

SpaceRelighter: パターン投影による照明環境の再現

向川 康博^{*1} 永井 悠文^{*2} 大田 友一^{*3}

SpaceRelighter: Reproducing Illumination by Pattern Projection

Yasuhiro Mukaigawa ^{*1} Hirobumi Nagai ^{*2} Yuichi Ohta ^{*3}

Abstract –

We introduce *SpaceRelighter*, a projector-based mixed reality system that records illumination in a real scene and reproduces it at a later time by projecting a light pattern onto the scene. Users can see a virtually illuminated real scene without having to wear special devices such as a head-mounted display. Because the virtual illumination and real scene are merged in a real 3-D environment and not on a 2-D display, users have a better sense of reality. We first explain the principle of estimating light patterns by photometric and geometric conversions. We then describe an extended method for reducing the problem of occlusion by using multiple cameras and multiple projectors. We constructed a prototype system including two cameras and two projectors to confirm that illumination can be reproduced using projectors.

Keywords : shared mixed reality, projector, illumination

1 はじめに

現実空間に対して仮想情報を投影するプロジェクタ型複合現実感では、様々な視覚情報を実物体上に直接重畳することができるため、盛んに研究が進められている。一般的な HMD 型複合現実感と比較して、ユーザが特殊な機材を装着する煩わしさがないだけでなく、頭部の移動に伴う位置ずれが原理的に起こらない、互いの顔が見えるため協同作業に向いているなど、多くの利点がある。

3次元物体をスクリーンと見なして、物体表面上にパターンを直接投影する研究例として、東城ら [1] は、3次元物体上に指示内容を投影する遠隔作業支援システムを提案している。Raskar ら [2][3] は、仮想的な陰影やテクスチャを白色物体に投影する手法を提案している。また、向川ら [4] は、光源方向だけではなく鏡面反射などの反射特性も自由に变化させられる仮想光学環境を提案している。さらに、Mukaigawa ら [5] は、実物体の反射特性を記録し、それを形状の異なる白色石膏の表面上で忠実に再現するシステムを提案している。このように、仮想の光学情報をスクリーン物体へ付加する投影型インタフェースでは、仮想情報を

重畳された実世界を直接見ることができるため、通常の CG では得られない現実感を得ることができる。

一方、プロジェクタを用いて擬似的な影を投影する研究例も報告されている。Naemura ら [6] は、主に影に着目して、仮想光源や仮想物体によって生じる影を投影するシステムを提案している。また、Underkoffler ら [7] は、テーブル上に置かれた物体の影を投影するシステムを提案している。これらは、いずれも偽の影を投影することで、光源位置や物体形状を知覚させるインタフェースとしての研究であり、照明環境を完全に再現するものではなかった。

本研究では、プロジェクタ型複合現実感のリアリティ向上を目的として、現実世界の照明環境をカメラで記録し、それをプロジェクタで忠実に再現する *SpaceRelighter* と呼ぶシステムを提案する。プロジェクタによって、実世界の照明環境を自在に制御する技術は、実世界で CG を見せるための基礎技術としても重要である。

実世界の照明環境を再現するためのアプローチは、モデルベース手法とイメージベース手法に大別できる。前者は、観察される陰影を、照明・反射・形状モデルに分離して扱う。3次元形状や反射特性に依存しない照明分布を直接的に推定する手法として、Sato ら [8] は、2台の全方位カメラを用いたステレオ法を提案している。また、同じく Sato ら [9] は、インバースレンダリング [10] の枠組みで、シーンを撮影した画像中の影の濃淡を解析することで、照明分布を間

^{*1}筑波大学先端学際領域研究センター

^{*2}筑波大学大学院システム情報工学研究科

^{*3}筑波大学システム情報工学研究科知能機能システム専攻

^{*1}Center for Tsukuba Advanced Research Alliance, Univ. of Tsukuba

^{*2}Graduate School of Systems and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

^{*3}Department of Intelligent Interaction Technologies, Univ. of Tsukuba

接的に推定する方法を示している．それに対し，我々の提案する *SpaceRelighter* は，照明分布を陽に推定するのではなく，カメラで記録した画像と同じ見え方になるように照明環境をプロジェクタで再現するイメージベース手法であり，陰影を解析する必要がない．

なお，Debevecらが構築した *Light Stage3*[11]では，プロジェクタではなく，多数のLEDを用いて照明環境を再現している．LEDは安価であるため，大量に設置することが可能であるが，影を正確に再現するためには，膨大な数のLEDが必要となる．また，球表面上にLEDを設置しただけでは，近接光源などの効果を再現できない，一方，プロジェクタでは，隠れの問題を除けば，原理的には1台だけであらゆる照明環境を再現できる．また，隠れを考慮したとしても，比較的少数のプロジェクタで解決できるという利点がある．

