

動的シーンに対する仮想光学パターンの投影

Projecting Virtual Photometric Patterns onto Dynamic Scene

永井 悠文†
Hirobumi Nagai向川 康博†
Yasuhiro Mukaigawa大田 友一†
Yuichi Ohta

1. はじめに

仮想情報を重畳された現実空間を複数ユーザが共有できる協調型複合現実感とは、新しい協調作業スタイルとして研究が進められている。ユーザに仮想情報を与える装置として、一般に Head-Mounted Display(HMD)が利用されている。しかし、HMD を装着すると、アイコンタクトなどの非言語情報の伝達が阻害され、ユーザ間の円滑なコミュニケーションが困難になる。竹村らは、HMD で隠れた顔画像を視線も含めて再現することでアイコンタクトを復元する方法を提案している[1]。

一方で、HMD を用いずに、現実空間に対して仮想情報を直接投影するプロジェクタ型複合現実感と呼ばれる手法が提案されている[2-6]。プロジェクタ型複合現実感では互いの顔が直接見えるため、協調作業に向いているという利点のほかにも、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・広視野にするのが容易であるなど、多くの利点がある。

我々は、仮想光源による照明環境を現実空間に提示できるプロジェクタ型複合現実感の研究を進めている[6]。従来は、光学パターンを投影される現実空間は、静的であると仮定してきた。本稿では、USB カメラを用いた簡易なシステムで、シーンの動的な変化を検出し、リアルタイムに光学パターンを更新する手法について述べる。

2. 仮想光学パターンの投影

我々は、平面ではなく、3次元形状の物体に対して適切な光学パターンを投影することで、仮想光源の位置や、物体の反射特性を自由に变化させることができるシステムの構築を目指している。仮想的な見え方を現実の物体上で直接見せることが可能となるため、2次元的な表示と比べてリアリティがあり、照明設計などの平面ディスプレイではイメージが沸きづらい分野のニーズは大きいと考えられる。

静的なシーンを対象とするならば、投影される物体とプロジェクタの幾何学的な位置関係は、予め計測しておくことができる。Raskar ら[2]は、現実世界の白色物体に対して、プロジェクタからテクスチャや陰影などの仮想情報を投影するプロジェクタ型複合現実感の基礎となる Shader Lamps を提案した。向川ら[5]は、プロジェクタ型複合現実感における見え方の光学的変化を取り扱い、光源位置や反射特性を任意に変化させることのできる仮想光学環境を提案した。また、我々は、写実性の向上を主目的として、現実世界の照明環境を記録し、それを忠実に再現する SpaceRelighter と呼ぶシステムを提案した[6]。SpaceRelighter は、図1に

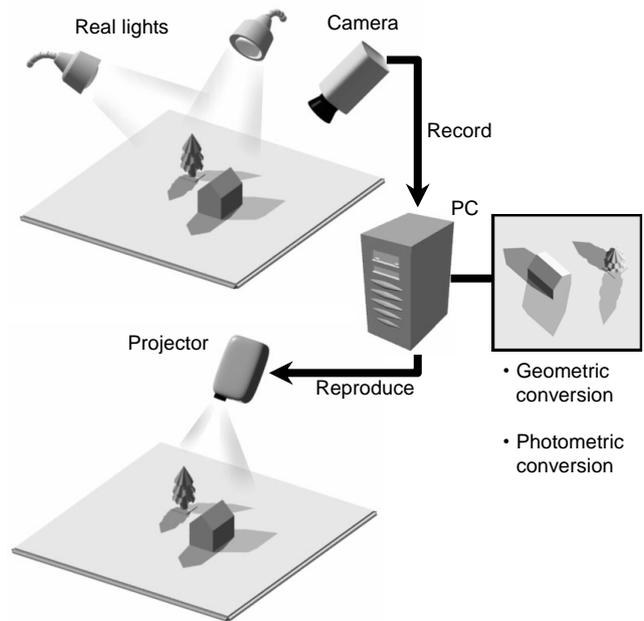
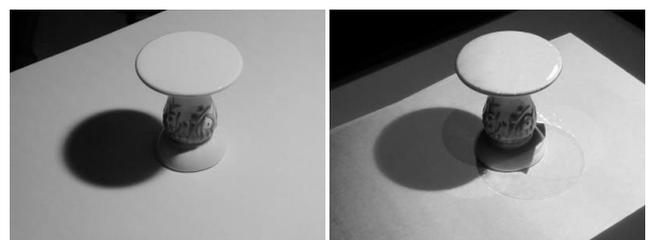


