

## 表示画像の特徴領域抽出に基づく プロジェクターカメラシステムの焦点ボケの自動補正法

小山田 雄仁<sup>†</sup> 齋藤 英雄<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 慶應義塾大学大学院 理工学研究科

プロジェクタとカメラを対にすることで、プロジェクタの仕様環境を拡張するための研究が盛んに行われている。その中で、プロジェクタの投影によって生じる焦点ボケを解消するための技術を Focal Correction と呼ぶ。本稿では、プロジェクタのスクリーン上に生じる焦点ボケの度合いを、特殊な画像の投影を必要としない推定する手法を提案する。焦点ボケの度合いを精度良く推定するために、投影画像中から推定に最適な領域を抽出し、各抽出領域毎にボケの度合いを推定する。また、焦点ボケによる画像劣化を解消するため、推定したボケの度合いに応じた補正を施した画像を投影する。実験により、提案手法を用いることで、特殊な画像の投影を必要とせずに焦点ボケの度合いを推定することが出来、プロジェクタの焦点ボケによる画像劣化を解消することが出来ることを示す。

## Defocus Blur Correction Based on Feature Region Detection for Projector-Camera System

Yuji Oyamada<sup>†</sup>, Hideo Saito<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Science and Technology, Keio University

To use a projector anytime anywhere, a lot of projector-camera based approaches have been proposed. In this paper, we focus on the focal correction technique, one of the projector-camera based approaches, reduces the effect of defocus blur which occurs when a screen is located out of projector's depth-of-field. We propose a novel method for estimating projector defocus blur on a planar screen without any special measuring images. To estimate the degree of defocus blur accurate, we extract sub-region which is well-suited for defocus blur estimation in the projection image and estimate the degree of defocus blur at each extracted region. To remove the effect of defocus blur, we pre-correct the projection image depends on the degree of defocus blur before projection. Experimental results show that our method can estimate the degree of defocus blur without projecting any special images and pre-corrected image can reduce the effect of the defocus blur.

### 1 はじめに

バーチャル物体をあたかも現実空間中に存在するかのよう融合する技術のことを AR(Augmented Reality) と呼ぶ。AR では現実空間とバーチャル空間やバーチャル物体を同時に扱うことが出来るため、単独では体験することが出来ない新しい世界を生み出すことが可能となる。従来の AR ではバーチャル物体やバーチャル

空間の出力装置として液晶ディスプレイや HMD(Head Mounted Display) が用いられていたが、近年プロジェクタを用いてバーチャル物体を重畳表示することで、複数のユーザが同時に体験出来る AR システムの研究がなされている。このプロジェクタを用いた AR を、特に Projection Based AR(Projection Based Augmented Reality) と言い、立体的な形状を持つ物体や移動する物体に対して投影を行うシステムが提案されている。

Yotsukura らはプロジェクタを用いた演技者支援システムを提案した [1]。これは演技者が装着した赤外線 LED 付の仮面をトラッキングし、仮面の位置と姿勢に合わせた 3 次元顔モデルをプロジェクタで投影し続けることで演技の支援を実現している。また、Gupta らは白い本に対して、その本の状態に合わせて本の内容を投影する Universal Media Book を提案した [2]。しかし、プロジェクタは白色の平面スクリーンに対して光軸が垂直になるように投影することを前提として設計されているため、スクリーン物体の形状や使用環境は限定されたものになってしまう。また、プロジェクタは被写界深度が浅い設計となっているため、立体形状を持つ物体や移動する物体に対して投影を行うと、表示された映像上に焦点ボケが生じてしまう可能性もある。

Projector-Camera System の関連研究としては、スクリーンの形状による表示画像の歪みを補正する研究を挙げることが出来る。Chen らは、プロジェクタアレイを実現するために、任意の位置と姿勢にある平面スクリーンに対して格子状のパターンを投影し、撮影画像から投影画像への平面射影変換行列を推定する手法を提案した [3]。また同様に、Tardif らは投影画像と撮影画像の幾何学的な対応関係を画素毎に推定することで、任意形状を持つスクリーンに対する投影を実現した [4]。

