

現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術—II 仮想化現実の方法論

横矢 直和*

1. はじめに

現実世界と仮想世界との連続的な融合世界を扱う複合現実感 (MR: Mixed Reality) 技術 [1] の中で、今回は、現実世界の情報を用いてコンピュータの内部の仮想世界を強化する仮想化現実 (AV: Augmented Virtuality) 技術について述べる。AV 技術は現実世界に匹敵する写実性を仮想世界に付与することを目的としており、コンピュータグラフィックス (CG) の分野における写実性の追求に源を発している。CG の分野においては高い写実性を求めて様々な描画法が考案され、それを高速に実行するためのハードウェアも開発されてきたが、仮想物体に現実世界と同等の写実性を与えようとする仮想物体のモデルを作成するための手作業が膨大になり、CG のみで表現する仮想世界の写実性には限界がある。そこで現れたのが現実世界の情報を使うという AV につながる考え方である。

AV 技術には、仮想物体の幾何モデルに対する実写画像のテクスチャマッピングに代表される初歩的なものから、現実世界を3次元のあるいは時間軸も含めて4次元的にコンピュータに取り込む究極の AV である「現実世界の仮想化」まで、様々な手法が存在する。なお、AV は拡張現実 (AR: Augmented Reality) とは異なり、実時間描画を伴わない利用場面においてはオフライン処理でよいことも多く、必ずしも実時間性は要求されない。

AV 技術の起源は先に述べたように CG 研究にあるが、そこで用いられる「現実世界を仮想世界に取り込む」技術の多くはコンピュータビジョン (CV) の分野で開発された手法が基礎になっている。これが、AV が CG と CV の融合領域とよばれるゆえんである。実際、AV 技術に関する論文は CG と CV の両分野の会議・雑誌で発表されている。

以下、本稿では、AV 技術による仮想化現実空間構築の方法論を整理し、具体的な事例を交えながら要素技術を紹介する。

2. テクスチャマッピングと画像変形

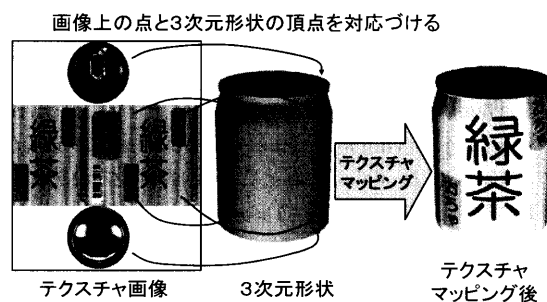
実写画像を用いて仮想環境を構築する AV 技術の基本手法にテクスチャマッピングと画像の変形処理がある。

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

Key Words: mixed reality, augmented virtuality, model-based rendering, image-based rendering, inverse rendering.

2.1 テクスチャマッピング

テクスチャマッピングは既知の幾何形状の表面に既存の画像を貼り付ける処理であり、CG における詳細なポリゴンモデルの作成に伴う手作業と複雑なモデルの描画に伴う計算の負荷を軽減するために考えられた手法である。高精細なモデルを持たず、比較的単純なポリゴンモデルに実写画像のテクスチャマッピングを行うことによって、モデル化作業と描画については軽い負荷で写実性の高い画像を生成することができる。最近では、パソコンレベルでも実時間描画が可能になっている。テクスチャマッピングの手順を第1図に示す。テクスチャマッピングの対象となる幾何モデルそのものも現実世界から取得するのが後述のモデルベースレンダリングである。