図1 : SpaceRelighter の概要



(a) 実光源での見え方 (b) プロジェクタで再現した見え方

図2 : SpaceRelighter の例

示すように、面光源や近接光源など、様々な照明環境での見え方をいったん画像として記録しておけば、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イメージベーストな手法である。図2は、実光源によって照らされたシーンと、プロジェクタによって再現された見え方の例である。これらのシステムでは、投影されるシーンを動かしてはならないという制約がある。

一方、シーンの動的な変化に対応するためには、シーンの変化を何らかの方法で検知する必要がある。Raskar らの Dynamic Shader Lamps では赤外線センサや磁気センサを用いてシーンの変化を検知している[3]。本稿では、より簡易

† 筑波大学大学院システム情報工学研究科

なシステムとして、USB カメラのみで物体の2次元位置を追跡し、リアルタイムに光学パターンを更新する手法について述べる。また、プロジェクタ光を実世界に投影する際に問題となる光学補正を、仮想テクスチャの反射率として与えることで、リアルタイムに実現する手法を述べる。

3. 動的に変化するシーンへの対応

3.1 システムの構成

本研究では、図3に示すように、平面上に複数の対象物体を置くようなシーンにおける協調作業を取り扱う。対象物体は白色の完全拡散反射面を持つものとし、形状はレンジファインダであらかじめ計測しておく。USB カメラで物体の2次元位置・方向を検出し、それに応じて、上方に設置されたプロジェクタから光学パターンを投影する。ユーザは物体を接地させながら自由に動かすことが可能である。

対象物体の位置の推定には、物体の底面に貼付した各々がユニークなビジュアルマーカを用いる。下方に取り付けた USB カメラからビジュアルマーカを観察する。各対象物体に、ユニークなマーカを貼付することで、下方に設置したカメラからの観察だけで、どの物体が、どのような位置・方向であるかを認識することができる。しかし、完全に透明なアクリル板ではプロジェクタの投影光が透過してしまう。そこで、カメラでビジュアルマーカを観察できて、かつプロジェクタの投影光を拡散反射させるために、アクリル板の上にはトレーシングペーパーを敷いた。

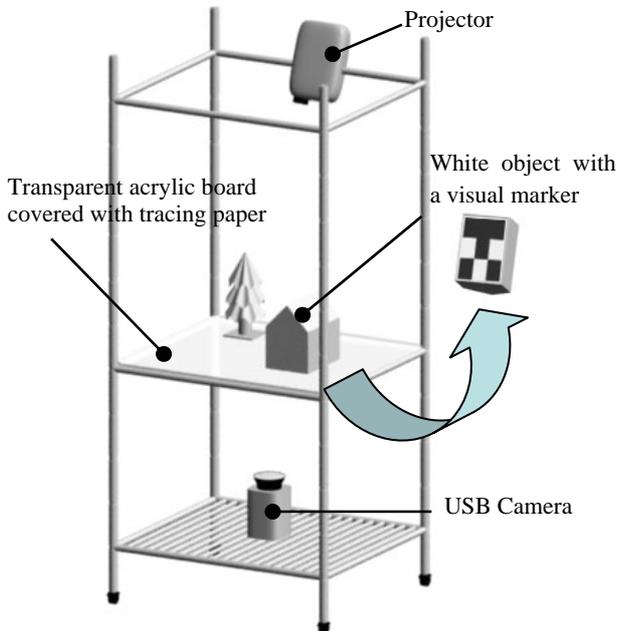


図3：機器構成

3.2 キャリブレーション

本稿で取り扱う座標系は、カメラ座標系 \mathbf{x}_c 、プロジェクタ座標系 \mathbf{x}_p 、ワールド座標系 \mathbf{x}_w の3つであり、それぞれを次のように定義する。

$$\mathbf{x}_c = [x_c \ y_c \ 1]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_p = [x_p \ y_p \ 1]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_w = [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T \quad (3)$$