有色またはテクスチャを持つスクリーンに対する投影表示の実現を目指す研究も盛んに行われている。プロジェクタで投影する色と実際にスクリーン上に表示される色の対応関係は  $3 \times 3$  の色混合関数で表現出来る。スクリーンに対して単色のパターンを複数枚投影し、プロジェクタとスクリーン間の色混合関数を推定することで、静的なもの [5, 6]、動的なもの [7] に対して、表示したい色を表示させることが出来る。また、Helmholtz Reciprocity の原理を用いて投影画像と表示画像間の光線変換関数を求めることで、全ての光源からの影響を補正する手法 [8] や、人間の視覚特性に関するモデルに基づき撮影画像のコントラストを最大化する補正法も提案されている [9]。

また、表示画像上に生じる焦点ボケの解消を目的とした研究も行われている。一つは、異なる領域に焦点を合わせた複数台のプロジェクタを用いる手法が挙げられる。各プロジェクタが自分の被写界深度内に位置するスクリーンにのみ投影することで、焦点ボケによ

る画像劣化が起こる領域を最小限に抑えるという考え方である [10]。

一方で、一台のプロジェクタのみで焦点ボケを解消するために、投影画像そのものを補正してから投影する手法も提案されている。スクリーン上に生じた焦点ボケの度合いに応じて補正した画像を投影することで、焦点ボケによる画像劣化を解消している [11, 12, 13]。

このように、焦点ボケによる画像劣化を解消する手法は大きく二つに分類することが出来るが、両手法とも焦点ボケの度合いを推定するために、四角形や十字等の基本図形を多数配置した特徴点画像を用いる [10, 11, 12]。特徴点画像はインパルス関数と同様の効果が得られるので焦点ボケの推定には最適だが、スクリーン物体が移動するタイプの Projection Based AR([1, 2]) に対しての適用は不向きである。なぜなら、スクリーン上に生じる焦点ボケの度合いはスクリーンの移動と共に変化するため、スクリーンの位置が変わる度に特徴点画像を投影して焦点ボケの度合いを推定しなければならない。これは、閲覧者にとって不要な映像を見せるという点で、Projection Based AR の利点を損なってしまふ。筆者らは、投影する映像そのものが既知であるというプロジェクタの性質を利用することで、これら従来手法 ([10, 11, 12]) では不可欠だった特徴点画像を用いずに、実際に表示したい画像そのものから、スクリーン上に生じる焦点ボケの度合いを推定する手法を提案した [13]。しかし、投影画像が十分にテクスチャを含んでいない場合や、投影画像そのものがボケを含んでいるような画像である場合、焦点ボケの度合いの推定に大きく誤差が生じていた。

## 2 提案手法

提案手法におけるシステムはキャリブレーション済みのプロジェクタ-カメラとスクリーンからなる。本手法では前処理として、投影画像中から PSF の推定に最適な 4 領域を抽出する。PSF の推定は、各抽出領域毎に、投影画像と表示画像 (投影画像がスクリーン上に表示された画像) を比較する事で行う。スクリーン上に表示されている画像は、スクリーン-プロジェクタの関係によって、幾何学的・光学的に歪んでしまふ。焦点ボケ以外の画像劣化要因を極力減らすために、原画像 (図 1(a)) から、投影画像 (図 1(c)) を生成する。投

影画像(図1(c))を投影する事で、スクリーン上に表示される映像からは幾何学的・光学的な歪みが解消される。また、投影画像の生成と逆の手順をたどることによって、スクリーン上に表示されるであろう予測画像を生成する。次に、投影画像をスクリーン上に表示した表示画像と、予測画像を仮想的に劣化させた複数の劣化画像(比較画像 comparison image)を比較し、表示画像上に生じたPSFの推定を行う。推定したPSFを用いて投影画像に対して補正をすることで事前補正画像(図1(e))を生成する。

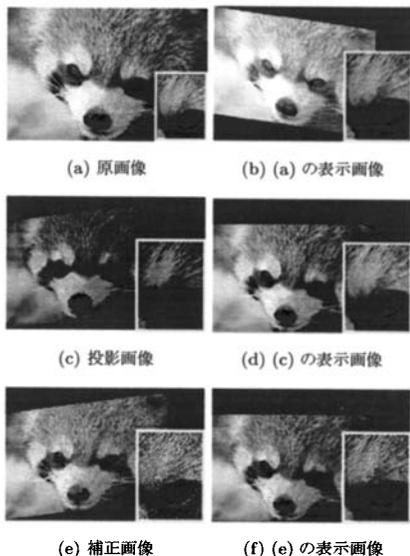


図1: 投影画像と表示画像の幾何学的・光学的関係

## 2.1 PSF 推定領域抽出

本手法が対象としているのは平面スクリーンである。提案手法では異なる4領域で推定したPSFを内挿することで画素毎に異なるPSFを推定する。この4領域の抽出だが、最も単純な方法としては、画像の4隅を利用する方法が考えられる。しかし、画像において被写体は中央に位置することが一般的であり、画像の4隅には背景等が写ることが多い。画像の背景はカメラからの距離が遠く、ピントが合っていない事が多いため、テクスチャをあまり多く含んでおらず、これらの領域はPSFの推定に不向きである事が分かっている

