

## 非平面へのパターン投影における相互反射の補償

柿沼 孝行<sup>†</sup> 向川 康博<sup>††</sup> 大田 友一<sup>†††, ††††</sup>

<sup>†</sup>筑波大学大学院理工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>††</sup>大阪大学産業科学研究所 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8 1

<sup>†††</sup>筑波大学大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

<sup>††††</sup>計算科学研究センター

E-mail: kakinuma@image.esys.tsukuba.ac.jp, mukaigaw@ieee.org, ohta@iit.tsukuba.ac.jp

### - 概要

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。これにより、様々な形状の面をプロジェクタのスクリーンとして利用できるようになり、プロジェクタの利用範囲の拡大が期待できる。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 Non-planar Surface

Takayuki Kakinuma<sup>†</sup> Yasuhiro Mukaigawa<sup>††</sup> Yuichi Ohta<sup>†††, ††††</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Science and Engineering, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

<sup>††</sup>The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047, Japan

<sup>†††</sup>Department of Intelligent Interaction Technologies, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

<sup>††††</sup>Center for Computational Sciences

E-mail: kakinuma@image.esys.tsukuba.ac.jp, mukaigaw@ieee.org, ohta@iit.tsukuba.ac.jp

### Abstract-

If a pattern is projected to a non-planer screen, the desired view can not be correctly observed due to the influence of inter-reflections. This paper proposes a technique for photometric compensation in consideration of inter-reflections on concave surface. The compensation is accomplished by canceling inter-reflections estimated by the radiosity method. By using our technique, various concave surfaces can be used as a screen, thus the range of application will be expanded. 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、様々な用途にプロジェクタが使用されるようになった。最近では、プレゼンテーションや映像の大画面表示以外の用途として、プロジェクタの様々な応用が研究されている。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、身の周りのあらゆるものをスクリーンとして用いることでその用途は更に広がると考えられる。例えば、Raskar ら[1]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。壁面の色が一様であれば、ページャや黒板などの色に合わせて色補正できるプロジェクタは既に商品化されている。しかし、壁面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[2]は、スクリーンのテクスチャに合わせて、投影パターンの補償を行う手法を提案している。Fujii ら[3]はこの手法に改良を加え、補償処理を実時間で行うことを可能とした。さらに、このような色補償には投影光のダイナミックレンジによる物理的な補償限界があるため、Wang ら[4]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垂直に入射しない場合、投影光の入射角が浅くなることで光量が減衰してしまう。そのため、面によって光量がばらつき、正しい映像が得られなくなってしまう。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。例えば、3次元物体をスクリーンとみなしてパターンを投影する拡張現実感システム[5]-[8]が提案されており、反射特性のシミュレーションや陰影の再現などを可能とする。このようなシステムでは、反射光の補償が行われていないとユーザに違和感を与えてしまう可能性があるが、これらの手法ではいずれも厳密な補償はされておらず、特に相互反射の影響については全く考慮されていない。Grossberg ら[9]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が、相互反射の起こらない立方体や球などの凸物体を投影の対象としている。

本研究では、非平面にパターン投影する際に問題となる相互反射の影響を、エネルギーの伝播量をシミュレーションすることで補償する手法を提案する。Fournier ら[10]は、相互反射の影響を考慮して反射特性を推定するためにラジオシティ法[11]を採用している。本研究でも同様にラジオシティ法を用いて、拡散反射面で生じる相互反射の影響に関する光学的な補償法を提案する。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