本稿では，まず *SpaceRelighter* の原理について述べ，次に隠れの問題を解決するために複数のカメラとプロジェクタを用いる手法について述べる．

2 *SpaceRelighter*

2.1 コンセプト

SpaceRelighter は，プロジェクタ型複合現実感の一つであり，現実世界の照明環境を記録し，それを忠実に再現できるシステムである．図1に示すように，面光源や複数光源など，様々な照明環境での見え方を一旦記録しておけば，それらの実光源を撤去した後も同様の照明環境を再現できる．例えば，窓から部屋に差し込む日照変化の様子を朝から夜まで記録しておけば，任意の時間帯の日照変化を再現することが可能となり，新しい住宅展示方法などへの応用も考えられる．

本研究は，プロジェクタの持つ潜在的な能力を見直し，実光源の模倣という，今までにない新しい機能をプロジェクタに与えることを目指す．

2.2 動作原理

SpaceRelighter は，現実世界の照明環境を記録するためのカメラと，仮想的な照明パターンを現実世界に投影するプロジェクタから構成される．基本的には，カメラで撮影された画像と同じ見え方となるように，プロジェクタから適切なパターンを投影することで，現実世界の照明環境を記録・再現する．

カメラとプロジェクタのレンズ中心は，ハーフミラー等を用いない限りは一致しない．つまり，カメラで撮影された画像を，そのままプロジェクタで投影できないため，カメラ，プロジェクタ，シーンの3次元的な位置関係を考慮した幾何変換が必要である．また，カメラで撮影されたRGB値を，そのままプロジェクタで投影し，再度カメラで撮影しても，同じRGB値として観測されることはない．つまり，プロジェクタ

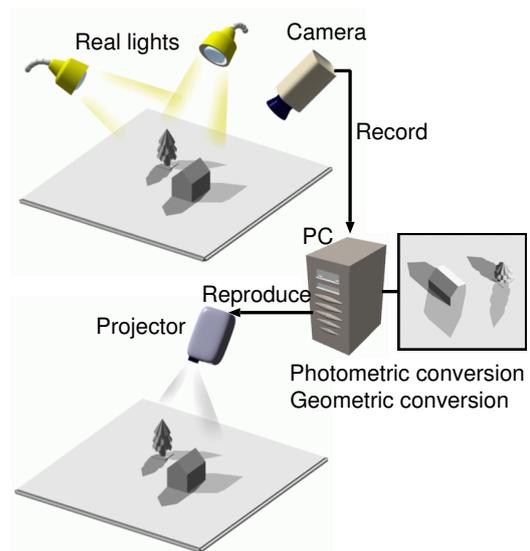


図1 *SpaceRelighter* のコンセプト
Fig.1 The concept of *SpaceRelighter* .

光の分光分布やカメラの分光感度特性を考慮した光学変換も必要である．次節以降で，幾何変換と光学変換について，それぞれ詳しく述べる．

2.3 幾何変換

カメラで撮影された画像の2次元座標をカメラ座標系と呼び， (X_C, Y_C) と表記する．また，プロジェクタで投影されるパターンの2次元座標をプロジェクタ座標系と呼び， (X_P, Y_P) と表記する．対象シーンが平面であれば，両者の座標系には射影変換の関係が成り立つ．しかし，本研究では，任意の形状を持つ3次元シーンを対象としているため，各点ごとに対応関係を調べる必要がある．

両者の座標系の対応関係は，空間コード化投影法[12]によって調べることができる[13][14]．X方向とY方向のコード画像は，式(1)のようにカメラ座標系からプロジェクタ座標系への変換テーブルとして利用できる．ここで， $Code_X$ と $Code_Y$ は，それぞれX方向とY方向のコード値を返す関数である．

$$X_P = Code_X(X_C, Y_C), \quad Y_P = Code_Y(X_C, Y_C) \quad (1)$$

本研究では，この座標変換に基づいて，微小な三角形パッチ単位でテクスチャマッピングし，カメラで撮影した画像をプロジェクタのレンズ中心からの見え方に変換する．画像上で隣接する3点で構成される三角形ごとに，頂点座標を式(1)によってプロジェクタ座標系に変換する．さらに，三角形内部のテクスチャを線形内挿で補間し，プロジェクタで投影されるパターン上にマッピングする．

なお，対象シーンの形状によっては，カメラで撮影できるがプロジェクタで投影できない領域(以後，投

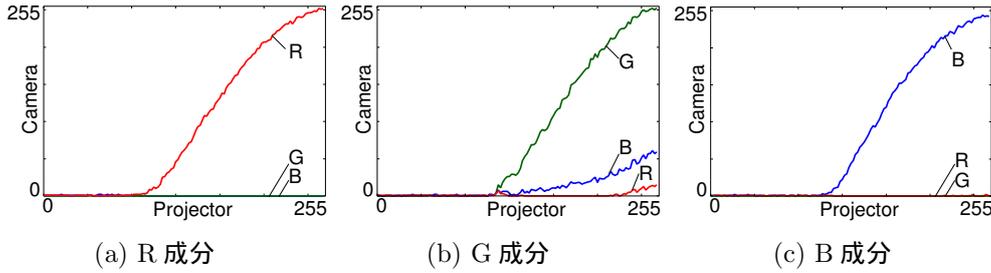


図 2 投影値と撮影値の関係

Fig. 2 Relationships between projected colors and observed colors.

