

複合現実感における建築物の陰影表現手法

角田 哲也[†] 大石 岳史^{††} 池内 克史[†]

[†] 東京大学大学院情報学環・学際情報学府

〒 113-0033 東京都文京区本郷 7 丁目 3-1

^{††} 東京大学生産技術研究所

〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 駒場 II キャンパス E 棟

E-mail: †{kakuta,oishi,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし 本稿では、複合現実感における重要な技術課題である仮想物体と実画像の光学的整合性の実現に向けて、建築物のような静的モデルに対する、実時間での陰影付け手法を提案する。提案手法では、まず実光源環境を近似した光源により、仮想物体の影を表す基礎画像を生成する。次に、実世界の光源分布から取得した輝度パラメータと基礎画像の線形和を求め、合成した画像をモデル表面の影付け平面にマッピングすることにより、仮想物体の陰影表現を行う。最後に奈良県明日香村川原寺跡において文化財建築の復元実験を行うことにより、提案手法の有効性を示す。キーワード 複合現実感、拡張現実感、ヘッドマウントディスプレイ、光学的整合性、陰影付け、文化財、

Shading and Shadowing of Architecture in Mixed Reality

Tetsuya KAKUTA[†], Takeshi OISHI^{††}, and Katsushi IKEUCHI[†]

[†] Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, the University of Tokyo

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

^{††} Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

E-mail: †{kakuta,oishi,ki}@cvl.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract This paper describes a new method for shading and shadowing in Mixed Reality using a set of basis images that has been rendered in advance and shadowing planes. We first describe how we approximate the illumination of the scene with a number of directional lights and generate the basis images. We then describe how we synthesize basis images and set them onto shadowing planes as a texture. The proposed method is especially appropriate for static models such as buildings. Hence, we chose to apply this method to a Japanese old temple, Kawaradera, with the goal of improving the quality of synthesized images in Mixed Reality.

Key words Mixed Reality, Augmented Reality, Head Mounted Display, Photometric Consistency, Shadowing, Cultural Heritage

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィクス (CG) で描かれた仮想物体を、現実空間の画像に融合させる複合現実感 (MR: Mixed Reality) の研究が注目されている [1] [2]。複合現実感の応用としては、機械製造工程・保守作業における作業支援、注釈・情報提示によるナビゲーション、医療・建築分野でのシミュレーション、ゲーム・エンターテインメントへの適用など、幅広い事例が報告されている。また最近では、ウェアラブルコンピュータとの併用によって、屋外の観光地や遺跡における文化財や人々の生活の様子を復元展示する試みが行われている [3] [4]。

複合現実感の技術的な課題としては、仮想環境と現実環境の違和感のない合成を行うために、幾何学的・光学的・時間的な 3 つの観点における整合性を実現することが必要と考えられている。このうち光学的整合性については、仮想物体の陰影を実物体と一致させ、さらに仮想物体の影が実画像上の適切な位置に落とされる必要がある。しかし複合現実感においては、仮想物体の描画と実画像の合成処理を実時間で行わなければならないという制約があるために、処理に時間のかかる仮想物体の影付けは困難であると考えられる。光学的整合性の実現のために提案されている手法としては、カメラを用いて実世界の光源環境を直接計測する手法 [5] [6] [7] や、間接的に入力画像中の実物

体の陰影から光源環境を推定する方法 [8] などが挙げられる。

一方 CG の分野では現実感の高いソフトシャドウを高速に表現する手法が提案されている [9] [10] [11]。これらの手法では効率的に写実性の高い影付けを行うことができるが、複合現実システムでの実光源環境に対応した影付けを行うことは想定されていない。

そこで佐藤らは、光源輝度と物体表面の明るさの関係の線形性に着目し、前処理段階で生成しておいた仮想物体の影の画像（本稿ではこれを基礎画像と呼ぶ）を、実光源環境に対応して合成処理する手法 [12] を提案している。この方法によって、刻々と変化する実世界の光源分布に対応した仮想物体の影付けを、高速に行うことが可能となる。しかしながら、佐藤らの手法は固定された視点を対象としているため、観察者が任意に視点を移動できる複合現実システムにそのままの形で適用することはできない。また仮想物体の特定の位置における影を用いるため、物体の位置姿勢が変化するシーンには対応不可能である。さらに仮想物体の影を表現できるのは、実世界の地平面上のみという制約がある。

以上の背景を踏まえて、本稿では、複合現実感において光学的整合性を実現するために、仮想物体の陰影を実時間でいう手法を提案する。まず、仮想物体表面および実世界の幾何形状に対応する、任意の位置に配置した影付け用の平面（本稿ではこれを影付け平面と呼ぶ）に対して落とされる仮想物体の影を基礎画像として取得する。次に、実世界における光源分布を分析し、基礎画像の線形和によって合成したソフトシャドウを表す画像を、上述の影付け平面にアルファ値としてマッピングする。これによって太陽の運動などによって次第に遷移する実光源環境と、急速に変化するユーザ視点の両者に対応した、適切な仮想物体の陰影表現を行うことが可能となる。なお、提案手法は照明条件の変化が著しい屋外での適用を想定し、特に建築物などの静止した仮想物体を対象としている。そこで、実験対象として奈良県明日香村に位置する川原寺を選択し、現地にて同寺の復元 CG モデルを合成表示することにより、提案手法の有効性を確認する。なお本稿では、複合現実システムに使用する表示装置として、ビデオスルー方式のヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いるものとする。この方式では、図 1 に示すように、実世界を撮影した入力画像に対して仮想物体の重ね込みを行うため、合成処理の段階で影付けなどの操作を行うことにより、光学的整合性を向上させることが可能である。

