

実物体ならびに実環境の光学的側面のモデル化

池内克史 佐藤洋一 西野 恒 佐藤いまり

東京大学生産技術研究所 第3部

〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1

Tel : 03-3401-1433 E-mail : {ki, ysato, kon, imarik}@iis.u-tokyo.ac.jp

あらし高精度な複合現実感環境のためには、仮想物体と現実物体の間の幾何的な整合性などに加え、光学的な整合性を実現することが必要不可欠である。光学的整合性を実現するためには、如何にして仮想物体モデルに現実性の高い反射特性を付与するかという点、そして獲得された仮想物体モデルを如何にして現実空間に重ね込むかという点、の2つが重要となる。本報告では、この2つの課題の解決を目指し、我々が提案してきた手法の概略を紹介する。前半では、現実性の高い反射特性を持った仮想物体モデルを生成する手法として、固有テクスチャ法と呼ばれる手法を紹介する。次に後半では、仮想物体モデルを現実空間内に重ね込む際に重要となる現実空間内における光源環境を推定するための手法を紹介する。

Photometric Modeling of Real Objects and Environments

Katsushi Ikeuchi Yoichi Sato Ko Nishino Imari Sato

Institute of Industrial Science

University of Tokyo

7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo JAPAN 106-8558

Tel : 03-3401-1433 E-mail : {ki, ysato, kon, imarik}@iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract This paper presents an overview of our efforts on mixed reality. These efforts span two aspects: how to create models of virtual objects, and how to integrate such virtual objects with real scenes. For model creation, we have developed a new method called the Eigen-Texture method which automatically creates models by observing the real objects. For the integration of a virtual object with a real scene, we have developed a method that renders virtual objects based on real illumination distribution. We have successfully tested the proposed methods by using real images to demonstrate their effectiveness.

1 はじめに

仮想現実感システムは、人間と計算機のインタフェースとして非常に重要な位置をしめる。その中でも、すべてを仮想世界のみで構成するのではなく、仮想物体を現実背景画像に埋め込む複合現実感、仮想世界のリアリティが格段に向上し、非常に有望な手法である。複合現実感システムは、仮想モール、ゲーム、ロボットプランニングといった幅広い応用が考えられる。

本論文ではまず仮想物体のモデルの生成法について考える。現在多くのシステムではモデルがプログラマーにより手で入力されている。このため入力に非常に手間が掛かり、開発コストも高くなる。一方、先の述べた複合現実感の応用として、例えば電子モールなどがあるが、これらの応用では仮想モールに陳列すべき商品といった仮想化するべき実物体が存在する。近年、コンピュータビジョンの分野では、実物体の形状や反射率を測定する手法が各種開発されてきた。これらの方法を用いて実物体の仮想化が可能である。この際、幾何形状入力と光学特性入力の2つの分野が考えられるが、本論文では後者の光学特性の入力に的を絞り、2章において自動的に光学的特性を獲得するための手法を説明する。

次に仮想商品をモールの陳列棚に陳列するように、完成した仮想モデルを現実シーンに埋め込む必要がある。この際、仮想物体が実シーンの正しい場所に表示され、サイズも適正なものとなるように、仮想物体と現実シーンとの幾何学的整合性をとる必要がある。さらに、表示された仮想物体の色や明るさ影といった光学条件が実シーンのそれらと同じようになるよう光学的整合性をとる必要もある。さらに、仮想物体が運動した場合、これの動きと現実シーンのそれが同じであるように、時間的整合性をとる必要がある。本論文ではこの3つの整合性のうち光学的整合性について、3章で考える。

2 光学モデルの生成

仮想物体のモデルを実物体・環境から得る手法として、画像ベース、いわゆるイメージベースレンダリング (IBR) と呼ばれる手法を多くの仮想現実感システムが採用している [1, 2]。これらの手法は、物体の見え方というのは、その物体が存在する3次元空間を通過す

る光線の分布により完全に記述されると考え方に基いたものである。物体の見え方のモデルを作成する場合には、カメラ視線方向を変化させながら、実物体のカラー画像を撮影し、それらの入力画像を元に、物体が存在する空間における光線の分布を計測する。このような光線の分布を表現する空間は、一般に光線空間、Lightfield、Lumigraph などと呼ばれることが多い。与えられたカメラ視点から見た場合に観察されるべき物体の画像を合成する際には、あらかじめ記録された光線の分布から、必要な光線情報を取出し画像を再構成するという手順をとる。