[13]. 精度良くPSFのパラメータを推定するためには、単純に画像の4隅を利用するのではなく、画像中からPSFのパラメータ推定に最適な領域を抽出する必要がある。

まず初めに、PSFのパラメータ推定に最適な領域を定義する。我々が以前提案した手法[?]では、投影画像そのものにテクスチャを多く含まない場合にPSFの推定誤差が生じることが分かった。すなわち、テクスチャを多く含まない領域はPSFのパラメータ推定に不向きであり、テクスチャを多く含む領域はPSFのパラメータ推定に向いていると言える。テクスチャを多く含む領域の抽出方法は、Aizawaらが提案した任意フォーカス画像生成アルゴリズムに基づいている[14]. 投影画像と投影画像を劣化させた劣化画像の差分画像を生成する。差分画像を小領域に分割し、小領域中で最もSAD(Sum of Absolute Difference)の値が高くなる領域をボケの影響を受け易い領域、すなわちPSFのパラメータ推定に最適な領域とする。

図2に例を示す。図2(a)中の赤枠は本手法によって抽出されたPSFの推定に最適な4領域を示す。以前提案した手法(図2(b))では幾何学的に分割した小画像を全てPSFのパラメータ推定に用いていたため、例えば画像の隅や端などにテクスチャを多く含まない領域が存在している。一方で、本手法によって抽出された4領域はテクスチャを多く含んでいる領域であることが分かる。

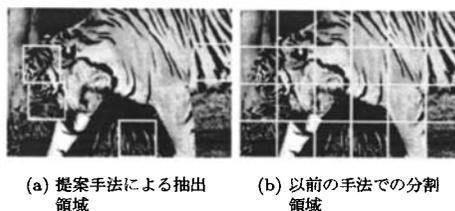


図2: PSFの推定に最適な領域

## 2.2 投影画像・予測画像生成

プロジェクタの焦点ボケ以外の画像劣化の要因を取り除くため、原画像から投影画像・予測画像を生成する。投影画像とはプロジェクタからスクリーンに投影される画像、表示画像とはスクリーン上に表示された画像

をカメラで撮影した画像、予測画像とは仮に焦点ボケが生じなかった時にスクリーン上に表示されるであろう画像を意味する。提案手法の対象は平面スクリーンであるため、原画像と投影画像間の幾何学的関係を $3 \times 3$ の平面射影変換行列 (Homography) で表すことができる。[3]。また、原画像と投影画像間の光学的関係は色変換関数を用いて表すことができる [15]。Homography と色変換関数を適用することで、原画像 (図 1(a)) から投影画像 (図 1(c)) を生成出来、焦点ボケ以外の画像劣化の要因を抑える事が出来る。

### 2.3 PSF パラメータ推定

本研究では、プロジェクタの投影による焦点ボケが分散  $\sigma$  の Gaussian 型 PSF で近似出来るものと仮定し、劣化画像  $g(x, y)$  を原画像  $f(x, y)$  と PSF  $h(x, y)$  の Convolution として  $g(x, y) = f(x, y) * h(x, y)$  のように表す。

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

すなわち、スクリーン上に表示されている画像とは、投影画像に対して PSF を Convolution した画像と等価となる。また、スクリーン上に表示したい原画像は既知であるため、PSF の推定は投影画像と表示画像を比較することで可能となる。そこで、式 (2) で示すように、推定した PSF を原画像に対して Deconvolution した事前補正画像  $\tilde{f}(x, y)$  をプロジェクタで投影すれば、スクリーン上に表示される画像は補正による影響が投影によって打ち消され、原画像と近似した画像となる。

$$\begin{aligned} f(x, y) &\approx \tilde{f}(x, y) * h(x, y) \\ &= [f(x, y) * h^{-1}(x, y)] * h(x, y) \quad (2) \end{aligned}$$

