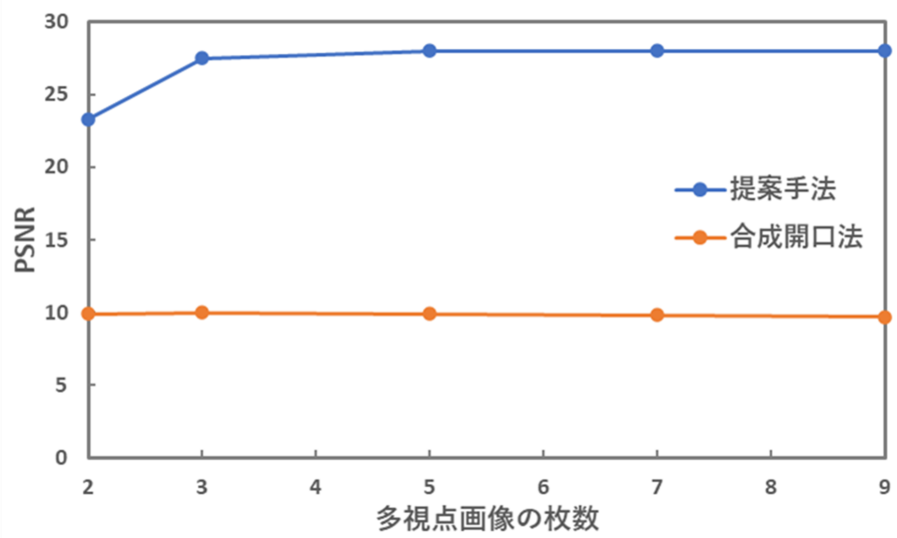


図 12 5 視点画像を用いた見えの分離



(a) 手前画像



(b) 奥画像

図 13 多視点画像の枚数と分離精度の関係

5.2 3枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション

3枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション実験では、図 14 に示した手前画像と中央画像と奥画像の3枚の写真乾板が貼り付いた状態を想定した。また、5.1 節と同様に、評価のしやすさを考慮し、ポジ画像を使用した。



(a) 手前画像

(b) 中央画像

(c) 奥画像

図 14 3枚の写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーションで使用する元画像

5.2.1 同じ厚みの写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション

まず、シミュレーション実験では、厚さ 2mm の写真乾板が 3 枚貼り付いた状態を想定し、図 15 に示す 7 視点の入力画像を合成した。(a) の合成画像は図 14 の元画像をずらすことなく乗算した画像である。(b) は x 方向に手前画像を 24 画素、中央画像を 23 画素、奥画像を 22 画素平行移動した後に乗算した画像であり、(c) は y 方向に手前画像を 18 画素、中央画像を 17 画素、奥画像を 16 画素平行移動した後に乗算した画像である。また、(d) は x 方向に手前画像を 48 画素、中央画像を 46 画素、奥画像を 44 画素平行移動した後に乗算した画像であり、(e) は y 方向に手前画像を 36 画素、中央画像を 34 画素、奥画像を 32 画素平行移動した後に乗算した画像である。そして、(f) は x 方向に手前画像を 72 画素、中央画像を 69 画素、奥画像を 66 画素平行移動した後に乗算した画像であり、(g) は y 方向に手前画像を 54 画素、中央画像を 51 画素、奥画像を 48 画素平行移動した後に乗算した画像である。

図 16 に見える分離を行った結果を示す。推定結果より、それぞれ真値に近い見えの分離が行われていることが確認できる。しかし、2枚が貼り付いた場合のシ

ミュレーション結果と比較すると分離精度が落ちていることが分かる。これは、推定する未知数の数が、2枚貼り付いた場合に比べて増えたことにより、最適化の安定性が低下したためである。



