

# 画像ベースライトトランスポートを用いた凹面スクリーン表面の 反射ひずみ補償

波部 斉<sup>†\*a)</sup> 佐伯 信雄<sup>††\*\*</sup> 松山 隆司<sup>††</sup>

Distortion Compensation of Light Reflection on Concave Screen  
Based on Image-Based Light Transport

Hitoshi HABE<sup>†\*a)</sup>, Nobuo SAEKI<sup>††\*\*</sup>, and Takashi MATSUYAMA<sup>††</sup>

あらまし 没入型投影ディスプレイシステムなどで用いられる凹面スクリーン上に映像を投影したとき、相互反射や表面反射特性の影響で、入力された映像の明暗パターンがはずんで鑑賞者へ提示される。本論文では、これらの影響を補償し意図する映像を忠実に再現する手法を提案する。原理的には、プロジェクタ（光源）からスクリーン、鑑賞者とたどるライトトランスポートを求め、その逆変換を施すことで反射ひずみ補償が達成され、いくつかの例が提案されている。しかし、それらは本来面積をもった画素同士の対応であるライトトランスポートを、点同士の対応関係として近似的に定式化しているため、近似誤差によって反射ひずみを正しく補償できない場合がある。提案手法は、単純な点対応で生じる、単位入射光を投影したときの直接反射と相互反射の境界部分の急激な明度変化が観測できないという問題に対し、プロジェクタとカメラの間の幾何学的対応関係を取り、幾何変換を行った上でライトトランスポートを求める。これにより、凹面スクリーンの幾何形状に応じたコンパクトなライトトランスポートで反射ひずみ補償が可能となった。

キーワード 没入型投影ディスプレイ、反射ひずみ補償、相互反射、幾何変換、ライトトランスポート

## 1. ま え が き

プロジェクタから任意形状の様々な物体に映像を投影することで、従来得られない効果を生み出し、バーチャリアリティなどに応用する研究が盛んになっている [1]。任意形状の物体に映像を投影した際には、形状の影響を受けた幾何学的な変化と、表面の色合いや反射特性、更には、表面同士で発生する相互反射などによる光学的な変化が発生するため、その補償が技術的課題となる。

代表的な例として、没入型投影ディスプレイ (IPD: Immersive Projection Display) が挙げられる。これは、鑑賞者を取り囲むように配置されたスクリーンに



図 1 没入型ディスプレイシステム  
Fig. 1 Immersive projection display system.

映像を投影し、あたかも映像の中にいるような没入感を与えるシステムであり。様々な規模・形態のものが開発・市販され、都市環境のシミュレーションなどへの応用が進んでいる。図 1 はその一例であり、半球面のスクリーンとプロジェクタを用いた小型の IPD である。IPD で意図したとおりの臨場感あふれる映像を提示するため、先述の幾何学的、光学的な「ひずみ」を補償する手法が数多く提案されている [2] ~ [5]。

本論文では、これら様々な「ひずみ」の中で、幾何

<sup>†</sup> 京都大学大学院工学研究科, 京都市  
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto-shi, 615-8530 Japan

<sup>††</sup> 京都大学大学院情報学研究科, 京都市  
Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-8501, Japan

\* 現在, 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科

\*\* 現在, 日本 SGI 株式会社

a) E-mail: habe@computer.org

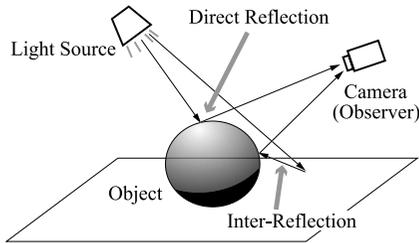


図 2 ライトトランスポート  
Fig. 2 Light transport.

学的なひずみは既に補償されていると考え、スクリーン表面で発生する光学的な反射ひずみの補償に着目する。反射光は、図 2 に示すように直接反射光と相互反射光に大別でき、前者は光源からの光がシーン中の物体表面で 1 回反射して鑑賞者に届いたものであり、後者は物体表面で反射した光が再度別の箇所を照らして鑑賞者に届いたものである。スクリーン表面は高いコントラストを確保するために鏡面反射が生じる素材が用いられており、放出する方向によって反射光強度は大きく変化する。更に、IPD での没入感を高めるため凹面スクリーンを用いると相互反射が必ず発生する。

例えば、図 1 の凹面スクリーンに一樣な明度値をもつ画像を投影したときには図 15 (a) のように部分的に高い輝度をもつ領域が現れる。これは、鏡面反射による直接反射光の強度変化と、相互反射による強度変化が併せて観測されたものである。本論文では、このような反射ひずみを補償し、意図する映像を忠実に再現する手法を提案する。そこでは、先に述べたように主に鏡面反射による直接反射光のひずみと、相互反射光のひずみを同時に補償する。なお、以降の議論では図 1 のような小型の IPD を想定し、1 台のプロジェクタによって凹面のスクリーンに映像を投影する場合を考えるが、複数のプロジェクタを用いた大規模な IPD にも容易に適用可能であると考えられる。

提案手法では、(1) 光源 (プロジェクタ) から鑑賞者に達するまでの光の伝搬 (ライトトランスポート、以下 LT と略) (図 2) を計測した後、(2) LT の逆変換を用いて反射ひずみ補償画像 (意図した画像に忠実な投影像を得るためにプロジェクタに入力する画像) を生成する。(1) では、プロジェクタから投影した「単位入射光」に対する放出光分布を、鑑賞者の位置に設置したカメラで画像として撮影し任意の投影パターンに対する LT を得る [6] ~ [8]。この画像ベースの LT 計測は視点を固定すれば任意の表面反射特性に対応でき、

スクリーンの正確な形状測定が不要となる利点がある。

3. で詳述するように、画像ベースの LT を用いる先行研究では、プロジェクタ画素及びカメラ画素を点として扱い、プロジェクタに入力する画像の輝度値と、カメラで観測される画像の輝度値との関係を求めている。しかし、実際にはそれらの画素は物理的な大きさをもった面であるため、点对応に基づく LT では正しく補償が行えない場合がある。例えば、直接反射光と相互反射光が一つの画素で混じって観測されている部分では、互いの強度が著しく異なるため、そこから求める逆変換では正しい補償ができない。

これに対して提案手法では、事前にカメラ画素とプロジェクタ画素の幾何学的対応関係<sup>(注1)</sup>を求めておき面を基本単位とする LT を用いる。これによって、直接反射光を主に観測する画素と、相互反射光のみを観測する画素を個別に扱えるので LT のより効率的な観測と補償処理が可能となる。従来法に比べて、幾何学的対応関係を求める処理が加わるが、5. に述べるように、それによって LT を表現する単位を大きくとることも可能となるので、全体としては簡便な構成でひずみ補償が可能となる。