本手法では PSF を推定するために、予測画像に PSF を Convolution した複数の比較画像を用いる。予測画像 (図 3(a)) に対して 0.5, 0.75, 1.0, ... と、異なるパラメータの PSF を Convolution した比較画像  $g_r(x, y)$  (図 3(c)~3(e)) を複数生成する。各比較画像と表示画像間の正規化相互相関 (Normalized Cross Correlation)  $R_{NCC}$  を算出し、最も表示画像と相関の高い比較画像を生成した PSF を表示画像上に生じる

PSF とする。

$$R_{NCC} = \frac{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} (g(x, y) - g_r(x, y))}{\sqrt{\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} g^2(x, y) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} g_r^2(x, y)}} \quad (3)$$

図 3 の例では、 $\sigma$  の値が 2.0 の時の比較画像が、最も表示画像との相関が高い。この表示画像上には  $\sigma$  の値が 2.0 の Gaussian PSF による焦点ボケが生じていると言える。この PSF パラメータ推定を 4 抽出領域に施し、4 抽出領域における PSF のパラメータを推定する。次に推定した 4 パラメータを用い、内挿・外挿することで画素毎の PSF を推定出来る。

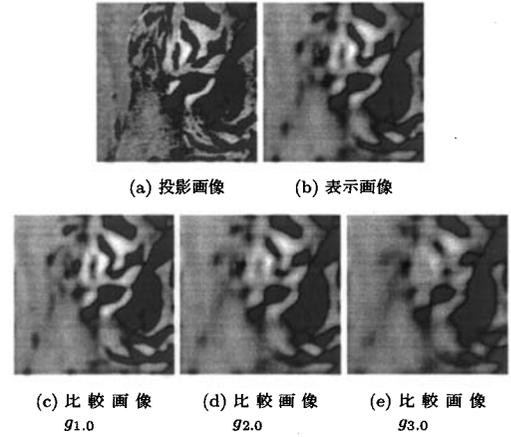


図 3: 抽出領域における PSF パラメータ推定

### 2.4 投影画像の事前補正

推定した PSF を用いて Deconvolution をすれば事前補正画像が得られるわけだが、本手法では Deconvolution によって生じるノイズの増幅を抑えることが出来る Wiener Filtering を用いる。推定した PSF  $H$  の Wiener Filter は

$$H_w = \frac{1}{H} \frac{|H|^2}{|H|^2 + \gamma} \quad (4)$$

となり、 $\gamma$  は信号-ノイズ比を表す。しかし、投影画像を Wiener Filtering した画像中には、プロジェクタが

出力出来る 0~255 の範囲外の明度値を持つ画素が生じてしまう可能性があるため、Wiener Filtering を施した後に画像を正規化しなければならない。この範囲外の明度値の正規化として、式 (5) に示す範囲外をカットする正規化を行う。

$$f_{\text{clamp}}(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } (f(x, y) \leq 0) \\ 255 & \text{if } (f(x, y) \geq 255) \\ f(x, y) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

(  $f$  : 正規化前の明度値  
 $f_{\text{clamp}}$  : 正規化後の明度値 )

### 3 実験と結果

本手法の有用性を示すために、PSF のパラメータ推定及び、補正画像の投影実験を行った。図 4 に示すように、スクリーン前面に設置されたプロジェクタ (EPSON ELP7600) で投影画像を投影し、スクリーン上に表示された画像をカメラ (SONY XCD-X710CR) で撮影する。投影画像は 960×640、表示画像は 1024×768 の解像度である。式 (4) に示した Wiener Filter の  $\gamma$  の値は 0.01 とした。

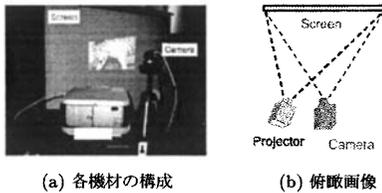


図 4: 実験環境

#### 3.1 推定領域抽出, PSF パラメータ推定

初めに、推定領域抽出及び PSF パラメータ推定の実験を行った。本実験において、焦点ボケの度合いはスクリーン左から右に向かい徐々に増大する。原画像は前景領域 (虎) と背景領域を含むものを使用した。

図 5(a) 中、赤い直線で囲まれた領域は提案手法によって抽出された PSF のパラメータ推定に最適な領域を示し、緑の点線で囲まれた領域は画像の 4 隅を表す。両領域を比較すると、提案手法によって抽出され