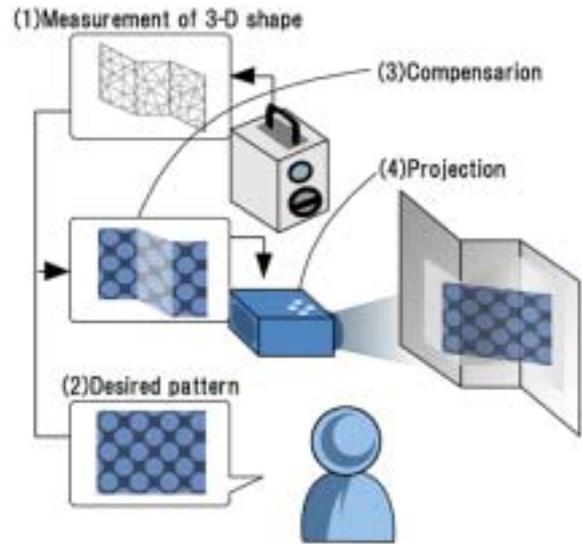


図1 機器構成と補償の原理

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

本研究で想定する機器構成を図1に示す。図のように、非平面のスクリーンに対しプロジェクタとレンジファインダを一台ずつ使用する。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、またユーザの視点位置は固定で既知とする。処理の手順は以下の通りである。

- (1) レンジ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)に関してはスクリーンの形状を手順(1)で計測しており、また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される。(B)に関しては、一台のプロジェクタで対象面全てを投影できると仮定し、本研究では取り扱わない。スクリーンの形状が複雑で投影不可能な面が無視できない場合などは、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[6][8]。

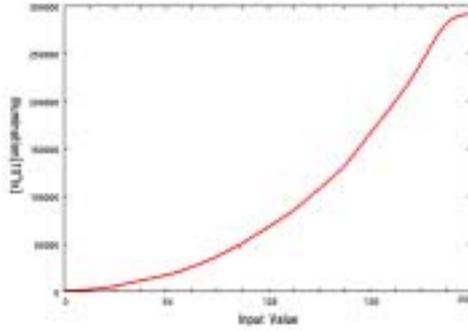


図2 投影値と照度の関係

(C)の問題については、非平面の反射率が一樣でテクスチャがないと仮定し、本研究では取り扱わない。もし面にテクスチャがある場合については、従来手法[2][3][4]を本研究の手法に組み込むことで解決可能と考えられる。

そこで、本研究では未解決である(D)の相互反射の問題に注目し、その補償法を明らかにする。

### 3 反射補償手法

#### 3.1 投影値と照度との関係

一般に、プロジェクタへ入力する信号(投影値)とスクリーンの照度は非線形な関係にある。例えば照度を半分にしたい場合、投影値を単純に半分にすればいいというわけではない。この非線形な関係は個々の機器に強く依存するため、定式化は困難である。そのため本研究では、照度計を用いてある一定距離におけるプロジェクタ光の照度を実測し、図2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と照度を、関数  $f$  を用いることで定式化する。投影値を  $p_i$ 、その時のある一定距離におけるスクリーンの照度を  $L$  とするとき

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

となる。ここで  $f$  は単調増加関数であるため、逆引きすることで逆関数  $f^{-1}$  が定義できる。すなわち

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

となる。

#### 3.2 一次反射の補償

本節では、まず、相互反射が生じない場合について考え、一次反射のみを補償する原理について述べる。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  $L_i$  でパッチの法線方向か

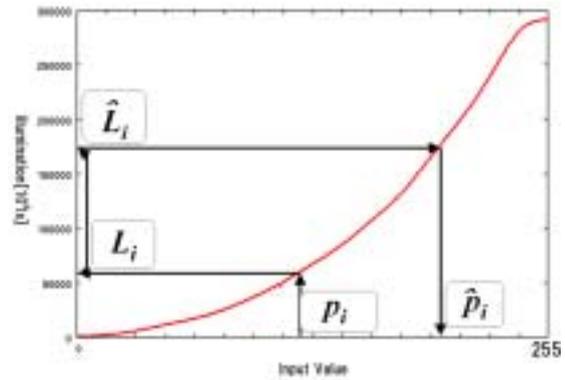


図3 光学的補償の過程

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。

$$\begin{aligned} \hat{p}_i &= f^{-1}(\hat{L}_i) \\ &= f^{-1}\left(\frac{L_i}{\cos \theta_i}\right) \\ &= f^{-1}\left(\frac{f(p_i)}{\cos \theta_i}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)の過程は図3のように考えることができる。この