ここで、物体を置く平面のワールド座標系における2次元座標を \mathbf{x}_w^{2D} とする。 \mathbf{x}_w^{2D} は次式のように、 $z_w = 0$ となる平面である。

$$\mathbf{x}_w^{2D} = [x_w \ y_w \ 1]^T \quad (4)$$

また、射影行列 \mathbf{H}, \mathbf{P} を次のように定義する。ここで s, t はスカラーである。

$$s\mathbf{x}_w^{2D} = \mathbf{H}\mathbf{x}_c \quad (5)$$

$$t\mathbf{x}_p = \mathbf{P}\mathbf{x}_w \quad (6)$$

まず、これらの座標系間のキャリブレーションが必要である。キャリブレーションは、アクリル板の上にグリッド線を引いた紙を敷き、その上に形状が既知である直方体の物体を重ねていくという手法を取った。射影行列 \mathbf{P} は、3次元点と2次元像の座標の対応から求める[7]。その際の、ワールド座標における3次元座標とプロジェクタ座標系の2次元座標との対応付けは、プロジェクタから十字型のマウスカーソルを投影し、グリッド線上でクリックすることにより手動で行った。

以上のキャリブレーションの結果を用いれば、USB カメラで \mathbf{x}_c さえ求めれば、プロジェクタ座標の \mathbf{x}_p が容易に算出できる。

3.3 物体位置の推定

本システムでは、アクリル板の上にはトレーシングペーパーが敷かれているので、ビジュアルマーカが認識できるのは物体が床に接地しているときのみである。つまり、物体の位置姿勢は、ビジュアルマーカの x_w, y_w 平面座標と、 x_w, y_w 平面における回転さえ分かれば一意に決まる。図4は、トレーシングペーパーを敷いたアクリル板越しに USB カメラから観察されるマーカの様子である。

ビジュアルマーカの位置とIDの認識には ARToolKit[8]を用いた。正方形マーカの内部にパターンを設定し、テンプレートマッチングによってマーカの識別を行う。正方形マーカの4隅のカメラ座標 \mathbf{x}_c と、その物体がどの物体であるかを示すマーカ内部のパターンの認識からマーカの位置とIDを獲得する。そして、マーカのカメラ座標 \mathbf{x}_c を射影行列 \mathbf{H} を用いてワールド座標 \mathbf{x}_w^{2D} に変換する。物体は接地していると仮定しているため、物体の位置姿勢が一意に求まる。ワールド座標系で定義された物体のモデルを、射影行列 \mathbf{P} を用いてレンダリングする。これは、プロジェクタをカメラと見なしたときに、ワールド座標系のシーンを描画することに相当する。

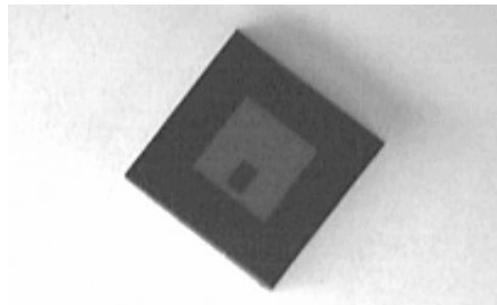


図4：USB カメラから見た物体底面

3.4 現実世界における光学補正

前節までに述べた手法を用いることで、プロジェクタから光学パターンを投影し、現実世界の白色物体にテクスチャや陰影効果をつけることができる。一般的なCG技法では物体の陰影を表現する為に、反射光の強さは入射角の余弦に比例するというランバートの余弦則に基づき次のような計算を行う。ある点 p において、仮想光源へのベクトルと法線のベクトルがなす角を θ_l 、仮想光源の強度を I_l とすると、点 p の輝度 I_p は、

$$I_p = k_p I_l \cos \theta_l \quad (7)$$

と算出される。ここで、 k_p は点 p における仮想的な拡散反射率を表す。

しかし、このようにして生成された光学パターンをそのまま現実世界に投影しても、観測者の目には正しい結果は映らない。なぜなら、図5に示すように、現実世界においてプロジェクタから投影された光が、やはりランバートの余弦則に基づき、物体に当たった際に減衰してしまうからである。そこで、観測者の目に正しい結果が映るように光学パターンを補正する必要がある。

