影付け平面を用いた複合現実感における高速陰影表現手法

Fast Shading and Shadowing of Virtual Objects Using Shadowing Planes in Mixed Reality

角田 哲也[†], 大石 岳史^{††}, 正会員 池内 克史^{††}Tetsuya Kakuta[†], Takeshi Oishi^{††} and Katsushi Ikeuchi^{††}

Abstract We have developed a fast shading and shadowing method that uses the shadowing planes and the basis images in mixed reality (MR). The method is model-based and computable in real time by using a standard graphics processing unit (GPU) making it particularly effective when used with an outdoor MR application. To express the shadows of objects, we map the shadow images that are synthesized from the basis images rendered offline with the basis lights onto the shadowing planes, and we compute alpha blending with the objects. The shadowing planes are generated from convex hulls of objects. We obtain the radiance parameters of the real scene from an omnidirectional image and compute the linear sum of the radiance parameters and the basis images on the GPU. We applied this shadowing method to both an indoor and outdoor MR application and found it to be effective.

キーワード：複合現実感，拡張現実感，光学的整合性，影付け，ソフトシャドウ

1. ま え が き

近年，現実世界とコンピュータグラフィックス (CG) によって表現された仮想世界を融合する複合現実感 (MR: Mixed Reality) に関する研究が盛んに行われている^{1)~3)}。MR では，ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 等の表示装置を用いて，現実世界の撮影画像に CG を重ね合わせることににより，あたかも CG で描いた仮想物体が現実世界に出現したかのように見せることが可能である。MR は，工業・教育・医療・建築分野等への応用が期待されており，より現実感の高い合成画像が求められるようになってきている。

MR において仮想世界と実世界の違和感のない合成を行うためには，仮想物体と実画像との間の光学的整合性を満たすことが重要である⁴⁾。光学的整合性を実現するためには，仮想世界と実世界の色・明るさ・陰影等の条件を一致させる必要がある。すなわち，ある特定の光源環境の下で，仮想物体と実物体の表面における陰 (Shade) を一致させるとともに，両者が光を遮ることによって互いに落とし合

う影 (Shadow) を表現しなければならない。

従来より CG の分野では物体の陰影付けに関する研究が盛んに行われている^{5)~7)}。しかし MR における陰影付けは，CG における単純な陰影付けと異なり，1) 実時間で処理を行い，2) 実世界の光源環境に対応し，3) 実・仮想物体相互の影付けを表現しなければならない，という課題がある。

MR における光学的整合性の実現に関して，これまでに多くの研究がなされている⁸⁾。実世界の光源情報を取得する方法としては，ビデオカメラを用いる方法⁹⁾¹⁰⁾，鏡面球を用いる方法¹¹⁾¹²⁾，光センサを用いる手法¹³⁾，物体の影を分析する方法¹⁴⁾等が提案されている。

また影付けに関しては，シャドウマップ法やシャドウボリウム法を用いる手法¹⁵⁾¹⁶⁾が提案されているが，これらは仮想物体のソフトシャドウを表現することができず，合成画像の写実性に乏しいという問題がある。一方，実世界の高ダイナミックレンジ画像を用いて仮想物体を埋め込んだシーンの大局照明を計算し，仮想物体のソフトシャドウを生成する手法を提案されている¹¹⁾。しかしこの手法は実時間での処理が難しいという制約がある。一方，あらかじめ前処理で生成しておいた基礎画像を線形結合することによって，仮想物体のソフトシャドウを高速に生成する手法が提案されている⁹⁾¹⁷⁾。これらの手法は，前処理における基礎画像のレンダリングにラジオシティ法等を利用し，写実的な合成画像を生成することができる。しかし，カメラの位置が固定された画像ベースの手法であるため，ユーザ

2007 年 9 月 28 日受付，2008 年 1 月 17 日再受付，2008 年 2 月 20 日採録

[†] 東京大学 大学院 学際情報学府・日本学術振興会特別研究員 DC

(〒113-0033 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-5938)

^{††} 東京大学 大学院 情報学環

(〒113-0033 文京区本郷 7-3-1, TEL 03-5841-5938)

[†] Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo, JSPS Research Fellow

(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan)

^{††} Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

(7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan)

図 1 影付け平面を用いた影付け
Shadowing using shadowing planes.

