

SpaceRelighter: 現実空間における照明環境の記録と再現

向川 康博[†] 永井 悠文[†] 大田 友一[†]

[†] 筑波大学 〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: †{mukaigaw,nagai,ohta}@image.esys.tsukuba.ac.jp

あらまし 本稿では、プロジェクタを用いた協調型複合現実感システムの一つとして、現実世界の照明環境を記録し、それを忠実に再現できる *SpaceRelighter* を提案する。記録した光学情報は、ディスプレイ上で2次元的に重畳されるのではなく、現実世界に直接投影することで3次元的に重畳されるため、ユーザは高い現実感を得ることができる。まず、カメラで撮影した画像を幾何変換・光学変換し、プロジェクタで投影するパターンを生成する原理について述べる。さらに、カメラで撮影できない領域とプロジェクタで投影できない領域を減らすために、複数のカメラとプロジェクタを用いて、撮影画像を分配・統合する手法について述べる。

キーワード 協調型複合現実感, プロジェクタ, 照明環境

SpaceRelighter: Recording and Reproducing Illumination in Real Scene

Yasuhiro MUKAIGAWA[†], Hirobumi NAGAI[†], and Yuichi OHTA[†]

[†] University of Tsukuba

Tennodai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573, Japan

E-mail: †{mukaigaw,nagai,ohta}@image.esys.tsukuba.ac.jp

Abstract In this paper, we introduce *SpaceRelighter* which is one of the projector-based mixed reality systems. *SpaceRelighter* can record illumination in real scene, and reproduce it by projecting light patterns onto the scene. Since the recorded illumination is not mixed on the 2-D display, but mixed in the 3-D real scene, the reality is improved. First, we explain the principle for estimating light patterns to be projected from recorded images by geometric and photometric conversion. Then, we describe an extended method which can reduce occlusion problem by using multiple-cameras and multiple-projectors.

Key words shared mixed reality, projector, illumination

1. はじめに

複数のユーザが、仮想情報を重畳された現実空間を共有できる協調型複合現実感とは、新しい共同作業スタイルとして注目されている。ユーザが円滑に共同作業を行なうためには、互いの意志疎通が重要であり、ユーザに仮想情報を与えるための機器が相手の顔を隠すことは好ましくない。

複合現実感において一般的に利用されている HMD は顔を隠してしまうため、表情やアイコンタクトが伝わりにくくなり、共同作業の妨げとなる。この問題を解決するための一つの方法として、竹村・大田は顔画像を生成して HMD 上に重畳することで、アイコンタクトを復元する手法を提案している [1]。別の解決法としては、ユーザが HMD を装着するのではなく、プロジェクタによって仮想情報を現実空間に投影する方式も考えられる。このプロジェクタ型複合現実感では、互いの顔が見えるという利点の他にも、機器を装着する煩わしさがなく、頭部の

移動に伴う位置ずれが原理的に起こらない、HMD と比べて高解像度・広視野であるなど、多くの利点があるため盛んに研究が進められている [2] [3] [4] [5] [6]。

さらに、プロジェクタ型複合現実感のリアリティを向上すれば、違和感のない共同作業空間をユーザに提供することができるため、実世界の光学情報を仮想世界で再現する研究が進められている。西山らは、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上で再現する仮想光学環境を提案している [7]。この仮想光学環境では、ユーザは照明環境を任意に変えながら、実物体と同じ反射特性の物体を目の前で見ることができる。

一方、本研究では、プロジェクタ型複合現実感のリアリティを向上させるための別のアプローチとして、現実世界の照明環境を記録し、それを忠実に再現できる *SpaceRelighter* 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、複数ユーザによる共同作業を支援するための協調

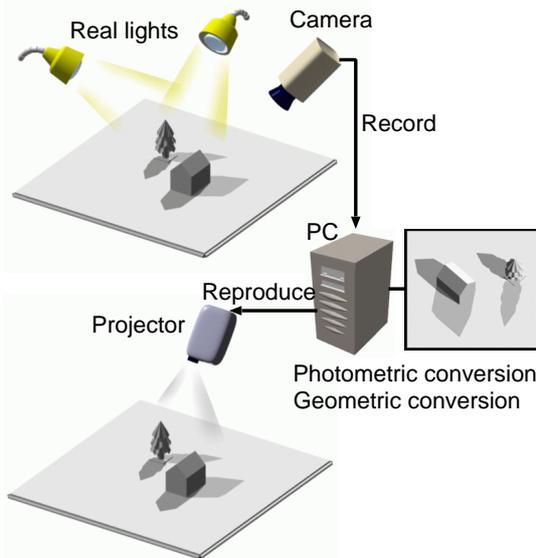


図 1 SpaceRelighter のコンセプト

型複合現実感だけではなく、実世界で CG を見せるための基礎技術としてとしても重要であると考えられる。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まったく同じ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。