以下では、2. で関連研究を概観し、3. では画像ベースの LT 表現における問題点を指摘しそれへの対策を論じる。これらの議論を踏まえ、4. で提案手法の概要を示し、5. でそのアルゴリズムを述べる。最後に、6. で実画像を用いた評価実験の結果を示し、7. でまとめを行う。なお、本論文は筆者らが [9] で示したアイデアをより詳細に述べ、その有効性を示す議論と実験結果を補ったものである。

## 2. 関連研究

コンピュータグラフィックスの分野では、写実的な映像を生成するために LT をシミュレートする手法が多く用いられている。レイトレーシング [10] やラジオシティ [11] はその典型例である。近年では、実画像から LT を計測し、任意の照明環境下での映像を仮想的に生成する手法 (リライティング) [6], [7], [12], [13]、直接反射成分と相互反射成分に分離する手法 [14] や、 $n$  回反射成分を分離する手法 [8] が提案されている。

本論文で取り扱う反射ひずみ補償はこれらの逆問題に相当する。つまり、カメラで得られる映像を鑑賞者

(注1): 対応関係のみが必要であるため、スクリーン形状を求める必要はない。

が見る映像とみなして、LT の逆変換を施してプロジェクタへの入力映像を求める問題である。LT の逆変換を直接求めるのは困難であるため、まず（正の）LT を求めてその逆変換を求めることになる。既存手法は LT を得る手法によって大きく二つに分類される。

まず、センサなどを用いて計測した投影面の形状とその表面反射特性を用いて LT を求め、反射ひずみを補償するもの [15] ~ [18] がある。任意の反射特性の計測は難しいため、これらは表面が完全拡散反射面であると仮定している。他方、投影面の形状を陽に利用せず、画像ベースで LT を求めて反射ひずみを補償する手法が提案されている [19]。この場合はカメラ（鑑賞者）の視点を固定すれば、鏡面反射と拡散反射を含む任意の反射特性に対応できる。本研究で想定する IPD では、スクリーンを完全拡散反射面とみなすことはできないが、鑑賞者は 1 箇所にとどまっていると仮定できるため、後者の画像ベース LT 計測が適している。画像ベース LT の計測及びそれを用いた関連研究については、次章で詳述する。なお、視点移動については付録で論じる。

### 3. 画像ベースのライトトランスポート表現

本研究で用いる画像ベースの LT 表現の原理と既存の応用分野を延べ、それらに共通する問題点とそれに対する一般的な対策を論じる。

#### 3.1 画像ベース LT を用いた関連研究

[8], [20] で詳しく論じられているように、シーンを構成する物体が小さな面の集合で構成されるとすると、シーンからカメラに向かって放出される光の分布（放出光分布） $L_{out}$  と、光源からシーンに入射する光の分布（入射光分布） $L_{in}$  はそれぞれ離散的に表現することができ、その間の関係は、

$$L_{out} = T L_{in}, \quad (1)$$

と記述できる。ここで、 $T = [t_1 t_2 \dots]$  は、シーンに対してレーザ光などの単位入射光を照射して得られたインパルス拡散関数（Impulse Scattering Function：以下 ISF） $t_i$  をまとめた行列（ISF 行列）である。実システムでは  $L_{in}$  がプロジェクタに入力する画像（以下、プロジェクタ画像）などに相当し  $L_{out}$  がカメラで撮影される画像（以下、カメラ画像）に相当する。

ISF 行列の導出は [8] のようにレーザ光などの単位入射光に対する各 ISF を画像として求める手法が基本となり、その改良として、相互反射の影響が及ぶ範囲

が重ならないプロジェクタ画素を同時に点灯し高速な導出を行う手法 [7]、直接反射成分と相互反射成分それぞれの特性を利用して高速に求める手法 [12], [13] などが提案されている。

ここで、光のもつ線形性より、ISF 行列は様々な放出光分布の基底と考えることができ、ISF 行列によってすべての LT が表現できているといえる。この性質を用いて任意の  $L_{in}$  での  $L_{out}$  を生成するのがライティングである [6], [7], [12], [13]。これに対して  $L_{in} = T^{-1} L_{out}$  を計算して所望の  $L_{out}$  を得る  $L_{in}$  を求めるのが反射ひずみ補償問題である。その例として、Wetzstein らが先述の [7] による LT 計測結果を用いるものを提案している [19]。

#### 3.2 画像ベース LT における近似誤差とその低減

ここまで述べてきたすべての手法は  $L_{in}$  と  $L_{out}$  を離散的に表現している。すなわち、プロジェクタ画像及びカメラ画像の（面積をもった）各画素の中の光分布を一つのスカラ値で代表させ、その関係を ISF 行列で「近似的に」表現している（図 3）。この離散化の単位は必ずしも画素と等しい必要はなく、更に大きい領域を単位としてもよい。したがって以降では画素ではなく「LT 単位」と呼び、プロジェクタとカメラどちら側かを明示する際には「カメラ側 LT 単位」のように呼ぶことにする。

投影過程を考えると、投影側のプロジェクタでは画

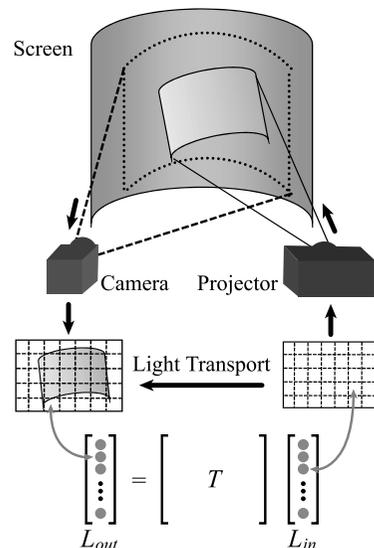


図 3 画像ベースライトトランスポート  
Fig. 3 Image-based light transport.

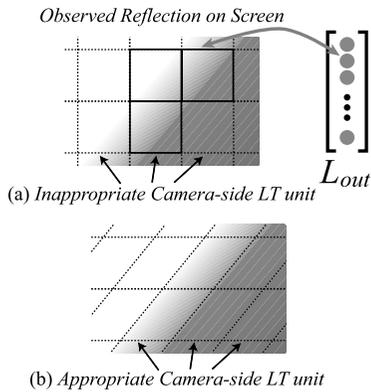


図 4 表面反射を正しく観測するためのカメラ側 LT 単位  
 Fig. 4 Camera-side LT unit for accurate reflection observation.

