

# 非平面へのパターン投影のための相互反射の補償

向川 康博<sup>†1</sup> 柿沼 孝行<sup>†2</sup> 大田 友一<sup>†3,†4</sup>

非平面に対しパターンを投影すると、相互反射の影響により正しい見え方にならない。本稿では、凹面部で生じる相互反射の影響を考慮し、投影パターンを光学的に補償する手法を提案する。ラジオシティ法を用いてスクリーンの幾何情報から相互反射の影響を予測し、これを相殺するように投影パターンを補償する。提案手法の特徴は、相互反射の逆問題を解析的に解いているため、反復計算が不要であり、高速に光学補償ができることである。実際に凹面を含むスクリーンにパターン投影を行う実験により、相互反射の影響を大きく軽減できることを確認した。

## A Compensation Method of Inter-reflection for Pattern Projection onto a Non-planar Surface

YASUHIRO MUKAIGAWA,<sup>†1</sup> TAKAYUKI KAKINUMA<sup>†2</sup>  
and YUICHI OHTA<sup>†3,†4</sup>

If a pattern is projected to a non-planar screen, the desired view cannot be correctly observed due to the influence of inter-reflections. This paper proposes a simple but effective technique for photometric compensation in consideration of inter-reflections on a concave surface. The compensation is accomplished by canceling inter-reflections estimated by the radiosity method. The significant advantage of the proposed method is that any iterative calculations are not necessary for the photometric compensation because it analytically solves the inverse problem of inter-reflections. Experimental results show that the influence of inter-reflections is effectively reduced.

### 1. はじめに

近年、プロジェクタの低価格化、小型軽量化が進み、プレゼンテーションや映像の大画面表示だけではなく、様々な用途にプロジェクタが使用されるようになってきた。一般にプロジェクタは白色平面スクリーンやドーム状スクリーンなどの限られた面を投影の対象としているが、部屋の一角、立体造形物など、身の周りのものをスクリーンとして用いることでその用途はさらに広がると考えられる。たとえば、Raskarら<sup>1)</sup>は室内のあらゆる面を投影スクリーンとして利用し、必

要な情報を必要な場所へ表示できるシステムを提案している。このように白色平面への投影を前提とせず、あらゆる面をスクリーンとして利用するためには、大別して2つの問題を解決する必要がある。

1つ目の問題として、スクリーンが白色でない場合への対処がある。壁面に投影する場合のように、スクリーンにテクスチャがある場合、投影される映像にテクスチャが重なり、正しい映像を得ることができない。Nayarら<sup>2)</sup>は、スクリーンのテクスチャに合わせて、投影パターンを補償する手法を提案している。Fujiiら<sup>3)</sup>はこの手法に改良を加え、実時間での補償を可能とした。さらに、このような補償には投影光のダイナミックレンジによる物理的な限界があるため、Wangら<sup>4)</sup>は人間の視覚特性に基づく投影パターンのコントラスト調整を行うことで、この制約を軽減する手法を提案している。これらの手法により、平面上の比較的薄いテクスチャであれば、投影時の色の重なりを軽減でき、スクリーンとして利用可能である。

2つ目の問題として、スクリーンが平面でない場合への対処がある。スクリーン面に対して投影光が斜めに入射すると光量が減衰してしまうため、面の向きに

<sup>†1</sup> 大阪大学産業科学研究所  
The Institute of Scientific and Industrial Research,  
Osaka University

<sup>†2</sup> 筑波大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering, University of Tsukuba

<sup>†3</sup> 筑波大学大学院システム情報工学研究科  
Department of Intelligent Interaction Technologies,  
University of Tsukuba

<sup>†4</sup> 筑波大学計算科学研究センター  
Center for Computational Sciences, University of  
Tsukuba

よって光量がばらつき、正しい見え方とならない。さらに、相互反射の影響も受けるため、ある面への投影光が別の面にも影響を与えてしまう。これらの問題が解決されれば、スクリーンの形状による制約が大幅に軽減されるため、プロジェクタを新しい情報提示装置として利用可能である。たとえば、3次元物体をスクリーンと見なしてパターンを投影する複合現実感システム<sup>5)~8)</sup>が提案されており、反射特性や陰影のシミュレーションが可能になる。また、Grossbergら<sup>9)</sup>は、3次元物体へのパターン投影におけるテクスチャの色補償方法を提案している。しかし、これらのシステムでは、相互反射の影響についてはまったく考慮されておらず、投影パターンが正しく補償されていないため、ユーザに違和感を与えてしまう可能性がある。

3次元物体にパターン投影する際に問題となる相互反射の影響を取り除くために、向川ら<sup>10)</sup>は、実画像に基づく補償方法を提案している。この手法では、スクリーンの3次元形状を用いずに相互反射の影響を調べることができるという利点があるが、正確な補償のためには投影する格子パターンを細かくする必要があり、多くの記録時間と記憶容量を必要とする。最近、Bimberら<sup>11)</sup>は、エネルギーの伝播量をシミュレーションするラジオシティ法<sup>12)</sup>に基づいて相互反射の影響を定式化し、投影パターンを光学的に補償する手法を提案した。しかし、この手法では、補償後の照度を解析的に算出していないため、投影パターンを少しずつ変えながら修正していく反復計算を繰り返しており、計算時間が長いという問題があった。さらに、3次反射以降の多次反射を別々に定式化しており、多次反射まで考慮すると計算時間が増加するため、反射回数を途中で打ち切る必要があった。