IBRに基づく手法では、言うなれば物体の見え方そのものを光線情報として記録しておくため、非常に複雑な形状をもつ物体などにも適用できるという利点がある。しかしながらその反面、IBRに基づく手法では、対象物体の正確な3次元幾何モデルを持たないため、影が生成できなかったり、触感が生成できないといった欠点があり、複合現実感システムに使用するのは難しいという限界が存在する。

2.1 モデルベース法

これらの問題を解決するものとして、複数視点方向から撮影された対象物体の距離画像とカラー画像をもとに、物体モデルを生成するための手法 (モデルベース法) を開発した [7]。この手法では、物体表面の反射特性をモデル化する際に、ある特定の反射モデル関数を仮定しその反射パラメタを推定する点に特色がある。このモデルベース法により、対象物体の3次元幾何モデルと物体表面における反射係数の分布が一旦求められれば、反射モデルにもとづき任意の光源・観測方向での物体のカラー画像を合成することができる。

この手法がIBRに基づく手法と大きく異なるのは、対象物体の正確な3次元形状を利用するという点である。モデルベース法では、3次元形状モデルと光学モデルに基づき仮想物体の色や陰影を生成できるために、背景実画像と整合性がとれた極めて自然な複合現実感画像が生成できるという特徴がある。また、物体に関するモデルとして蓄える必要のある情報は、物体表面形状と表面上の各点での反射係数だけであり、これらの情報から任意の光源・視点下での画像が生成できるといった長所がある。

2.2 固有テクスチャ法

しかしながらモデルベース法には、例えば人間の髪の毛や毛皮表面のように、物体表面における反射現象が解析的なモデルで近似できない場合に、適用が困難になるという欠点があった。そこでこのような場合にも対応できる手法として、固有テクスチャ法を開発した[3]。図1はこの手法の概略を示す。

この手法もまず距離画像列から3次元形状モデルを生成する。次にカラー画像列を3次元形状モデルの上に重ねあわせた後、これらのカラー画像を3次元物体の表面上で定義される座標上で固有空間法を用いて圧縮する。この結果得られる、上位の固有値とこれに対応する固有ベクトルを対象物体の見え方を表現するモデルとして、3次元メッシュ上に蓄積する。逆に、画像生成はこれらの固有ベクトルから逆変換で行われることになる。複雑光源下で固有テクスチャ法を利用する場合には、生成されるべき画像はそれらの要素となる光源下での画像の重ねあわせとして得ることができる。

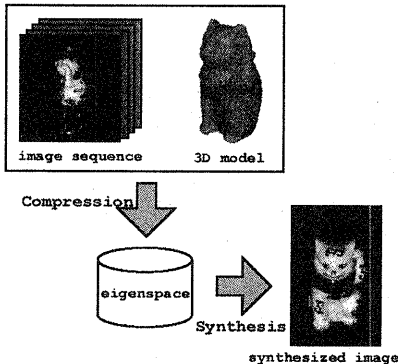


図1: 固有テクスチャ法

2.3 理論の概略

固有テクスチャ法においても、入力画像として対象物体の姿勢を変化させながら撮影したカラー画像列と距離画像列を用いる。モデルベース法と同様に距離画像列から3次元メッシュよりなる3次元形状モデルを作成し、この上にカラー画像を重ねあわせる。各三角パッチ上のカラー画像を同一の面積・形状をもつ平面上へ投影する。ここでは、投影された物体表面上の色分布をセル画像と呼ぶことになる。図2にこのようにし