ように、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が特徴である。

### 3.3 相互反射の表現

次に、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する手法が提案されている[12]。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(8)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4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。

$$F_{ij} = \frac{1}{\pi A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} H_{ij} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{l_{ij}^2} dA_i dA_j \quad (8)$$

フォームファクタは幾何学的形状から算出でき、照度や反射率には依存しない。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。

$$c'_i = rL_i \cos \theta_i + r \sum_j F_{ji} c'_j \quad (9)$$

### 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。本手法では、あらかじめオフライン処理としてフォームファクタを計算しておけばよく、実際のパターン投影時の処理時間が短いことが特徴である。

式(9)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。ここで次式のように、補償した照度  $\hat{L}_i$  によって正しい放射輝度  $c_i$  が得られている状態を考える。

$$c_i = r\hat{L}_i \cos \theta_i + r \sum_j F_{ji} c_j \quad (10)$$

補償した照度  $\hat{L}_i$  は、式(10)より

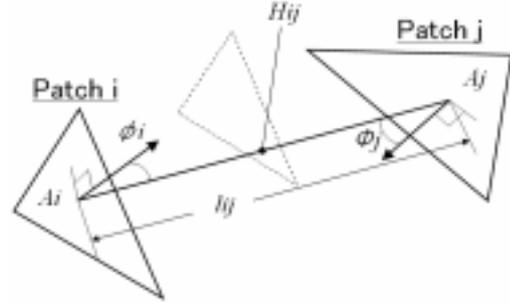


図4 フォームファクタ算出に用いる要素

$$\begin{aligned} \hat{L}_i &= \frac{c_i - r \sum_j F_{ji} c_j}{r \cos \theta_i} \\ &= \frac{rL_i - r \sum_j F_{ji} rL_j}{r \cos \theta_i} \\ &= \frac{L_i - r \sum_j F_{ji} L_j}{\cos \theta_i} \\ &= \frac{f(p_i) - r \sum_j F_{ji} f(p_j)}{\cos \theta_i} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。したがって、パッチ  $i$  に対応する補償後の投影値  $\hat{p}_i$  は

$$\begin{aligned} \hat{p}_i &= f^{-1}(\hat{L}_i) \\ &= f^{-1}\left(\frac{f(p_i) - r \sum_j F_{ji} f(p_j)}{\cos \theta_i}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

として算出することができる。

なお、本研究では、スクリーンの反射率は一様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、パッチごとの反射率を  $r_i$  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

### 4.1 機器構成

本研究では、図1に示した通り、プロジェクター一台とレンジファインダー一台を使用する。プロジェクタには EPSON 製 EMP-74(2000lm)、レンジファインダー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。本研究では、精度を保障するために専用レンジファインダーを用いたが、プロ



図5 プロジェクタ(手前)と非平面スクリーン(奥)