本稿ではまず第 2 章において、光源環境の近似モデルを定義し、影付け平面の設置と基礎画像の生成を行うオフライン処理の段階について説明する。次に第 3 章では、ビデオカメラを用いた実光源環境の計測と、シーン内の光源の設定、さらに基礎画像の線形和と影付け平面へのマッピングを行うオンライン処理の段階について解説する。第 4 章では実験対象である川原寺遺跡の概要を説明し、使用機器と様々な条件における合成結果についての考察を行う。最後に第 5 章で結論と今後の課題について述べる。

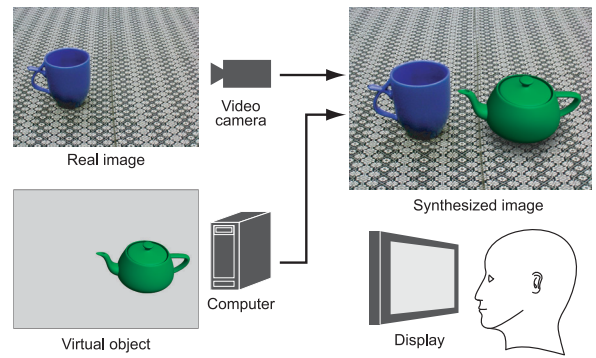


図 1 ビデオスルー方式の処理の流れ

2. 基礎画像の生成

本章ではまず、光源環境の近似モデルについて説明する。次に影付け平面の概念と機能について説明し、最後にそれらを用いて基礎画像を取得するまでの手順を示す。本章の内容は、複合現実システムを運用する前段階の処理として行われるものである。

2.1 実光源環境の近似

現実世界の光源環境は、太陽や照明などの直接光だけでなく、壁や地面からの相互反射による寄与分も間接光として考慮する必要がある。図 2 は点光源と面光源によって生じる影の違いを示している。

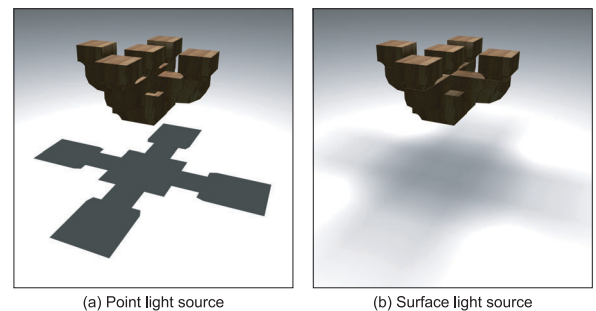


図 2 点光源と面光源による影の違い

図 2(a) に比べて同図 (b) では、光源の一部によって照射された半影の領域が生じ、輪郭がぼかされたソフトな影が表現されている様子がわかる。一般に我々が実世界で観察する物体の影は、様々な光源と複雑な相互反射の作用によって、図 2(b) のように表される。

そこで本稿では、写実的な影を表現するために、観測点に対して全方向から入射する光を想定し、実世界の光源環境を図 3(a) に示すような半球状の面光源として考える。

図 3(a) において、中心点 A から (θ_i, ϕ_i) の方向に存在し、微小角度 $\delta\theta$ と $\delta\phi$ に対応する微小領域を考えると、点 A からこの領域を望む微小な立体角は $\delta\omega = \sin\delta\theta_i \delta\phi_i$ と表される。また、 (θ_i, ϕ_i) の方向からの単位立体角あたりの輝度を $L_0(\theta_i, \phi_i)$ とすると、上記の微小領域からの輝度は、 $L_0(\theta_i, \phi_i) \sin\delta\theta_i \delta\phi_i$ と表現される。従って、面光源全体から照射される観測点 A の照度 E は、以下のように表すことができる。

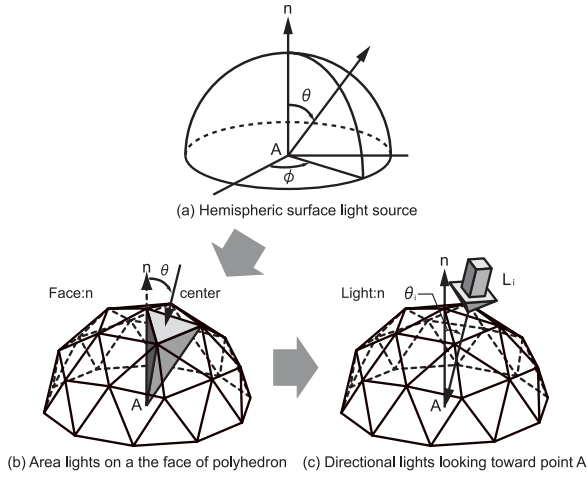


図 3 実光源環境の近似

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \sin \phi_i d\theta_i d\phi_i \quad (1)$$

ここで、 $\cos \theta_i$ は微小領域からの照射角度による光源輝度の減衰を意味する。

次に、図 3(b) に示すように半球状面光源を多面体で近似し、面方向へのサンプリングを行う。ここでは近似する多面体として、Geodesic dome の Class 1 D-2 を用いる。この多面体は、ほぼ面積の等しい 40 の三角形面から構成されるため、半球面を概ね等密度でサンプリングすることが可能である。またこの段階で、多面体の頂点方向ではなく、面内のすべての点を考慮した三角形の面光源の集合を考えることにより、近似する多面体の面数が少ない場合でも精度を上げることができる。図 3(b) における点 A の照度 E は次のように表される。

$$E = \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sum_{j=1}^p L_j \quad (2)$$