(a) 視点 1



(b) 視点 2



(c) 視点 3



(d) 視点 4



(e) 視点 5



(f) 視点 6



(g) 視点 7

図 15 7 視点からの同じ厚みを想定した合成画像



(a) 真値

(b) 推定結果

図 16 同じ厚みを想定した 7 視点画像を用いた見えの分離

5.2.2 異なる厚みの写真乾板が貼り付いた場合のシミュレーション

次に、厚さ 4mm の写真乾板が手前側に、厚さ 6mm の写真乾板が中央側に、厚さ 2mm の写真乾板が奥側に貼り付いた状態を想定し、図 17 に示す 7 視点の入力画像を合成した。(a) の合成画像は図 14 の元画像をずらすことなく乗算した画像である。(b) は x 方向に手前画像を 24 画素、中央画像を 22 画素、奥画像を 19 画素平行移動した後に乗算した画像であり、(c) は y 方向に手前画像を 18 画素、中央画像を 16 画素、奥画像を 13 画素平行移動した後に乗算した画像である。また、(d) は x 方向に手前画像を 48 画素、中央画像を 44 画素、奥画像を 38 画素平行移動した後に乗算した画像であり、(e) は y 方向に手前画像を 36 画素、中央画像を 32 画素、奥画像を 26 画素平行移動した後に乗算した画像である。そして、(f) は x 方向に手前画像を 72 画素、中央画像を 66 画素、奥画像を 57 画素平行移動した後に乗算した画像であり、(g) は y 方向に手前画像を 54 画素、中央画像を 48 画素、奥画像を 39 画素平行移動した後に乗算した画像である。

図 18 に見える分離を行った結果を示す。同じ厚さを想定したシミュレーションと同様に、2 枚が貼り付いた場合のシミュレーション結果と比較すると分離精度は落ちているが、それぞれ真値に近い見えの分離が行われていることが確認できる。また、同じ厚さを想定した場合と比較すると、分離精度が高いことが分かる。これは、同じ厚さの場合に比べて、中央側と奥側までの厚みが大きく、多視点撮影した際における中央画像と奥画像の平行移動量が小さいためである。

シミュレーション実験の結果より、多視点画像を用いた提案手法は、3 枚の貼り付いた写真乾板の見える分離が可能であることが分かった。



(a) 視点1



(b) 視点2



(c) 視点3



(d) 視点4



(e) 視点5



(f) 視点6



(g) 視点7

図 17 7視点からの異なる厚みを想定した合成画像



(a) 真値

(b) 推定結果

図 18 異なる厚みを想定した7視点画像を用いた見えの分離

6. 実環境実験

本章では、提案手法に基づき、貼り付いた写真乾板の見えを分離するために、実環境実験を行う。まず、6.1節において、模擬写真乾板を用いて見えの分離を行い、実環境における提案手法の有効性を評価する。そして、6.2節において、本研究の目的である貼り付いた写真乾板の見えの分離を行う。

実環境実験では、図 19 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、対象の写真乾板から約 18cm 離れた位置で撮影する。また、それぞれの乾板の上に拡散板を設置することで、点光源からの光を一様に照射している。そして、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。