そこで、本研究では、これらの問題を解決できる新しい相互反射の補償方法を提案する。Fournierら<sup>13)</sup>は、ラジオシティ法に基づいて、相互反射の影響を考慮して反射率を解析的に算出した。提案手法でも、Fournierらと同様の考えに基づいて、相互反射の影響を補償した照度を解析的に解いているため、反復計算が不要であり、計算時間が短縮できる。さらに、3次反射以降の多次反射も途中で打ち切ることなく完全に考慮することができる。本稿では、まず光学的補償を行うための下準備について述べ、その後、相互反射の補償原理について述べる。

## 2. 非平面へのパターン投影

まず、図1に示すように、凹面にパターンを投影するという状況を考える。この場合、スクリーン平面

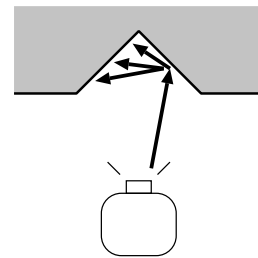


図1 凹面へのパターン投影

Fig. 1 Projection onto the concave surface.

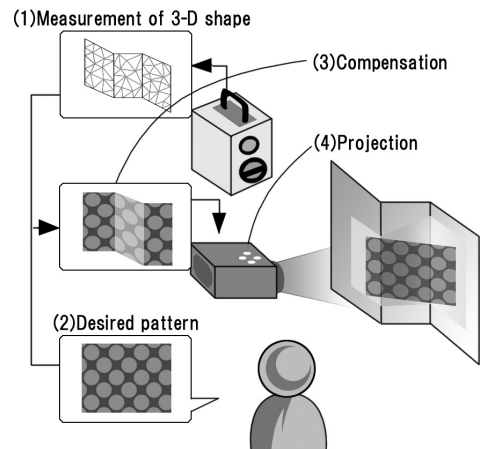


図2 機器構成と補償の原理

Fig. 2 Flow of the compensation process.

での反射光が、再びスクリーン面を照らし、期待どおりの見え方にならないという問題が生じる。これが相互反射の問題である。本研究で想定する機器構成と処理手順を図2に示す。提案手法では、プロジェクタとレンズファインダを1台ずつ使用する。また、問題設定を簡易化するため、スクリーンは鏡面反射を生じない白色のランバート面であるとし、ユーザの視点位置は固定で既知とする。なお、プロジェクタの被写界深度を考慮すると、異なる距離にあるスクリーンに対して同時にフォーカスを合わせることは難しい。そのため、本研究でいう非平面のスクリーンとは、凹凸は許容するが、平面であった場合と比較してプロジェクタとの距離が著しく異なるものではないと仮定する。

これらの問題設定を考慮すると、非平面へのパターン投影のための処理の手順は以下のとおりとなる。

- (1) レンズファインダにより非平面スクリーンの3次元形状を計測し、微小パッチの集合として表現
- (2) ユーザに見せたい理想の投影パターンを用意
- (3) スクリーンにあわせて投影パターンを補償
- (4) 補償パターンを投影

ここで、非平面へパターン投影を行う際、以下の問

題を解決する必要がある．

- (a) 幾何学的な歪み
- (b) 投影不可能な面
- (c) スクリーンのテクスチャ
- (d) 相互反射

これらの問題のうち，(a) に関しては，あらかじめスクリーンの3次元座標とプロジェクタの2次元座標との幾何的キャリブレーションを行っておくことで容易に解決できる．(b) に関しては，複数台のプロジェクタを用意し相補投影を行うことで問題を解決できる<sup>6),8)</sup> ため，本研究では取り扱わず，1台のプロジェクタで対象面すべてを投影できると仮定する．(c) の問題については，投影パターンを補償することでスクリーンのテクスチャを擬似的に隠す手法<sup>2)-4)</sup> が提案されているため，本研究では取り扱わず，非平面の反射率が一样でテクスチャがないと仮定する．そこで，本研究では(d)の相互反射の問題に注目し，2次反射だけでなく3次以上の多次反射も取り扱うことができ，かつ反復計算を必要としない高速な補償法を明らかにする．