ここで L_j は単位立体角あたりの光源輝度、 p は各々の面内の画素数、 n は多面体の面数をそれぞれ表している。また、照射角度による輝度の減衰パラメータは、三角形面中心の画素のもので代表させている。この操作によって、式 (1) で与えられる 2 重積分の項は、多面体の各面ごとの離散的な積分で近似することができるようになる。

さらに計算効率を向上させるため、本稿では多面体各面の面光源を図 3(c) のように面の中心から観測点 A に向かう平行光源の集合で近似する。実世界の光源を分析する際には多面体各面内のすべての点について輝度の計算を行うが、仮想世界で実世界の光源を再現する場合には、図 3(c) に示すように面光源を平行光源に代替する処理を行う。これによって正確な光源分布の測定を行いながら、効率的な照明効果を得られることが期待される。点 A の照度 E はさらに単純化され、次のように表すことができる。

$$E = \sum_{i=1}^n L_i \cos \theta_i \quad (3)$$

ここで L_i は各面を代表する平行光源の輝度を表す。以上の

過程によって、実世界の光源環境を半球状面光源から多面体各面の面光源に近似し、さらに各面の中心から照射する平行光源の集合として考えることが可能となる。

2.2 影付け平面の設置

次に、仮想物体の影を表現するための影付け平面の設置を行う。

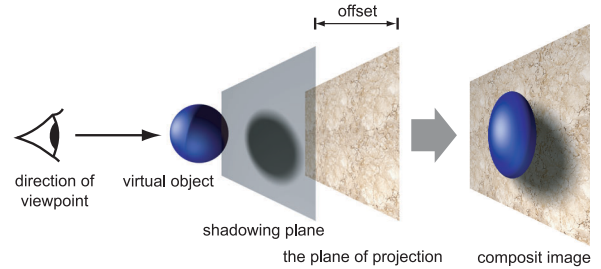


図 4 影付け平面の概念

図 4 に示すように、影付け平面を被投影面から視線方向に若干オフセットすることによって、オブジェクト同士の干渉を防いでいる。また影付け平面自体は黒い物体とし、これに合成後の影の画像をアルファ値としてマッピングすることにより、視線方向から見て後方に位置する被投影面にあたかも影が落ちたかのように見せかけることができる。

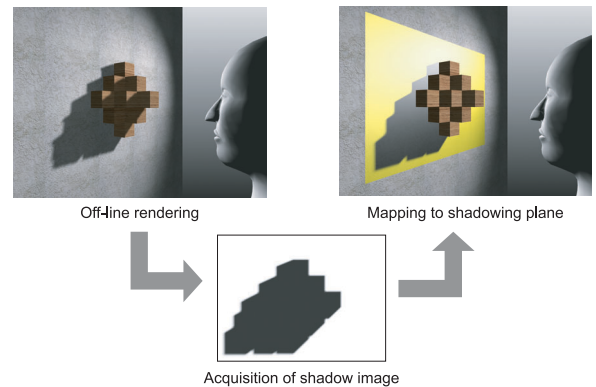


図 5 影付け平面による影の表現

図 5 は影付け平面に落ちる影の状況をあらかじめ画像として取得しておき、それを再び影付け平面にマッピングすることによって、仮想物体の影を擬似的に表現する手順を示している。仮想物体のレンダリングはオフラインで行うため、描画時間を制約されることなく精密な影付けを行うことができる。一方オンライン処理の段階では、あらかじめ用意した基礎画像を合成して影付け平面にマッピングする処理のみを行うため、通常影付けを行う場合よりも高速に影を描画することが可能である。

佐藤らの手法で表現できる影は $z = 0$ の平面のみに限られていたが、本稿の提案手法では、影付け平面を 3 次元空間上で自由に配置することにより、実世界中の任意の面や仮想物体自身に対して影付けを行うことが可能である。また、仮想物体を観察する距離やモデルの複雑さに応じて、影付け平面の覆う範囲を適応的に設定することができるため、対象となるモデルに応じて表現する影の精度を任意に制御することができる。例えば

本稿の対象となる古建築のCGモデルは、複雑な形状を持つ多数の部材から構成されるが、各部材の影を一定のまとまりごとに1つの影付け平面で代表させることによって、見た目の現実感を損なわずに処理効率を向上させることが可能である。

2.3 基礎画像の生成

以上をもって光源環境の近似と、仮想物体の影を擬似的に表現するための影付け平面の設置が完了した。次に、実光源を簡略化した複数の平行光源によって仮想物体のレンダリングを行い、影付け平面に落ちる影を基礎画像として取得する過程を説明する。

図6は対象となるCGモデルに対して、実光源環境を近似した複数の平行光源を配置した状態を表す。

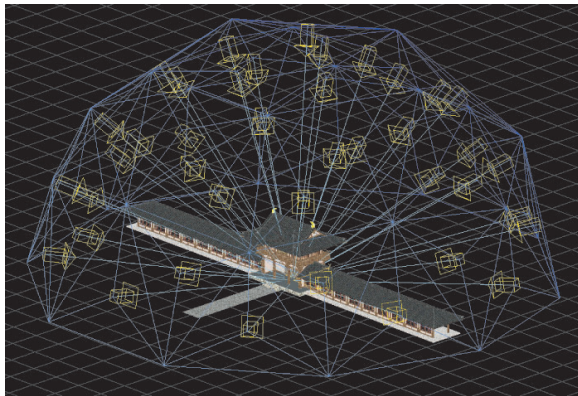


図6 光源の配置

ここでは半球状面光源を近似する多面体として、面数40のGeodesic domeを使用している。各平行光源は三角形面の中心に位置し、モデルの中心に向けられている。このような光源の配置でレンダリングを行うことにより、多面体各面方向からの光源に対応する仮想物体の影の現れ方を調べることができる。