て得られるセル画像列の例を示す。観測方向に応じてセル画像の明暗が変化し遮蔽のため完全に暗くなっているのが判る。

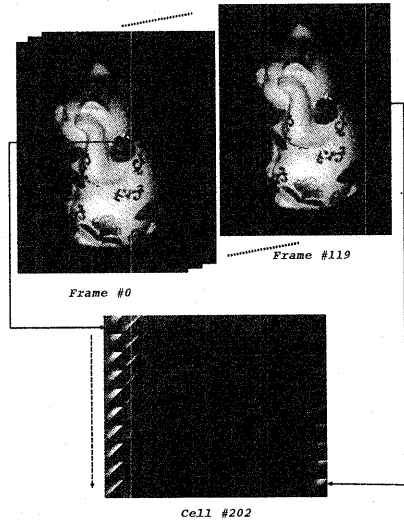


図2: セル画像

セル画像における各画素の色の変化は、モデルベース法における物体表面上の各点における反射光の色の変化と同様に、三次元物体表面上の同一地点での変化を示す。従って、内部反射成分に相当する部分の色の变化はなく、単にその地点の明るさの変化のみを反映している。このように、明るさの変化のみで物体色等の変化を伴わないセル画像列を固有空間法を利用して圧縮するため、高い圧縮率が成ることが可能となる。

セル画像の圧縮は以下のステップを経て行われる。まず、各セル画像中の画素をラスタースキャンすることにより $1 \times 3N$ のベクトル X_m に変換する。ここで m は入力カラー画像列の中でどのフレームにおいて観察されたものかを示し、 N は1つのセル画像内の画素数である。

$$X_m = [x_{m,1}^R \cdots x_{m,N}^R x_{m,1}^G \cdots x_{m,N}^G x_{m,1}^B \cdots x_{m,N}^B] \quad (1)$$

このようなベクトル X_m により表現されるセル画像を入力カラー画像列の M フレーム全てに関して作成しまとめることにより、セル画像列は次の $M \times N$ の行列として表現できる。

$$X = [X_1 X_2 \dots X_M]^T \quad (2)$$

この行列を元にして、固有空間法を用いて固有値と固有ベクトルを求める。この際に、行列 X の各成分から平均の値を引く。これにより最大の固有値に対応する固有ベクトルが変化の一番大きい次元に対応する。この時点では固有空間は $3N$ 次元と非常に高次元になっており、もとのセル画像を完全に復元するためにはこのすべての次元が必要になる。一方、比較的低次元の固有値と固有ベクトルで現画像のかなりの部分が復元できることが知られている。このため固有値を大きい順にソートし、それらの総和で何パーセントの部分が復元できるかを計算する。しかる後に、選ばれた固有ベクトルを用いて固有空間を形成し、各セル画像をこの空間へ投影する。

以上、固有テクスチャ法の概要をまとめると、入力カラー画像列がセル画像列へと変換され、このセル画像列から観測行列を得た後、この観測行列が固有空間へ投影される。結果として、 $k(M + 3N)/3MN$ なる圧縮率が達成される。次に、画像の合成に関しては、この逆変換を行うことでセル画像を生成し、これらのパッチを3次元幾何モデルの上に貼り付けるという手順となる。

2.4 手法の実装

固有テクスチャ法を実装し、実際の物体に適用した。まず、モデルベース法の時と同じ実験装置を用いてカラー画像列と距離画像列を撮影した。このカラー画像列と距離画像列に上記の手法を適用した。図3に8次元の固有空間を用いて再現した例を示す。ここでは120枚の入力カラー画像から、8次元に相当する固有画像をモデルとして蓄えているので、物体の見え方を表現するモデルとして8枚分の画像を蓄えたこととデータ量的に等価であり、非常に効率の良いモデル表現となっていることが判る。正確には、各方向における固有値も蓄積する必要があるので、圧縮率は7.9%になっている。

固有テクスチャ法は、入力カラー画像をもとに物体の見え方を固有画像の考え方により効率よく保持するという点において、IBRに基づく手法の一種であると考えられることもできる。しかしながら重要となるのは、固有テクスチャ法では、通常のIBR手法と比較しては

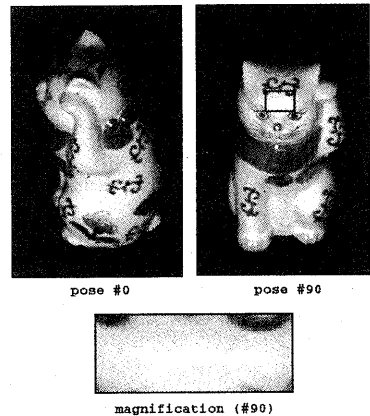


図3: 合成画像 (8 dimensions)