### 3. 投影パターンの補償

#### 3.1 投影値と照度の関係

一般に，プロジェクタへの入力信号（以後「投影値」と呼ぶ）とスクリーンの照度は非線形な関係にある．たとえば照度を半分にしたい場合，投影値を単純に半分にするだけではいけない．この非線形な関係は個々の機器に強く依存するため，本研究では照度計を用いて，事前に投影値と照度の関係を調べておく．プロジェクタの正面に，ある一定距離をおいて照度計を固定し，投影値を様々に変化させた場合のプロジェクタ光の照度を実測し，図3のような投影値と照度との関係を計測した．この関係より，本研究の機器構成における投影値  $p$  と，ある一定距離における照度  $L$  は，関数  $f$  を用いることで次式のように定式化できる．

$$L = f(p). \quad (1)$$

ここで， $f$  は単調増加関数であるため，逆引きすることで次式のように逆関数  $f^{-1}$  が定義できる．

$$p = f^{-1}(L). \quad (2)$$

#### 3.2 1次反射の補償

まず，最も単純なシーンとして，スクリーンが単一平面や凸面で構成される場合を考える，このようなシーンでは，相互反射が生じないため，一次反射のみを補償すればよい．ある白色のパッチ  $i$  に対応する投影値が  $p_i$  であり，プロジェクタから照度  $L_i$  でパッチ

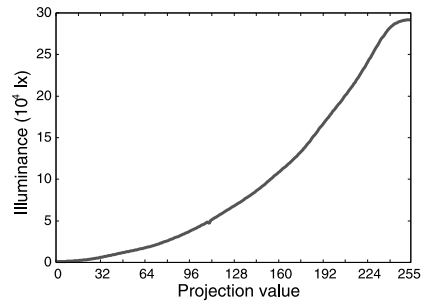


図3 投影値と照度の関係

Fig. 3 Relation between projection value and illuminance.

の法線方向から照らされ，望みの放射輝度  $c_i$  になっていると仮定する．白色面の反射率を  $r$  とすれば，照度と放射輝度はそれぞれ次式で示される．

$$L_i = f(p_i), \quad (3)$$

$$c_i = rL_i. \quad (4)$$

ここで，パッチ  $i$  が投影方向に対して  $\theta_i$  だけ傾いている場合を考える．このとき，放射輝度  $c'_i$  は次式のように入射角度に応じて減衰する．

$$c'_i = rL_i \cos \theta_i. \quad (5)$$

すなわち， $\theta_i$  が既知であれば，減衰の影響をあらかじめ算出することが可能であり，照度を補償できる．補償後の照度  $\hat{L}_i$  は，次式で算出される．

$$\hat{L}_i = \frac{c_i}{c'_i} L_i = \frac{L_i}{\cos \theta_i}. \quad (6)$$

この補償後の照度  $\hat{L}_i$  でパッチを照らすことで，望みの放射輝度  $c_i$  を得ることができる． $\hat{L}_i$  で照らすための投影値  $\hat{p}_i$  は次式で算出できる．

$$\hat{p}_i = f^{-1}(\hat{L}_i) \quad (7)$$

$$= f^{-1}\left(\frac{L_i}{\cos \theta_i}\right) \quad (8)$$

$$= f^{-1}\left(\frac{f(p_i)}{\cos \theta_i}\right). \quad (9)$$

式(7)の過程は図4のように考えることができる．このように，我々の手法では，照度という物理量に基づいて投影パターンの光学的補償をしていることも特徴の1つである．

なお，2章でも述べたように，本研究ではプロジェクタと投影面の距離は，スクリーンが平面であった場合と比較して著しく変化しないと仮定している．そのため，投影面の照度が，プロジェクタと投影面の距離の二乗に反比例して減衰してしまう効果は無視する．これは，照度が変化するほど距離に差がある場合には，そもそもプロジェクタの被写界深度の制限により，正しくフォーカスを合わせることができないためである．投影面との距離が著しく変化する場合には，オクルー

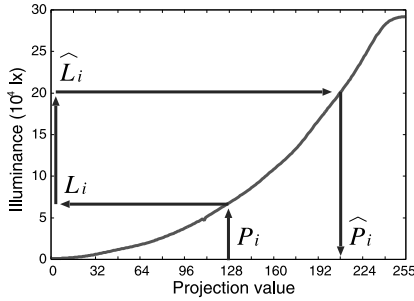


図 4 投影値と照度に基づく光学的補償

Fig. 4 Compensation based on relationship between illuminance and projection value.

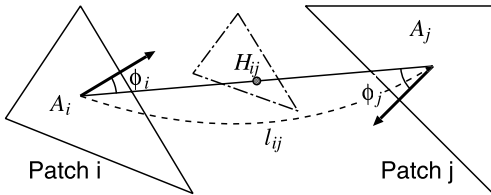


図 5 2つのパッチ間のフォームファクタ

Fig. 5 Form factor between two patches.