図7は影付け平面に落ちる影を取得するために、平面の法線方向に直行投影カメラを配置した状態を表す。

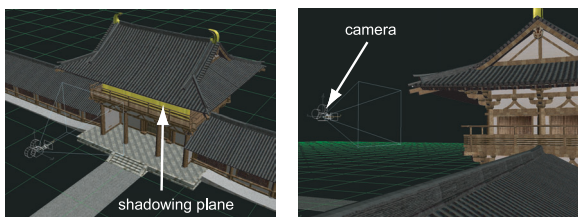


図7 影付け平面に対するカメラの配置

レンダリング時には仮想物体は不可視であり、仮想世界のカメラによって取得される画像は、対象面に対して落とされるモデルの影のみを示すことになる。図7で用いた建築物のモデルでは、地表面だけでなく壁面や屋根面にも影付け平面を設置し、それぞれに対して適切な大きさの基礎画像を取得できるようにカメラを配置している。また提案手法では、影付け平面へのマッピング用テクスチャ座標が正しく設定されるならば、矩形以外の任意の形状を持った面でも影付け面として利用することができる。

図8は、地面に落ちる仮想物体の影を、鉛直方向からの平行投影によって取得した基礎画像を表す。

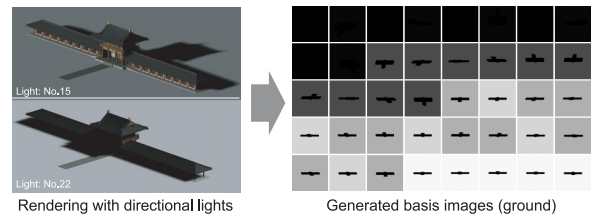


図8 地表面に対する基礎画像の生成

40個の平行光源によって、次第に影の位置と形状が変化していく様子わかる。また、影の落ちない部分についても、対象面に入射する角度によって光源輝度の減衰が生じ、照度に差が現れることが確認できる。

以上のようにして、各々の影付け平面ごとに、近似多面体の面数分の基礎画像を取得することができる。すなわち n 個の平行光源 $L_i (i = 1, 2, \dots, n)$ と、 m 枚の影付け平面を用いた場合には、 $m \times n$ 枚の基礎画像 $I_{j,i} (j = 1, 2, \dots, m, i = 1, 2, \dots, n)$ が生成されることになる。またここで、基礎画像中で全く仮想物体の影の落ちない部分、即ち光源の入射角度による減衰パラメータ $\cos \theta_i$ のみを表す画素の明るさを $a_i (i = 0, 1, \dots, n)$ として同様に取得しておく。

一方、垂直に配置された影付け平面については、後方からの光源の照射に対して完全に影に覆われる状況が生じ、明るさ0の基礎画像が生成されることがある。そのような基礎画像については、簡便のため後述の線形和計算において、単純に照度 $E = 0$ を乗算するものとした。

3. 合成処理

本章では、前処理段階であらかじめ生成しておいた基礎画像を用いて、実世界の光源分布に対応した仮想物体の影を表現し、実画像と合成するまで流れを説明する。

3.1 実光源環境の計測

まず、魚眼レンズ付きのビデオカメラにより、実世界の光源環境を計測する作業を行う。図9に示すように、カメラを地平面に対して鉛直上方向に設置することにより、実世界上半球の全方位画像を撮影する。これによって例えば屋外環境の場合には、周囲の建物や木立を含む天空の光源分布が取得されることになる。

図10に示す画像は、屋外環境で撮影された全方位画像に対して、光源近似の多面体を投影したものである。この画像中の三角形領域は多面体の各面に相当し、領域内の画素の明るさを計測することによって、その面によって近似された光源部分の輝度のスケールを得ることができる。そこで各々の近似光源の輝度を表すために、輝度パラメータ $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ を導入する。 S_i は多面体各面の中心に設置した平行光源の輝度を意味し、仮想世界における光源の輝度に反映されるとともに、基礎画像からソフトシャドウを合成する際において、それぞれの画像に乘算されるスケールとして用いられる。輝度パラメータの

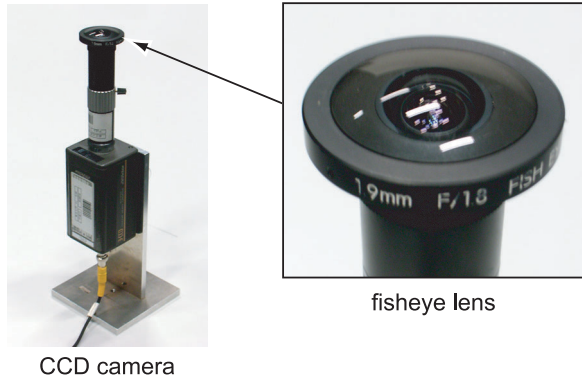


図 9 魚眼レンズ付きビデオカメラ

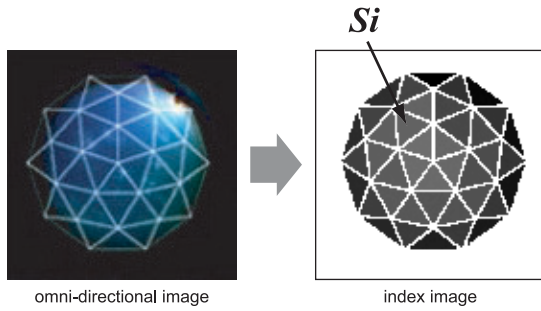


図 10 全方位画像からの輝度パラメータ S_i の取得

計算方法を以下に示す．

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} I_j}{I_{i \max}} \quad (4)$$