図 5: 原画像と表示画像

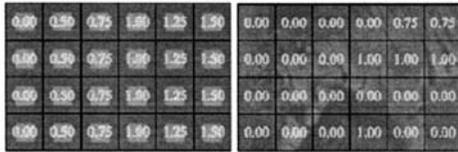
た領域の方がテクスチャを多く含んでおり、画像の 4 隅にはテクスチャがあまり多く含まれていない領域があるということが分かる。

図 5(b) に投影結果である表示画像を示す。推定したパラメータを評価するため、図 5(c) に示す特徴点画像によって推定したパラメータを正解値とする。この実験では、特徴点画像を用いて推定したパラメータ (図 6(a))、我々が以前提案した幾何学的に分割した小領域毎に推定したパラメータ (図 6(b)) と提案手法によって推定されたパラメータ (図 6(c)) を比較する。図 6(a) より、スクリーン上に生じた焦点ボケの度合いが左から右に向け徐々に大きくなっていることが分かる。提案手法によって推定されたパラメータマップの各値を見ると、特徴点画像によって推定されたパラメータと完全には一致しないものの、左から右に向けて徐々に値は大きくなっていることが分かる。一方で、以前提案した手法によって推定されたパラメータは特徴点画像によって推定されたパラメータから大きく異なっている。これらの結果から、PSF の推定に最適な領域の抽出が行え、それによって以前提案した手法より精度よく PSF のパラメータを推定出来た事が分かる。

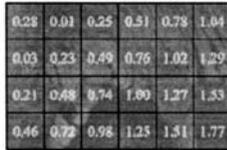
#### 3.2 事前補正画像の投影

次に事前補正画像を投影することで、表示画像中に生じる焦点ボケを解消出来ることを示す。ここでは、提案手法によって補正を施した補正画像 (図 7(c))、原画像 (7(a)) そして我々が以前提案した手法を用いて補正を施した補正画像 (図 7(b)) とその投影結果を比較する。

投影画像 (図 Fig.7(a)~ 図 7(c)) を比較すると、提案手法によって補正された画像が最もエッジが際立った画像となっている事が分かる。特に、虎の毛皮や髭の部分が強ク強調されている。一方、以前提案した手法には補正されている領域とされていない領域の 2 つが



(a) 特徴点画像を用いた手法 (b) 以前提案した手法



(c) 提案手法

図 6: 表示画像から推定した PSF のパラメータマップ

存在する。補正がされていない領域は、すなわち PSF のパラメータ推定に失敗した領域である。各投影画像の表示画像を図 7(d)~図 7(f)、その拡大画像を図 7(h)~図 7(j) に示す。拡大した画像を比較すると、原画像の投影結果は焦点ボケによって毛皮のテクスチャや髭の細かな領域を確認することが出来なくなっている一方、補正画像の表示画像では焦点ボケの影響を解消出来、毛皮や髭を確認する事が出来る。これらの結果から、提案手法による事前補正画像を投影する事で、投影による焦点ボケを解消出来ている事が分かる。

## 4 結論

本論では、プロジェクタの投影スクリーン上に生じる焦点ボケを推定するための最適な領域の抽出方法及び焦点ボケの推定手法を提案した。プロジェクタの投影において、スクリーン上に表示したい画像(投影画像)は既知であり、かつプロジェクタの焦点ボケはレンズの焦点ボケを表す Gaussian 型 PSF で近似出来る。この性質を利用し、スクリーン上に表示したい投影画像と、実際にスクリーン上に投影表示された表示画像を比べることによって、プロジェクタの平面スクリーン上に生じる PSF を推定した。本手法は従来手法([10, 11, 12])では不可欠だった特徴点画像を必要としないため、Projection Based AR の利点を損なわずに PSF の推定が出来る。また、以前提案した手法の問題点である画像のテクスチャに依存したパラメータの推定誤差も抑えることが