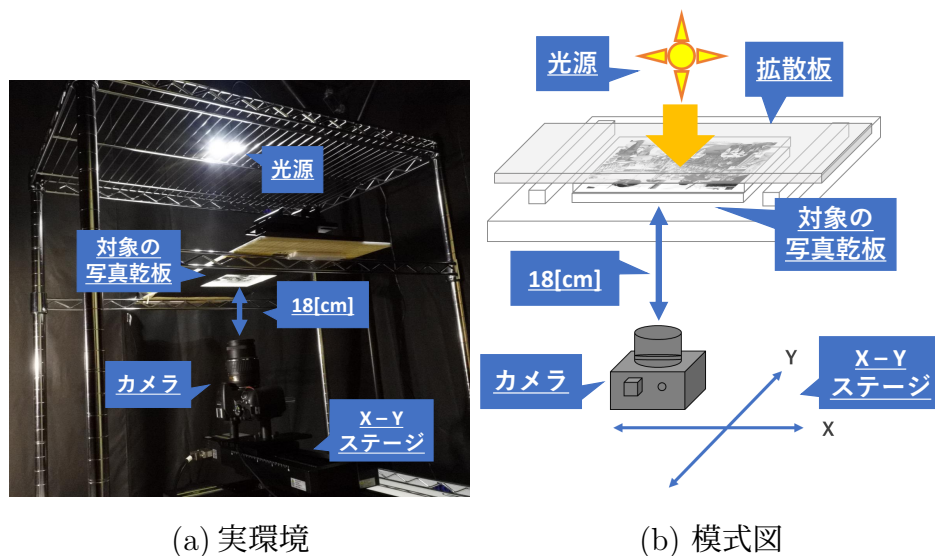
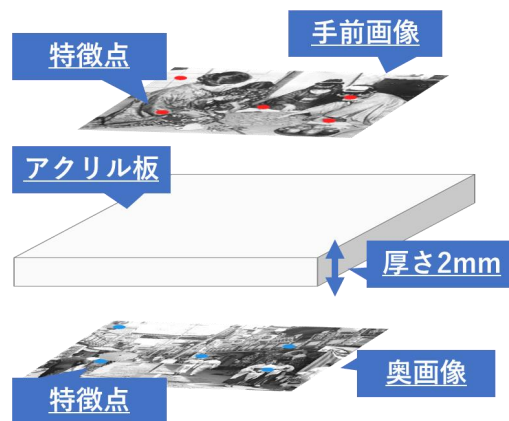


図 19 撮影環境

6.1 模擬写真乾板を用いた評価実験

図 20 に示した模擬写真乾板を用いて見えの分離を行い、実環境における提案手法の有効性を評価した。模擬写真乾板は、シミュレーション実験で使用した元画像を OHP シートに印刷し、厚さ 2mm のアクリル板に手前画像と奥画像を貼り合わせた構造となっている。また、手前画像の赤いマーカーと奥画像の青いマーカーは、それぞれの視差行列を求める際に用いる特徴点である。



(a) イメージ図



(b) 外観



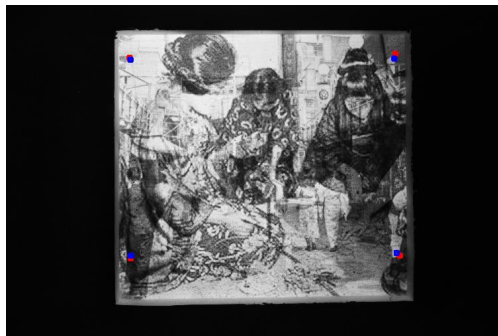
(c) 撮影画像

図 20 模擬写真乾板

模擬写真乾板を用いた評価実験では、カメラを初期位置から X 方向に 7mm ずつ計 2 回移動させ撮影したものと、初期位置から Y 方向に 6mm ずつ計 2 回移動させ撮影したものの計 5 枚を入力画像に用いた。また、図 21 に示した入力画像の赤いマーカーの 4 点と青いマーカーの 4 点を用いて、4.2 節に基づき手前画像と奥画像の視差行列を求めた。



(a) 視点 1



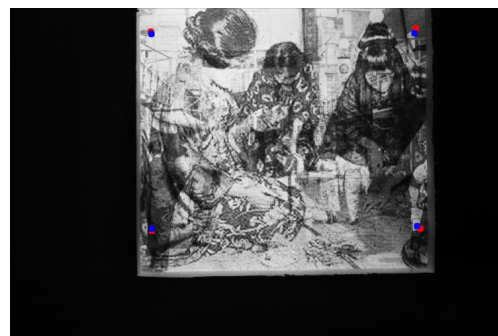
(b) 視点 2



(c) 視点 3



(d) 視点 4



(e) 視点 5

図 21 模擬写真乾板の見える分離で用いた特徴点

模擬写真乾板を用いた見えの分離結果を、図 22 と図 23 に示す。分離結果は、手前側と奥側ともに、真値画像と比較すると片側の画像のアーチファクトが少し残っているが、見えの分離が正確に行えていることが確認できる。つまり、実環境において、シミュレーション実験よりは精度は落ちるが、安定して見えの分離が可能であることが確認できる。また、手前画像の分離結果には、女性の足下の部分に格子線が発生していることが分かる。これは、多視点画像の境界領域は、他の観測領域に比べて拘束式が不足しており、解が正しく定まらないことが原因であると考えられる。また、分離結果が全体的に白飛びしているのは、光源が明るすぎたためであると考えられる。