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 [9] によって調べることができる [10]。X 方向のコード画像と 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 方向のコード画像の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、投影不可領域と呼ぶ）がシーン中に存在する。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 [11] 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。

図2(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成分にも変化が見られることから、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。これらの現象は、基本的にはNayarらのモデルで説明ができる。

しかし、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。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。

$$c = Vp \quad (2)$$

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。

$$C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_8], \quad P = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_8] \quad (3)$$

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。

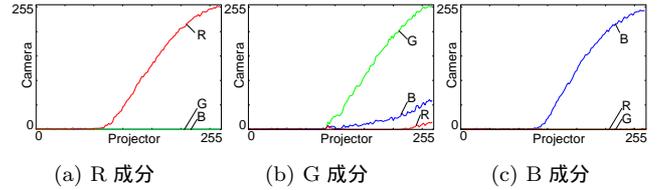


図2 投影値と撮影値の関係

$$C = VP \quad (4)$$

なお、以上で述べた光学変換だけでは、望みの撮影値を得ることは難しく、撮影値を投影値にフィードバックすることで、目的の見え方となるように投影値を逐次的に修正する方法が有効である[11]。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。

$$I_{t+1} = I_t + \alpha(R - M_t) \quad (5)$$

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。

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幾何変換・光学変換し、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、より複雑な形状の物体に投影する場合には、撮影不可領域や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。

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。

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3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撮影でき、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。

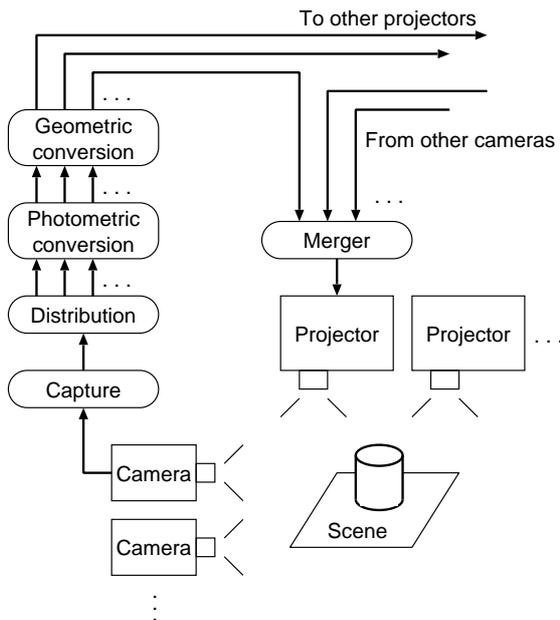


図3 複数のカメラとプロジェクタ

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。

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、プロジェクタが完全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では、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、単純に平均によって投影パターンを算出すると、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