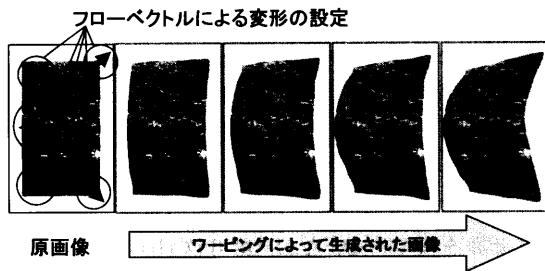


第1図 幾何モデルに対するテクスチャマッピング

2.2 画像変形: ワーピングとモーフィング

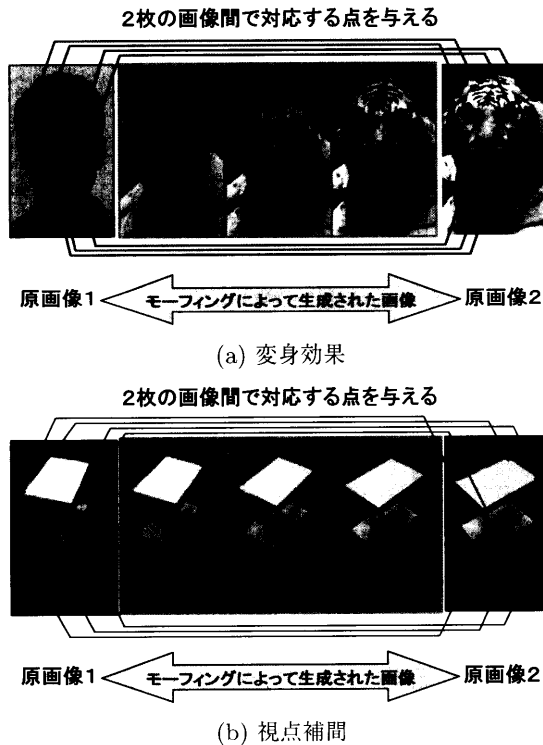
テクスチャマッピングと関連が深く、併用されることの多い技術にワーピング (image warping) [2] がある。ワーピングは、第2図に示すように、画像内に設定された制御点をあらかじめ与えられたフローベクトルに従って引っ張ることによって画像を歪める画像の幾何学的変換処理であり、AV 研究ではテレプレゼンスにおける全方位画像からの提示画像生成などに利用されてきた [3]。QuickTimeVR [4] に代表される全方位画像を用いるアプローチでは、複数の画像を張り合わせて全方位画像を生成するためにスティッチングとよばれる処理が行われる。最近では、複数のカメラで撮影したビデオ映像の自動スティッチングによって全天球ビデオを作成することも可能になっている [5]。

ワーピングのような画像の幾何学的変換に加えて色情報の変更も行う画像変形処理にモーフィング (image morphing) がある。モーフィングは、対応点が与えら



第2図 画像ワーピング

れた2枚の画像間で形の変換と同時に色の合成を行うことによって中間画像を生成する手法である。2枚の画像の中間画像を連続的に生成することによって人間や動物の変身効果を表現でき(第3図(a)参照), 映画制作やテレビのCM制作などに広く利用されている。AVでは, 離散的な位置で撮影された複数の画像から中間視点の画像を生成する視点補間 (view interpolation) に利用される(第3図(b)参照)。これは, 後述のイメージベースレンダリングの一種である。



第3図 二つの画像間のモーフィング

ここで紹介した画像の変形処理はいずれも, 制御点のフローベクトルや複数画像間の対応点既知であることが前提になっている。CGによって描画した画像の場合にはこれらの情報は事前にわかっているが, 実写画像においては一般に未知である。画像間の対応点を手作業で与えることが多く, 自動化が課題である。

3. モデルベースレンダリング

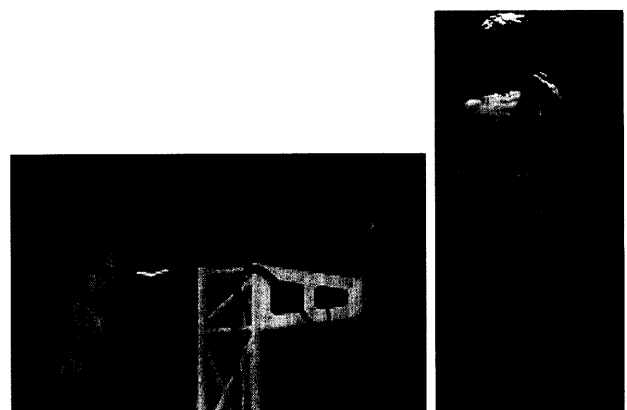
MRにおいては, ユーザの自由な視点移動に応じて, MR環境を眺めたときの各視点の画像を実時間で生成・