ジョンの場合と同様に、複数のプロジェクタで相補的に投影する<sup>6),8)</sup>などの工夫が必要であると考えられる。

### 3.3 相互反射とラジオシティ

次に、より一般的な状況として、相互反射の影響がある場合を考える。シーンの3次元形状が未知の場合には、プロジェクタから格子パターンを投影したり<sup>10)</sup>、レーザ光をスキャンすることで相互反射の影響を直接計測したりする<sup>14)</sup>手法が提案されている。しかし、本研究では投影パターンの幾何変換のために計測した3次元形状が利用できるため、ラジオシティ法<sup>12)</sup>に基づいて相互反射成分を算出する。ラジオシティ法は、各パッチ間でエネルギーが伝播する割合を示すフォームファクタに基づいてシーン全体におけるエネルギーの伝播を計算する手法であり、拡散反射による相互反射の影響を算出できる。式(10)のフォームファクタ  $F_{ij}$  は、パッチ  $i$  が放射するエネルギーのうちパッチ  $j$  が受け取る割合を示し、図5のように  $i-j$  間の距離  $l_{ij}$ 、 $i-j$  間を結ぶベクトルとパッチ  $i, j$  のそれぞれの法線ベクトルが成す角  $\phi_i, \phi_j$ 、 $i$  と  $j$  それぞれの面積  $A_i, A_j$ 、パッチ間での障害物の有無判定係数  $H_{ij}$  から決定される。

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} H_{ij} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{l_{ij}^2} dA_j dA_i. \quad (10)$$

このフォームファクタを用いて、相互反射の影響を考慮した放射輝度  $c'_i$  は次式で求められる。

$$c'_i = r L_i \cos \theta_i + r \sum_j F_{ji} c'_j. \quad (11)$$

なお、フォームファクタは幾何学的形状のみから算出でき、投影パターンやスクリーンの反射率には依存しない。そのため、フォームファクタはあらかじめオフライン処理で計算しておけばよく、その計算コストはパターン投影時のオンライン処理には影響しない。

### 3.4 相互反射を考慮した光学補償

本節では、ラジオシティに基づき、一次反射成分と相互反射成分の両方を同時に補償する手法について述べる。式(11)は、補償を行っていない照度  $L_i$  では、誤った放射輝度  $c'_i$  が得られることを示している。ここで式(12)のように、補償した照度  $\hat{L}_i$  によって正しい放射輝度  $c_i$  が得られている理想的な状態を考える。すなわち、本研究の目的は、補償した照度  $\hat{L}_i$  の算出である。

$$c_i = r \hat{L}_i \cos \theta_i + r \sum_j F_{ji} c_j. \quad (12)$$

Bimber らの手法<sup>11)</sup>では、投影パターンを少しずつ変えながら修正していく反復計算を繰り返す必要があったため、相互反射成分をいくら正確に予想して投影パターンを補償しても、その補償によって相互反射成分が変化してしまい、正しく補償できたことにはならないという問題があった。一方、提案手法では、式(12)を解析的に解くことで、Bimber らの手法の問題を解決する。インバースレンダリング問題を解くために、Fournier ら<sup>13)</sup>はラジオシティ法に基づいて、相互反射の影響を考慮して反射率を解析的に算出した。提案手法でも、Fournier らと同様の考え方に基づいて、相互反射の影響を補償した照度を解析的に算出する。補償した照度  $\hat{L}_i$  は、式(12)より、

$$\hat{L}_i = \frac{c_i - r \sum_j F_{ji} c_j}{r \cos \theta_i} \quad (13)$$

$$= \frac{r L_i - r \sum_j F_{ji} r L_j}{r \cos \theta_i} \quad (14)$$

$$= \frac{L_i - r \sum_j F_{ji} L_j}{\cos \theta_i} \quad (15)$$

$$= \frac{f(p_i) - r \sum_j F_{ji} f(p_j)}{\cos \theta_i} \quad (16)$$

となる。ここで、3.2節は相互反射を考慮していないが、式(4)は単にパッチ  $i$  に対する照度と放射輝度の関係を示しているだけであり、本節においても有効であることに注意されたい。すなわち、式(4)を用いることで、式(13)から式(14)への変形が可能となる。

以上より、パッチ  $i$  に対応する補償後の投影値は、

$$\hat{p}_i = f^{-1}(\hat{L}_i) \quad (17)$$

$$= f^{-1} \left( \frac{f(p_i) - r \sum F_{ji} f(p_j)}{\cos \theta_i} \right) \quad (18)$$

として算出できる。

このように、提案手法は、反復計算をすることなく投影パターンの補償が可能であるため、処理時間が短いことが特徴である。また、式 (12) は 3 次反射以降の多次反射もすべて含んでいるため、Bimber ら<sup>11)</sup> のように反射回数を途中で打ち切る必要がない。高次の相互反射の影響を反復計算なしに解析的に計算できるのは、あらかじめスクリーンの 3 次元形状を計測し、投影値と照度の関係をキャリブレーションしているためである。

なお、投影パターンによっては、補償後の投影値  $p_i$  が負の値になってしまう場合があるが、プロジェクタから負の照度を投影することはできないため、正しく補償ができない。このような場合には、コントラストは低くなるが、黒として表現するゼロレベルを上げて相対的に負の値を表現することで、相互反射を補償することも可能である。