は視点を変更することができない。

本稿では、MR における光学的整合性問題を解決するため、シーンの 3 次元モデル周辺に仮想的な平面状の物体（以下、影付け平面と呼ぶ）を配置し、この平面群に対して物体の影を表す画像をテクスチャマッピングすることによって、実光源環境に対応した物体のソフトシャドウを高速に表現する手法を提案する。本手法は従来手法に比べて次の二つの新規性がある。

- 影付け平面によって視点変更が可能。
- GPU による実時間処理が可能。

本手法は前処理段階で影付け平面をシーンに配置し、実光源環境を近似した基礎光源によって物体の影を生成して基礎画像として蓄える。逐次処理段階では、魚眼レンズ付きカメラを用いて取得した全方位画像から実世界の光源分布を推定し、基礎画像と放射輝度パラメータの線形和を求めることによって任意の光源環境に対応した影画像を生成する。次に、図 1 に示すように、影画像を影付け平面にマッピングし、アルファブレンドすることによって物体表面の影を表現する。本稿で提案する影付け手法は、画像ベースの従来手法⁹⁾¹⁷⁾と異なりモデルベースであるためユーザの視点変更が可能である。また基礎画像の合成は単純な線形結合演算であるため、GPU のシェード機能を用いて実時間で行うことが可能である。そのため本手法は、従来手法と比べて屋外などの光源環境が変化するアプリケーションに有効である。

以降、第 2 章では提案手法の処理の流れについて概要を述べる。第 3 章では、影付け平面の生成方法および GPU による基礎画像の合成とアルファブレンディングによる影付け方法を説明する。第 4 章では、基礎光源および基礎画像の生成方法、実光源環境の取得と放射輝度パラメータの計算方法について述べる。第 5 章では、室内・屋外環境における提案手法を用いた実・仮想物体の合成実験の結果を示す。最後に第 6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 概 要

提案手法の処理の流れを図 2 に示す。まず (a) 前処理段階で実・仮想物体の 3D モデルを分割し、各部分の凸包から影付け平面を生成する。次に (b) 実光源環境を近似した基礎光源を作成し、(c) 基礎光源を用いてシーンをレンダ

図 2 提案手法の処理の流れ
Flowchart of the proposed method.

リングする。そして影付け平面に落ちる物体の影を基礎画像として蓄積する。

逐次処理では、まず (d) 魚眼レンズ付ビデオカメラにより実光源環境を撮影し、放射輝度パラメータを計算する。次に (e) 仮想物体のシェーディングを行うためにシーンの仮想光源を設定する。また (f) 放射輝度パラメータと基礎画像・拡散反射成分の線形和を GPU で計算し、影画像を生成する。そして (g) 影画像を影付け平面にマッピングする。最後に (h) 仮想物体と影付け平面を含むシーンをレンダリングし、実画像と合成する。

3. 提 案 手 法

本節では、本稿で提案する影付け手法の概要と利点について説明する。また、影付け平面の生成方法および基礎画像の合成と、影付け平面へのテクスチャマッピングによって影を表現する方法について述べる。

3.1 提案する影付け手法の利点

本稿で提案する影付け平面とは、3 次元モデルの表面上に配置した平面状の仮想物体である。この平面群に影の画像をマッピングし、物体表面とアルファブレンドすることによって、実・仮想物体が相互に投げかけ合う影を表現する。影付け平面は仮想物体自身のセルフシャドウ、仮想物体が実物体に落とす影、仮想物体が実物体から受ける影、の 3 種類の影を表現することが可能である。

提案手法は従来の影付け手法と比較して、ソフトシャドウを影画像のマッピングによって、高速に生成できるという利点がある。また影付け平面は 3D モデルの微小な形状差異を 1 枚の平面内に含み、ユーザの視点からは見えないモデル凹部の影を省略することができる。さらにユーザからの見え方に応じて遠景・近景のモデルに適応的に配置することができる。なお、影付け平面はシーンの幾何形状に対して前処理段階で配置するため、モデルの移動・変形を伴わない静的なシーンにのみ適用可能である。

MR における影の精度を評価する方法としては、実遮蔽物体と仮想遮蔽物体によって生じる影の誤差を比較する方

図 3 影付け平面の生成
Generation of shadowing planes.