るかに高い圧縮率が得られるという点である。これは、通常のIBR手法での圧縮は3次元空間における光線の分布という考え方に基づいて行われる。そのため、圧縮される対象となる光線分布は、必ずしも物体表面上の同一点に対応していない。このため、光線分布の変化は照明条件の変化と異なる地点での内部反射色の変化をあわせたものになり相関が低くなってしまふ。これに対し、固有テクスチャ法では、セル画像の各画素は常に物体上の同一の点に対応し、画像列中での変化は照明条件の変化のみとなり非常に相関の高い。このため固有テクスチャ法では高い圧縮率が得られる結果となる。

固有テクスチャ法の1つの欠点はIBR手法と同様、新しい光源状況下での画像を生成できないことである。このため、可能性のある全ての光源状況での画像をサンプルする必要がある。しかしながらこの問題は、ある点での明るさ(照度)は各光源による照度の単純線形和として表現できるという画像の線形性を利用して大幅に軽減できる。即ち、光源方向に関して一定間隔で配置された点光源を考えた場合、これら各光源下での画像を要素光源画像とすると、任意光源下において観察されるべき物体画像はこれらの要素画像の線形和として表現することが可能となる。

このような要素光源下での画像の線形和の一例を図4に示す。図4第一行の3枚の画像は3つの異なった光源下での画像を別々に40回サンプルした際の入力画像を示している。これらを0.999の復元率になるように固有空間法を用いて圧縮し、逆に再合成した。これら

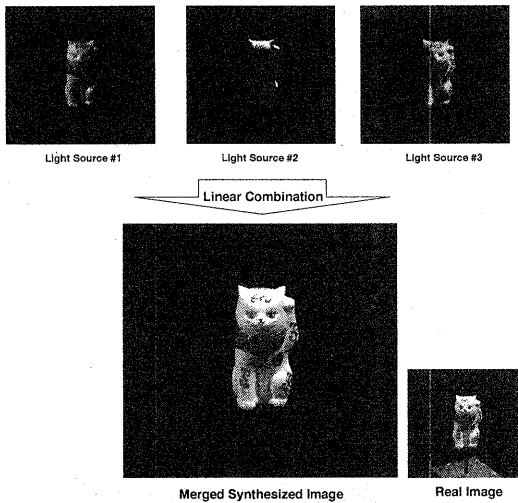


図 4: 光源からの影響の線形和

の画像の線形和が図 4 中央下の画像である。比較のため直接 3 つの光源を点灯し表示したものが図 4 右下の図である。両者にほとんど差がないことが見て取れる。

3 仮想物体の実シーンへの重ねこみ

複合現実感のためには、幾何・光学・時間の三つの整合性を取る必要があることは先にも述べた。即ち、仮想物体が背景の正しい位置に生成されるという幾何的整合性。仮想物体の輝度や影が背景画像と一致しているという光学的整合性。仮想物体の動きが背景の動きと一致しているという時間的整合性である。

本章ではとくにこの光学的整合性を実現するため、現実空間の光源環境を直接測定する手法について述べる [4]。まず、魚眼レンズを備えたテレビカメラのペアを用意し、全方位画像ステレオを構成する。これは、撮影場所に不変な光源環境を得るためである。これにより 3 次元的な空間における光源輝度分布を生成する。つぎに、この光源輝度分布を利用して任意の場所での仮想物体表面の陰影や仮想物体が実物体へ投げる影の強さを計算する。

3.1 輝度分布マップの生成

テレビカメラに魚眼レンズを装着し、全方位画像を撮影する。この測定を 2ヶ所の既知の場所で行う。このようにして撮影された 2 枚の全方位画像をもとに、ステレオ法により環境内の光源の三次元位置を計測する。現実空間において、大部分の光は蛍光灯や窓といった直接光源からの光であり、残りの部分は壁や天井からの反射などの間接光源からの光である。そのため、直接光源からの光による影響が大きいために、これら直接光源の 3 次元位置を正確に求める必要がある。幸いなことに、蛍光灯や窓といった直接光源は、先の全方位画像上で際立った特徴点として観察されるのが普通である。そこでまず、全方位画像中のこれらの特徴点の二次元位置を特徴点抽出オペレータを利用して求める。各特徴点を求めた後、通常のステレオ法と同様に対応する特徴点の組を求める。画像の各点の空間への視線は魚眼レンズの特性から判るので、求められら特徴点の組を用いて直接光源の三次元位置が三角測量の原理で決定される。