点 p に I_p の明るさをプロジェクタから投影すると、現実世界の点 p でランバートの余弦則に基づく光の減衰が2重に起こってしまう。そこで、点 p において、プロジェクタへのベクトルと法線のベクトルがなす角を θ_r とすると、投影光強度 I_c は次式のようにしなければならない。

$$I_c = w_p \frac{I_p}{\cos \theta_r} \quad (8)$$

ここで、 w_p は点 p におけるプロジェクタによる投影光強度とカメラによる観測値の関係から算出される係数である。本システムでは、物体法線は、レンジファインダを用いて計測した3次元形状から容易に算出できる。また、プロジェクタの射影行列 \mathbf{P} からプロジェクタ位置も求めることができるので、式(8)を用いて投影光強度を求めることができる。式(8)は、プロジェクタから投影された光が、現実世界の白色物体に当たり $\cos \theta_r$ 倍減衰すると、観測光が I_p になることを意味する。

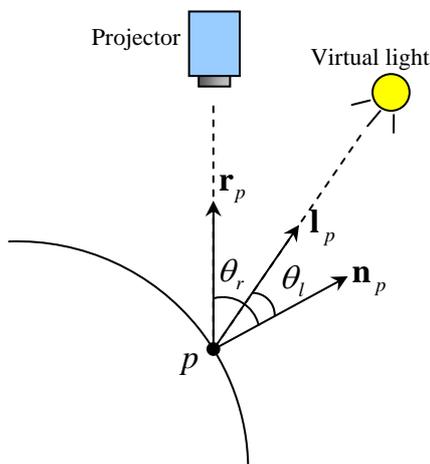


図5：補正すべき投影後の光の減衰

本システムでは、上記で述べた光学補正を実時間で行うため、式(7)によるレンダリング後に補正するのではなく、予め仮想テクスチャに対して式(8)に相当する補正を行っておく。このようにすることで、光学補正を含めたレンダリングを OpenGL 上で実現でき、後処理としての補正が不要となる。対象物体が動かされるたびに、仮想テクスチャに対して光学補正を行う必要があるが、物体が静止している間は、仮想光源を変えても仮想テクスチャを変更する必要はなく、リアルタイム処理に向いている。このようにして生成された光学パターンは、2次元ディスプレイ上で直接見ると不自然であるが、プロジェクタから対象物体に投影し観測すると正しい見え方となる。

4. 実験

4.1 機器構成

本システムは、図6に示すように、上方に設置されたDLP プロジェクタ (PLUS U4-136)、アクリル板の下に設置された USB カメラ (Logicool QV-4000)、PC (PentiumIII 600 MHz) 1台から構成される。



図6：システム概観

4.2 光学補正

3.4節で述べた手法による光学補正の検証を行った。検証には、図7に示すように白色の半球を用いて、実光源による見え方と、それをプロジェクタによって再現した結果を比較した。図8は、図7のそれぞれの画像について球断面の一部の輝度値を表したものである。光学的補正を行った画像は、本来観察されるべき輝度とほぼ等しいことが確認できる。一方、光学的補正を行っていない画像は、プロ

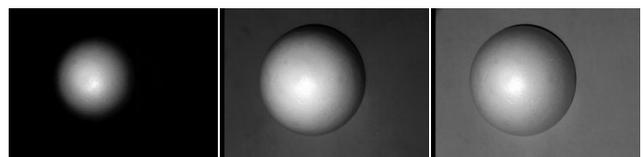


図7：光学補正を行う前の画像 (左)
光学補正を行った画像 (中)
実光源による見え方 (右)