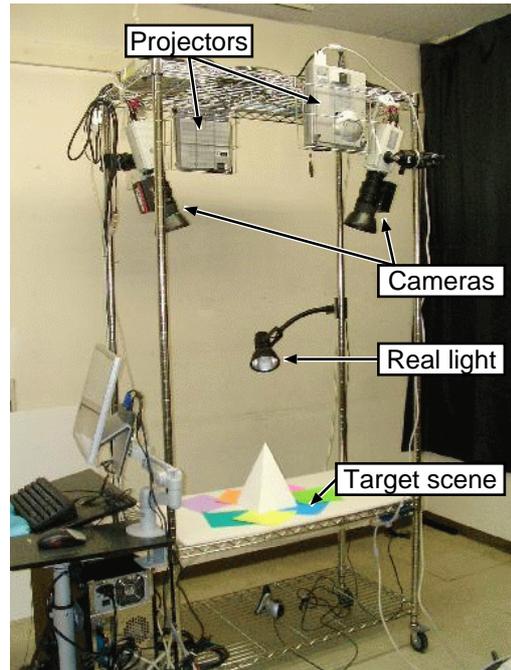


図4 機器構成

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。

4. 実験結果

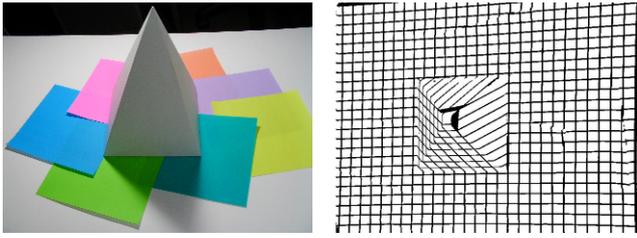
4.1 機器構成

本研究では、図4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5(a)はユーザ視点から見た対象シーンであり、色紙を敷いた上に石膏の四角錐が置かれている。図5(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6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、本システムの機器構成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。



(a) 隠れないシーン (b) 座標系の対応関係

図 5 シーン 1 (色紙と四角錐)



図 8 シーン 2 (陶器)



(a) 記録シーン (b) 光学変換の結果 (c) 幾何変換の結果

図 6 幾何変換・光学変換

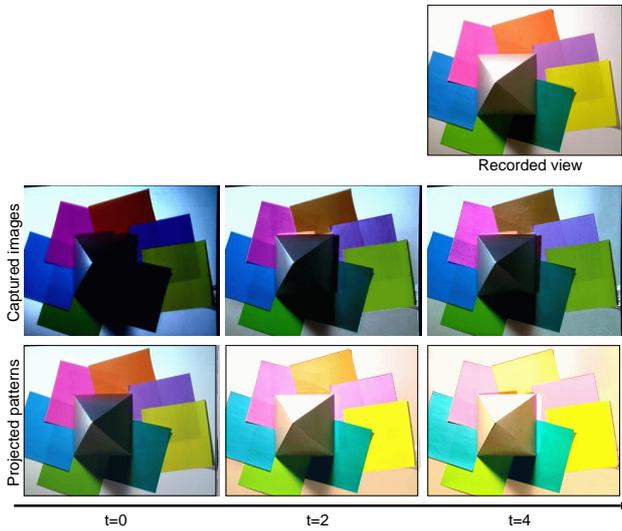


図 7 投影パターンのフィードバック

図 7 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。右上が記録したシーンであり、2 段目がカメラで撮影された画像、3 段目が幾何変換をする前の投影パターンである。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づいていくことがわかる。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・再現できることが確かめられた。

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 8 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 台ずつ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 9 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。それぞれの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 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。

ここで、ユーザ視点付近に設置した異なる種類のカメラから、2 台のプロジェクタでパターンを投影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する必要がある。すなわち、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、異なる位置に置かれた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ない可能性がある。

図 11 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、照明環境をほぼ正しく再現できることが確かめられた。

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。隠れの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た。また、隠れの問題を解決するために、複数のカメラと