提示する必要がある。CGでは物体の幾何モデルを持っているため, 描画の計算能力さえあれば, 自由視点での映像提示は容易である。現実世界の仮想化においても現実世界の情報から幾何モデルを取得することが考えられる。このような幾何形状モデルの取得を経由する描画法は, 一般にモデルベースレンダリング (MBR) とよばれる。ここでの幾何モデルの取得はコンピュータビジョンの分野で古くから取り組まれてきた3次元物体・シーンのモデル化技術そのものである。物体表面のテクスチャづけは形状計測と同時に取得した画像のテクスチャマッピングが利用される。

3次元モデル化技術は, レンジファインダなどを用いる能動的な手法と画像からshape-from-X (X = shading, texture, focus, silhouette, motion など) やステレオ視の技法によって3次元形状を復元する受動的な手法に大別される。

3.1 能動的な手法による幾何モデリング

3次元計測のための様々な能動的な手法 [6] が存在するが, AVのための幾何モデリングでは, 高精度な計測が可能なことから, 対象に対してレーザー光を照射し, 反射時間や三角測量原理によって対象までの距離を計測するレーザレンジファインダが利用されることが多い。近年, 文化財のデジタルアーカイブを目的としたAV研究が世界各所で行われるようになってきたが, 最も代表的なものは, スタンフォード大学のLevoyらによるデジタルミケランジェロプロジェクト [7] と, 東京大学の池内らによる大仏プロジェクト [8] である。デジタルミケランジェロプロジェクトにおいて, フィレンツェ・アカデミア美術館所蔵のダビデ像をレーザレンジファインダで計測している様子と, 得られた幾何モデルの描画結果を第4図に示す。



第4図 ダビデ像の計測風景と得られた幾何モデル

複雑な形状をした文化財などの全周形状を得るためには, 複数の位置で計測したデータの統合が必要であり, 一般に

- (1) 多視点での対象の3次元形状計測
- (2) 多視点距離データの位置合せ

(3) 位置合せされた複数データからの単一幾何モデル生成

の三つのプロセスを経て幾何モデルを取得する。プロセス(2)において、二つの距離データ間の位置合せを繰り返す逐次的な手法では距離データの数が多の場合に位置合せ誤差の蓄積が問題になるため、データ全体での位置合せ誤差を最小化する大局的な位置合せが必要である。

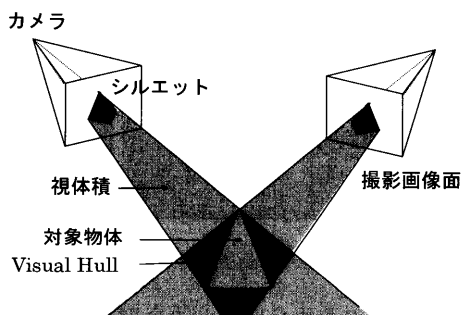
これまでに本格的なデジタルアーカイブが試みられているのは小物体から大仏程度のスケールまでである。大型の構造物になると、全表面の距離データを得るために多数の撮影位置が必要となり、地上からの計測だけでは不十分なこともある。このため、池内らは大仏プロジェクトの中で、カンボジア・バイヨン寺院を計測するために空中浮遊型のレンジセンサを開発している[9]。

3.2 受動的手法による幾何モデリング

レンジファインダを用いた3次元計測は高精細な幾何モデルが得られるという特長があるが、一方で、設備が大掛かりになるという欠点がある。また、都市レベルの広域計測が難しいという問題もある。このため、AVのための簡易的な幾何モデル取得や広域環境のモデリングには、画像撮影による受動的な手法も用いられる。とくに、shape-from-silhouette や shape-from-motion の技法が用いられることが多い。

shape-from-silhouette

物体の周囲の複数の視点から対象を撮影し、対象のシルエットを空間に投影した視体積の交差部分として幾何形状モデルを計算する方法である(第5図参照)。このoutside-in撮影には、実際に複数のカメラを物体の周囲に配置する方法、物体の周りからカメラを移動させながら撮影を行う方法、回転台に乗せた物体をカメラの前で回転させながら撮影する方法などがある。shape-from-silhouette法は小物体や人物などの幾何モデル取得によく利用される。この方法は、背景差分などによって画像から物体の領域を正確に切り出せることが前提である。そのため、正確な物体領域切り出しを実現するためにクロマキー撮影のように単色の背景を用いることが多い。