影不可領域と呼ぶ)が存在する．そこで、一様な白色パターンと一様な黒色パターンをそれぞれプロジェクタから投影し、これを撮影した画像中で画素値の差が閾値以下であれば、投影不可領域として記録しておく．幾何変換の際に、三角形の頂点が投影不可領域に入っていれば、その三角形はマッピングしない．

一方、シーン中にはプロジェクタで投影できるがカメラで撮影できない領域（以後、撮影不可領域と呼ぶ）も存在する．幾何変換の際に、最終的にテクスチャがマッピングされなかった領域は、撮影不可領域として記録しておく．

2.4 光学変換

プロジェクタに与えた RGB 値と、投影光がスクリーンで反射してカメラで撮影された後、ビデオキャプチャデバイスで得られた RGB 値は異なる．Nayar ら [15] は、

- ・ プロジェクタに与えた入力信号と、プロジェクタからの投影光強度の非線形な関係
- ・ 投影光の分光分布、スクリーンの分光反射率、カメラの分光感度特性から決定される RGB 値の線形変換
- ・ カメラからの映像出力信号と、ビデオキャプチャデバイスから得られる RGB 値の非線形な関係を考慮したモデルを提案している．この投影値と撮影値の関係は、プロジェクタ・カメラ・ビデオキャプチャデバイス・シーンの反射率の組合せによって決まる．

ここで、我々が構築したシステム（詳細は 4.1 節で述べる）を用いて、投影値と撮影値の関係を調べた結果を図 2 に示す．(a) は、G 成分、B 成分を 0 とし、R 成分を 0～255 まで 1 刻みに変化させた一様なパターンを白色板に投影した時の、ある一点の撮影値の変化を示している．同様に (b),(c) は、それぞれ G 成分、B 成分を変化させた時の変化を示している．なお、この実験では、RGB 各成分ごとに投影値を 255 とした時の撮影値が 255 に近くなるように絞りを調整している．これらの結果より、本システムの機器構成では、投影値と撮影値が非線形な関係であることがわかる．

また、G 成分を投影すると撮影値の B 成分も変化することから、プロジェクタの G 成分の分光分布と、カメラの B 成分の分光感度特性に重なりがあり、投影値と撮影値の色合いが変化してしまうことを示している．

さらに、我々が提案する *SpaceRelighter* では、より複雑な形状のシーンを対象とするため、以下に述べる現象も生じる．

- (1) 投影場所ごとに法線方向が異なり、法線方向とプロジェクタ方向のなす角が大きいほど、撮影値は小さくなる
- (2) 投影場所ごとにプロジェクタとの距離が異なり、遠いほど投影光の減衰が大きい
- (3) シーン中で相互反射が生じるため、ある面への投影光が別の面に影響を与える

このうち、(1) と (2) は反射率の違いと同様に扱うことも可能である．しかし、(3) を厳密にモデル化するためには、シーンの 3 次元形状を詳細に復元し、ラジオシティ法などによって相互反射の影響を調べる必要がある．さらに、投影値と撮影値の関係は、カメラとプロジェクタの組合せによって決まるため、複数のカメラとプロジェクタを同時に使う場合には、すべての組合せごとに校正が必要となる．このように、投影するシーンの形状が複雑で、複数のカメラとプロジェクタを用いる場合には、投影値と観測値の関係を、厳密にモデル化することは容易ではない．

そのため、本研究では、望みの観測値を得るための投影値を厳密に算出するのではなく、撮影値を投影値にフィードバックしながら、目的の見え方となるように投影値を逐次的に修正する．この手法は、単純ではあるが、効果的であることが Nayar らによって示されている [15]．ある時点 t での幾何変換前の投影パターンを I_t とし、それを撮影した画像を M_t とする．最初に記録した目標となる画像を R とすれば、次に投影すべきパターン I_{t+1} は次式のように求められる．

$$I_{t+1} = I_t + \alpha(R - M_t) \quad (2)$$

ここで α は収束の早さを決める係数である． α を大きくすると，収束は早くなるが，投影パターンが振動，もしくは発散する危険性がある．本研究では，経験的に $\alpha = 0.5$ としている．