表1 凹面部の分散

	分散
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

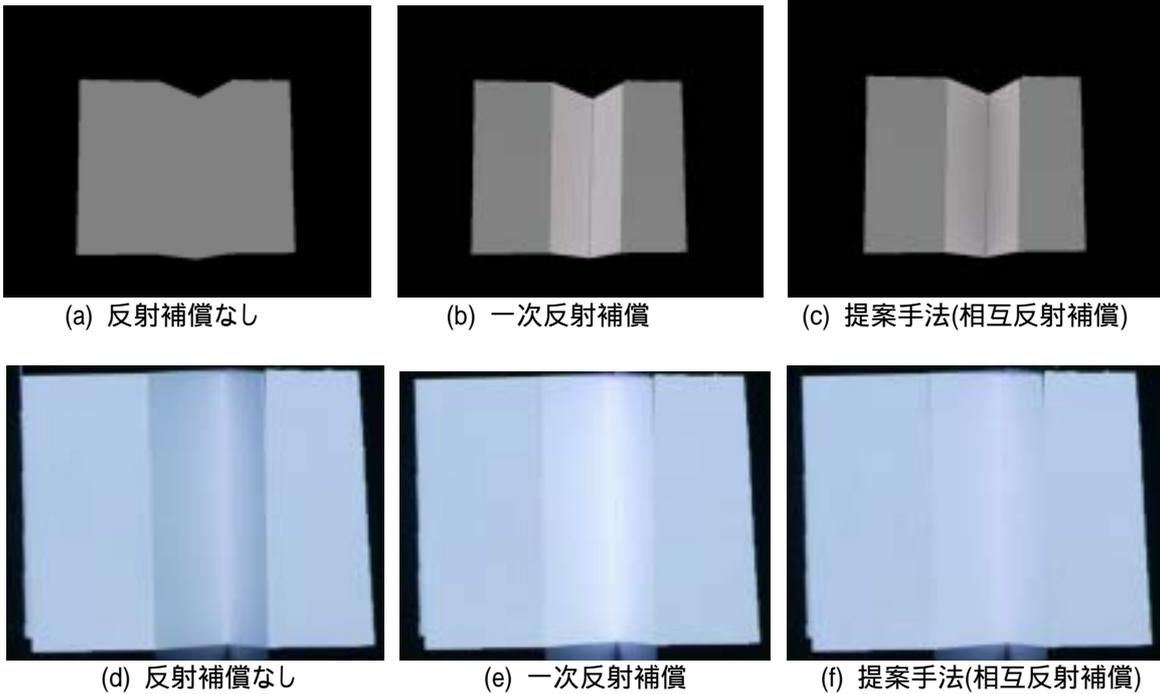


図6 単色パターンの光学的補償

(a) ~ (c)は投影パターン, (d) ~ (f)は投影結果

ジェクタとカメラで代用することも可能である。光学的補償の下準備として、あらかじめレンジファインダとプロジェクタの幾何学的キャリブレーション、シーンの3次元形状の計測、フォームファクタの算出をしておく。これにより、パターン投影を行う際には実時間での光学的補償、および投影が可能となる。

#### 4.2 グレー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を補償し、定量的に評価する実験を行った。図5のように、スクリーンは中央部が約60度の角度を成す凹面となるように2枚の板を組み合わせ、ランバート面に近い状態に加工してある。まずこの非平面に対し、グレーの均一なパターンが投影されているように見える実験を行った。図6(a)~(c)は投影パターンを、(d)~(f)は投影結果を示しており、(a)と(d)が光学的補

償を一切行わない場合を、(b)と(e)が一次反射のみ補償を行った場合を、(c)と(f)が提案手法によって補償を行った場合を示している。補償を一切行わない場合、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、非平面を撮影して画像中の凹面部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、明るさが一様になっていることがわかる。なお、図6(f)でも完全な単色にはならなかったが、この原因としてはスクリーンが完全なランバート面では

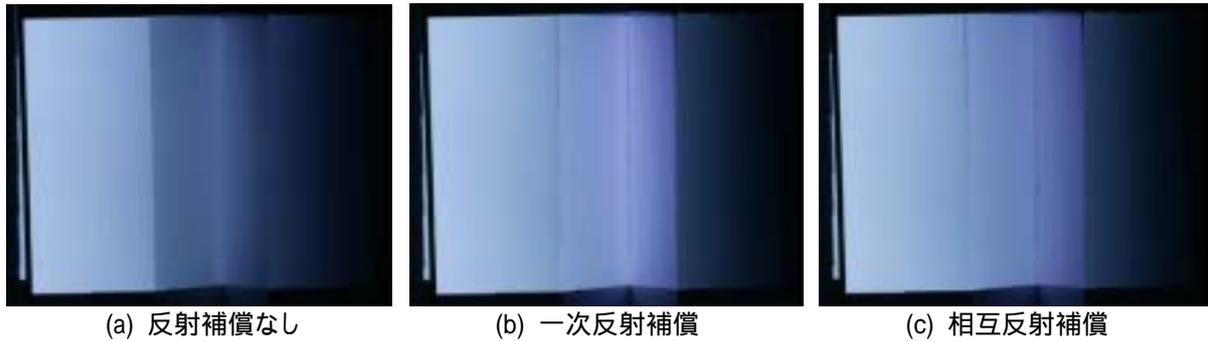


図7 グラデーションパターン投影結果

ないことなどが考えられる。

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、その輝度変化を調べた。図7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8に示す。提案手法による補償を行った結果が最も直線に近くっており、なめらかなグラデーションとなっていることがわかる。