間接光源からの光の影響は、直接光源からの光からの影響に比べて比較的小さいが、現実物体と仮想物体の間の光学的整合性を正確に実現しようとする、間接光源についても光源輝度分布を表現する必要がある。間接光源は各部分の輝度自体はそれほど大きくないが、面光源としての寄与は大きい。大部分の間接光源は乱反射面によるものが多い。こういった乱反射による面光源はその実際の位置には無関係に、光を受ける点から見た場合の光源の空間角が重要になる。

間接光源も光源構造に含めるため、先の特徴点を利用して空間メッシュを生成する。まず、二次元画像上で対応の取れた特徴点のみを利用して二次元のメッシュ構造をドロネ三角メッシュ法で生成する。次に、各頂点の三次元座標を利用して、これを三次元メッシュとする。生成された三次元構造は細部においては実際と多少異なっているものの、壁や天井といった間接照明がなす空間角を近似する構造となっている。このようにして三次元構造を得た後、間接照明の輝度を計算するため、対応する二次元メッシュ内の明るさ(照度)を三次元メッシュ上に輝度に変換しながら貼り付ける。これにより、光源構造をあらわすメッシュが得られる。このようにして求められた現実空間における光源輝度分布を表現するメッシュ構造を輝度分布マップと呼ぶ。

3.2 ソフトシャドウの生成

仮想物体を現実画像に重ねあわせるためには、求められた輝度分布マップを利用して、仮想物体表面上の各点での照度分布を求める。実画像中の仮想物体が投げる影に関しては、まず仮想物体の形状を考慮してどの程度実物体表面上の照度に変化するかを計算する。この値を用いて実画像の輝度を減少させ、仮想物体の周辺に影を生成させる。仮想物体は常にカメラの実物体の間に存在し、仮想物体が存在する周辺の実環境（例えば机平面）の三次元形状も分るものとした。

まず、カメラ投影中心から入力画像の各画素を通して実空間に伸る視線を定義し、この視線が仮想物体と交差するか否かを調べる。もし仮想物体と交差すれば、測定された輝度分布マップと Torrance-Sparrow 反射モデルを利用して、物体表面上の交差点での物体の色と輝度を計算する。視線が仮想物体と交差しなかった場合には、仮想物体から現実物体表面におとされる影を計算することになる。まず、既知の実物体の三次元形状より交差点の三次元座標を計算する。次に、この点において仮想物体が存在しないとした場合のこの点の照度 E_1 を先の輝度分布マップを利用して計算する。さらに、仮想物体が存在する場合にどの程度の光が隠蔽されるかということ considering、部分照度 E_2 を計算する。

$$E_1 = \sum_{i=1}^N (2\pi/N) L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (3)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^N (2\pi/N) S_i L(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i \quad (4)$$

ここに $S_i = 0$ は仮想物体が光源 $L(\theta_i, \phi_i)$ を隠蔽した場合、 $S_i = 1$ はそうでない場合である。

現実画像の画素値にこの照度の比 E_2/E_1 を掛け合わせることで、実画像上の点の輝度を減少させる。この操作を仮想物体の周辺の各画素で繰り返し、仮想物体から落される影を生成する。

3.3 合成画像の生成

本手法を実画像に適用した例を図5に示す。図5(a)は現実の机上の各種の物体を含んだ入力画像、(b)はカメラの位置姿勢を計算するために必要となるカメラ

キャリブレーション用画像である。魚眼レンズ付カメラで室内空間を上向きに撮影した2枚の全方位画像が図5(c)である。ここで、輝度の高い部分として天井の蛍光灯や屋外への窓が見て取れる。これらの2枚の画像から本章で述べた手法により、光源輝度マップを求めた結果が(d)に示されている。最終的に、求められた光源輝度マップを用いて、机上に仮想物体を配置した画像を生成した結果が(e)である。仮想物体表面の陰影が生成され、仮想物体から実物体の机上に自然な影が落されている様子が見られる。