ジェクタへのベクトルと物体法線のなす角度が大きい場所において、2重に減衰が起こってしまい、本来観察されるべき輝度よりも小さくなってしまっている。

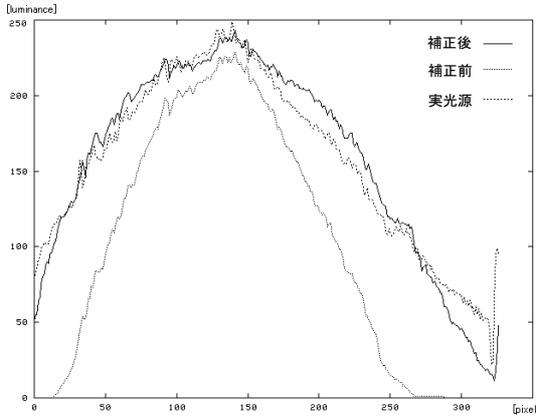


図8：球断面の一部の輝度値

4.3 動的なシーンへの対応

USB カメラで物体の底面画像をキャプチャし、物体の位置を推定した後に、光学パターンを生成・投影する一連の処理の流れを図9に、各処理に要する時間を表1に示す。白色立方体に木目調のパターンを投影した結果を図10に示す。描画速度は約 30[fps]で行えており、様々なシステムへの応用に十分耐えうる描画速度であるといえる。

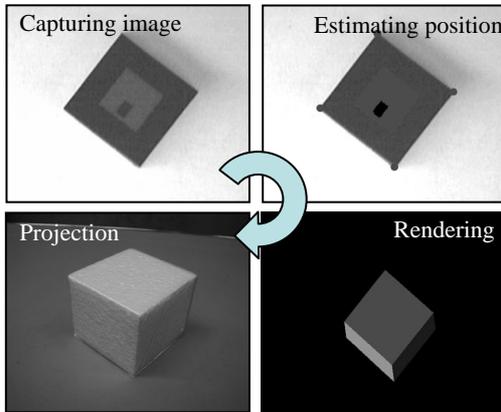


図9：処理の流れ

表1：キャプチャ開始から各処理までに要する時間

処理内容	時間[msec]
キャプチャ	1.9
物体位置推定	7.0
レンダリング	11.6

5. まとめ

本稿では、シーンの動的変化に対応し、リアルタイムに光学パターンを更新するプロジェクタ型複合現実感システムを提案した。また、プロジェクタ光を実世界に投影する際に問題となる光学補正を、仮想テクスチャの反射率として与えることで、リアルタイムに実現する手法について述

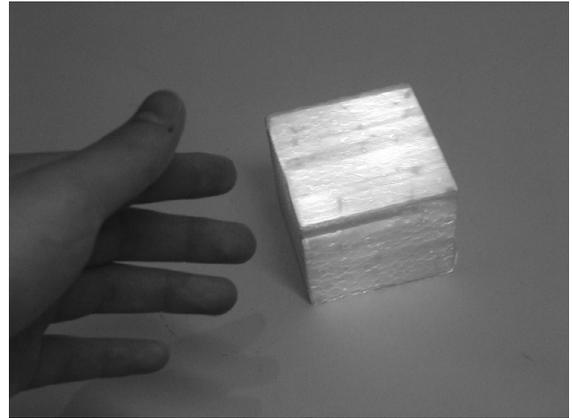


図10：白色立方体に木目調のパターンを投影した結果

べた。

本システムでは、赤外線センサや磁気センサを用いるようなシステムに比べ、白色物体の底面にビジュアルマーカを取り付けるだけで容易に対象物体を増やすことができる。また、物体位置の検出には USB カメラ 1 台のみを用いているので、安価にシステムを構築できる。

しかし、物体の底面にマーカを貼付する本手法は、物体が接地していないと物体の位置姿勢が分からないという問題がある。3次元的位置姿勢を追跡できる簡易なシステムを構築することが今後の課題である。

参考文献

- [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] 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.
- [3] D.Bandyopadhyay, R.Raskar, H.Fuchs, "Dynamic Shader Lamps:Painting on Real Objects", The Second IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR2001), pp.207-216, 2001.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 向川康博, 永井悠文, 大田友一, "SpaceRelighter: 現実空間における照明環境の記録と再現", 信学技報 PRMU 2003-202, pp.25-30, 2004.
- [7] 徐剛, "写真から作る3次元CG", 近代科学社, 2001.
- [8] H.Kato, M.Billinghurst, "Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System", International Workshop on Augmented Reality (IWAR1999), pp.85-94, 1999.