法¹⁴⁾があるが、実際のアプリケーションではユーザが経験する主観的な現実感が重要である。そこで提案手法の有効性を確かめるため、ユーザによる合成画像の主観評価実験を行った。実験結果については5.3節で述べる。

3.2 影付け平面の生成

影付け平面は実・仮想物体の幾何モデルから生成する。実世界の3次元幾何形状を取得するには、手作業によるモデリングや、レンジセンサを用いた3次元モデルの自動生成手法¹⁸⁾¹⁹⁾等を利用する。影付け平面を物体の凸包から生成することによって、物体表面の凹凸を少ないポリゴン数で近似的に表現することができる。

提案手法では、図3(b)に示すように3Dモデルを任意の部分に分割し、分割後の各部分から凸包を生成する(図3(c))。モデルの分割は凸包が物体表面となるべく一致するように、ユーザが手作業で行うものとする。次に各部分の凸包から面積の大きい主要な面を抽出し、これを影付け平面として用いる。コーナ部分の微小な凸面等は、ユーザ視点からの可視性を考慮して適宜除外する。以上の手順によって任意の数の影付け平面を生成することができる。

3.3 影付け平面と物体表面のオフセット距離

物体表面に落ちる影を正確に表現するために、影付け平面は物体表面の近傍に配置する。ただし図4に示すように、

図 4 物体表面に対する影付け平面のオフセット配置
Offset of shadowing plane.

物体表面とのZ-fighting(複数の面のZバッファ深度が近接しているために隠面消去が正確に行われず、表示上のちらつきが生じる問題)を避けるため、システムのZバッファのビット数に応じて影付け平面を視点方向に適切な距離だけオフセットする必要がある。OpenGLでは、Z軸負方向を向いたカメラのnearクリップ平面を n 、farクリップ平面を f 、物体のZ座標を Z_{obj} とすると、射影変換後の正規化装置座標におけるZ座標 Z_{ndc} は以下の式で表される。

$$Z_{ndc} = \frac{2fn}{(f-n)Z_{obj}} + \frac{f+n}{f-n} \quad (1)$$

さらにnearクリップ平面の深度値が0、farクリップ平面の深度値が1となるようにビューポート変換を行うと、 Z_{obj} に対応する深度値 d は以下のように求められる。

$$d = \frac{Z_{ndc} + 1}{2} \quad (2)$$

$$= \frac{2fn}{(f-n)Z_{obj}} + \frac{f+n}{2(f-n)} + \frac{1}{2} \quad (3)$$

式3によってカメラと物体表面との距離に対応した深度値を求め、深度値に差異を生む動作環境固有の最小距離をオフセットすることによって、物体表面に対する影付け平面の最適位置を決定することができる。なおOpenGLではglPolygonOffset関数を使用することによって以上の処理を行うことが可能である。

3.4 アルファブレンディングによる影付け

実・仮想物体表面上のある点における放射照度を E とする。この点が影付け平面 P_j^{shadow} によって影付けされた後の放射照度を E' とする。 E' は基礎画像の合成画像 $\sum I_j^{basis}$ と拡散反射成分の合成値 $\sum d_j^{basis}$ を用いて以下のように表される¹⁰⁾。

$$E' = E \frac{\sum I_j^{basis}}{\sum d_j^{basis}} \quad (4)$$

本手法で提案する影付け平面とのアルファブレンディングによる影付けを実現するため、影の強度を表す影画像 I_j^{shadow} を次のように定義する。

$$I_j^{shadow} = 1 - \frac{\sum I_j^{basis}}{\sum d_j^{basis}} \quad (5)$$

図 5 影画像の作成と影付け平面へのマッピング
Generation of shadow images and mapping onto shadowing planes.