ここで、 I_j は画素の明るさ、 n_i は三角形領域 i の画素数、 $I_{i \max}$ は領域 i の明るさの最大値を表す．全方位画像に多面体を投影して分割された三角形領域ごとの画素の明るさの総和を求め、あらかじめ計算しておいたその領域内での明るさの最大値で割ることによって、その領域に対応する近似光源の輝度パラメータ S_i を取得することができる．

3.2 仮想世界の光源輝度の設定

次に、得られた輝度パラメータを用いて仮想世界の光源輝度の設定を行う．図 11 にシーン内の光源配置を示す．

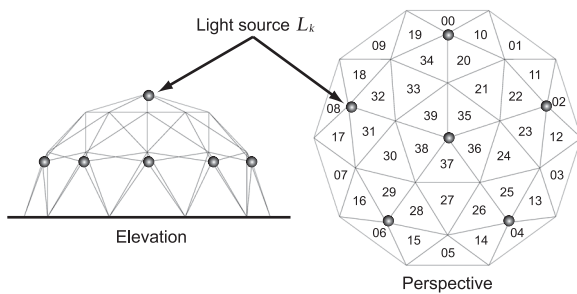


図 11 仮想世界の光源の配置

本来ならば基礎画像の生成に用いた平行光源すべてを用いるべきであるが、実装環境において利用できる光源数に制限があり、また多数の光源は描画時間を著しく低下させる問題があるために、本稿では近似光源を均等に代表するような 6 個の光源

$L_k (k = 1, 2, \dots, 6)$ を選定している． L_k の輝度は、近傍の 5 つの三角形領域における輝度パラメータ S_i の総和から、以下の式によって決定される．

$$L_k = \frac{\sum_{i=1}^5 S_i}{L_{k \max}} \quad (5)$$

このようにして輝度パラメータ S_i からシーンの光源輝度 L_k を求めることにより、実世界の光源環境を反映した仮想物体のシェーディングを正確に行うことが可能となる．

3.3 基礎画像の線形和

ここでは、光源輝度と物体表面の明るさの関係の線形性を利用することによって、オフライン処理で生成しておいた基礎画像 $I_{b_j,i}$ と光源輝度の減衰値 a_i 、および上述の輝度パラメータ S_i から、その時間・場所における実光源環境に対応した影の画像を合成する方法を説明する．

$$S_1 \times \boxed{I_{b1}} + S_2 \times \boxed{I_{b2}} + \dots + S_n \times \boxed{I_{bn}} = \boxed{I_{\text{sum}}}$$

$$S_1 \times \boxed{a_1} + S_2 \times \boxed{a_2} + \dots + S_n \times \boxed{a_n} = \boxed{A_{\text{sum}}}$$

図 12 基礎画像と輝度パラメータの線形和による画像の生成

図 12 は、基礎画像 $I_{b_j,i}$ と輝度パラメータ S_i の線形和によって、現実感の高いソフトシャドウを示す画像 I_{sum} が合成される様子を表す．同様に a_i と S_i の線形和によって、基礎画像における光源輝度減衰値の合計スカラー値 A_{sum} が得られる．影付け平面 j に対して n 枚の基礎画像 $I_{b_j,i}$ と輝度パラメータ $S_{j,i}$ が用いられる場合、影の合成画像 I_{sum_j} および合計スカラー値 A_{sum_j} は以下の式によって求められる．

$$I_{\text{sum}_j} = \sum_{i=1}^n S_i \times I_{b_j,i} \quad (6)$$

$$A_{\text{sum}_j} = \sum_{i=1}^n S_i \times a_{j,i} \quad (7)$$

ここで取得されたスカラー値 A_{sum_j} は、対応する影付け平面がその光源環境において取り得る明るさの最大値を示すことから、 I_{sum_j} を A_{sum_j} で割った画像 $T_j (0 \leq T_j \leq 1)$ は、仮想物体の影の濃度スケールを意味することがわかる．

$$T_j = \frac{I_{\text{sum}_j}}{A_{\text{sum}_j}} \quad (8)$$

合成後の画像 I_{sum_j} において、 $T_j = 0$ となる画素は全く光源の影響を受けない照度 $E = 0$ の領域を示し、反対に $T_j = 1$ となる画素は全く影の落ちない領域を示す．

3.4 影付け平面へのマッピング

さらに前節で求められた影の濃度スケール画像 T_j を、対応する影付け平面 j にアルファ値としてテクスチャマッピングする処理を行う．

図 13 は仮想物体のユーザ視線側に設置された複数の影付け

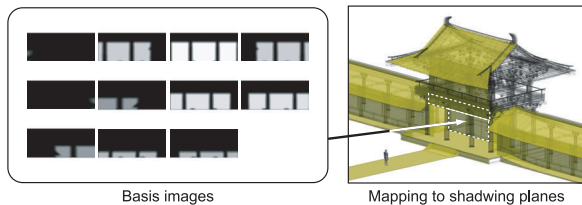


図 13 影付け平面へのマッピング

平面に対して、基礎画像の線形和から求めた画像 T_j をマッピングする様子を表している。影付け平面自体は黒いオブジェクトであるため、濃度スケール $T_j = 0$ となる部分は完全に被投影面を覆う影となり、反対に $T_j = 1$ となる部分は全く影の落ちない透明な領域として処理される。