模擬写真乾板を用いた評価実験の結果より、多視点画像を用いた提案手法は、見えの分離に対して、実環境においても有効性が高いことが分かった。

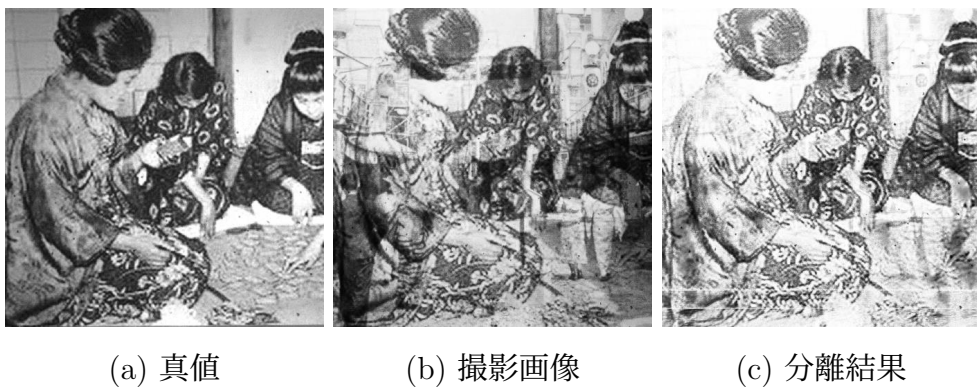


図 22 手前画像の見えの分離

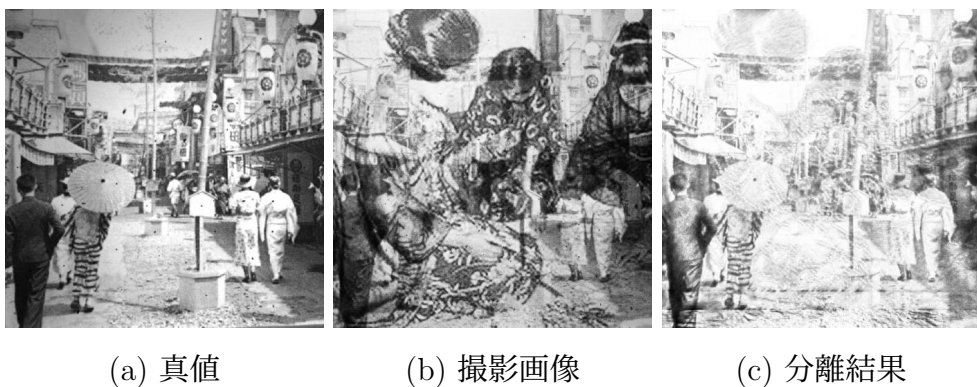


図 23 奥画像の見えの分離

6.2 貼り付いた写真乾板の見えの分離

多視点画像と提案手法を用いて、本研究の目的である図 1 に示した貼り付いた写真乾板の見えの分離を行った。

貼り付いた写真乾板の見えの分離では、カメラを初期位置から X 方向に 14mm ずつ計 2 回移動させ撮影したものと、初期位置から Y 方向に 12mm ずつ計 2 回移動させ撮影したものの計 5 枚を入力画像に用いた。

模擬写真乾板を用いた評価実験とは異なり、貼り付いた写真乾板はネガ画像として観測される。そこで、5 枚の入力画像をポジ画像に変換してから見えの分離を行った。

また、模擬写真乾板を用いた評価実験では、模擬写真乾板に予め赤と青のマーカを付けることで、手前側と奥側の特徴点の区別していた。しかし、貼り付いた写真乾板では、特徴点を区別するマーカを付けることが出来ない。そこで、視差行列を求める際に必要となる手前側と奥側の写真乾板の特徴点を、目視で区別した。