### 3.5 スクリーンモデル

スクリーンの 3 次元形状を表現するパッチ数と相互反射の補償精度はトレードオフの関係にある。原理的には、パッチ数は多いほど補償精度は向上するが、要求される精度と記憶容量に応じて適切に設定する必要がある。ただし、平面で近似できる平坦な部分は、単純に大きなパッチで近似してもいいというわけではない。式 (10) のフォームファクタでは、2 つのパッチ間に障害物があるかないかという二者択一的な判定になっており、部分的な遮蔽が表現できない。そのため、部分的な遮蔽を考慮すると、たとえ平面であっても複数のパッチに分割する必要がある。最適なパッチ分割法については、今後の課題である。

なお、本研究では、スクリーンの反射率は一律と仮定して定式化を行ったが、何らかの方法で反射率を計測できれば、式 (18) における反射率をパッチごとに  $r_i$  と可変にすることで、同じ枠組みで補償が可能であり、テクスチャのあるスクリーンへの応用も可能であると考えられる。

## 4. 実験結果

### 4.1 機器構成

本研究では、図 6 に示すとおり、プロジェクタ 1 台とレンジファインダ 1 台を使用する。プロジェクタには EPSON 製 EMP-74 (2000lm)、レンジファインダにはコニカミノルタ製 VIVID910、照度計にはコニカミノルタ製 T-10 を使用した。スクリーンは、中央部が

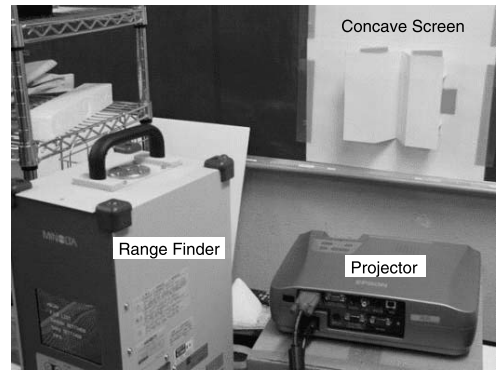


図 6 システム構成

Fig. 6 Overview of the system.

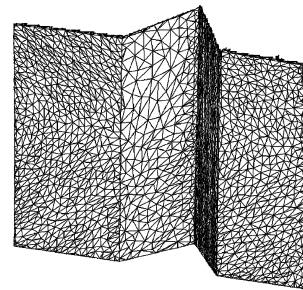


図 7 スクリーンの 3 次元形状計測結果

Fig. 7 Measured 3D shape of the screen.

約 60 度の角度をなす凹面となるように複数の平面を組み合わせ、サーフェイサを塗装することでランバート面に近い状態に加工した。図 7 に示すように、計測したスクリーンの形状は、4,200 枚の三角形パッチで表現されている。なお、本研究では、精度を保証するために専用レンジファインダを用いたが、プロジェクタとカメラで代用することも可能である。

まず、光学的補償の下準備として、シーンの 3 次元形状の計測、フォームファクタの算出、レンジファインダとプロジェクタの幾何的キャリブレーションをしておく。幾何的キャリブレーションのためには、図 8 のように平面に対してプロジェクタから格子パターンを投影し、その平面の 3 次元形状をレンジファインダで計測した。実験に用いたレンジファインダはカメラを内蔵しており、投影された格子点を撮影できるため、シーンの 3 次元座標とプロジェクタの 2 次元座標の関係を求めることができる。なお、安定性を向上させるため、平面の高さを 2 段階に変えてキャリブレーションを行った。

### 4.2 濃淡パターンを用いた実験

まず、単色の投影パターンを用いて、相互反射の補償精度を定量的に評価する実験を行った。非平面に対



図 8 幾何的キャリブレーション  
Fig. 8 Geometric calibration.

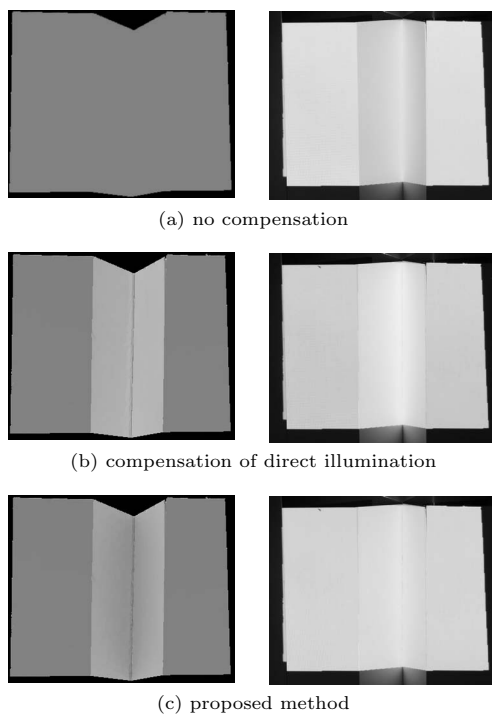


図 9 単色パターンの光学的補償  
Fig. 9 Photometric compensation for monochrome patterns.