できるだけ収束を早くするためには，フィードバック処理の初期値が重要であり，最初の投影パターン I_0 を投影したときの画像 M_0 が， R に近くなるべきである．そこで本研究では，投影値と撮影値の関係をアフィン変換で近似することにより，投影パターンの初期値を決定する．すなわち， $p = [p_R \ p_G \ p_B \ 1]^T$ を投影値の RGB 成分とし， $c = [c_R \ c_G \ c_B]^T$ を撮影値の RGB 成分とすれば，アフィン変換行列 V によって次式のように変換できると仮定する．

$$c = Vp \quad (3)$$

変換行列 V は，あらかじめシーン中の各点毎に独立に算出しておく必要がある．本研究では，代表的な色の一様パターンを実際に投影し，それをカメラで撮影することで，投影値と撮影値の対応関係を調べ，変換行列を算出する．具体的には，RGB 値をそれぞれ 0/255 のいずれかとし，それらを組み合わせた合計 8 通りの投影値 c_1, c_2, \dots, c_8 (それぞれ黒・青・赤・紫・緑・水色・黄・白に対応) と，それに対応する撮影値 p_1, p_2, \dots, p_8 を要素に持つ次式の C, P を得る．

$$C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_8], \quad P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_8] \quad (4)$$

これにより，次式を満たす変換行列 V を，最小自乗法によって算出することができる．

$$C = VP \quad (5)$$

以上で算出されたアフィン変換行列は，投影値と撮影値の非線型な関係を厳密に表現するものではないが，フィードバック処理の初期値を定めるという用途には十分に利用できる．少しでも正解に近い初期値とすることにより，比較的少ない反復回数で，望みの観測値が得られると期待できる．

3 複数カメラ・複数プロジェクタへの拡張

3.1 撮影・投影不可領域の対処

前節では，カメラで撮影した画像を変換し，プロジェクタで投影する，*SpaceRelighter* の基本的な動作原理について述べた．凹凸のある壁面など，あまり複雑でない面を対象とした場合には，十分に適用が可能である．しかし，図 3 に示すように，比較的単純な形状であっても，カメラで撮影できない撮影不可領域や，プロジェクタで投影できない投影不可領域が存在する．つまり，これらの問題を解決しない限り，照明環境を完全に記録・再現することはできない．

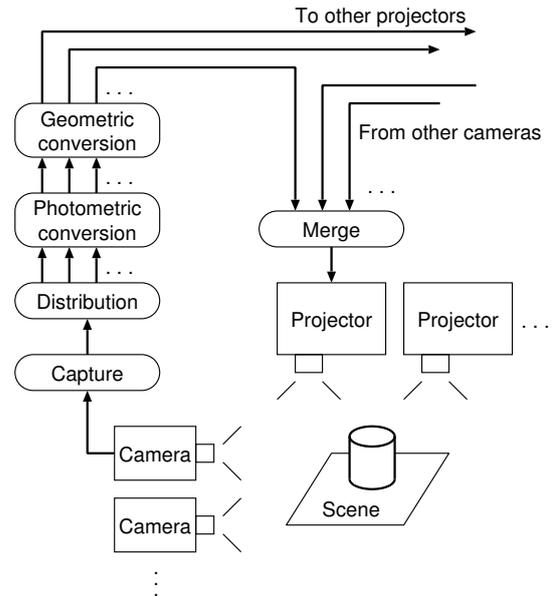


図 4 複数のカメラとプロジェクタ
Fig. 4 Multiple cameras and projectors.

これらの問題は，複数のカメラとプロジェクタを用いることによって，原理的には解決可能である．複数のカメラを配置することで撮影不可領域が減少し，複数のプロジェクタを配置することで投影不可領域が減少する．複数のカメラ・プロジェクタを用いる場合は，前節で述べた幾何変換のために，すべてのカメラとプロジェクタの組合せごとに座標変換テーブルを求めておく．また，光学変換のために，すべてのカメラとプロジェクタの組合せごとに，色変換行列を算出しておく．

単に，投影不可領域の問題を解決するだけであれば，Sukthankar らが提案した複数プロジェクタを用いた影の除去法 [16] によって容易に解決できる．しかし，複数のカメラとプロジェクタを用いて照明環境を記録・再現する場合，シーン中のある領域が，どのカメラから撮影でき，どのプロジェクタから投影できるかというすべての組合せを考慮しなければならない．本研究では図 4 に示すように，この組合せ問題を，撮影画像の分配と投影パターンの統合の 2 つに分けて考える．

3.2 撮影画像の分配

カメラで撮影した画像は，複数のプロジェクタに分配される．各カメラで撮影された画像の各画素が，どのプロジェクタで投影でき，どのプロジェクタで投影できないかという状態は，予め調べておくことができる．ここで，プロジェクタへの分配方法として，基本的に 1 台の主プロジェクタで投影し，主プロジェクタの投影不可領域のみ副プロジェクタで投影する方法が考えられる．しかし，プロジェクタの光学特性の違いを完全に補正することは難しく，主/副プロジェクタで投影された領域の境界が目立つ結果となってしまう．