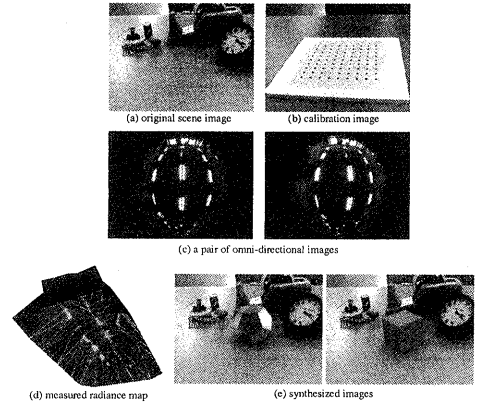


図5: 実光源輝度分布にもとづく画像合成

4 既知形状物体からの影による光源推定

3章で述べた手法は、魚眼レンズ付カメラを利用して現実空間における光源分布を直接測定するものであった。そのため、一枚の実画像のみを与えられその画像中に仮想物体を重ね込むという場合に利用できない。そこで、1枚もしくは2枚のみの実画像のみから光学的整合性を実現するための手法を開発した。この手法の基本的な考え方は、形状の既知である物体の周辺に存在する影の分布から逆に光源分布が推定できるというものである [5, 6]。

ここでは簡単のため形状既知の物体により影が落とされる平面は、乱反射面であり、その反射係数が既知であるとして考える。先のソフトシャドウを計算した際の式(4)をもう一度見ると、各方向の隠蔽具合 S_i は既知形状より計算可能であり、 $\cos \theta_i$ も既知となるのでた

め、これらを既知の係数 a_i とすると

$$a_1 L_1 + a_2 L_2 + a_3 L_3 + \dots + a_{1n} L_n = E \quad (5)$$

なる光源 L_i の強さを未知変数とする線形方程式であることが判る。ここに、 $a_i = (2\pi/N) S_i \cos \theta_i$ 、 $L_i = L(\theta_i, \phi_i)$ である。この方程式が各画素について成立するので、ソフトシャドウの各画素での明るさ E_j を求めることにより

$$a_{11} L_1 + a_{12} L_2 + \dots + a_{1n} L_n = E_1$$

$$a_{21} L_1 + a_{22} L_2 + \dots + a_{2n} L_n = E_2$$

$$a_{31} L_1 + a_{32} L_2 + \dots + a_{3n} L_n = E_3$$

...

$$a_{m1} L_1 + a_{m2} L_2 + \dots + a_{mn} L_n = E_m \quad (6)$$

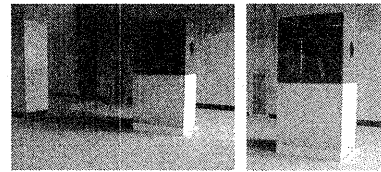
なる連立方程式が成り立つ。従ってこの連立方程式を解くことにより、各光源の輝度値 L_i が求められ、これにより現実空間における光源輝度分布が求められることになる。図 6(a) と (b) に示される実画像中のソフトシャドウ内の明るさ分布と遮蔽物体形状から光源分布を測定し、これに基づき仮想物体の陰影と影を計算しものが図 6(c) である。

影が落とされる平面の反射係数が未知の場合には、物体の存在する画像と存在しない画像を比較することにより、反射係数の影響を除去できることが分っている。例えば図 7 に示される例では、遮蔽物体が存在するときの画像 (a) と存在しないときの画像 (b) の 2 枚を利用することで、床面の反射係数の影響を取り除き実光源輝度分布を推定した。それにより求められた光源輝度分布を利用して仮想物体画像を重ね込んだものを図 7(d) に示す。

5 文化財の電子的保存に向けて

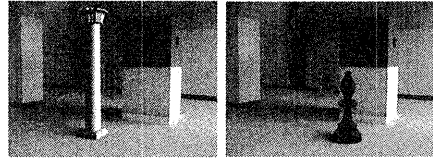
我々は、本報告で紹介した仮想物体モデルの獲得のための手法を利用することにより、寺院や大仏などの屋外大型建造物を電子的に保存するプロジェクトを進めている。計測された鎌倉大仏の距離データとカラー画像の例を図 8 に示す。

これまで、屋内環境に置かれた比較的小さな物体の仮想モデルを生成することに成功してきた。しかし、



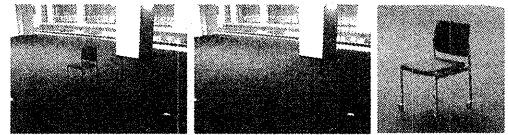
(a)

(b)



(c)