3.5 実画像への仮想物体の重ねこみ

最後にビデオスルー方式の HMD に付随するカメラにより撮影された実画像に、仮想物体と影付け平面を合成する処理を行う。仮想物体と影付け平面は、3次元空間内で相対的な位置関係を保持したまま同時に描画されるため、ユーザの視点が変わっても、正しい位置に影を表現することができる。また、実画像に落ちる仮想物体の影については、地表面のような実世界の幾何形状に対応する影付け平面の描画を行い、実画像中の影の落ちる画素を相対的に暗くすることによって、表現することが可能である。図 14 は、実画像と仮想物体の合成処理の概念を表す。

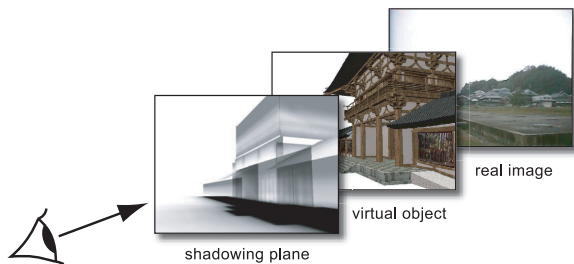


図 14 合成処理の概念図

このようにしてオンライン処理では、実世界の光源環境に対応した仮想物体の適切な陰影表現を行う。提案手法では、基礎画像の生成をオフラインで行っておくことにより、精密な影の計算を行いながら、同時に複合現実システムに適用可能な実時間での描画処理を行うことが可能である。

4. 実 験

本章では、実験対象である川原寺の概要と復元 CG モデルの制作過程、および使用機器について説明し、様々な条件における合成結果と、処理速度に関する考察を行う。

4.1 実験対象

奈良県高市郡明日香村に位置する川原寺(弘福寺)は、天武朝より平城遷都までの期間、官寺して重要な地位を占め、飛鳥四大寺の一つにも数えられた大寺である。その発祥については諸説あるが、発掘調査の結果からは6世紀中頃の創建という見方が有力と考えられている[16]。しかし現在では建築部分が失

われ、図 15(a) に示すように、わずかに基壇部分を残すのみとなっている。

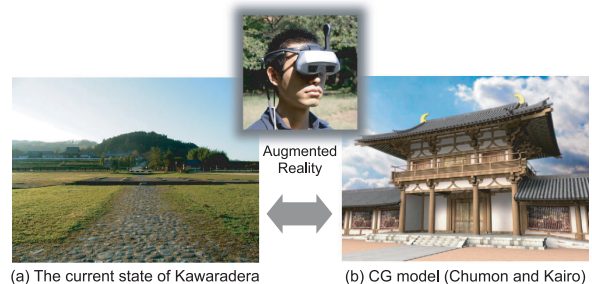


図 15 川原寺の現状と復元 CG モデル

そこで、川原寺において提案手法を実装し、複合現実感技術を用いて創建当時の伽藍を再現する試みを行うことになった。従来の CG による文化財の復元や複製等による展示に比べて、複合現実感による合成表示は、遺跡現地で効果的に体験することができ、尚且つモデルの修正が容易である等の利点が考えられる。

川原寺の復元 CG モデルの作成にあたっては、図 16 に示すように、昭和 32・33 年の発掘調査をもとに制作された復元案[14]を参照した。また、モデリング作業には Discreet 社の 3dsmax を使用した。現段階では中門と回廊部分のモデルが完成し、頂点数は約 23,000、ポリゴン数は約 42,000 となっている。

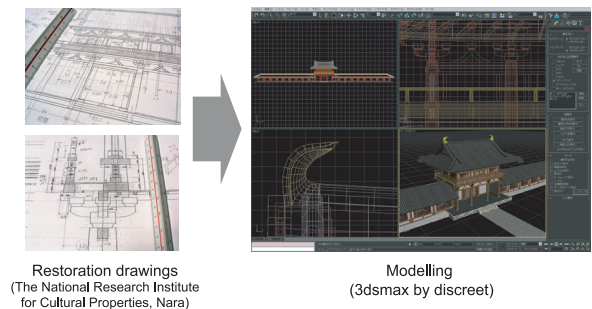


図 16 モデリングの過程

4.2 使用機器

複合現実感アプリケーションの構築にあたって、主に Canon 社の MR Platform [15] を用いている。同システムはビデオスルー方式の HMD、6 自由度の 3 次元磁気センサ (米国 Polhemus 社製)、PC (Linux, 2.8GHz Pentium4 CPU, 1024MB RAM, nVIDIA GeForce FX5950 Ultra GPU) により構成されている。また、実光源環境の計測には、3CCD カラービデオカメラ (Victor 社製 KY-F57) を使用している。図 17 に MR Platform の構成と、ビデオカメラの接続状況を示す。また図 18 にシステムの外観を示す。仮想世界と実世界の幾何学的位置合わせに関しては、上記の磁気センサを使用している。