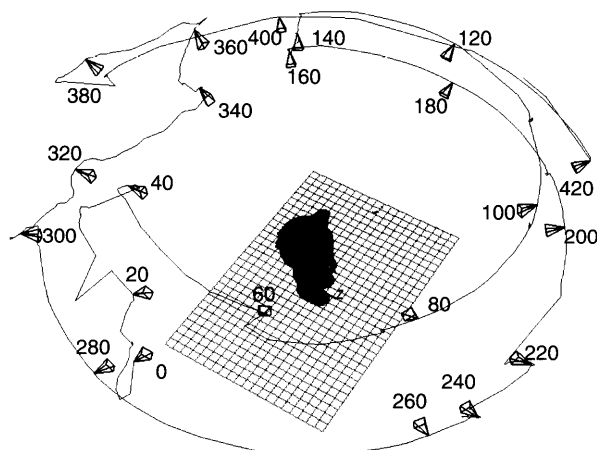
第5図 シルエット制約

手持ちビデオカメラを用いて対象の周りから移動撮影を行い、shape-from-silhouetteによって幾何モデルを生成した例[10]を第6図に示す。ここでは、既知のマーカ

の上に物体を置き(第6図(a)参照)、撮影されたマーカの画像上での座標からPnP(Perspective n-Point)問題[11]を解くことによって、まずマーカ座標系における撮影時のカメラの位置と姿勢(第6図(b)中の曲線と角錐)を求め、つぎに背景差分によって求めたシルエットをカメラ位置から空間に投影し、視体積交差法によって幾何モデルを得ている。なお、第6図(b)中の数字は移動撮影時のフレーム番号を表している。幾何モデルの表面テクスチャは撮影画像のテクスチャマッピングによる。



(a) マーカシート上に置かれた対象物体



(b) 撮影時のカメラの位置・姿勢と得られた幾何モデル

第6図 物体周囲からの移動撮影に基づく視体積交差法による幾何モデリング

shape-from-motion

移動カメラ撮影によって得られた動画像から対象の3次元形状を復元し、幾何モデルを生成する手法である。カメラの移動軌跡を正確に制御できる場合には、動画像の各フレーム画像を用いてマルチベースラインステレオ法[12]などで対象の密な形状データを取得することができる。自由に動くカメラの場合には、動画像からカメラの移動パラメータと対象の3次元情報を同時に復元しなければならない。一般に対象の3次元情報は疎な特徴点上でしか得られないため、得られたカメラ移動パラメータを用いて、後処理として前述の場合と同様にマルチベースラインステレオ法を適用することによって密な3次元情報を得る。AVにおいてshape-from-motionは、移動撮影による広域屋外環境の幾何モデリングに利用されることが多い。

3.3 モデルベースレンダリングの特徴

モデルベースレンダリングは幾何モデルを経由した描画を行うため、通常のCGと同様に自由な視点移動に対応した描画が容易であり、仮想物体との奥行き隠蔽関係の表現や衝突判定も可能である。しかし、比較的単純な形状をした物体については幾何モデルの取得が容易であるが、複雑な形状や表面材質によっては表面形状の取得そのものが難しいという問題がある。また、テクスチャマッピングに用いられる画像は撮影時の照明条件の影響を受けており、仮想世界に取り込まれたモデルを任意の仮想照明条件で描画しようとするとも照明条件の矛盾が生じる。すなわち、そのままでは入力画像撮影時と異なる光源環境下での描画は原理的に行えない。この問題を解決するためには、画像から撮影時の照明条件の影響を除去し、物体固有の表面反射特性を求めておく必要がある。このような光学特性のモデリングを行うためのアプローチはインバースレンダリング(後述)とよばれる。

4. イメージベースレンダリング

現実世界からの高精度な幾何モデルの取得が難しいという問題に対して、幾何モデルを経由しない描画法が考案されている。既存の画像をもとに新たな視点・視線の画像を生成する方法であり、イメージベースレンダリング(IBR)と総称される。IBRはCG分野で活発に研究が行われ、既存の画像として実写画像を用いることによってAVのための強力な手法になっている。AVにおいては、既存の実写画像から撮影時とは異なる視点・視線の画像を生成可能な仮想化現実環境の構築が必要である。以下では、この観点から、AVのためのIBRを実現するうえでの基本的な方法論について述べる。