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投影パターン一枚ごとに0.6秒程度の計算時間であった。プロジェクタのダイナミックレンジが十分に広いと仮定すれば、基本的にはあらゆる投影パターンについて補償可能であるため、プレゼンテーションなどへの応用も十分可能と考えられる。

### 4.3 カラーパターンを用いた実験

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、RGBそれぞれについて投影値と照度の関係を調べ、独立に補償を行うことが可能となる。そこで、4.2節で用いたスクリーンに対しカラーパターンを用いた光学的補償実験を行った。結果を図9に示す。図9(d)では凹面部で色が暗くなり、(e)では相互反射の影響を受け明るくなってしまっているが、(f)では相互反射の影響が軽減され、凹面部と非凹面部での明るさの差が小さくなっていることがわかる。RGBそれぞれについて相互反射の影響が軽減されていることから、提案手法がカラー画像に対しても有効であると考えられる。

次に、反射補償の効果について定量的評価を行った。上の実験で獲得した図9(d)~(f)について、図10(a)点線部のように相互反射の影響が大きく現れる箇所を走査し、色相を調べた。図10(b)に示すように相互反射の補償を行ったパターンでは色相の変化が少ないことから、一様色に近い、すなわち相互反射の影響が補償されていると考えられる。

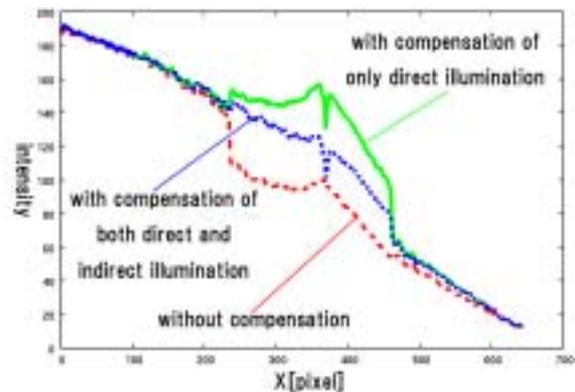


図8 グラデーションパターンの輝度変化

### 4.4 一般壁面への投影実験

最後に、提案手法の汎用性を確認するために、室内の壁面に写真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11に示す。図中(c)では相互反射の影響が軽減され、最も正しい映像が得られた。

## 5 まとめ

本稿では、非平面へのパターン投影における相互反射の問題について、ラジオシティ法に基づいてその影響を補償する手法について述べた。スクリーンの3次元形状をあらかじめ計測し、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反復計算することなく光学的補償を行うことができる。投影パターン一枚あたりの計算量も0.6秒と比較的少ないため、実時間での補償も十分可能と考えられる。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、さまざまな用途への可能性が広がることを期待できる。