式 5 において、影画像 I_j^{shadow} 中の強度 1 となる画素は本影（完全に物体に遮られた影）となる部分を示し、強度 0 となる画素はまったく影の落ちない部分を示す（図 5 (a)）。

本研究では図 5 (b) に示すように、影付け平面 P_j^{shadow} に影画像 I_j^{shadow} をアルファ値としてマッピングすることにより、物体表面上における影を表現する。ここで影付け平面は反射率 0 の物体とする。影付け平面と物体表面のアルファブレンディングを行うことにより、物体表面の放射照度 E' は以下の式で表される。

$$E' = E(1 - I_j^{shadow}) + P_j^{shadow} I_j^{shadow} \quad (6)$$

式 6 において、影付け平面 P_j^{shadow} の反射率は 0 と仮定したため、 $P_j^{shadow} I_j^{shadow} = 0$ となる。すなわち、

$$E' = E(1 - I_j^{shadow}) \quad (7)$$

式 7 に式 5 を代入することにより式 4 が得られる。つまり影付け平面に覆われた物体表面の放射照度は影画像の強度によって減衰し、他の物体による影付けの影響を表現することができる。

最後に、実画像を背景とした状態で仮想物体と影付け平面を含むシーンのレンダリングを行ない、合成画像を生成する。影付け平面は仮想物体と実物体のどちらを覆う場合でも、画素値を減衰させることにより影を表現することが可能である。

3.5 GPU による基礎画像の合成

物体に対して m 枚の影付け平面を生成したとして、各々の影付け平面を $P_j^{shadow} \{j = 1, 2, \dots, m\}$ と表す。また n 個の基礎光源 $L_i \{i = 1, 2, \dots, n\}$ によって影付け平面 P_j^{shadow} 上に落ちる影を基礎画像 $I_{j,i}^{basis}$ として表す。同様に各々の基礎光源で照射した時に影付け平面 P_j^{shadow} 表面上で観測される拡散反射成分を $d_{j,i}^{basis}$ と表す。さらに、あ

$$S_1 \times I_{j,1}^{basis} + S_2 \times I_{j,2}^{basis} + \dots + S_n \times I_{j,n}^{basis} = \Sigma I_j^{basis} \quad (a) \text{ 基礎画像}$$

$$S_1 \times d_{j,1}^{basis} + S_2 \times d_{j,2}^{basis} + \dots + S_n \times d_{j,n}^{basis} = \Sigma d_j^{basis} \quad (b) \text{ 拡散反射成分}$$

図 6 放射輝度パラメータと基礎画像および拡散反射成分の線形結合
Linear combination of luminance parameters and basis images and diffuse components.

図 7 フラグメントシェーダによる基礎画像の合成
Synthesis of basis images using fragment shader.

る時刻における実光源環境の放射輝度分布を放射輝度パラメータ S_i を用いて表す。

基礎光源の放射輝度と物体表面の放射照度は線形的な関係にある。この線形性は物体間の相互反射や影についても同様に成り立つ。そこで図 6 (a) に示すように、影付け平面 P_j^{shadow} において、基礎画像 $I_{j,i}^{basis}$ と放射輝度パラメータ S_i の線形結合を行うことにより、任意の光源環境に対応したソフトシャドウ画像 ΣI_j^{basis} を生成する。また図 6 (b) に示すように、放射輝度パラメータと影付け平面の拡散反射成分 $d_{j,i}^{basis}$ の線形和 Σd_j^{basis} を計算する。以上の処理は画像同士の演算であるため、通常の影付け処理に比べて高速に実行することができる。また、単純な線形演算であるため、ハードウェアで処理することができる。