素より細かな変化は起き得ないため LT 単位をプロジェクト画素と等しくすればよい。一方、観測側のカメラでは LT 単位を適切に選ばないと問題が生じる。図 4 は LT 計測のために単位入射光を投影したときのカメラ画像を示している。(a) のように LT 単位の境界がスクリーン表面での反射が大きく変化する部分に一致しないとき、実線で囲んだカメラ側 LT 単位では、その中に反射光強度が大きく変わる部分が含まれる。LT 単位の中は一つの明度値で代表させるため、この部分で実際の現象との間の誤差が大きくなる。

この誤差を低減するためには、図 4(b) のようにスクリーン表面反射の空間周波数が高い部分にカメラ側 LT 単位の境界を一致させればよい。具体的には (1) 表面の材質・幾何形状が大きく変化する部分と (2) 直接反射と相互反射の境界部分に相当する。(1) は反射特性に直接影響するため明らかであるが、相互反射は散乱の過程を繰り返して直接反射に比べて強度が小さくなるため (2) も注意が必要である。

(1) に関しては反射特性をあらかじめ測定しておく、あるいは、高解像度で一度 LT を計測した上で不必要な部分を統合（低解像度化）していくなどによって対処が可能である。(2) に対しては、カメラ画像上で直接反射に相当する箇所をあらかじめ求めておく、すなわち、プロジェクト画像とカメラ画像の間の幾何的対応関係を求めておく必要がある。

ここまで述べたように、画像ベースのライトトランスポートを用いる場合には、一般に上記 (1) や (2) による誤差の影響を低減する必要があるが、3.1 で述べた [19] をはじめとする関連研究では、高い空間解像度

をもつカメラ側 LT 単位を用いて計測を行っているため、それらを明示的に扱う必要がなく詳しい議論もなされていない。それに対して本論文ではこれらの問題を指摘し、更に、具体的な問題として IPD での反射ひずみ補償において (2) を考慮することで効率的な LT 計測と補償が可能となることを示す。

#### 4. 凹面スクリーン表面の反射ひずみ補償

3. での画像ベースの LT 一般の課題とその対処法に関する議論を踏まえ、本論文で取り上げる IPD での反射ひずみ補償を行う際に生じる課題とその具体的な解決策を述べる。

##### 4.1 凹面スクリーンでの反射とその LT 計測

3.2 で論じたように画像ベース LT では、(1) スクリーン表面の材質・形状と (2) 直接反射と相互反射の差、によって表面反射に生じた大きな変化の部分と LT 単位の境界を一致させる必要がある。

一般に、凹面スクリーンの表面は均一な材質で構成されており、その形状も滑らかになっている。したがって (1) に起因する反射の大きな変化は起こらないとみなしてよい。(2) については、先行研究 [19] のようにプロジェクトやカメラの画素を LT 単位として扱えば問題が生じないが、現実的には以下の問題が生じる。

- LT 計測のためにプロジェクトから単位入射光<sup>(注2)</sup>を投影するが、プロジェクト側 LT 単位を画素とすると十分な相互反射光強度が得られないため、汎用的なカメラでの計測は困難になる。レーザ光を用いることも考えられるがプロジェクトとの位置合せが問題となる。

- スクリーン形状が滑らかであるため、相互反射は空間的に滑らかに変化すると考えられる。これに対して画素を LT 単位とすると規模の大きい ISF 行列が必要になり効率が悪く、逆行列計算も困難になる。

これに対して提案手法では、

(1) 全体の LT を直接反射と相互反射に分けて考え、相互反射については、プロジェクト画像を重なりがない  $M \times M$  のブロックに分割してそれぞれをプロジェクト側 LT 単位とし、

(2) 直接反射と相互反射の境界、つまり、プロジェクト側 LT 単位の境界と一致するようにカメラ側 LT 単位の境界を設定し、プロジェクト側と 1 対 1 に対応するようにカメラ側 LT 単位を設ける。

(注2): 一つのプロジェクト側 LT 単位を点灯したものを。

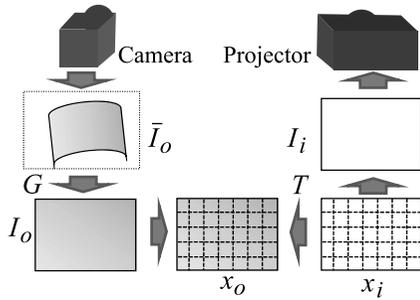


図5 プロジェクタ画像・カメラ画像の関係  
Fig. 5 Relationship between projector images and camera images.

(1) によって単位入射光の強度が増すため汎用的なカメラでも容易に相互反射を観測可能とし、更に(2)によってプロジェクタ側・カメラ側双方でコンパクトなLT単位とする。カメラ側LT単位を大きくしたときには3.2に述べたLTの近似誤差が大きくなるが、(2)の幾何変換によって効率的なLT計測と反射ひずみ補償を実現する。Wetzsteinらも一つのカメラ画素に影響を与えるプロジェクタ画素をクラスタリングしている[19]が、そこでは複雑な形状を扱うためにカメラ画素のクラスタリングは行っていない。それに対し、IPDにおいてはカメラ画素のクラスタリングも可能であり、その場合は上記(2)によるLT単位設定が必要となる。

4.2 反射ひずみ補償アルゴリズムの概要

4.1で述べた基本アイデアを実現するためのアルゴリズムの概要を述べる。まず、画像ブロックをLT単位とするため画像の幾何変換・解像度変換について述べた後、提案手法でのLT表現について述べる。

4.2.1 幾何変換・解像度変換

プロジェクタ画像とカメラ画像のそれぞれについて行う幾何変換・解像度変換を以下に述べる(図5)。

(a) プロジェクタ画像の解像度変換

先に述べたとおり、相互反射を表現するためプロジェクタ画像を  $M \times M$  の画像ブロックに分割してプロジェクタ側LT単位とする。以下ではブロックの個数を  $N_B$  とする。

画素から画像ブロックへの解像度変換を行う際には、画像ブロックに含まれる画素の明度の平均をとって画像ブロックを代表する明度値とすればよいが、逆に、画像ブロックの明度から各画素の明度値を得ると

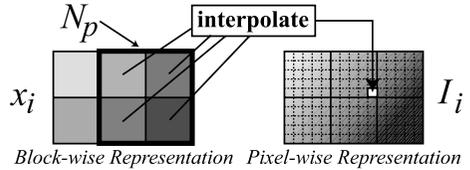


図6 領域から画素への変換  
Fig. 6 Transformation from regions to pixels.