4.1 全方位画像の利用

QuickTimeVR[4]以来、全方位画像や全方位ビデオのインタラクティブ観賞に関する研究が盛んである[3]。全方位画像を取得するための様々な手法や具体的なセンサ[13]が開発されているが、AVのために利用されているのはおもに、1点への中心投影像を撮影できる、すなわち、単一視点制約を満たす全方位センサである。全方位画像の例を第7図に示す。このような全方位画像の幾何学的変換によって任意の視線方向の平面透視投影画像を生成することができる。ただし、1枚の全方位画像からは視線の変更のみが可能であり、生成される画像の視点位置は全方位センサの設置位置あるいはその移動経路上に制限され、自由な視点変更はできない。自由視点画像の生成には次節以降で述べる手法が必要となる。全方位画像の幾何学的変換を高速に実行するために前述のワーピングが利用されている[3]。

4.2 視点補間

既存の実写画像から撮影時とは異なる視点の画像を生成する最も簡単なAV手法は視点補間である。基本的に



(a) 双曲面透視投影全方位画像



(b) 等角投影全天球画像

第7図 全方位画像

は、複数の画像間を前述のワーピングやモーフィング操作で補間し中間画像を生成する、IBRの原形ともいえる手法である。視点補間によって中間画像を連続的に生成すれば、既存の画像間の連続的な視点移動を実現でき(第3図(b)参照)、仮想化現実環境のウォークスルーが可能になる。複数の位置で全方位画像を取得し、全方位カメラ設置点の凸閉包領域内での自由な視線・視点移動が可能なウォークスルーシステムも考えられている。

視点補間は画像間での点対応が既知であることが前提になっており、実写画像に適用する場合には人手による対応付けに頼ることが多い。このため、オフライン処理による対応付けを前提とした蓄積再生型システムにならざるを得ないのが現状である。対応点指定の自動化には、CVの分野で古くから取り組まれてきた複数画像からの3次元復元と同じ対応点探索問題を解決しなければならない。さらに、動的な環境のライブビデオを用いる場合には、この対応点探索を実時間で行わなければならないという大きな壁がある。

4.3 光線空間とLight Field

画像は3次元空間における物体から反射した光線を撮像面で記録した結果と考えることができる。IBRの基礎となる最も一般的な理論は、3次元空間内の光線分布を、位置 (x, y, z) 、方向 (θ, ϕ) 、波長 λ 、時間 t からなる7次元の関数 $\rho(x, y, z, \theta, \phi, \lambda, t)$ として記述する方法である[14]。このplenoptic functionとよばれる7次元情報空間を画像として完全に記録しておけば、この空間内で任意の視点・視線の画像を描画できることになる。しかし、7次元の情報空間を記録しようとする膨大な画像データが必要になる。そのため、1本の光線は同じ色を持ち、時間的に変化しないとするのが一般的である。これで2次元

縮退するが、基準面（撮像面）を通過する光線情報のみ注目すると、さらに1次元縮退し、4次元空間になる。

実写画像を用いたIBRが広く注目されるようになったきっかけは、日米で独立にほぼ同時期に考案された、4次元空間での光線記述に基づく光線空間理論 [15] と Light Field [16] である。光線空間理論では、光線情報を1枚の基準面を通過する光線の位置 (x, y) と方向 (θ, ϕ) の4次元関数 $\rho(x, y, \theta, \phi)$ で表現する。いっぽう、Light Fieldでは、光線が2枚の基準面を通過する位置 (x, y) 、 (u, v) の4次元関数 $\rho(x, y, u, v)$ で記述する。明らかに、両理論は多次元情報空間の定義の仕方が異なるだけで、原理的に等価である。

光線空間や Light Field は、必要な画像群をあらかじめ取得しておけば、幾何モデルなしで任意視点・視線の画像を描画でき、万能なIBR法になっている。しかし、AVで要求される高精細な合成画像を得ようとする膨大な画像データが必要になる。このため、物体のシルエットを利用して少ない画像から光線情報を補間する方法、実写画像から粗い幾何モデルを推定し光線情報の補間を行う方法、全方位画像を用いる方法など、様々な工夫がなされている。