して、一様なパターンが投影されているように見せる実験を行った結果が図 9 であり、左側が投影パターン、右側がスクリーンをカメラで撮影した結果である。(a) が光学的補償をいっさい行わない場合を、(b) が一次反射のみ補償を行った場合を、(c) が提案手法によって補償を行った場合を示している。補償をいっさい行わない場合、凹面での輝度低下が著しく、さらに相互反射の影響を受けるため、単色が投影されているようには見えない。一次反射のみについて補償を行っ

表 1 凹面部の明るさの分散  
Table 1 Variance at concave part.

反射補償なし	88.1
一次反射補償のみ	60.5
一次+相互反射補償	21.7

た場合については、凹面での輝度低下は回避されているが、逆に相互反射の影響が顕著に見られるため、必要以上に明るく投影されてしまっている。一方、提案手法ではこのような問題が軽減されており、見かけ上ほぼ単色に投影されている。ここで、定量的な評価のために、スクリーンを撮影した画像中の凹面部分での輝度の分散を算出した結果を表 1 に示す。この結果からも明らかなように提案手法では分散が小さくなっており、明るさがほぼ一様になっていることが分かる。

次に、相互反射補償の効果を視覚的に示すため、左から右に暗くなるグラデーションパターンを投影し、その輝度の空間的变化を調べた。図 10 は投影結果の比較である。この画像中の投影部分を横軸に沿って走査し、輝度変化を調べた結果を図 11 に示す。このグラフは、3 種類の見え方の性質を端的に表現しており、提案手法による補償を行った結果が最も直線に近くなっており、なめらかなグラデーションとなっていることが分かる。

なお、この光学的補償は短時間で処理することができ、この実験の場合では、Pentium4 2.53 GHz の PC を用いて、投影パターン 1 枚ごとの計算が約 0.12 秒であった。この速度は、通常のプレゼンテーションなどの用途には十分である。さらに、スクリーンの 3 次元形状を表現するパッチ数を減らすことで、補償時間をさらに高速化できれば、動画への対応も可能と考えられる。

#### 4.3 カラーパターンを用いた実験

式 (18) では、照度の補償方法を明らかにしている。しかし、プロジェクタから投影される R, G, B 各色に対応する分光分布に重なりがないと仮定すれば、R, G, B それぞれについて投影値と照度の関係を調べて独立に補償を行うことで、カラーパターンも補償できる。

そこで、前節と同じスクリーンを用いて、カラーパターンを用いた光学的補償実験を行った。補償の効果を分かりやすくするため、左半分が R, G, B に 3 分割され、右半分がグレー単色となる投影パターンを用いた。図 12 の左側が投影パターン、右側がスクリーンをカメラで撮影した結果である。(a) が光学的補償をいっさい行わない場合を、(b) が一次反射のみ補償を行った場合を、(c) が提案手法によって補償を行っ

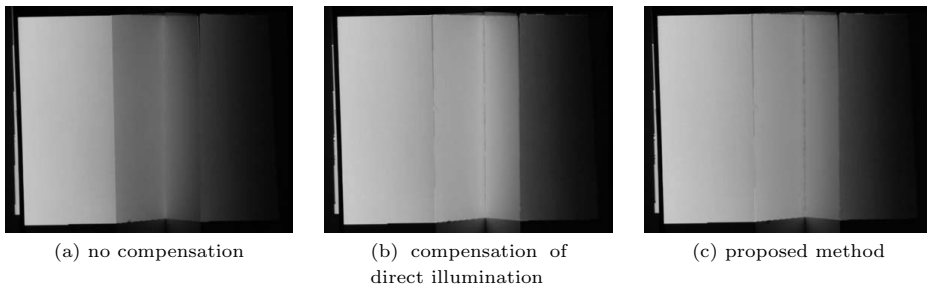


図 10 グラデーションパターンの光学的補償

Fig. 10 Photometric compensation for gradation patterns.

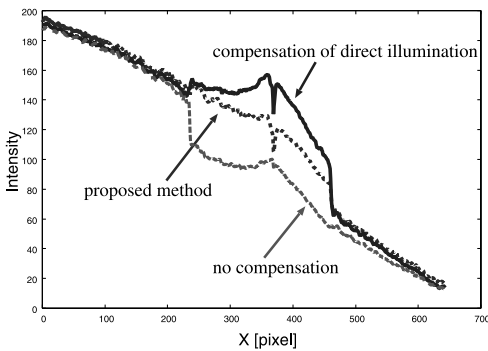


図 11 水平方向の輝度変化

Fig. 11 Transition of intensity along horizontal line.