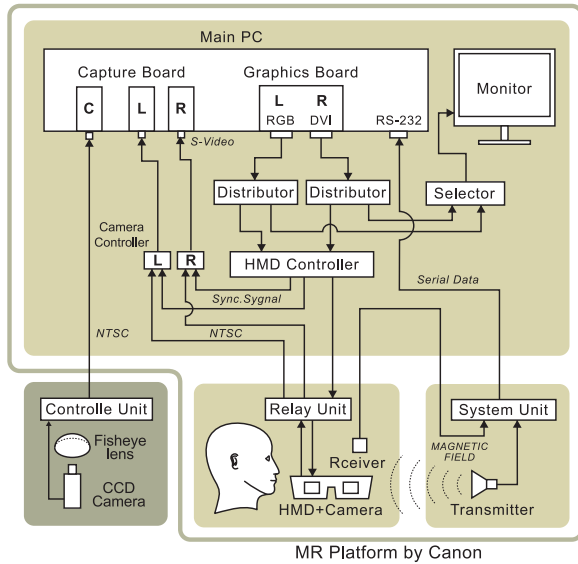


図 17 MR Platform の構成

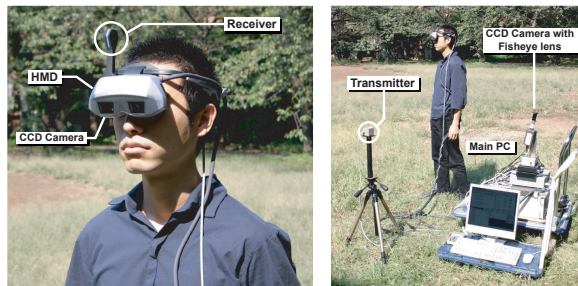


図 18 システム外観

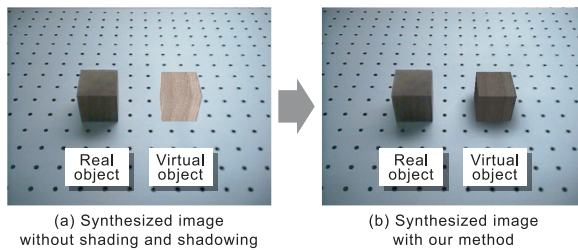


図 19 合成結果 (屋内)

4.3 実験結果

まず、屋内環境における合成実験の結果を図 19 に示す。

図 19(a) は光源環境を全く考慮せず、単純に実画像へ仮想物体を重ね込んだ状態を表す。これに対して同図 (b) は、提案手法を適用して仮想物体の陰影を表現した状態を表す。実際には仮想物体の表示されている位置にビデオカメラを設置し、その位置における光源環境を取得することによってモデルの陰影付けを行っている。並置された実物体との比較において、仮想物体表面のシェーディングと地平面へ落ちる影の表現により、合成画像の現実性が向上している様子がわかる。

次に、屋外環境における合成実験の結果を図 20 に示す。

同図において、中門の壁面に廂や柱により生じた影が落ちることにより、仮想物体自身の影が表現されていることがわかる。一方、図 21 は時間の経過に伴う光源環境の移り変わりによって、仮想物体の陰影が次第に変化していく様子を示している。

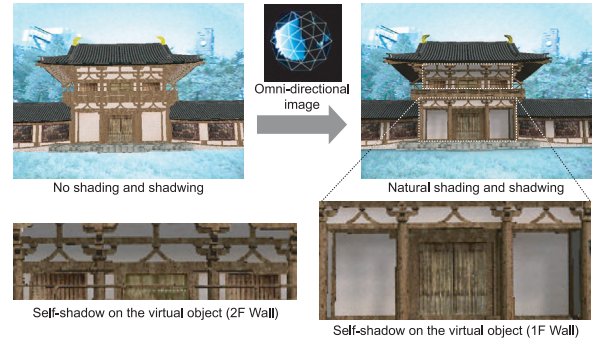


図 20 合成結果 (屋外)



図 21 光源環境の遷移に対する陰影の変化

提案手法では、実光源環境の計測を毎フレームごとに行うため、緩やかな太陽の運動と、天候の急速な変化の両方に対応することができる。

さらに、川原寺現地における合成実験の結果を図 22 に示す。

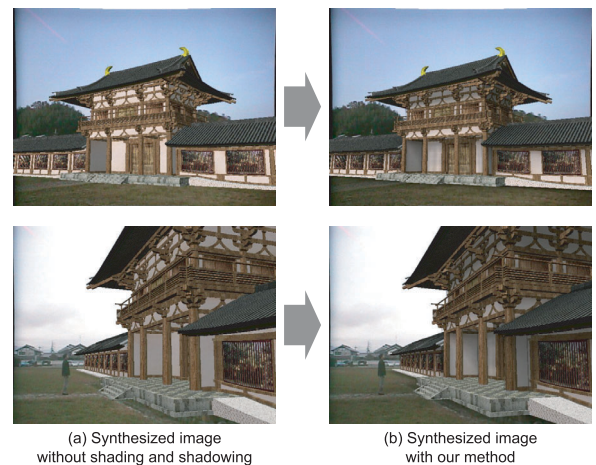


図 22 合成実験 (川原寺現地)

図 22(a) は陰影付けを行う前の合成画像を示し、同図 (b) は提案手法を適用した後の合成画像を示す。シェーディングと影付けによって、仮想物体の外観に深みが増すとともに、実画像に違和感なく重ねこまれている様子がわかる。

光源環境をサンプリングする近似光源の数を増やして多くの基礎画像を使用するほど、影の表現精度が向上することは明らかであるが、その代わりに処理速度の低下が生じることがわかる。そこで、基礎画像を一定枚数以上確保しながら処理の効率化を図るために、以下の工夫を行った。

- 輝度パラメータ S_i に閾値を設ける
 - 輝度パラメータ S_i の変化量 ΔS_i に閾値を設ける
- まず、全ての光源の中で相対的に輝度の低い光源から生じる影は、合成画像中であまり目立たないことが実験よりわかった。