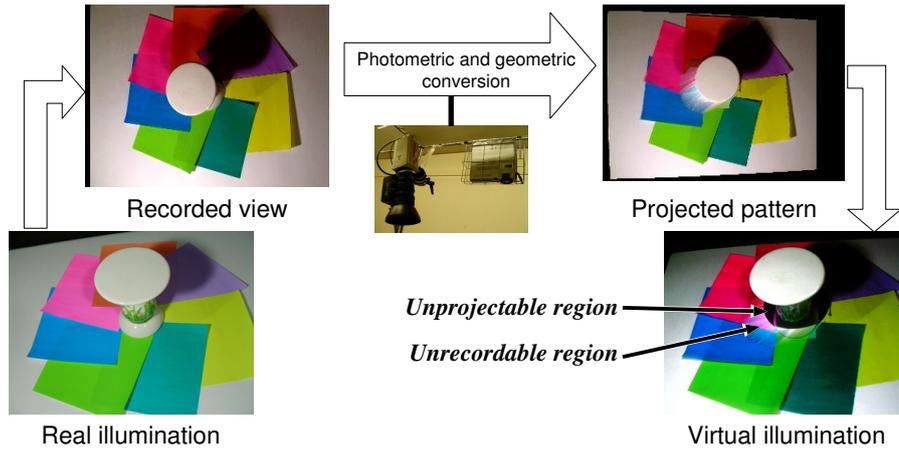


図3 撮影・投影不可領域
Fig. 3 Unrecordable and unprojectable regions.

そこで本研究では、撮影画像を、その領域を投影できるプロジェクタに均等に分配する。すなわち、ある領域が n 台のプロジェクタで投影できるとすれば、撮影値を $1/n$ 倍した値を各プロジェクタに分配する。これにより、投影不可領域の境界で、すべてのプロジェクタが同時に入れ替わることがなくなり、不連続性が減少できると考えられる。

なお、1台のプロジェクタで投影した場合と、 $1/n$ 倍した値を n 台のプロジェクタで投影した場合とは、シーンの明るさが同一である保証はない。本研究では、この問題を直接には取り扱わず、2.4節で述べたように、撮影値をフィードバックする過程で修正する。

3.3 投影パターンの統合

前節で述べたように、各プロジェクタには、そのプロジェクタで投影すべきパターンが、各カメラより送られる。ここで、前節と同様の理由により、基本的には、投影する領域を撮影できたカメラから送られたパターンの平均によって投影パターンを決定する。

しかし、カメラとプロジェクタの光学特性を完全にモデル化することは難しいため、各カメラから送られてきたパターンは、同じ領域であっても色が一致するとは限らない。そのため、投影パターンを単純に平均すると、各カメラの撮影不可領域の組合せごとに色合いが異なってしまい、不自然な結果となる。

そこで、本研究では、あらかじめ1台のカメラを基準カメラとし、他のカメラは基準カメラと同じ色合いになるように投影パターンの色をアフィン変換する。具体的には、対象とするカメラと基準カメラで共通に撮影できる領域のRGB値を列挙し、対象とするカメラでのRGB値を、基準カメラでのRGB値に変換するためのアフィン行列を最小自乗法によって算出する。このアフィン行列を用いて、各カメラの投影パターンが基準カメラと同じ色合いになるように変換する。

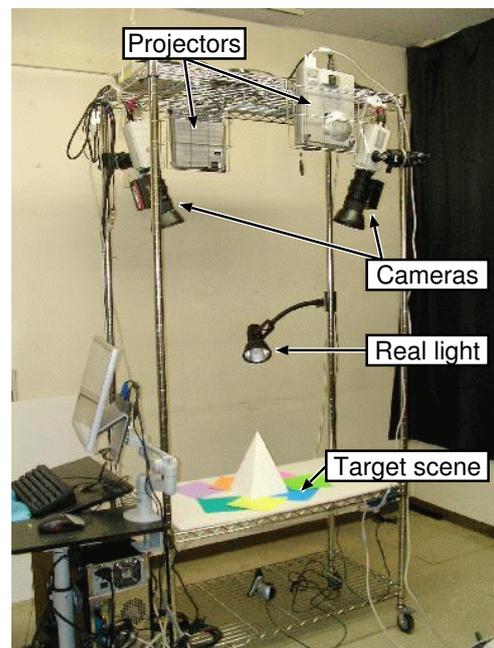


図5 機器構成
Fig. 5 Prototype system of SpaceRelighter.