図 7 に GPU のフラグメントシェーダにおける基礎画像の合成方法を示す。フラグメントシェーダでは、頂点をラスタライズされたフラグメントに対して、テクスチャの合成が行われる。ここではまず、同一の基礎光源 L_i から生成した基礎画像をタイル状に敷き詰めたテクスチャ画像を作成する。テクスチャ画像には影付け平面数 m 枚の基礎画像が配置される。次に、テクスチャ画像と影付け平面拡散反射成分 $d_{j,i}^{basis}$ および放射輝度パラメータ S_i をフラグメントシェーダに転送し、複数のテクスチャユニットを利用して線形和を計算する。最後に、合成後のテクスチャ画像に対して、元の基礎画像に対応する UV 座標から画素値を抽出し、影付け平面にマッピングする。

図 8 半球状面光源
Hemispheric surface light source.

図 9 基礎画像の生成
Generation of basis images.

4. 実装

本章では前処理における基礎光源および基礎光源を用いた基礎画像の生成方法について述べる。

4.1 基礎光源による実光源環境の近似

図 8 において、物体表面上の微小面 A における放射照度を考える。微小面 A に入射するすべての放射束を考えると、微小面 A から天頂角 θ 、方位角 ϕ の方向を見たときの放射輝度が $L(\theta, \phi)$ であるような半球状の面光源を仮定する。微小面 A から (θ, ϕ) 方向に微小角度 $(d\theta, d\phi)$ によって構成される面光源上の微小領域 B を考えると、微小面 A が半球状面光源全体から受ける総放射照度 E は次式で表される²⁰⁾。

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta, \phi) \sin \theta \cos \theta d\theta d\phi \quad (8)$$

これまで、球面調和関数などを用いた基礎光源によって、任意の光源環境を表現する研究が行われている²¹⁾。しかし従来手法では屋外環境における太陽のような高周波成分を持つ光源を再現することが困難である。そこで本研究では、Geodesic Dome を用いて半球状面光源を分割し、離散的な基礎光源を生成する。基礎光源の放射輝度スケールを変化させることによって、実世界における任意の放射輝度分布に対応することが可能となる。

Geodesic Dome とは、各面が 3 角形で構成される正多面体で、各頂点が球に内接するものであり、球面をほぼ等しい面積に分割する性質を持つ²²⁾²³⁾。図 9 (a) に示すように、Geodesic Dome の各領域によって分割された面光源を基礎光源 L_i とする。半球面の分割が十分に細かく、分割後の面光源（基礎光源）内の放射輝度が均等であると仮定

図 10 全方位画像による実世界光源分布推定
Estimation of light distribution from omnidirectional image.

図 11 MR システムの外観
Apparance of MR-system.

すると、物体表面上の微小面 A における総放射照度 E は基礎光源 L_i の放射輝度の和によって表すことができる。

4.2 基礎画像の生成

図 9 に基礎画像の生成方法を示す。地平面に配置した影付け平面 P_j^{shadow} に対し、Geodesic Dome 上の基礎光源 L_i によって照射したときに落ちる物体の影を、基礎画像 $I_{j,i}^{basis}$ として取得する。また、物体を除いた状態で同様にレンダリングを行い、影付け平面の拡散反射成分 $d_{j,i}^{basis}$ を取得する。

4.3 実光源環境の取得

まずカメラを用いて実世界の光源環境を計測し、図 10 に示すようなすべての光源入射方向に対応する全方位画像を取得する。次に、全方位画像に Geodesic Dome を投影し、画像を各々の基礎光源 L_i に対応する三角形領域に分割する。さらに各領域内の画素値の和を求め、これを領域内の画素値の最大値 (255) の和で割ることによって、0.0 ~ 1.0 の範囲に正規化された対象領域の放射輝度パラメータ S_i を計算する。そしてシーン内の基礎光源に放射輝度パラメータの値を反映させることによって実世界の光源分布を再現し、仮想物体のシェーディングを行う。また同時に放射輝度パラメータを 3.5 節で述べた基礎画像の線形結合に用いることによって、任意の光源分布に対応した影画像を合成し、影付け平面を用いて物体の影付けを行う。