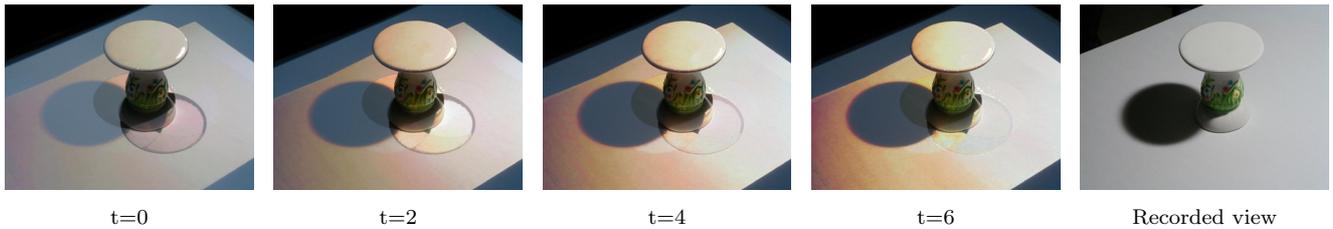


図 11 ユーザ視点から異なるカメラでシーンを撮影した結果

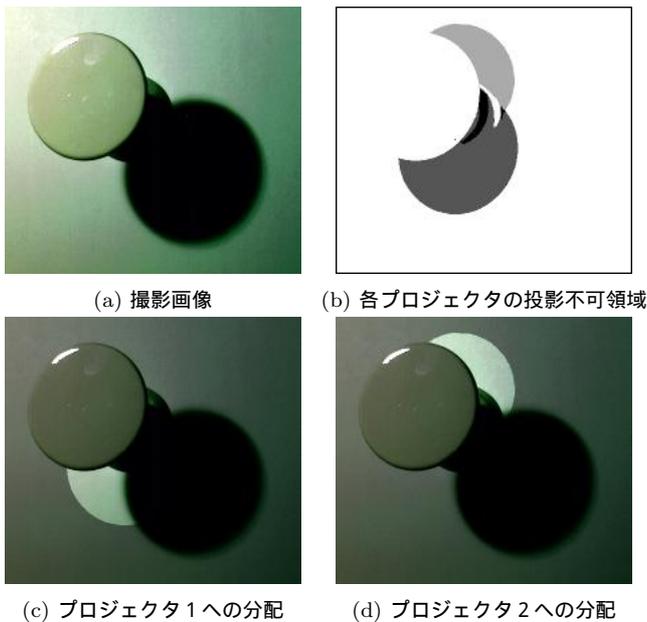


図 9 撮影画像の分配結果

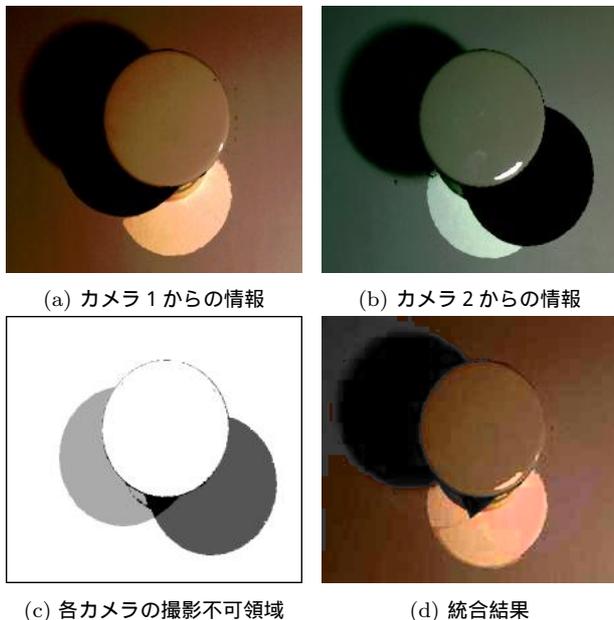


図 10 投影パターンの統合結果

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，照明環境を記録したカメラから見た限りでは，照明環境を概ね再現できることを確認したものの，分光感度特性の異なるカメラで撮影すると，実光源の場合とプロジェクタの場合では色合いが変わってしまい，完全に再現できたとはいえない．さらに，人間が見た場合には，大まかな陰影は正しいと感じるものの，不自然さを感じる．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し，また人間の視覚特性も考慮して，人間が見て違いが分からない投影方法を検討する必要もあると考えられる．

なお，本研究の一部は科学研究費補助金（課題番号 14780290）による．研究の初期において，助言頂いた岡山大学尺長健教授，実験に協力してくれた西山正志氏，有光博志氏，末廣雅子氏に感謝します．

文 献

- [1] M. Takemura and Y. Ohta, "Diminishing Head-Mounted Display for Shared Mixed Reality", IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002), pp.149-156, 2002.
- [2] J. Underkoffler, B. Ullmer, and H. Ishii, "Emancipated Pixels: Real-World Graphics In The Luminous Room", Proc. SIGGRAPH'99, pp.385-392, 1999.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 西山正志, 向川康博, 尺長健, "仮想光学環境のための局所反射特性分布の学習と再現", 情処研報 CVIM 2002-132-9, pp.61-68, 2002.
- [8] Y. Mukaigawa, M. Nishiyama and T. Shakunaga, "Realization of Virtual Photometric Environment by Photometric Pattern Projection", Proc. IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2003), pp.435-440, 2003.
- [9] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [10] 見市伸裕, 和田俊和, 松山隆司, "プロジェクタ・カメラシステムのキャ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.
- [11] 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.