き<sup>(注3)</sup>には注意が必要である。

画像ブロックに含まれるすべての画素に画像ブロックがもつ明度を割り当てると、ブロックの境界部分では明度が不連続となる。このような部分は反射ひずみ補償画像を投影したときの誤差につながるため、図6のように、ある画素の明度を得るときには、その中心座標と近傍4ブロックの中心座標のユークリッド距離を求め、その大きさに応じて各ブロックに与えられた明度を補間して平滑化の効果を得る。

(b) カメラ画像からプロジェクタ画像への幾何変換

先述のとおり、提案手法ではプロジェクタ側LT単位とカメラ側LT単位の幾何的対応をとって、単位入射光に対する直接反射と相互反射が一つのカメラ側LT単位で混じって観測されないようにする。プロジェクタ側LT単位はプロジェクタ画像上のブロックとしたので、それとカメラ画像との対応付けが必要になる。ここでは、よく用いられるグレイコードによる空間コード化法[21]を用いてプロジェクタ画素とカメラ画素の対応を求めておき、カメラ座標系からプロジェクタ座標系への変換を行う。以下ではこの幾何変換を  $G$  で表す。変換後はプロジェクタ画像と同じように画像ブロックへの解像度変換を行う。

以下では、添字  $i, o$  はそれぞれプロジェクタ画像とカメラ画像を指し、 $\bar{I}$  のように上線を付した記号はカメラ座標系でのデータ、上線がないものはプロジェクタ座標系でのデータを指す。また、画像  $I$  に対してその中の画像ブロックの平均明度を要素とする  $N_B$  次元ベクトルを  $x$  で表し、 $x$  から  $I$  への変換を行う際の補間演算(図6)を  $I(p) = \text{intp}(x, p)$  で表す。 $p$  は画素、 $I(p)$  は  $p$  での画素値を示している。補間処理は任意のものが利用可能だが6.の実験ではバイリニア補間を用いた。

4.2.2 凹面スクリーンでのライトトランスポート以上の準備のもとで凹面スクリーン上の相互反射の

(注3): LTの逆変換から反射ひずみ補償画像を求める際に必要になる。

LT を表現する . 入力するプロジェクタ画像を  $I_i$  , 観測するカメラ画像を  $\bar{I}_o$  とすると , 4. 2. 1 で述べたように ,  $\bar{I}_o$  をプロジェクタ座標系に変換した  $I_o = G(\bar{I}_o)$  と  $I_i$  をそれぞれブロックに分割してベクトル  $x_o$  と  $x_i$  を得る . これらの間には ,

$$x_i = T x_o, \tag{2}$$

の関係が成立し , 行列  $T$  が LT を表現する ISF 行列である .  $T$  の具体的な導出については 5. で述べる .

直接反射は式 (2) では正確に表現できない . 凹面スクリーン上での直接反射は鏡面反射成分を多く含むため , 相互反射に比べて空間的に大きく変化するためである . よってここではプロジェクタ画素単位で直接反射の補正係数を求めておく . 具体的には画像  $I_o$  中の画素  $p$  で観測された直接反射と , その画素を含む画像ブロックでの直接反射の平均値との比  $\alpha(p)$  を保持しておく .  $T$  の対角要素がブロック単位の入力と出力の比を示すので , これらを掛け合わせることで画素ごとの反射率が求まる .

## 5. 提案手法

以上の議論を受け , 提案手法の具体的な手順を述べる . 提案手法は大きく分けて (1) キャリブレーションと (2) 理想画像に対する反射ひずみ補償の二つの処理からなる . キャリブレーションでは 4. 2 に述べたプロジェクタとカメラの間の幾何変換  $G$  と LT  $T$  を求める . その処理はプロジェクタ , スクリーンとカメラの組に対して 1 回行われ , その後それぞれの理想画像に対して反射ひずみ補償処理を行う .

### 5. 1 キャリブレーション

#### 5. 1. 1 幾何学的キャリブレーション

先述のとおり , 幾何学的キャリブレーションではグレイコードパターンによる空間コード化法 [21] を用いた . ここでは , スクリーン上の相互反射の影響を低減するため , 赤・緑の 2 色でパターンを構成した . 図 7 に示した投影パターンの例では , 薄い色が緑色に相当し , 濃い色が赤色に相当している . 各々の色についてしきい値処理を行うことで , 相互反射によって偽の色が観測された場合の悪影響を低減できる .

この処理の結果 , 以下のような関係が求まる .

$$I = G(\bar{I}). \tag{3}$$

$G$  がカメラ座標系からプロジェクタ座標系への変換である .

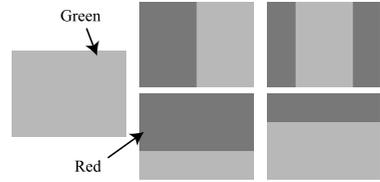


図 7 幾何学的キャリブレーションで使用したグレイコードパターンの例

Fig. 7 Gray code patterns for geometric calibration.

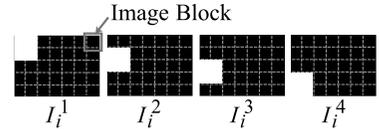


図 8 光学的キャリブレーション用入力画像の例

Fig. 8 Input images for photometric calibration.

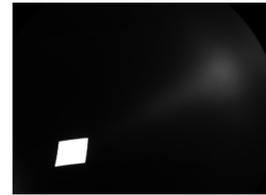


図 9 光学的キャリブレーションで得られる画像の例

Fig. 9 An example of obtained images in photometric calibration.

#### 5. 1. 2 光学的キャリブレーション

次いで ISF 行列  $T$  を求める . 本手法では ,  $T$  を求めるために図 8 のように隣接する四つのブロックがすべて白となるパターンを , ブロックの大きさだけずらしながら投影していく . これによって , あるブロックが白となるパターンが最大四つ存在することになる . 一つのパターンのみでは , ブロック内の相互反射や測定誤差が結果に影響するが , 四つのパターンの平均をとることで , それらを低減する .

具体的な光学的キャリブレーション手法は次のとおりである . 以下で ,  $\text{avg}_i(x_i|c)$  は条件  $c$  を満たす  $x_i$  の平均値を示す .

(1) 図 8 のようなパターン  $I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^P$  と黒画像  $I_i^B$  をプロジェクタから投影して ,  $\bar{I}_o^1, \bar{I}_o^2, \dots, \bar{I}_o^P$  及び  $\bar{I}_o^B$  を撮影する<sup>(注4)</sup> .  $\bar{I}_o^j$  の例を図 9 に示す . 環境光やプロジェクタの光漏れによる黒浮きの影響を除去するために ,  $\bar{I}_o^1, \bar{I}_o^2, \dots, \bar{I}_o^P$  から  $\bar{I}_o^B$  を引き , 更に  $G$  を用いて ,  $I_o^1, I_o^2, \dots, I_o^P$  に変換する ( $I_o^j = G(\bar{I}_o^j - \bar{I}_o^B)$ ).