5. 実画像との合成実験

提案手法の有効性を確認するため、室内・屋外環境において実画像に仮想物体を合成し、仮想物体の陰影を表現する実験を行った。本章ではまず実験に用いた MR システムについて説明する。次に室内および屋外での実験結果につい

て説明する．なお本稿では計算効率を高めるため、基礎画像をグレースケール画像として保存し、GPUのテクスチャRGBAチャンネルにそれぞれ異なる基礎画像を割当てた．そのため光源と影の色は考慮しないものとする．

5.1 MR システム

基本となるMRシステムには、キヤノン社のMR Platform²⁴⁾を用いた．MR Platformはビデオシースルー方式のHMD、Polhemus社の6自由度磁気センサFASTRAKによって構成される．このシステムでは、実画像の取得、実世界と仮想物体の幾何学的位置合わせ、実画像と仮想物体の合成処理を行うことができる．HMD上に表示される合成画像の大きさは640×480画素である．実光源環境の撮影には魚眼レンズ(FIT社FI-19)を装着したCCDカメラ(Victor社KY-57)を使用した．実験に用いたPCの仕様は、OS: Windows XP (SP2), CPU: Core2Duo E6850 3.0GHz, RAM: 4GB, GPU: nVIDIA GeForce8800GTS 640MBである．MRシステムの外観を図11に示す．

5.2 実験結果(室内環境)

室内環境における実画像との合成結果を図12に示す．影付け平面は地面に対して1枚設置し、40個の基礎光源を用いて128×128画素の基礎画像40枚を生成した．図12(a)では仮想物体の陰影を全く表現していないため、不自然な合成画像になっている．次に図12(b)では仮想物体の表面におけるシェーディングを表現している．仮想物体の立体感が追加されたが、実画像の地面からは浮いているように見える．さらに図12(c)では影付け平面を用いて地面に落ちる仮想物体の影を表現している．仮想物体の違和感が解消され、より自然な合成画像が生成されている．さらに図12(d)に示すように、ユーザ視点を移動した場合でも、影付け平面によって正しい位置に影が表現されている．なお本実験では、仮想物体表示位置の地面において光源環境の撮影を行った．また仮想物体のポリゴン数は12である．ディスプレイとの垂直同期を有効にした場合、陰影処理を含めた描画フレームレートはディスプレイの垂直同期周波数と一致した．垂直同期を無効にした場合、1フレームあたりの処理速度は0.93ミリ秒であった．

5.3 実験結果(屋外環境)

屋外環境における実画像との合成結果を図13に示す．図13(a)は仮想物体のシェーディングは行っているが、影付けは行っていない画像、図13(b)は仮想物体のシェーディングと影付けを行っている画像である．ここでは36枚の影付け平面と40個の基礎光源を用い、合計1520枚の基礎画像を生成した．

実験環境は周囲に建物等が存在しない平地である．光源環境の撮影はユーザや機材等が映り込まないように、MRシステムから約5m離して行った．また仮想物体のポリゴン数は約50000である．ディスプレイとの垂直同期を有効にした場合、陰影処理を含めた描画フレームレートはディスプレイの垂直同期周波数と一致した．垂直同期を無効にし

た場合、1フレームあたりの処理速度は1.46ミリ秒であった．なお図13(b)において、36枚の影付け平面のうちカメラの視野に含まれない21枚の描画を省略した場合、1フレームあたりの処理速度は1.29ミリ秒となり約13%の向上が確認された．