今後は鏡面反射についても考慮し、様々な反射特性に対応した光学的補償を行う必要があると考えられる。

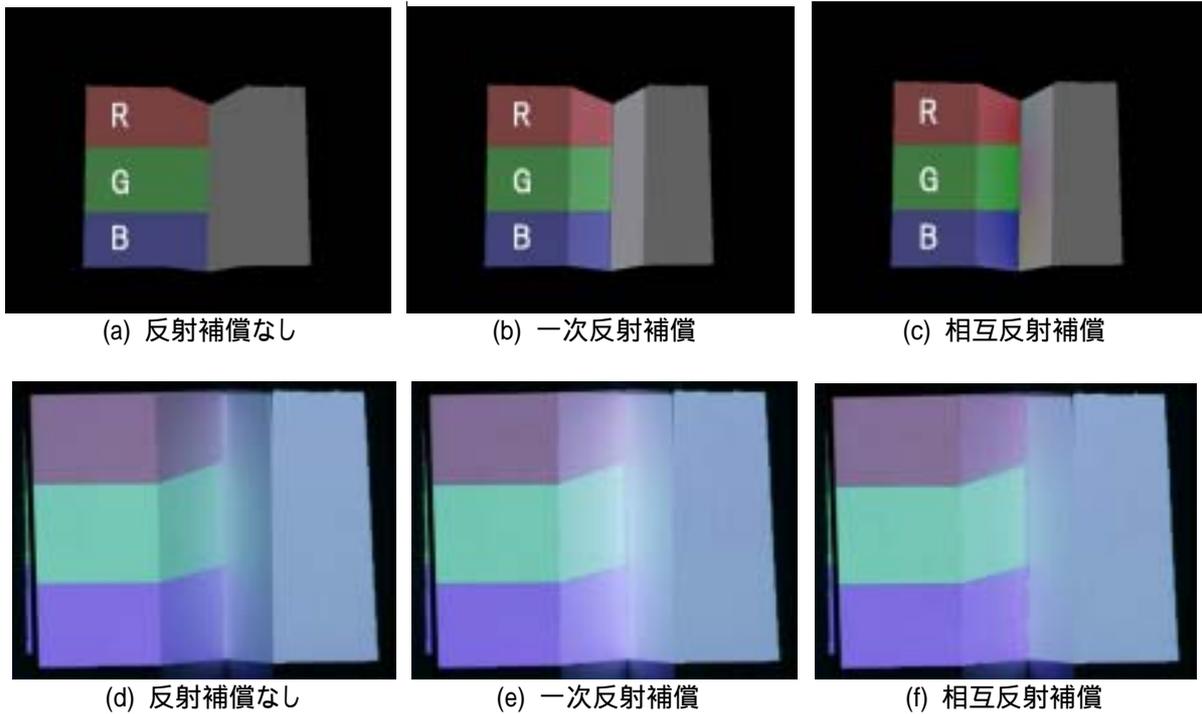


図9 カラーパターンの光学的補償  
(a)～(c)は投影パターン, (d)～(f)は投影結果

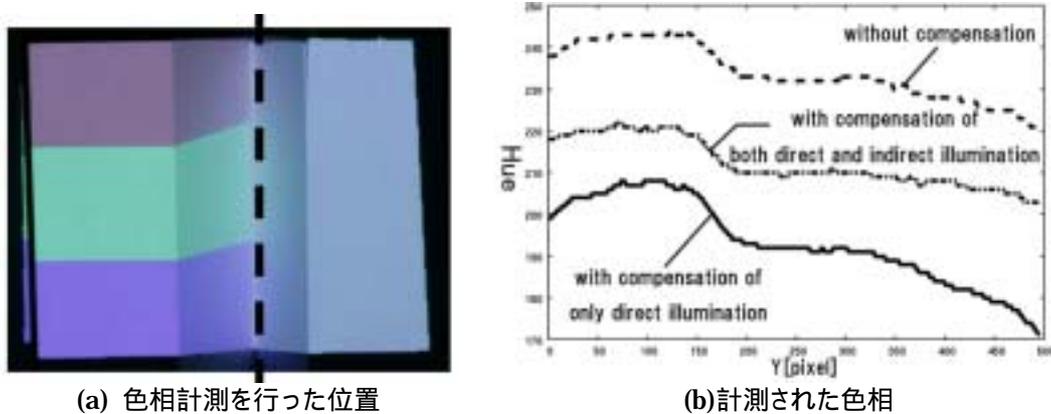


図10 反射補償による色相の変移

## 6 参考文献

- [1] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and H. Fuchs, "The Office of the Future : A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays", Proc. ACM SIGGRAPH, pp.179-188, 1998.
- [2] S. K. Nayar, H. Peri, M. D. Grossberg, and P. N. Belhumeur, "A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections" Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2003), 2003.
- [3] K. Fujii, M. Grossberg, and S. Nayar, "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] D. Wang, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Radiometric Compensation in a Projector-Camera System Based on the Properties of Human Vision System",