(注4): カメラのダイナミックレンジをできるだけ大きくするため , 多重シャッタースピード画像 [22] を統合する .

(2)  $I_i^j$  と  $I_o^j$  それぞれをブロックに分割し  $x_i^j$  と  $x_o^j$  を得る .

(3)  $x_i^j$  から  $x_o^j$  への LT は  $N_B \times N_B$  の行列  $T$  を利用して ,

$$x_o^j = T x_i^j, \quad (4)$$

と書ける .  $X_i = [x_i^1 x_i^2 \dots x_i^P]$  ,  $X_o = [x_o^1 x_o^2 \dots x_o^P]$  とおくと  $X_o = T X_i$  となり ,  $X_i$  の一般化逆行列を  $X_i^-$  として  $T = X_o X_i^-$  から  $T$  が求まる .

(4) 4.2.2 で述べたように , 精度良く直接反射のひずみを補償するため , 各画素で直接反射の補正係数を求めておく . ここでは , 画素  $p$  の直接反射は複数の  $I_o^j$  で観測されているため , それぞれについて求まった比の平均値を求める . まず , 準備として ,

$$x_o^{avg}(k) = \text{avg}_j \left( x_o^j(k) \mid x_i^j(k) > 0 \right), \quad (5)$$

により , 各々のブロックでの直接反射光の平均を求める . ここで添字を付けた  $x_o^j(k)$  ,  $x_i^j(k)$  はベクトルの成分 , すなわちブロック内の平均明度を示す . 次いで , 補正係数  $\alpha$  を ,

$$\alpha(p) = \text{avg}_j \left( \frac{I_o^j(p)}{\text{intp}(x_o^{avg}(k_p), p)} \mid x_i^j(k_p) > 0 \right), \quad (6)$$

を求める .  $k_p$  は画素  $p$  が含まれるブロックを示し ,  $I_o^j(p)$  は画素値を示す . この補正係数は 4.2.1 で述べた画像ブロックから画素への変換の結果と実際の観測値との比に相当している .

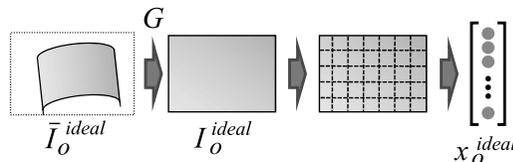
厳密には式 (6) の  $I_o^j(p)$  は相互反射の影響を含むが , 直接反射に比べてその影響は十分小さいため無視できるとする .

### 5.2 反射ひずみ補償

前節の処理で求まった  $G$  ,  $T$  及び  $\alpha(p)$  を利用し , 与えられた理想画像  $\bar{I}_o^{ideal}$  に対して反射ひずみ補償画像  $I_i^{ideal}$  を以下の手順で求める . なお図 6 に示すようにある画素  $p$  の近傍にある四つのブロックの集合を  $N_p$  で表す .

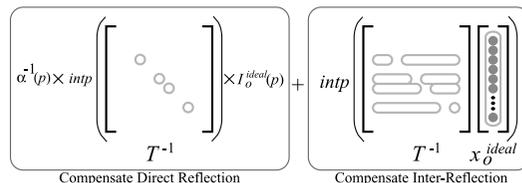
(1)  $\bar{I}_o^{ideal}$  をプロジェクト座標系に変換し  $I_o^{ideal} = G(\bar{I}_o^{ideal})$  を得る . 更に  $I_o^{ideal}$  をブロックに分割して  $x_o^{ideal}$  を得る (図 10 (a)) .

(2) 以降は , 図 10 (b) に示すように , 直接反射と相互反射を分けて取り扱う . そのために , LT  $T$  の逆行列  $T^{-1}$  のうち , 対角成分のみ取り出したベクトルを  $t_d^{-1}$  とし , 対角成分をすべて 0 にしたものを  $T_{nd}^{-1}$  とする .



(a) Conversion from a given ideal image to a block vector

$$I_i^{ideal}(p) =$$



(b) Calculation of a compensated image

図 10 ライトトランスポートを用いた反射ひずみ補償

Fig.10 Compensation of light reflection using light transport.

(3) 直接反射については  $t_d^{-1}$  の要素の中で ,  $N_p$  中のブロックに対応するものを補間し , 更に  $\alpha^{-1}(p)$  を乗じて直接反射のひずみを補償する係数を求める . 具体的には ,

$$I_i^{direct}(p) = \alpha^{-1}(p) \text{intp}(t_d^{-1}, p) I_o^{ideal}(p), \quad (7)$$

によって直接反射のひずみを補償する .

(4) 相互反射については ,  $T_{nd}^{-1}$  を用いて下式を計算する .

$$I_i^{inter}(p) = \text{intp}(T_{nd}^{-1} x_o^{ideal}, p) \quad (8)$$

(5) 最終的に両者を加えて反射ひずみ補償画像とする .

$$I_i^{ideal}(p) = I_i^{direct}(p) + I_i^{inter}(p) \quad (9)$$

ここで  $I_i^{ideal}(p)$  は非負の数となる保証はなく , 負の値をもつこともあり得る . 「負の光源」は物理的に実現できないため , 我々の実装では  $I_i^{ideal}(p)$  が負になっている場合は 0 として投影している . [18] でも指摘されているように , これは反射ひずみ補償一般における問題である .

## 6. 評価実験

提案手法の有効性を検証するための実験の結果を示す . 実験は図 11 に示す機器を用いて行った . プロジェクタは HP vp6120 (1024 × 768 画素) , カメラは SONY DFW-VL500 (640 × 480 画素) , スクリー



図 11 評価実験を行った環境  
Fig. 11 Experimental setup.