影付けによる現実感の向上を確認するために、屋外環境における合成画像を用いて、ユーザによる主観評価を行った．VR・MRにおけるCGの影の有無と誤差がユーザに与える影響を評価した事例としては、²⁵⁾²⁶⁾が挙げられる．本稿では23～33歳の大学院生13名に合成画像を呈示し、影がある場合とない場合では、画像から受ける現実感がどの程度変化するかを調査した．評価方法は、図13の仮想物体を様々な視点から見た、影の有無を含む合成画像19枚をランダムに呈示し、各画像から受ける印象について、調査用紙に7段階(1:非常に不自然～7:非常に自然)で評価してもらった．影の有無で分けた画像グループごとの平均値を図13(c)に示す．影付けによって見た目の現実感は約22%向上しており、提案手法の有効性を確認することができた．

6. む す び

本稿では、影付け平面と基礎画像を用いたMRにおける高速陰影表現手法を提案した．この手法は従来手法に比べて、1) 影付け平面を用いたモデルベース手法のため、視点の移動が可能、2) GPUによる処理の高速化が可能、という新規性がある．提案手法では前処理の段階で、影を受ける物体の表面上に影付け平面を設置し、実光源環境を近似した基礎光源により、各々の影付け平面に落ちる仮想物体の影を基礎画像として取得する．逐次処理の段階では、まず魚眼レンズ付ビデオカメラにより実光源環境の全方位画像を撮影し、分布を表す放射輝度パラメータを求める．次に放射輝度パラメータを元に仮想物体のシェーディングを行い、基礎画像の線形和を求める．最後に合成後の基礎画像と影付け平面の拡散反射成分から影画像を生成し、影付け平面にアルファ値としてマッピングすることにより、ソフトシャドウを表現する．またGeodesic Domeを用いた光源分布推定では、実環境光源の複雑な配光特性を正確に取得することは困難である．光源推定手法を改良し、複雑で規模の大きい仮想物体に対しても、実物体の影を正確に表現することが、今後の課題として挙げられる．

本研究の一部は、文部科学省技術振興調整費リーディングプロジェクト「大型有形・無形文化財の高精度デジタル化ソフトウェアの開発」の援助を受けて行った．また、実験の場を与えて下さった明日香村役場、復元図面をご提供いただいた橿原考古学研究所、奈良文化財研究所、論文の構成についてご助言をいただいた東京大学生産技術研究所の高松淳氏に感謝の意を表す．

図 12 仮想物体の陰影付けの比較（室内）
Comparison of shading and shadowing of virtual object indoors.

図 13 仮想物体の陰影付けの比較（屋外）
Comparison of shading and shadowing of virtual object outdoors.

【文 献】

- 田村秀行, 大田友一: “複合現実感”, 映情学誌, **52**, 3, pp.266-272 (March 1997)
- R. Azuma: “A Survey of Augmented Reality”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, **6**, 4, pp.355-385 (August 1997)
- R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, and B. MacIntyre: “Recent Advances in Augmented Reality”, IEEE Computer Graphics and Applications, **21**, 6, pp.34-47 (November 2001)
- 池内克史, 佐藤洋一, 西野恒, 佐藤いまり: “複合現実感における光学的整合性の実現”, 日本バーチャルリアリティ学論誌, **4**, 4, pp.623-630 (December 1999)
- A. Woo, P. Poulin, and A. Fournier: “A Survey of Shadow Algorithms”, IEEE Computer Graphics and Applications, **10**, 6, pp.13-32 (November 1990)
- F. Crow: “Shadow Algorithms for Computer Graphics”, Proc. SIGGRAPH'77, pp.242-248 (1977)
- J. M. Hasenfratz, M. Lapierre, N. Holzschuch, and F.X. Sillion: “A Survey of Real-time Soft Shadows Algorithms”, Computer Graphics Forum, pp.753-774 (December 2003)
- K. Jacobs and C. Loscos: “Classification of Illumination Methods for Mixed Reality”, Proc. Eurographics State of the Art Report(STAR), pp.95-118 (September 2004)
- 佐藤いまり, 林田守広, 甲斐郁代, 佐藤洋一, 池内克史: “実光源環境下での画像生成: 基礎画像の線形形による高速レンダリング手法”, 信学論 (D-II), **J-84-D-II**, 8, 1234-1242, (August 2001)
- I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi: “Acquiring a Radiance Distribution to Superimpose Virtual Objects onto a Real Scene”, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, **5**, 1, pp.1-12 (January-March 1999)
- P. Debevec: “Rendering Synthetic Objects into Real Scenes: Bridging Traditional and Image-Based Graphics with Global Illumination and High Dynamic Range Photography”, Proc. SIGGRAPH '98, pp.189-198, (July 1998)
- M. Kanbara and N. Yokoya: “Geometric and photometric registration for real-time augmented reality”, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.279-280 (September 2002)
- H. Matsuoka, A. Onozawa and E. Hosoya: “Environment Mapping for Objects in the Real World: a Trial Using ARToolkit”, Proc. Int. Augmented Reality Toolkit Workshop (September 2002)
- I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi: “Illumination from Shadows”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **25**, 3, pp.290-300 (March 2003)
- M. Haller, S. Drab, and W. Hartmann: “A Real-Time Shadow Approach for an Augmented Reality Application Using Shadow Volumes”, Proc. Symp. on ACM Virtual Reality Software and Technology(VRST'03), pp.56-65 (October 2003)
- 神原誠之, 岩尾友秀, 横矢直和: “拡張現実感のための動的シャドウマップを用いたシャドウレンダリング手法”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp.297-304 (July 2005)
- J. S. Nimeroff, E. Simoncelli, and J. Dorsey: “Efficient Re-