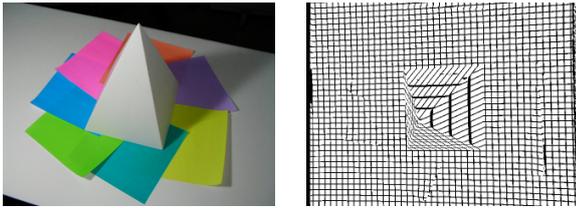
4 実験結果

4.1 機器構成

本研究では、図5に示すように、2台の3CCDカメラ (SONY DXC-9000) と2台のDLPプロジェクタ (PLUS U4-136) からなる試作システムを構築した。PCは1台であり、カメラで撮影される画像は2枚のビデオキャプチャカード (BUFFALO CBP-AV) で取り込まれ、2系統のXGA映像信号は1枚のビデオカードから出力される。

4.2 隠れないシーン

まず、隠れないシーンを対象とし、カメラとプロジェクタを1台ずつ用いて、照明環境を記録・再現する実験を行った。図6(a)はユーザ視点から見た対象



(a) 隠れのないシーン (b) 座標系の対応関係

図 6 シーン 1 (色紙と四角錐)
Fig. 6 Scene 1 (Pyramid on color papers).



(a) 記録シーン (b) 光学変換 (c) 幾何変換

図 7 幾何変換・光学変換
Fig. 7 Photometric and geometric conversions.

シーンであり、色紙を敷いた上に石膏の四角錐が置かれている。図 6(b) は、カメラ座標とプロジェクタ座標の対応関係をグリッドによって視覚化した結果であり、カメラとプロジェクタが四角錐のほぼ真上にあることから、撮影・投影不可領域がないことがわかる。

図 7 に幾何・光学変換を行なった結果を示す。(a) は実光源で照らされた対象シーンを、カメラで撮影した結果である。(b) は光学変換の結果であり、(c) は幾何変換の結果である。光学変換によって、機器の特性にあわせて明るさや色合いが変化している。幾何変換によって、プロジェクタを視点とした見え方になっており、四角錐の角度が変わっていることがわかる。

図 8 は、横軸をフィードバックの回数 t として、投影値が修正されていく様子を示している。右下が記録したシーンであり、1 段目が幾何変換をする前の投影パターン、2 段目がカメラで撮影された画像である。投影値と撮影値の非線形な関係を厳密に考慮していないため、 $t = 0$ においては照明環境が正しく再現できていない。しかし、フィードバックを繰り返すことによって、実光源下で記録した見え方に近付いていくことがわかる。

しかし、照明環境を記録したカメラから見ると記録シーンを再現できたように見えたとしても、異なる位置にある異なる種類のカメラから見た場合には、正しく再現できている保証はない。そこで、別のカメラからプロジェクタで照明環境を再現したシーンを見た場合に、どれくらい自然に見えるかを確認した。図 9 は、ユーザ視点付近に設置したデジタルカメラ (SANYO DMX-C1) でシーンを撮影した結果である。(a) が実

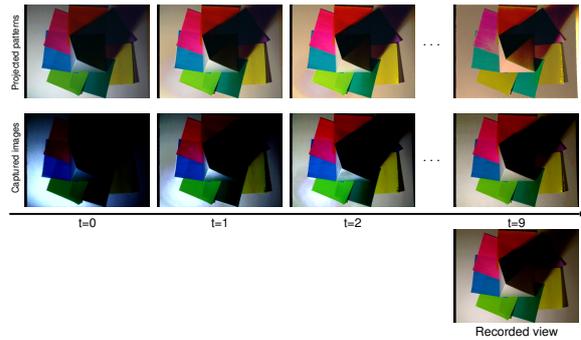
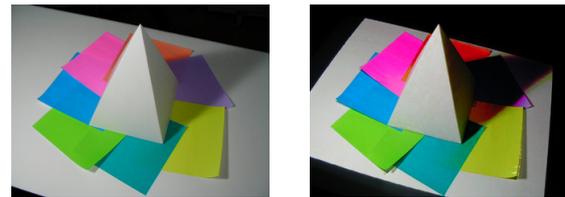


図 8 投影パターンのフィードバック
Fig. 8 Feedback process.



(a) 実光源下での見え方 (b) 再現結果

図 9 実画像と再現結果の比較
Fig. 9 Comparison of the reproduced virtual view with the recorded real view.