4.4 イメージベースレンダリングの特徴

光線空間理論や Light Field を利用すれば、あらかじめ必要な画像群を取得しておくことによって、幾何モデルなしに写実性の高い任意視点・視線画像を描画できるのがIBRの最大の利点である。しかし、現実の複雑なシーンを対象とすると画像データが膨大な量になるため、先にも述べたように、データ圧縮が重要な課題になっている。なお、全く幾何モデルを持たない場合には、仮想物体との奥行き隠蔽関係の表現や衝突判定は一般には不可能である。IBRで用いられる実写画像は、MBRにおいてテクスチャマッピングに利用される画像と同様、撮影時の照明条件の影響を受けている。このため、あらかじめ様々な光源環境での画像を取得しておかない限り、任意の仮想照明条件下での描画はMBR以上に難しい。

5. インバースレンダリング

仮想化された実物体を任意の光源環境下で任意の視点から眺めたときの画像を描画するためには、物体の3次元形状（幾何モデル）と表面反射特性（光学モデル）を知る必要がある。これは幾何モデルを持たないIBRでは本質的に不可能であり、MBRにおいても、幾何モデルは持っているが、テクスチャマッピングに用いられる画像はある特定の照明条件のもとで撮影されたものに過ぎないため、そのままでは任意光源・任意視点の描画はできない。この問題を解決するのが、複数の撮影画像から物体固有の表面反射特性を推定するインバースレンダリング [17] とよばれる光学的モデリング手法である。

インバースレンダリングはその言葉の意味通り、画像

生成（描画）過程の逆過程をたどることによって表面反射特性を推定する方法である。一般に、物体の姿勢と光源方向を変化させながら撮影した複数の画像と別途レンジファインダなどで計測された距離データに対してなんらかの反射モデルをあてはめ、反射パラメータを推定するというアプローチをとる。これまでのインバースレンダリングの研究は、

- 完全拡散反射物体
- 拡散反射と鏡面反射を有する物体で一般的な鏡面反射を仮定
- 非一般的な拡散・鏡面反射物体
- 非一般的な拡散・鏡面反射物体で拡散反射に関しては相互反射を考慮
- 非一般的な拡散・鏡面反射物体で拡散・鏡面反射に関して相互反射を考慮

という流れで、徐々に対象に関する制約を緩め、一般的な対象を扱えるようになってきた。

拡散・鏡面反射物体の反射モデルとしてよく用いられるのは次式で表現される Torrance-Sparrow モデル [18] である。

$$I = \frac{Y}{D^2} \left\{ P_d \cos \theta_d + \frac{P_s}{\cos \theta_v} \exp\left(-\frac{\theta_r^2}{2\sigma^2}\right) \right\}$$

ここで、 I は物体面上の点に対応する観測画像内の画素の輝度値、 θ_d は入射光と法線のなす角度、 θ_v は視線と法線のなす角度、 θ_r は光源と視線の二等分方向と法線のなす角度を表す。 Y 、 D はそれぞれ光源の強度と光源から物体面までの距離を表す。上式の第1項が拡散反射成分、第2項が鏡面反射成分を表しており、 P_d 、 P_s 、 σ がそれぞれ推定すべき拡散反射係数、鏡面反射係数、表面粗さ係数である。

観測位置、光源位置、光源強度が既知で、物体の幾何形状が計測されていると、物体表面で非一般的な拡散・鏡面反射特性を持つ物体の光学モデリングは、観測画像 I から物体面上の各点において反射係数 P_d 、 P_s 、 σ を推定する問題になる。物体表面上の各点で反射係数を密に推定するためには、観測位置と光源位置を変えながら複数の画像を取得し、物体表面上の各点で反射モデルに含まれる未知変数以上の方程式を立てる必要がある。強い鏡面反射成分を観測できるのは正反射方向の限られた範囲であることから、すべての点でこの条件を満足しようとすると非常に多数の画像が必要になる。そこで、町田ら [19] は、物体の3次元形状から画像撮影のための光源位置を計算する光源位置計画法を報告している。

Torrance-Sparrow モデルなどの反射モデルは物体表面で光が一度だけ反射された直接反射光のみが観測されることを仮定している。このため、物体表面での相互反射等の2次反射が存在する場合には正しい反射係数が得られない。実際、複雑な形状をした物体では必ず相互反射が生じ、簡単な形状でも凹部では相互反射が発生する。