- Rendering of Naturally Illuminated Environments”, Proc. Eurographics Workshop on Rendering (EGWR94), pp.359-373 (June 1994)
- 18) M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade, and D. Fulk: “The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues”, Proc. SIGGRAPH’00, pp.131-144 (July 2000)
- 19) K. Ikeuchi: “Modeling from Reality”, Proc. Third International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM’01), pp.177 (May 2001)
- 20) B. K. P. Horn: “Robot Vision”, The MIT Press (March 1986)
- 21) P. P. Sloan, J. Kautz, J. Snyder: “Precomputed Radiance Transfer for Real-Time Rendering in Dynamic, Low-Frequency Lighting Environments”, Proc. SIGGRAPH’02, pp.527-536 (July 2002)
- 22) A. Pugh: “Polyhedra: a Visual Approach”, University of California Press (September 1976)
- 23) K. Ikeuchi: “Recognition of 3D Object using the Extended Gaussian Image”, Proc. 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.595-600 (August 1981)
- 24) S. Uchiyama, K. Takemoto, K. Satoh, H. Yamamoto, and H. Tamura: “MR Platform: A Basic Body on Which Mixed Reality Applications Are Built”, Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR02), pp.246-253 (September 2002)
- 25) 中村宣孝, 宮里勉, 岸野文郎: “仮想空間における影の効果に関する評価”, 信学会 1995 年総合大会講演論文集, pp.263 (March 1995)
- 26) 中野学, 北原格, 亀田能成, 大田友一: “複合現実感における影の不整合に関する実験的検討”, 信学会 2007 年総合大会講演論文集, pp.169 (March 2007)

かくた てつや
角田 哲也 2002 年, 京都大学工学部建築学科卒業。2005 年, 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程終了。現在, 同大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程在籍。日本学術振興会特別研究員 DC。複合現実感の研究に従事。

おおishi たけし
大石 岳史 1999 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。2002 年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程修了。2005 年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻博士課程修了。同年東京大学生産技術研究所特任助手, 2006 年特任助教を経て, 2007 年より東京大学大学院情報学環特任講師。実物体の形状モデリングの研究に従事。博士 (学際情報学)。

いけうち かつし
池内 克史 京都大学工学部機械工学科卒業。1978 年, 東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程終了。MIT 人工知能研, 電総研, CMU 計算機科学科を経て, 1996 年より, 東京大学生産技術研究所教授。2000 年より, 東京大学大学院情報学環教授兼担。人間の視覚機能, 明るさ解析, 物体認識, 人間による組立て作業の自動認識などの研究に従事。正会員。