特に晴天時で影がくっきり現れる状況では、太陽の反対方向から入射する光によって生じる影は、肉眼でほとんど認知できないと考えられる。そこで、相対的に微弱な光源の影響を省略するために、輝度パラメータ S_i に閾値を設け、それを下回る場合には基礎画像の線形和計算から除くこととした。

また屋外の光源環境を観察すると、大抵の天候では光源環境の変化が非常に緩やかであることがわかった。そこで、輝度パラメータ S_i を毎フレームごとに再計算する処理を省略するために、前フレームとの差分 ΔS_i を計算し、 ΔS_i が閾値を下回る場合には、線形和の再計算を行わず、以前に合成した影の画像をそのまま用いるものとした。

以上の工夫によって、最終的に 6.3FPS のフレームレートを実現した。しかし実時間での遅延のない合成処理を行うには、まだ多くの課題が残されている。今回の実験では、仮想物体の描画処理のみで 6.8FPS の処理時間を要したため、モデルの描画にかかる処理時間を削減することが、今後は特に必要であると考えられる。

5. 結 び

本稿では、複合現実感における合成画像の光学的整合性の実現に向けて、実光源環境に対応した仮想物体の実時間陰影付け手法を提案した。また川原寺遺跡を対象に複合現実システムによる文化財建築の復元を行い、仮想物体の陰影表現によって合成画像の現実感を向上させ、本手法の有効性を示した。特に提案手法では、これまで実時間処理の制約のために実現困難であった、複合現実感における仮想物体の影付け処理を、オフラインで生成した基礎画像と影付け平面を用いることによって、高速に行うことが可能である。

ただし、提案手法は前処理段階で基礎画像を生成するため、仮想物体が変形・移動するようなシーンには適用できない。

今後の課題としては、GPU の並列処理などによる影付け処理のさらなる効率化や、屋外環境での太陽輝度の正確な取得、また実画像と CG 画像全体の明るさの自動的な調整などが挙げられる。本稿の提案手法は、実験で用いた川原寺遺跡のように、屋外での大規模な建築物の合成に特に有効と考えられる。また、合成画像の視覚的な現実感が必要とされる、複合現実感によるシミュレーションやゲームなどの分野での応用が期待できる。

6. 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学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、川原寺の復元図面をご提供いただいた奈良文化財研究所、復元に関するご助言を頂いた鳥取環境大学の浅川滋男教授と朝日放送株式会社の牟田口章人氏に対して深甚なる謝意を表す。なお、図 6,7,8,14,15,16,21,22 における CG モデルのテクスチャ画像は、文献 [17] [18] [19] の写真より合成されたものである。資料をご提供いただいた、毎日新聞社、岩波書店にこの場を借りて感謝の意を表す。

文 献

- [1] R. Azuma, "A Survey of Augmented Reality", *Teleoperators and Virtual Environments*, vol.6, no.4, pp.355-385. Aug. 1997.
- [2] 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. Nov. 2001.
- [3] P. Daehne, J. Karigiannis, "ARCHEOGUIDE: System Architecture of a Mobile Outdoor Augmented Reality System", *Proc. Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2002)*, pp. 263-264, 2002.
- [4] 天目 隆平, 神原 誠之, 横 直和, "拡張現実感を用いたウェアラブル観光案内システム「平城宮跡ナビ」", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2003-186, Jan. 2004.
- [5] A. Fournier, A. Gunawan and C. Romanzin, "Common Illumination between Real and Computer Generated Scenes", *Proc. Graphics Interface'93*, pp.254-262, 1993.
- [6] P. E. 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, 1998.
- [7] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Acquiring a radiance distribution to superimpose virtual objects onto a real scene", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, No. 1, pp. 1-12, 1999.
- [8] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination distribution from brightness in shadows: adaptive estimation of illumination distribution with unknown reflectance properties in shadow regions", *Proc. IEEE Int. Conf. Computer Vision (ICCV'99)*, pp. 875-882, 1999.
- [9] M. Segal, C. Korobkin, R. van Widenfelt, J. Foran, and P. Haeberli, "Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping", *Proc. SIGGRAPH'92*, pp. 249-252, 1992.
- [10] M. Herf, and P.S. Heckbert, "Fast Soft Shadows", *Proc. SIGGRAPH'96*, pp. 145, Aug. 1996.
- [11] Soler, C., and Sillion, F. "Fast calculation of soft shadow textures using convolution", *Proc. SIGGRAPH'98*, pp. 321-332, 1998.
- [12] 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: 基礎画像の線形和による高速レンダリング手法", 電子情報通信学会論文誌, D-2, Vol.J84-D-2, pp.1864-1872, 2001.
- [13] 奈良国立文化財研究所(編), "川原寺発掘調査報告", 奈良国立文化財研究所学報第九冊, pp. 53-54, 1960.
- [14] 奈良文化財研究所, "川原寺復元図面".
- [15] 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 (ISMAR 2002)*, pp. 246-253 Sep. 2002.
- [16] 奈良国立文化財研究所(編), "川原寺発掘調査報告", 奈良国立文化財研究所学報第九冊, pp. 53-54, 1960.
- [17] 奈良六大寺大観刊行会(編), "奈良六大寺大観第一巻 法隆寺", 東京, 岩波書店, 1972.
- [18] 小川光三, "不滅の建築 1 法隆寺五重塔", 東京, 毎日新聞社, 1988.
- [19] 小川光三, "不滅の建築 2 唐招提寺金堂", 東京, 毎日新聞社, 1988.