た場合を示している．光学的補償をいっさい行わない場合，左側の3色が右側のグレー領域に写り込んでいる．一次反射のみ補償した場合には，色の写り込みは解消されず，凹面部で必要以上に明るくなっている．一方，提案手法では，色の写り込みが解消されている．これは，図 12 (c) 上段の投影パターンからも明らかであり，たとえば，緑領域の反対側が，相互反射の影響を受けることを予想してシアンになっている．このパターンを投影すると，スクリーン上ではシアンの領域は緑領域の影響を受け，ちょうどグレーになっていることが分かる．

さらに，色がどのように補償されたかを定量的に評価するために，スクリーンの右半分のグレー領域の色変化を解析した．相互反射の影響が強い図 13 (a) の点線に沿って，色相の変化を調べた結果を，図 13 (b) に示す．提案手法の色相が最も変化が少ないことから，相互反射によって生じる色の写り込みについても効果的に補償できていることが分かる．ただし，提案手法においても，完全に相互反射成分を補償できていない．これは，スクリーンが完全なランバート面でないことなどが原因として考えられる．

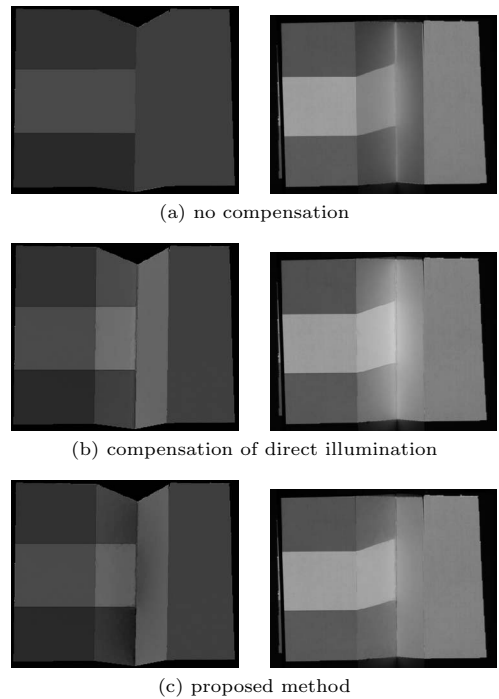


図 12 カラーパターンの光学的補償

Fig. 12 Photometric compensation for color patterns.

#### 4.4 実際の壁面への投影

最後に，提案手法の汎用性を確認するために，室内の壁面にカラー画像を投影するという状況を想定し，補償実験を行った．部屋の角の凹凸面に投影した結果を図 14 に示す．(a) が投影すべきカラー画像である．図 (b), (c), (d) は，それぞれ，光学補償をしなかった場合，1次反射のみ補償した場合，相互反射も補償した場合の壁面を視点とは異なる位置にあるカメラで撮影した結果である．壁には鉛直方向の角が3カ所あるが，(d) では相互反射の影響が軽減されているため，角がほとんど知覚できず，最も正しい見え方となっている．このように，本手法は，現実シーンにおいても有効であることが分かる．

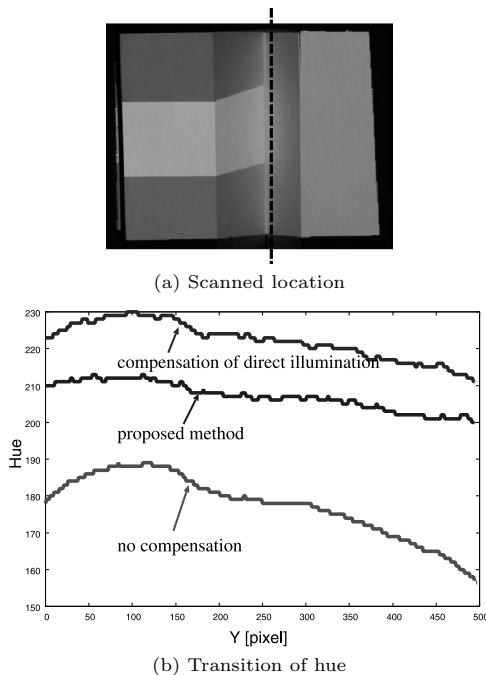


図 13 凹面部のエッジに沿った色相の変化

Fig. 13 Transition of hue along the concave edge.

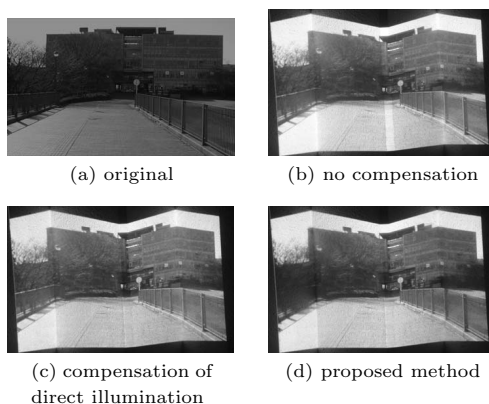


図 14 壁面への投影結果

Fig. 14 Results of projection onto the actual wall.