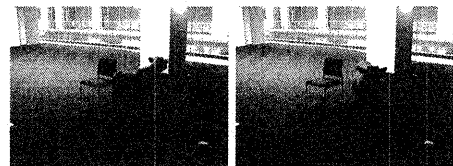
図 6: ソフトシャドウからの光源分布推定: 反射率既知の場合



(a)

(b)

(c)



(d)

図 7: ソフトシャドウからの光源分布推定: 反射率未知の場合

この文化財保存プロジェクトではこれまでは存在しなかった幾つかの課題を解決することが必要となってくる。屋外に配置された大型構造物が対象となるために、距離データの取得には長距離型高精細レンジファインダが利用される。しかし、実際にデータを測定する際のセンサ位置については多くの制約があり、任意視点方向から物体を観察するということが事実上不可能となってしまうことが多い。そのため、どのような方向から物体を観測すれば最適なモデルが獲得できるかというセンサプランニングの問題が重要となってくる。

また、照明環境を自由にコントロールできた屋内環境とは違い、屋外においては太陽光のもとにおける観測となる。このため、物体表面反射特性をモデル化するには、屋外環境における複雑な光源環境からの影

響を受けないようなアルゴリズムが必要となってくる。また、入力カラー画像を取得する際にも距離データの計測と同様に、可能なカメラ位置に制限が存在することが予想される。このため、限られた枚数の入力カラー画像から如何にして正確な物体反射特性を計測するかという点も重要となる。

このように、屋外環境に存在する大型文化財の電子的保存には非常に困難な課題がまだまだ多く存在するわけであるが、それらの解決に向けて新たな手法の一つ一つ提案していくことにより、数々の貴重な文化財を電子的に保存することを可能にしていきたい。

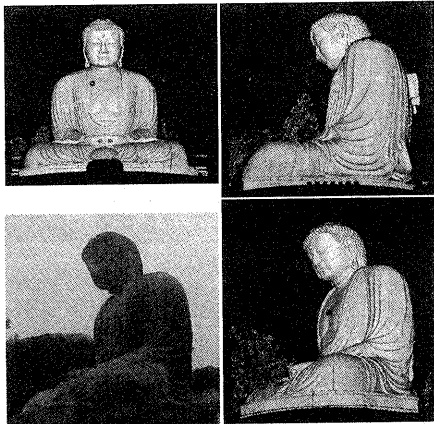


図 8: 屋外文化財の計測例

6 まとめ

本論文では、実物体を観測することで仮想現実感のための見えのモデルを生成する手法を述べた。距離画像ならびにカラー画像列から反射モデルの係数を抽出し、これにより任意光源・任意視点での画像を合成することを可能とするモデルベース法に対し、見えを三次元幾何モデルの上に張りつけ、この構造の上で圧縮する固有テクスチャ法を紹介した。また、これらの仮想画像を実画像に違和感無く重ね合わせるためには、両者での光源環境の一致すなわち光学的整合性を取る必要がある。この問題に関しても、我々は実環境の光源輝度分布を推定する手法を提案した。これにより光学的整合性を実現することにより、非常に高品質な複合現実感画像を生成できることが示された。

謝辞

本論文は、文部省科学技術研究費 (09450164)、文部省新プログラム研究費 (09NP1401)、MR システム株式会社などからの資金援助によりとり行った研究をまとめたものである。

参考文献

- [1] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. F. Cohen, "The lumigraph," *Proc. SIGGRAPH 96*, pp. 43-54, 1996.
- [2] M. Levoy and P. Hanrahan, "Light field rendering," *Proc. SIGGRAPH 96*, pp. 31-42, 1996.
- [3] K. Nishino, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Eigen-texture method: appearance compression based on 3D model," *Proc. IEEE CVPR'99*, pp. 618-624, June 1999.
- [4] 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, January-March 1999.
- [5] I. Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Illumination distribution from shadows," *Proc. IEEE CVPR'99*, pp. 306-312, June 1999.
- [6] 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 ICCV'99*, pp. 875-882, September 1999.
- [7] Y. Sato, M. Wheeler, and K. Ikeuchi, "Object shape and reflectance modeling from observation," *Proc. SIGGRAPH 97*, pp.379-387, 1997.
- [8] M. Wheeler, Y. Sato, and K. Ikeuchi, "Consensus surfaces for modeling 3D objects from multiple range images," *Proc. IEEE ICCV'98*, pp. 917-924, 1998.