ンは松下電気 Cyberdome1800 に付属のもの（直径 180 cm）を使用した。

### 6.1 予備実験

まず、提案手法の基本アイデアの有効性を確認する予備実験の結果を示す。4.1 で述べたように、提案手法ではプロジェクタ画素を  $M \times M$  に分割して相互反射の LT を表現する。その近似誤差や測定効率を確認するために、いくつかの  $M$  に対して単位入射光をカメラで観測した  $\bar{I}_o$  をプロジェクタ座標系へ変換して  $I_o$  を得た。相互反射に相当するプロジェクタ側 LT 単位の中で、ブロック  $b$  内の平均輝度値  $m_b = \text{avg}(I_o(p)|p \in b)$  と、 $m_b$  からの平均誤差  $e_b = \text{avg}(|I_o(p) - m_b||p \in b)$  を求めた。その結果を表 1 に示す。ここでは 5.1.2 に述べたように多重シャッタースピード画像を統合して  $\bar{I}_o$  を得ており、輝度値の範囲は 0 から 65535 となっている。

表を見ると、ブロックサイズ  $M$  が小さくなるにつれ誤差  $e_b$  は小さくなっているが同時に平均輝度  $m_b$  も小さくなっている。計測時間はブロックサイズ減少に従って大きくなっている。今回は露光時間などはすべて一定としたためこの増加は LT 観測に必要な画像数増加によるものである。誤差  $e_b$  を更に小さくするために  $M$  を小さくすると、露光時間を長くする必要があり、計測時間が更に増加する。よって、現実的に可能な時間で LT 計測を行うためにはある程度のブロックサイズとすることが必要である。それは近似誤差とのトレードオフになるが、今回の実験では  $M = 64$  を妥当なものとして選択した。

次いで、LT 単位の取り方と近似誤差の関係を見る。図 12 (a) から (c) はプロジェクタ座標系へ変換した撮影画像  $I_o$  とそれをブロックに分割して平均輝度値を

表 1 ブロックの大きさの近似誤差や測定時間などへの影響

Table 1 Affects of block size on approximation error and capturing time.

Block Size (pixel)	Avg. of Intensity $m_b$	Avg. of Error $e_b$	Capturing Time (min)
128	17.9	294.9	14
64	4.1	136.0	47
32	1.5	81.8	177

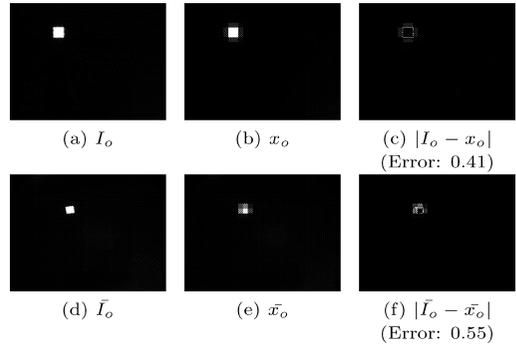


図 12 LT 単位の取り方の近似誤差への影響

Fig. 12 Approximation error caused by bad alignment of LT unit.

求めた  $x_o$ 、及び  $I_o$  と  $x_o$  の誤差を示している。これに対して、(d) から (f) はカメラ座標系の上でブロックに分割して平均輝度値とそれとの差を求めたものである。これを見ると後者では直接反射と相互反射が混ざってしまい、誤差が大きくなっているのが分かる。ここからも、幾何変換によってカメラ側 LT 単位の境界をプロジェクタ側 LT 単位の境界と一致させることの重要性が分かる。

### 6.2 反射ひずみ補償実験

反射ひずみ補償を行う前準備として、カメラ及びプロジェクタ単体の光学的特性を求めた。まず、白色物体を用いてカメラの口径蝕補正データを求め、次いで、プロジェクタから白色パターンを投影してカメラで撮影した。カメラの口径蝕補正データを用いるとプロジェクタの口径蝕補正データが導出できる。プロジェクタについては、プロジェクタ画像の明度値と投影される明度値との関係が一般には非線形になるので、ガンマ補正を無効にしたカメラで様々な明度データを撮影して、プロジェクタの入出力関係を求めた。ここでは、入出力関係は五次の多項式で近似している。これらの結果を用いて光学的特性を補正した画像を以降の処理で利用する。

まず、5.1 で述べた手法を用いてキャリブレーション

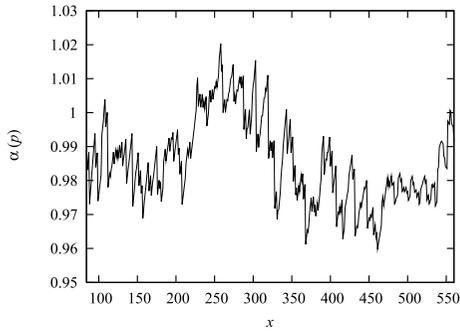


図 13 直接反射補償係数  
Fig. 13 Compensation factor for direct reflection distortion.

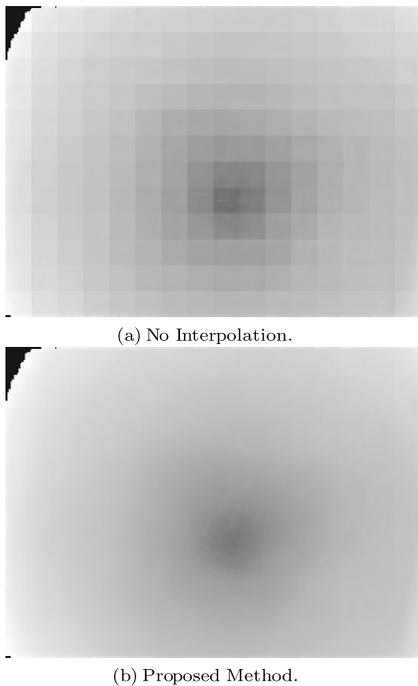


図 14 一様パターンに対する反射ひずみ補償画像  
Fig. 14 Compensation images for an uniform pattern.

ンを行い、 $G, T$  及び  $\alpha(p)$  を得た。このうち、ある横軸に沿って  $\alpha(p)$  の値をプロットした結果を図 13 に示す。この値は 1 に近いがある程度の幅をもっており、直接反射光の補償にはこの係数が必要であることが分かる。

次いで、一様な明度をもつ画像を  $\bar{I}_o^{ideal}$  として反射ひずみ補償画像を得た。反射ひずみ補償画像を図 14 に示す。(b) が本手法で得られたものであり、(a) は領域データから画素へ変換する際の補間演算(式(7)、

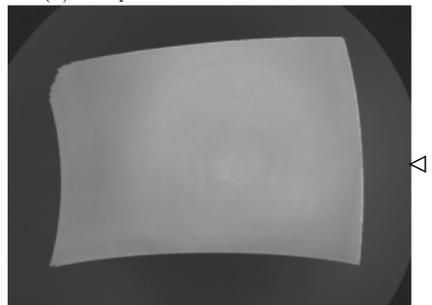
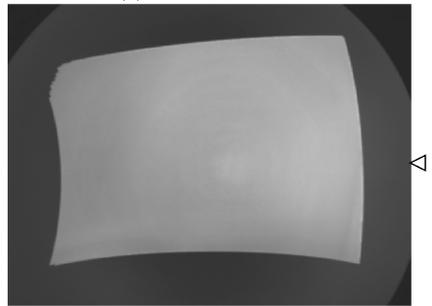
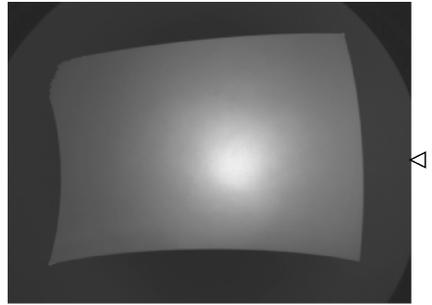
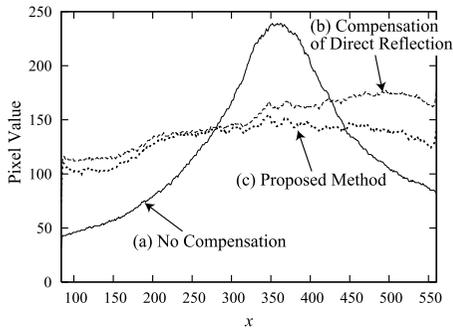