貼り付いた写真乾板では、図 24 に示した入力画像の赤いマーカの 4 点と青いマーカの 4 点を用いて、4.2 節に基づき、手前側と奥側の視差行列を求めた。赤いマーカが手前側の特徴点であり、青いマーカが奥側の特徴点である。



(a) 視点 1



(b) 視点 2



(c) 視点 3



(d) 視点 4



(e) 視点 5

図 24 貼り付いた写真乾板の見えの分離で用いた特徴点

貼り付いた写真乾板の見えの分離結果を、図 25 に示す。分離結果は、手前側と奥側ともに、片側の画像のアーチファクトが残っているが、安定して見えの分離が行えていることが確認できる。また、分離結果より、入力画像では見えていない部分が、見えの分離によって可視化されていることが確認できる。しかし、模擬写真乾板を用いた見えの分離と比較すると、片側の画像のアーチファクトの影響が大きいことが分かる。これは、光源からの入射光が、写真乾板の内部で少し散乱していることが原因として考えられる。また、目視で手前側と奥側の特徴点を区別しているため、誤った特徴点を用いていることも原因として考えられる。



(a) 撮影画像



(b) 手前画像の分離結果



(c) 奥画像の分離結果

図 25 貼り付いた写真乾板の見えの分離

図 25 より，分離結果は不鮮明になっていることが分かる．そこで，図 26 に示した貼り付いた写真乾板の表裏を反転した状態からの観測を追加し，見えの分離を行った．



(a) ネガ画像

(b) ポジ画像

図 26 貼り付いた写真乾板 表裏反転

表裏反転後の見えの分離では，反転前と同じ特徴点を用いて評価することが望ましい．しかし，反転後では，手前側と奥側が重なっているため，その特徴点を用いることができない．そのため，貼り付いた写真乾板の表裏反転後では，図 27 に示したように，反転前とは違う特徴点を用いて，4.2 節に基づき，手前側と奥側の視差行列を求めた．反転後では，反転前で抽出した特徴点から一番近い特徴点を用いている．



(a) 視点 1



(b) 視点 2



(c) 視点 3



(d) 視点 4



(e) 視点 5

図 27 表裏反転した貼り付いた写真乾板の見える分離で用いた特徴点

表裏反転した貼り付いた写真乾板の見えの分離結果を、図 28 に示す。分離結果は、反転前同様に、片側の画像のアーチファクトの影響はあるが、安定して見えの分離が行えていることが確認できる。また、図 25 に示した反転前の分離結果と比較すると、分離精度が低いことが分かる。これは、反転後では、手前側の記録面の前にガラス板があることにより、奥側の記録面が区別し難くなっていることが原因として考えられる。

貼り付いた写真乾板の見えの分離結果より、提案手法を用いることで安定して見えの分離は可能であるが、分離精度は低いことが分かった。今後は、分離精度を向上させるために、提案手法において、透過光のみを抽出する方法や正確に手前側と奥側の特徴点を区別する方法を考えていく必要がある。



(a) 撮影画像



(b) 手前画像の分離結果



(c) 奥画像の分離結果

図 28 表裏反転した貼り付いた写真乾板の見えの分離

7. 奥行き視差の応用例

本章では、奥行き視差の応用例として、2.2節で紹介した合成開口法 [10][11] を用いた雨天時における車載カメラ映像の鮮明化について説明する。7.1節では雨天時における自動運転について述べ、7.2節では雨天時における車載カメラを鮮明化した結果について述べる。

7.1 雨天時における自動運転

近年、自動運転技術に注目が集まっており、自動車だけでなく農業機械や建設機械にも導入されている。自動運転は、車載カメラで周囲の環境を認識し次の行動を予測することで、交通事故の削減や作業の効率化を果たしている。しかし、雨の日といった悪天候では、フロントガラスに付着する雨が視界不良となり、認識と予測が不可能となる。