光源であり、(b) がプロジェクタで再現した結果である。主にカメラの分光感度特性の違いにより、影の濃さなどがやや異なってみえるものの、ほぼ区別のつかない見え方となった。このように、撮影・投影不可領域のないシーンを対象とした場合には、シーンのほぼ全域に渡って、照明環境を正しく記録・再現できることを確認した。すなわち、プロジェクタに実照明環境の模倣という新たな機能を持たせることに成功した。

4.3 隠れのあるシーン

次に、カメラとプロジェクタを 2 台ずつ用いて、隠れのあるシーンの照明環境を記録・再現する実験を行なった。図 10 が対象シーンであり、平面に置かれた陶器が、斜め上方にある実光源から照らされている。この陶器の形状は比較的単純ではあるが、撮影・投影不可領域の両方が存在するため、1 組のカメラとプロジェクタでは、照明環境を正しく記録・再現できない。

図 11 に、一方のカメラで撮影された画像を、2 台のプロジェクタに分配した結果を示す。(a) はカメラで撮影されたシーンであり、(b) は 2 台のプロジェクタの投影不可領域を可視化した画像である。白は両方のプロジェクタから投影でき、濃い灰色と薄い灰色はそれぞれ一方のプロジェクタのみから投影でき、黒はどちらのプロジェクタからも投影できない領域を表している。(c),(d) は、撮影画像をそれぞれのプロジェクタに分配した結果である。プロジェクタの投影不可領域を考慮して、適切に分配されていることがわかる。



図 10 シーン 2 (陶器)
Fig. 10 Scene 2 (ceramic object).

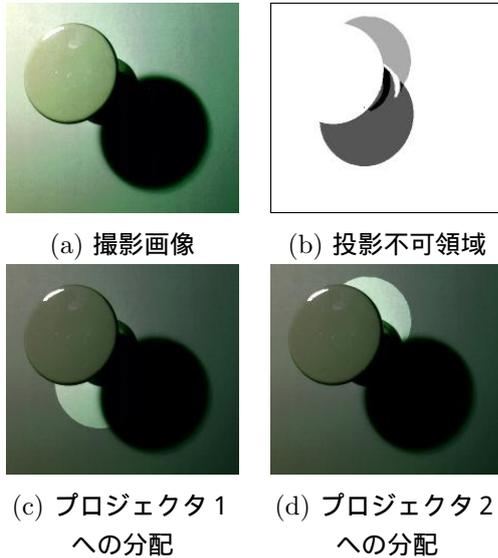


図 11 撮影画像の分配結果
Fig. 11 Results of the view distribution.

図 12 に、一方のプロジェクタに送られた投影パターンを統合した結果を示す。(a),(b) は、それぞれのカメラから送られたパターンである。(c) は 2 台のカメラの撮影不可領域を、前述の投影不可領域と同様に可視化した画像であり、(d) は 2 枚のパターンを統合した結果である。それぞれのカメラの撮影不可領域を考慮して、適切に統合されていることがわかる。

図 13 は、ユーザ視点付近に設置したデジタルカメラでシーンを撮影した様子である。左から順に $t = 0, 2, 4, 6$ の時点での状態であり、右端が実光源で照らされた正解である。 $t = 0$ においては、撮影・投影不可領域の境界がはっきりと見え、不自然な見え方になっている。また、このカメラと照明環境を記録したカメラでは分光感度特性が異なるため、明るさや色合いも若干異なっているが、フィードバックを繰り返すことによって、自然な見え方になっている。このように、検証したカメラの位置や種類が同一でなくても、ほぼ同じ照明環境に見えることを確認した。

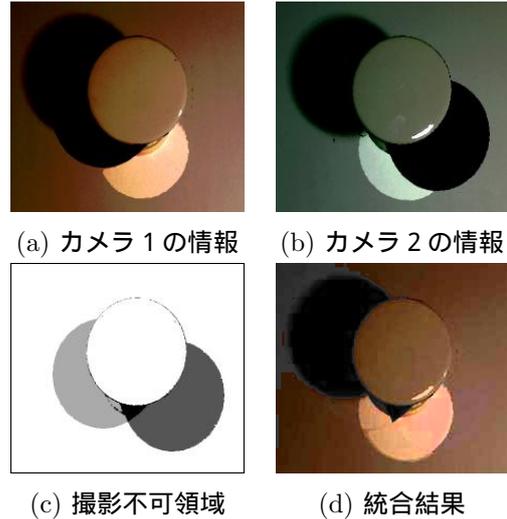


図 12 投影パターンの統合結果
Fig. 12 Result of the pattern merging.