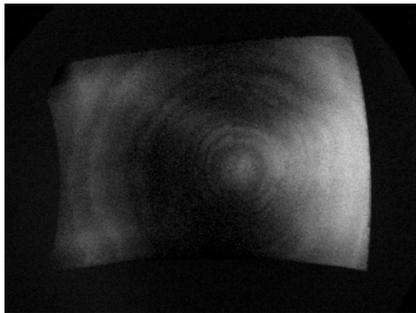
図 15 一様パターンに対する反射ひずみ補償画像の投影結果  
Fig. 15 Compensation results of an uniform pattern.

(8) での関数  $intp$ ) を行わなかった場合のものである。(a) では領域の境界が非常に目立っており、そのまま投影しても良好なデータが得られないのは明らかである。それに対し、(b) では滑らかな画像が得られており、4.2.1 で述べた処理の有効性を示している。なお、反射ひずみ補償画像の端で黒くなっている部分は幾何学的キャリブレーションで対応点が求まらなかった領域であり、それ以降の処理では使用されていない。

反射ひずみ補償画像をスクリーンに投影し、カメラで撮影した結果を図 15 に示す。図中 (a) は  $\bar{I}_o^{ideal}$  をそのまま投影したものであり、画像の中央部の明度が



(a) Pixel values along a horizontal axis



(b) Difference between Fig. 15 (b) and (c)

図 16 反射ひずみ補償の効果

Fig. 16 Effectiveness of compensation of light reflection.

他の部分に比べて著しく高くなっているのが分かる。(b) は 5.2 で述べた  $I_t^{\text{direct}}(p)$  を投影したものであり、相互反射を考慮せずに直接反射ひずみのみを補償した場合に相当する。この場合、(a) に比べて明度のばらつきが大幅に低減していることが分かる。しかし、画像中央より少し右側の明度が高くなっている。これらに対し、(c) が提案手法で得た反射ひずみ補償画像を投影したものであり、(a) や (b) に比べて明度がより一様に近くなっていることが分かる。

詳細に比較するために、図 15 で三角印で示した位置での横軸に沿った明度値の変化を図 16 (a) に示す。また、図 15 (b) と (c) の差の絶対値を図 16 (b) に示す(分かりやすいように 5 倍したものを画素値としている)。図 11 に示すようにスクリーンに向かって左側にプロジェクタを置いたため、画像では右側に相互反射の影響が強くなっているが、提案手法による (c) は (b) に比べて適切に補償できていることが分かる。なお、(c) でもまだ右側の明度値が大きい傾向が残っているが、原因としては口径蝕補正やプロジェクタ出力特性補正での誤差が考えられる。

次いで、一般の画像に対しても提案手法が有効に働



(a) Ideal Image.



(b) No Compensation.



(c) Proposed Method.

図 17 実画像に対する反射ひずみ補償結果

Fig. 17 Compensation results of a real image.

くことを示すために、図 17 (a) に示す風景写真を理想画像として用いて実験を行った。図 17 (b) は理想画像をそのまま投影したものであり、(c) は提案手法を用いて反射ひずみ補償を行ったものである。(b) は反射ひずみによる明度むらが明らかであるが、(c) はそれを補償できていることが分かる。このように、提案手法は一般の画像に対しても有効であることが分かる。

## 7. む す び

本論文では、画像ベースで凹面スクリーン上のライトトランスポートを計測し、表面で発生する反射ひず

みを補償して意図する画像を忠実に提示する手法を提案した。

従来用いられている画像ベースでのライトトランスポート計測では、プロジェクトとカメラの面積をもった画素を点として近似し、その間の光の伝搬を求めている。この場合、カメラ側でライトトランスポートを記述する単位を適切に設定しないと、スクリーン表面の反射を正しく観測できないという問題がある。従来の研究では、カメラで高解像度な単位を設定するためこの問題が顕在化せず、筆者らの知る限り明確な議論がなされている例もない。これに対して本論文ではこの問題を明確に指摘した上で、直接反射と相互反射の境界部分の急激な明度変化を観測できるように、カメラ画像とプロジェクト画像の間の幾何的な対応関係を求め、座標変換を行った上でライトトランスポートを求める手法を提案した。

これにより、性質が異なる直接反射と相互反射を個別に取り扱いでき、適切な大きさをライトトランスポートを計測・表現できるようになった。評価実験では汎用的なプロジェクトとカメラのみで効果的に反射ひずみを補償できることを示した。

今後の課題としては、画像ブロックへ変換する際の最適な大きさの自動決定や、カラー画像での有効性検証などが挙げられる。また、このような反射ひずみ補償手法に対する定量評価手法の確立も課題といえる。

謝辞 本研究の一部は文部科学省「知的資産の電子的な保存・活用を支援するソフトウェア基盤技術の構築」プロジェクトの研究課題「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」の支援により行われた。本研究に関して有益な議論を頂いた京都大学情報学研究所松山研究室の諸氏に感謝する。本研究の実験の一部は同研究室の見市伸裕氏の協力によって行われた。