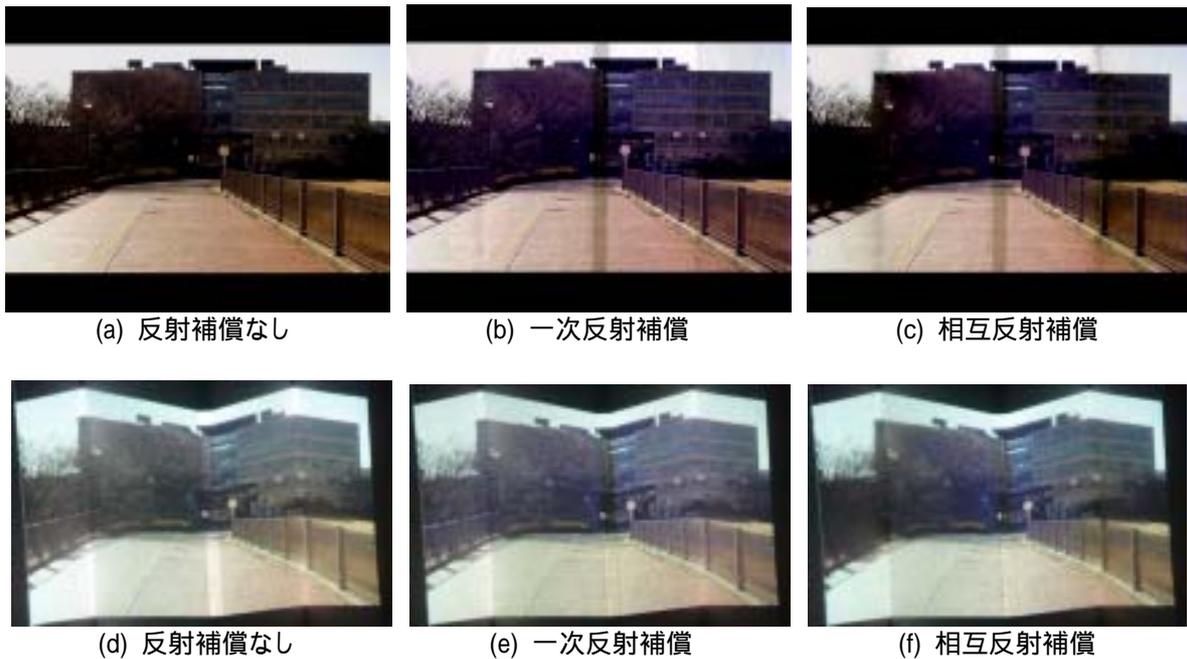


図11 一般壁面への投影実験  
(a)~(c)は作成した投影パターン, (d)~(f)はパターン投影結果

- Proc. International Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS2005), 2005.
- [5] R. Raskar, G. Welch, and W. C. Chen, "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] R. Raskar, G. Welch, K. Low, and D. Bandyopadhyay, "Shader Lamps: Animating Real Objects With Image-Based Illumination", Proc. Eurographics Rendering Workshop (ERGW2001), pp.89-102, 2001.
- [7] Y. Mukaigawa, M. Nishiyama, and T. Shakunaga, "Virtual Photometric Environment using Projector", Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.544-553, 2004.
- [8] Y. Mukaigawa, H. Nagai, and Y. Ohta, "SpaceRelighter -Recording and Reproducing Illumination in a Real Scene", Proc. International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), pp.109-118, 2004.
- [9] M. D. Grossberg, H. Peri, S. K. Nayar, and P. N. Belhumeur, "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] A. Fournier, A. S. Gunawan, and C. Romanzin, "Common illumination between real and computer generated scenes", Proc. Graphics Interface '93, pp. 254-262, 1993.
- [11] F. Sillion, and C. Puech, "Radiosity and global illumination", Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, 1994.
- [12] S. M. Seitz, Y. Matsushita, and K. N. Kutulakos, "A Theory of Inverse Light Transport", Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV2005), Vol.2, pp.1440-1447, 2005.