視界不良となる雨は、フロントガラスに付着する雨粒だけでなく、自動車の振動やワイパーにより雨粒が垂れて発生する雨筋や大雨がフロントガラスに密着して発生する雨膜も原因となる。そのため、雨粒、雨筋、及び雨膜を除去し、雨天時における車載カメラを鮮明化することが課題となる。



図 29 視界不良となる雨

7.2 雨天時における車載カメラ映像の鮮明化

本節では、自動車のフロントガラスを用いた実環境実験を行い、合成開口法による雨除去の有効性を評価する。

7.2.1 項では、実験環境、撮影条件、及び合成開口法の適用方法について述べる。7.2.2 項では、合成開口法による雨除去の有効性を評価するための結果について述べる。

7.2.1 実環境実験

実環境実験では、静止中の自動車のフロントガラスに雨粒、雨筋、及び雨膜を付着させて多視点撮影を行った。雨粒は、自然降雨によりフロントガラスに付着したものをを用いた。雨筋と雨膜は、水が入ったペットボトルをフロントガラスに垂らし、人工的に生成したものをを用いた。

Nikon 製のカメラ D5500 と焦点距離 30mm のレンズを用いて、無限遠に合焦し、フロントガラスから約 15cm 離れた位置で撮影した。また、多視点画像を撮影するために、カメラを手で動かしながら撮影している。

合成開口法では、まず、AKAZE(Accelerated-KAZE)[16]を用いて、多視点画像の特徴点を抽出する。そして、Brute-Force と KNN(K-Nearest Neighbor Algorithm)を用いて、最適な特徴点同士をマッチングさせる。次に、対応する特徴点を用いてホモグラフィ変換を行い、基準となる画像に多視点画像を位置合わせする。最後に、位置合わせを行った多視点画像を加算平均することで、仮想的に大きな開口を実現させ視界不良となる雨を大きくぼかす。



(a) 撮影環境

(b) 雨筋と雨膜の生成

図 30 実環境実験

7.2.2 実験結果

雨粒除去における評価実験では、50枚の多視点画像を用いて合成開口法を適用した。図 31 に雨粒に対する評価実験の結果を示す。適用結果は、フロントガラスに付着した雨粒が除去され鮮明化が行えていることが確認できる。雨筋除去における評価実験では、15枚の多視点画像を用いて合成開口法を適用した。図 32 に雨筋に対する評価実験の結果を示す。適用結果は、フロントガラスに垂れた雨筋が除去され鮮明化が行えていることが確認できる。雨膜除去における評価実験では、30枚の多視点画像を用いて合成開口法を適用した。図 33 に雨膜に対する評価実験の結果を示す。適用結果は、フロントガラスに密着した雨膜が完全にボカしきれず不鮮明なままになっていることが確認できる。この原因として、雨膜による歪みで多視点画像の特徴点が正確に抽出できていないためである。

雨天時における車載カメラ映像を鮮明化した結果より、合成開口法を適用させることで、雨粒と雨筋は大きくボカすことで鮮明化が行えていることが分かった。雨粒と雨筋においては、遅い速度で動作する農業機械や建設機械には、合成開口法を適用させることで、雨天時でも認識と予測を可能にさせることが期待できる。しかし、雨膜においては、合成開口法を適用しても、車載カメラの鮮明化が行えていないことが分かった。今後は、雨膜による歪みを補正する手法を検討することが課題となる。