## 文 献

- [1] M. Grossberg, H. Peri, S. Nayar, and P. Belhumeur, "Making one object look like another: Controlling appearance using a projector-camera system," IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), vol.1, pp.452-459, June 2004.
- [2] R. Raskar, J. van Baar, T. Willwacher, and S. Rao, "Quadric transfer for immersive curved screen displays," Comput. Graph. Forum, vol.23, no.3, pp.451-460, 2004.
- [3] N. Shibano, P.V. Hareesh, H. Hoshino, R. Kawamura, A. Yamamoto, M. Kashiwagi, K. Sawada, and H. Takemura, "A new system for interactive vr applications using a compact hemi spherical IPD (Cyber-Dome)," Proc. Virtual Reality International Conference, pp.101-107, 2004.
- [4] M. Ashdown, T. Okabe, I. Sato, and Y. Sato, "Robust content-dependent photometric projector compensation," Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems, pp.60-67, 2006.
- [5] S. Zollmann and O. Bimber, "Imperceptible calibration for radiometric compensation," Technical Report 859, Bauhaus-University Weimar, 2007.
- [6] A. Wenger, A. Gardner, C. Tchou, J. Unger, T. Hawkins, and P. Debevec, "Performance relighting and reflectance transformation with time-multiplexed illumination," Proc. ACM SIGGRAPH 2005, pp.756-764, 2005.
- [7] P. Sen, B. Chen, G. Garg, S.R. Marschner, M. Horowitz, M. Levoy, and H.P. Lensch, "Dual photography," ACM SIGGRAPH 2005, pp.745-755, ACM Press New York, NY, USA, 2005.
- [8] S.M. Seitz, Y. Matsushita, and K.N. Kutulakos, "A theory of inverse light transport," IEEE International Conference on Computer Vision 2005, vol.2, pp.1440-1447, 2005.
- [9] H. Habe, N. Saeki, and T. Matsuyama, "Inter-reflection compensation for immersive projection display," IEEE Intl. Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams 2007), 2007.
- [10] T. Whitted, "An improved illumination model for shaded display," Commun. ACM, vol.23, no.6, pp.343-349, 1980.
- [11] T. Nishita, and E. Nakamae, "Continuous tone representation of three-dimensional objects taking account of shadows and interreflection," ACM SIGGRAPH, vol.19, no.3, pp.23-30, 1985.
- [12] 那須 督, 日浦慎作, 佐藤宏介, "直接成分と間接成分の分離に基づく照明光の伝搬解析" 情処学研報 CVIM, vol.2007, no.42, pp.153-160, 2007.
- [13] O. Nasu, S. Hiura, and K. Sato, "Analysis of light transport based on the separation of direct and indirect components," IEEE Intl. Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams 2007), 2007.
- [14] S.K. Nayar, G. Krishnan, M.D. Grossberg, and R. Raskar, "Fast separation of direct and global components of a scene using high frequency illumination," ACM Trans. Graphics (TOG), vol.25, no.3, pp.935-944, 2006.
- [15] 向川康博, 西山正志, 尺長 健, "スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現;" 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.7, pp.1448-1455, July 2001.
- [16] O. Bimber, A. Grundhöfer, T. Zeidler, D. Danch, and P. Kapakos, "Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection displays," Proc. Virtual Reality 2006, pp.151-158, 2006.
- [17] Y. Mukaigawa, T. Kakinuma, and Y. Ohta, "A fast compensation method of inter-reflection for pattern

projection onto a non-planar surface,” Proc. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2006), pp.9–10, 2006.

[18] 向川康博, 柿沼孝行, 大田友一, “非平面へのパターン投影のための相互反射の補償,” 情処学論, vol.48, no.SIG 1(CVIM 17), pp.98–106, 2007.

[19] G. Wetzstein and O. Bimber, “Radiometric compensation through inverse light transport,” Pacific Graphics, 2007.

[20] 松下康之, S.M. Seitz, K.N. Kutulakos, “アクティブライティングによる相互反射の解析,” 情処学研報 CVIM, vol.2006, no.115, pp.69–76, 2006.

[21] 田村秀行 (編), コンピュータ画像処理, オーム社, 2002.

[22] 松山隆司, 井宮 淳, 久野義徳 (編), コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 第 2 章新技術コミュニケーションズ, 1998.

## 付 録

### 鑑賞者の視点移動の影響

提案手法は固定カメラが鑑賞者の眼に相当するとして LT 計測を行う。しかし, 厳密には鑑賞者の視点をカメラ視点と一致させることは不可能であり, 鑑賞中に視点が動くことも考えられる。更には, 人間は両眼でみるため視点の異なる映像を鑑賞することになる。これらが提案手法にどれだけ影響するかを確かめるために, カメラの位置を移動させたときの観測像の変化を調べた。プロジェクタのある  $4 \times 4$  画素を白, 残りを黒にして投影し, スクリーンから 2 m の位置に正対したカメラを横方向に動かして輝度値の変化を計測した結果を図 A.1 に示す<sup>(注5)</sup>。

これを見ると, 16 cm 程度の視点移動では輝度に大きな差がないことが分かる。今回用いたスクリーンで

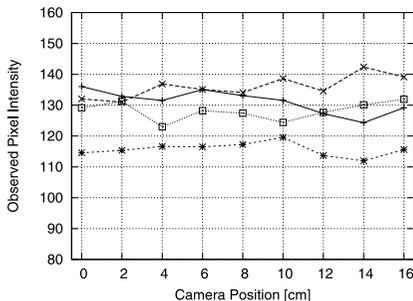


図 A.1 カメラ位置を移動した際の輝度の変化

Fig. A.1 Intensity variation when camera position is changed.

(注5): 図中の 4 本の線はスクリーン上の異なる 4 点に投影した結果を示している。

は鏡面反射成分が広がりをもっているためと思われ, IPD を普通に鑑賞している限りは一つの固定カメラで観測した LT を用いて反射ひずみ補償が可能であると考えられる。

(平成 20 年 1 月 30 日受付, 6 月 15 日再受付)



波部 斉 (正員)

1997 京大・工・電気工学第二卒。1999 同大学院・工・電子通信工学専攻修士課程了。三菱電機(株), 京都大学助手を経て 2006 より奈良先端大助手, 現在, 同大情報科学研究科助教。京都大学博士(情報学)。コンピュータビジョン, 三次元映像メディアの撮影・伝送・表示に関する研究に従事。IEEE Computer Society, 情報処理学会会員。



佐伯 信雄

2003 京大・総合人間卒, 2004 より京大大学院情報学研究科研究支援者, 2006 より日本 SGI(株)に勤務。京都大学在職中に三次元ビデオの撮影・表示に関する研究に従事。



松山 隆司 (正員:フェロー)

1976 京大大学院修士課程了。京大助手, 東北大助教授, 岡山大教授を経て 1995 より京大大学院電子通信工学専攻教授。現在, 同大学院情報学研究科知能情報学専攻教授。2002 学術情報メディアセンター長, 京都大学評議員, 2005 情報環境機構長。2006 情報通信研究機構知識創成コミュニケーション研究センター長。京大工博。画像理解, 分散協調視覚, 三次元ビデオの研究に従事。最近 Hybrid Dynamical System や「人間と共生する情報システム」の実現に興味をもっている。1980 情報処理学会創立 20 周年記念論文賞, 1995 第 5 回国際コンピュータビジョン会議 Marr Prize などを受賞。IAPR, 情報処理学会フェロー, 日本学術会議連携会員。