## 5. まとめ

本稿では、ラジオシティ法に基づいて、非平面へパターン投影する場合に生じる相互反射の影響を補償する手法について述べた。あらかじめ、スクリーンの3次元形状を計測し、フォームファクタを算出しておくことで、入力されたパターンに対し光学的補償を行うことができる。提案手法の特徴は、1次反射・2次反射に限らず3次以上の多次反射も補償できること、相互反射の逆問題を解析的に解くことで反復計算を必要

とせず高速に投影パターンを補償できることにある。これにより、プロジェクタを使用する際に平面であるという制約が軽減され、プレゼンテーションや大規模な展示投影など、様々な用途への可能性が広がることが期待できる。

本研究では、スクリーンをランバート面であると仮定して、拡散反射によって生じる相互反射のみを補償した。スクリーンがランバート面でない場合は、鏡面反射によって生じる相互反射も考慮する必要がある。鏡面反射の強度は視点位置にも依存するためユーザは1人に限定されるが、視点位置を計測できれば、たとえばフォトンマッピング法を用いた解析法<sup>15)</sup>などを応用することで、鏡面反射によって生じる相互反射の影響を抑えることが期待できる。ただし、処理の計算量を考えると、Bimberら<sup>11)</sup>やNayarら<sup>2)</sup>のように、反復計算による方法も有効であると考えられる。

今後の課題として、光学補償の評価方法の検討があげられる。本稿では、スクリーンをカメラで撮影した画像の分散値などによって、効果を定量的に検証した。しかし、ユーザがどのように感じるかという、人間の視覚特性を考慮した評価も必要であると考えられる。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金(課題番号17680018)の補助を受けて行った。

## 参考文献

- 1) Raskar, R., Welch, G., Cutts, M., Lake, A., Stesin, L. and Fuchs, H.: The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays, *Proc. ACM SIGGRAPH*, pp.179-188 (1998).
- 2) Nayar, S.K., Peri, H., Grossberg, M.D. and Belhumeur, P.N.: A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections, *Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2003)* (2003).
- 3) Fujii, K., Grossberg, M. and Nayar, S.: A Projector-Camera System with Real-Time Photometric Adaptation for Dynamic Environments, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2005)*, Vol.1, pp.814-821 (2005).
- 4) Wang, D., Sato, I., Okabe, T. and Sato, Y.: Radiometric Compensation in a Projector-Camera System Based on the Properties of Human Vision System, *Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2005)* (2005).
- 5) Raskar, R., Welch, G. and Chen, W.C.: Table-



- Top Spatially-Augmented Reality: Bringing Physical Models to Life with Projected Imagery, *Proc. International Workshop on Augmented Reality'99 (IWAR'99)*, pp.64–71 (1999).
- 6) Raskar, R., Welch, G., Low, K. and Bandyopadhyay, D.: Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination, *Proc. Eurographics Rendering Workshop (ERGW2001)*, pp.89–102 (2001).
- 7) Mukaigawa, Y., Nishiyama, M. and Shakunaga, T.: Virtual Photometric Environment using Projector, *Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004)*, pp.544–553 (2004).
- 8) Mukaigawa, Y., Nagai, H. and Ohta, Y.: SpaceRelighter—Recording and Reproducing Illumination in a Real Scene, *Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004)*, pp.109–118 (2004).
- 9) Grossberg, M.D., Peri, H., Nayar, S.K. and Belhumeur, P.N.: Making One Object Look Like Another: Controlling Appearance Using a Projector-Camera System, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2004)*, Vol.1, pp.452–459 (2004).
- 10) 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, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.J84-D-II, No.7, pp.1448–1455 (2001).
- 11) Bimber, O., Grundhöfer, A., Zeidler, T., Danch, D. and Kapakos, P.: Compensating Indirect Scattering for Immersive and Semi-Immersive Projection Displays, *Proc. IEEE Virtual Reality Conference (VR2006)*, pp.151–158 (2006).
- 12) Sillion, F. and Puech, C.: *Radiosity and global illumination*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA (1994).
- 13) Fournier, A., Gunawan, A.S. and Romanzin, C.: Common illumination between real and computer generated scenes, *Proc. Graphics Interface '93*, pp.254–262 (1993).
- 14) Seitz, S.M., Matsushita, Y. and Kutulakos, K.N.: A Theory of Inverse Light Transport, *Proc. International Conference on Com-*

*puter Vision (ICCV2005)*, Vol.2, pp.1440–1447 (2005).

- 15) 町田貴史, 竹村治雄, 横矢直和: 実物体のモデル化のための相互反射を考慮した表面反射特性の推定, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol.J88-D-II, No.8, pp.1450–1459 (2005).

(平成 18 年 5 月 3 日受付)

(平成 18 年 11 月 10 日採録)

(担当編集委員 岡谷 郁子)



向川 康博 (正会員)

1997 年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。岡山大学助手, 筑波大学講師を経て, 2004 年 11 月より大阪大学産業科学研究所助教授。コンピュータビジョン, 複合現実感の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEE 各会員。



柿沼 孝行

2006 年筑波大学大学院理工学研究科修了。在学中は, プロジェクトの光学補償に関する研究に従事。修士 (工学)。



大田 友一 (正会員)

1977 年京都大学大学院博士課程修了。京都大学工学部情報工学科助手, 筑波大学電子・情報工学系講師, カーネギーメロン大学計算機科学科客員研究員, 筑波大学電子・情報工学系助教授を経て, 1992 年同教授。2004 年より同大学大学院システム情報工学研究科教授。工学博士。コンピュータビジョン, 視覚情報メディア, 複合現実感の研究に従事。電子情報通信学会フェロー, 国際パターン認識連盟フェロー。