(a) 基準画像

(b) 合成開口法適用後

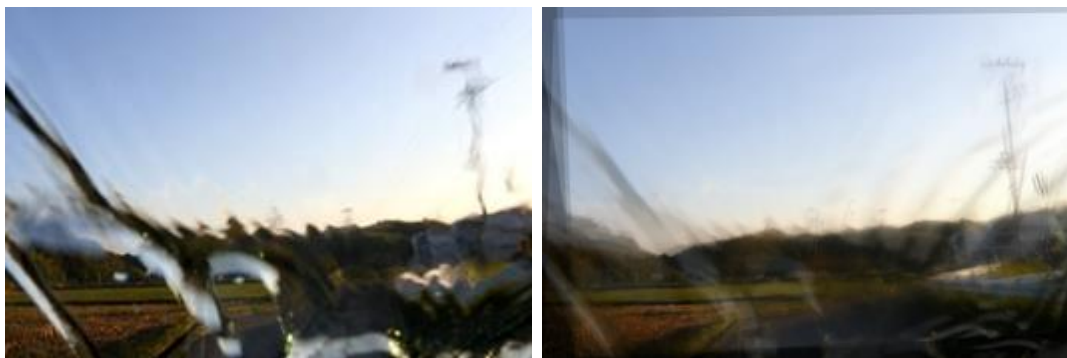
図 31 雨粒除去 実験結果



(a) 基準画像

(b) 合成開口法適用後

図 32 雨筋除去 実験結果



(a) 基準画像

(b) 合成開口法適用後

図 33 雨膜除去 実験結果

8. まとめ

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。貼り付いた写真乾板のそれぞれの記録面は物理的に重なってはならず、厚さ1mm程度のガラス板が挟まれている。そこで、提案手法では、まず、貼り付いた写真乾板に視差が発生するように、多視点撮影を行う。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。合成画像を用いたシミュレーション実験にて、多視点画像と提案手法を用いることで、高い精度で見えの分離が可能であることが示された。模擬写真乾板を用いた実環境実験にて、実環境においても安定して見えの分離が可能であることが示された。そして、最後に、提案手法による貼り付いた写真乾板の見えの分離を行った。貼り付いた写真乾板の手前側と奥側ともに、片側の画像が残っているが、全体的に安定して見えの分離が可能であることが確認された。また、奥行き視差の応用例として、合成開口法を用いた雨天時における車載カメラの鮮明化を行った。雨粒と雨筋は大きくボカせることで鮮明化できたが、雨膜はボカせることができないことが確認された。

今後の展望として、実環境実験における見えの分離の精度の向上が挙げられる。特徴点の抽出方法や散乱現象に関して検討していく必要がある。また、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

本研究を進めるにあたり、懇切なるご指導とご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 向川 康博教授に心より感謝致します。著者が研究に行き詰った時、親身に熱心にご指導いただいたことに、感謝の言葉しかありません。本研究の副査を引き受けて頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 清川 清教授に厚く御礼申し上げます。中間発表では、鋭いご指摘や激励の言葉を頂き、厚く御礼申し上げます。本研究の遂行及び学会の発表にあたり、熱心なご指導を頂いた光メディアインタフェース研究室の舩富 卓哉准教授に心より感謝致します。プログラミング技術に乏しい著者に、幅広い知識をご教授頂き、深く感謝申し上げます。本研究における多大なるご助言だけでなく、論文執筆や学会発表において懇切なるご指導を頂いた 田中 賢一郎助教に心より感謝致します。本研究における理論、学会発表時におけるプレゼンテーション資料を熱心にご指導頂き、深く感謝申し上げます。本研究を行うにあたり、貴重なご助言を頂いた光メディアインタフェース研究室 久保 尋之客員准教授に心より感謝致します。研究面だけでなく、就活面、プライベート面でも、著者を支えて頂き、深く感謝申し上げます。本研究における貴重なご助言だけでなく、研究に対するアドバイスや論文執筆においてもご指導頂いた光メディアインタフェース研究室 櫛田 貴弘さんに厚く御礼申し上げます。また、研究室生活において様々な活動を支えて頂いた、光メディアインタフェース研究室秘書 登 淑恵さんに厚くお礼申し上げます。本研究における貴重なご助言だけでなく、グループミーティングにおいてもご指導頂いた光メディアインタフェース研究室 北野 和哉さんに厚く御礼申し上げます。研究に関する熱い議論だけでなく、日頃から付き合ってくださった光メディアインタフェース研究室同期の皆様に感謝申し上げます。研究に関する議論だけでなく研究室生活において日頃からお世話になった光メディアインタフェース研究室学生の皆様に感謝申し上げます。最後に、私の大学院生活を暖かく見守って頂いた家族と友人に厚く御礼申し上げます。