出来た。本手法を用いて推定した PSF に基づいて事前補正を施した画像を投影する事で、実際に焦点ボケによる画像劣化を解消出来ることを示した。

## 参考文献

- [1] Tatsuo Yotsukura, Frank Nielsen, Kim Binsted, Shigeo Morishima, and Claudio S. Pinhanez. Hypermask: Talking head projected onto real object. *The Visual Computer*, 18(2):111-120, 2002.
- [2] Shilpi Gupta and Christopher Jaynes. The universal media book: Tracking and augmenting moving surfaces with projected information. In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2006 (ISMAR2006)*, pages 177-180, 2006.
- [3] Han Chen, Rahul Sukthankar, Grant Wallace, and Kai Li. Scalable alignment of large-format multi-projector displays using camera homography trees. In *Proceedings of the conference on Visualization'02 (VIS2002)*, pages 339-346, 2002.
- [4] Jean-Philippe Tardif, Sébastien Roy, and Martin Trudeau. Multi-projectors for arbitrary surfaces without explicit calibration nor reconstruction. In *Proceedings of the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM2003)*, pages 217-219, 2003.
- [5] Shree K. Nayar, Harish Peri, Michael D. Grossberg, and Peter N. Belhumeur. A projection system with radiometric compensation for screen imperfections. In *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PRO-CAMS2003)*, 2003.
- [6] Michael D. Grossberg, Harish Peri, Shree K. Nayar, and Peter N. Belhumeur. Making one object look like another: Controlling appearance

- using a projector-camera system. In *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2004)*, pages 452–459, 2004.
- [7] Kensaku Fujii, Michael D. Grossberg, and Shree K. Nayar. A projector-camera system with real-time photometric adaptation for dynamic environments. In *Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2005)*, pages 814–821, 2005.
- [8] Gordon Wetzstein and Oliver Bimber. Radiometric compensation of global illumination effects with projector-camera systems. In *ACM SIGGRAPH 2006 Research posters (SIGGRAPH2006)*, page 38, 2006.
- [9] Mark Ashdown, Takahiro Okabe, Imari Sato, and Yoichi Sato. Robust content-dependent photometric projector compensation. In *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006)*, page 6, 2006.
- [10] Oliver Bimber and Andreas Emmerling. Multifocal projection: A multiprojector technique for increasing focal depth. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(4):658–667, 2006.
- [11] Michael S. Brown, Peng Song, and Tat-Jen Cham. Image pre-conditioning for out-of-focus projector blur. In *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2006)*, pages 1956–1963, 2006.
- [12] Li Zhang and Shree Nayar. Projection defocus analysis for scene capture and image display. In *ACM SIGGRAPH 2006 Papers (SIGGRAPH2006)*, pages 907–915, 2006.
- [13] Yuji Oyamada and Hideo Saito. Focal pre-correction of projected image for deblurring screen image. In *IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2007)*, 2007.
- [14] Kiyoharu Aizawa, Kazuya Kodama, and Akira Kubota. Producing object-based special effects by fusing multiple differently focused images. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 10(2):323–330, 2000.
- [15] Christopher Jaynes, Stephen Webb, and R. Matt Steele. Camera-based detection and removal of shadows from interactive multiprojector displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 10(3):290–301, 2004.



(a) 原画像

(b) 以前の手法を用いた補正画像

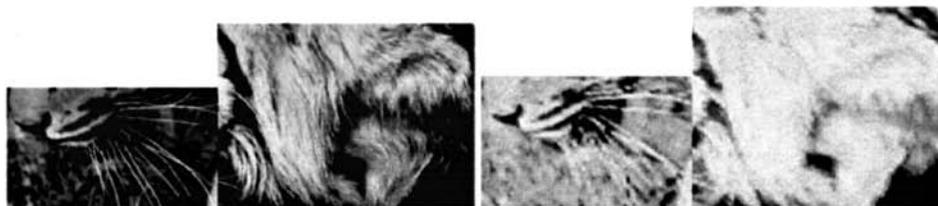
(c) 提案手法による補正画像



(d) (a) の表示画像

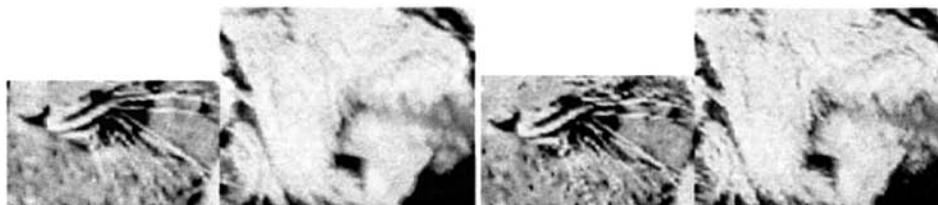
(e) (b) の表示画像

(f) (c) の表示画像



(g) (a) の拡大画像

(h) (d) の拡大画像



(i) (e) の拡大画像

(j) (f) の拡大画像

図 7: 補正画像の投影実験結果: (1 段目) 投影画像 (2 段目) 表示画像 (3,4 段目) 表示画像の拡大画像