5 まとめ

本稿では、プロジェクタを用いた協調型複合現実感の応用例の一つとして、現実空間の照明環境を記録し、それを忠実に再現する *SpaceRelighter* を提案し、その動作原理と実現方法について述べた。隠れないシーンを対象とした場合は、カメラで記録したシーンの幾何変換・光学変換、および撮影値のフィードバックによって、ほぼ正しく照明環境を再現できることを確認し、実光源の模倣という新しい機能をプロジェクタに持たせることに成功した。また、隠れの問題を解決するために、複数のカメラとプロジェクタを用いた撮影画像の分配、及び投影パターンの統合手法を提案した。カメラとプロジェクタを 2 台ずつ用いた実験では、隠れの問題を完全に解決できなかったわけではないが、原理的にはカメラとプロジェクタの数を増やすことで解決できると考えられる。

しかし、照明環境の記録に用いたカメラの画像上では、照明環境を概ね再現できることが確認できたものの、分光感度特性の異なるカメラで撮影した画像では、実光源とプロジェクタで色合いが異なるという問題が残る。また、人間の視覚で観察すると、大まかな陰影は正しいと感じるものの不自然さが残る。今後は個々のデバイスに依存しない色表現法によって照明環境を記録・再現することを目指す。また、人間の視覚特性も考慮し、人間が見て違いが分からない投影方法を検討していく必要もあると考えられる。

謝辞

本研究は筑波大学先端学際領域研究センター (TARA センター) プロジェクト「複合現実感技術の研究」の

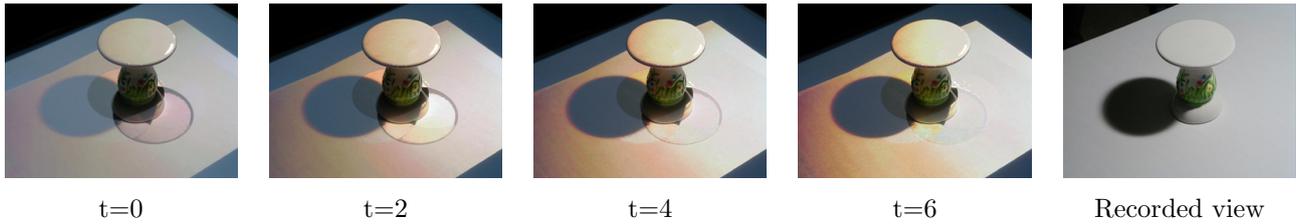


図 13 ユーザ視点から異なるカメラでシーンを撮影した結果
Fig. 13 Captured images of reproduced illumination using additional camera.

一部として実施した。

参考文献

- [1] 東城賢司, 日浦慎作, 井口征士, “プロジェクタを用いた 3次元遠隔指示インタフェースの構築”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.2, pp.169-176, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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, 2001.
- [5] 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.
- [6] T.Naemura, T.Nitta, A.Mimura, H.Harashima, “Virtual Shadows in Mixed Reality Environment Using Flashlight-like Devices”, Trans. Virtual Reality Society of Japan, Vol.7, No.2, pp.227-237, 2002.
- [7] J.Underkoffler, B.Ullmer, and H.Ishii, “Emancipated Pixels: Real-World Graphics In The Luminous Room”, Proc. SIGGRAPH’99, pp.385-392, 1999.
- [8] I.Sato, Y.Sato, and K.Ikeuchi, “Acquiring a Radiance Distribution to Superimpose Virtual Objects onto a Real Scene”, IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics, Vol.5, No.1, pp.1-12, 1999.
- [9] I.Sato, Y.Sato, and K.Ikeuchi, “Illumination from Shadows”, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, No.3, pp.290-300, 2003.
- [10] 佐藤洋一, 向川康博, “インパースレンダリング”, 情処研報 CVIM 2004-145-9, pp.65-76, 2004.
- [11] P.Debevec, A.Wenger, C.Tchou, A.Gardner, J.Waese, and T.Hawkins, “A Lighting Reproduction Approach to Live-Action Compositing”, ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2002), Vol.21(3), pp.547-556, 2002.
- [12] K.Sato and S.Inokuchi, “Range-Imaging System Utilizing Nematic Liquid Crystal Mask”, Proc. of International Conference on Computer Vision (ICCV’87), pp.657-661, 1987.
- [13] 見市伸裕, 和田俊和, 松山隆司, “プロジェクタ・カメラシステムのカリブレーションに関する研究” 情処研報 CVIM 2002-133-1, pp.1-8, 2002.
- [14] N.L.Chang, “Efficient Dense Correspondences using Temporally Encoded Light Patterns”, Proc. ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS), 2003.
- [15] S.K.Nayar, H.Peri, M.D.Grossberg, and P.N.Belhumeur, “A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections” Proc. ICCV Workshop on Projector-Camera Systems (PROCAMS), 2003.
- [16] R.Sukthankar, T.Cham and G.Sukthankar, “Dynamic Shadow Elimination for Multi-Projector Displays”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2001), pp.151-157, 2001.

(2005年1月13日受付)

[著者紹介]

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)。情報処理学会, 電子情報通信学会, IEEE各会員。

永井 悠文



2005年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程修了。在学中は, 顔画像合成やプロジェクタ型複合現実感の研究に従事。修士(工学)。

大田 友一 (正会員)



1977 京都大大学院博士課程了。京都大学情報工学科助手, 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 同教授。2004 より, 同大学大学院システム情報工学研究科教授。工博。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。