発表リスト

- [1] 渡辺 佳宏, 田中 賢一郎, 船富 卓哉, 向川 康博: 多視点撮影による貼り付いた写真乾板の見える分離, 情報処理学会研究報告, Vol. 2020-CVIM-223, No. 27, pp. 1-5, 2020

参考文献

- [1] 久留島 典子, 高橋 則英, and 山家 浩樹. 文化財としてのガラス乾板 : 写真が紡ぎなおす歴史像. 272:0–272, 2017.
- [2] 吉原 大志. 被災資料保全の担い手を広げる-歴史資料ネットワークの取り組みから-. 国文学研究資料館紀要, (10):139–153, 2014.
- [3] 天野 真志. 東日本大震災にともなう歴史資料保全の取り組み. 研究報告デジタルドキュメント, 2012(4):1–6, 2012.
- [4] Tsuyoshi Takatani, Takahito Aoto, Kenichiro Tanaka, Takuya Funatomi, and Yasuhiro Mukaigawa. Reconstruction of volumetric reflectance using spatio-sequential frequency correlation imaging. In *SIGGRAPH Asia 2018 Technical Briefs*, SA '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [5] Matthew O’Toole, Supreeth Achar, Srinivasa G Narasimhan, and Kiriakos N Kutulakos. Homogeneous codes for energy-efficient illumination and imaging. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 34(4):35, 2015.
- [6] H. Kubo, S. Jayasuriya, T. Iwaguchi, T. Funatomi, Y. Mukaigawa, and S. G. Narasimhan. Acquiring and characterizing plane-to-ray indirect light transport. In *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–10, 2018.
- [7] Shree K. Nayar, Gurunandan Krishnan, Michael D. Grossberg, and Ramesh Raskar. Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers*, pages 935–944, 2006.
- [8] K. Tanaka, Y. Mukaigawa, Y. Matsushita, and Y. Yagi. Descattering of transmissive observation using parallel high-frequency illumination. In *IEEE*

- International Conference on Computational Photography (ICCP)*, pages 1–8, 2013.
- [9] K. Tanaka, Y. Mukaigawa, H. Kubo, Y. Matsushita, and Y. Yagi. Recovering inner slices of layered translucent objects by multi-frequency illumination. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(4):746–757, 2017.
- [10] Natsumi Kusumoto, Shinsaku Hiura, and Kosuke Sato. Uncalibrated synthetic aperture photography for defocus control. *Information and Media Technologies*, pages 913–921, 2009.
- [11] 三原 基, 浅田 繁伸, 石原 葵, 岩口 堯史, 岡本 貴典, 田中賢一郎, 久保尋之, and 向川康博. 光線空間を用いた画素毎に独立したリフォーカシング. 電気関係学会関西連合大会.
- [12] V. Vaish, B. Wilburn, N. Joshi, and M. Levoy. Using plane + parallax for calibrating dense camera arrays. In *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004.*, volume 1, pages I–I, 2004.
- [13] 三原 基, 岩口 堯史, 田中 賢一郎, 久保 尋之, 長原 一, and 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. 情報処理学会研究報告, 2015-CVIM-195(52):1–4, 2015.
- [14] Dongmin Kim, Suvrit Sra, and Inderjit S. Dhillon. A non-monotonic method for large-scale non-negative least squares. *Optimization Methods and Software*, 28(5):1012–1039, 2013.
- [15] Richard Szeliski. コンピュータービジョン アルゴリズムと応用. 864:0–864, 2013.

- [16] P. F. Alcantarilla, J. Nuevo, and A. Bartoli. Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces. In *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2013.