撮影画像における相互反射の存在を前提に表面反射係数を正しく推定するためには、CGにおけるラジオシティ法[20]やフォトンマッピング法[21]のような大局的描画法の逆過程が用いられる。この方法はインバースグローバルレンダリングとよばれる。レンジファインダ計測による幾何モデルと、ラジオシティ法とフォトンマッピング法を併用したインバースグローバルレンダリング[19]によって得られた光学モデルをもとに、二つの異なる仮想光源環境下で描画を行った例を第8図に示す。



第8図 実物体の幾何モデルと光学モデルを用いた、二つの異なる仮想光源環境下での描画

6. おわりに

本稿では、連載講座「現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術」の第二回として、現実世界の情報を用いて仮想環境を構築する仮想化現実のための基本的な方法論を紹介した。今後、文化遺産や自然遺産のデジタルアーカイブなどにおいて、仮想化現実技術の本格的な応用展開が期待される。

(2005年11月14日受付)

参考文献

[1] 横矢：現実世界と仮想世界を融合する複合現実感技術—I 複合現実感とは；システム/制御/情報, Vol. 49, No. 12, pp. 489–494 (2005)

[2] G. Wolberg: *Digital Image Warping*, IEEE Computer Society Press (1990)

[3] Y. Onoe, K. Yamazawa, H. Takemura and N. Yokoya: Telepresence by real-time view-dependent image generation from omnidirectional video streams; *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 71, No. 2, pp. 154–165 (1998)

[4] S. E. Chen: Quick time VR – An image-based approach to virtual environment navigation; *Proc. SIGGRAPH'95*, pp. 29–38 (1995)

[5] 池田, 佐藤, 横矢: 全方位型マルチカメラシステムを用いた高解像度な全天球パノラマ動画の生成とテレプレゼンスへの応用; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 443–450 (2003)

[6] 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990)

[7] M. Levoy, et al.: The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues; *Proc. SIGGRAPH2000*,

pp. 131–144 (2000)

[8] K. Ikeuchi, A. Nakazawa, K. Hasegawa and T. Ohishi: The great Buddha project: Modeling cultural heritage for VR systems through observation; *Proc. 2nd IEEE/ACM Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR03)*, pp. 7–16 (2003)

[9] 阪野, 長谷川, 池内: 大型有形文化財計測のための気球搭載型レンジセンサ; 情報処理学会研究報告, CVIM148-28 (2005)

[10] 不殿, 佐藤, 横矢: ハンドヘルドビデオカメラを用いた撮影支援インタフェースを有するインタラクティブ三次元モデリングシステム; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 599–608 (2005)

[11] 出口: 射影幾何学による PnP カメラ補正問題の統一的解法; コンピュータビジョン'90~ビジョンと環境理解~シンポジウム論文集, pp. 41–50 (1990)

[12] M. Okutomi and T. Kanade: A multi-baseline stereo; *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 4, pp. 353–363 (1993)

[13] 八木, 横矢: 全方位ビジョン: センサ開発と応用の最新動向; 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 42, No. SIG13(CVIM3), pp. 1–18 (2001)

[14] E. H. Adelson and J. R. Bergen: The plenoptic function and the elements of early vision; *Computational Models of Visual Processing* (M. Landy and J.A. Movshon (Eds.)), MIT Press, pp. 3–20 (1991)

[15] 藤井, 金子, 原島: 光線群による3次元空間情報の表現とその応用; テレビジョン学会誌, Vol. 50, No. 9, pp. 1312–1318 (1996)

[16] M. Levoy and P. Hanrahan: Light field rendering; *Proc. SIGGRAPH'96*, pp. 31–42 (1996)

[17] 佐藤, 向川: インバースレンダリング; 情報処理学会研究報告, CVIM145-9 (2004)

[18] K. E. Torrance and E. M. Sparrow: Theory of off-specular reflection from roughened surfaces; *Journal of Optical Society of America*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105–1114 (1967)

[19] 町田, 竹村, 横矢: 実物体のモデル化のための相互反射を考慮した表面反射特性の推定; 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J88-D-II, No. 8, pp. 1450–1459 (2005)

[20] C. M. Goral, K. E. Torrance, D. P. Greenberg and B. Battaile: Modeling the interaction of light between diffuse surfaces; *Proc. SIGGRAPH'84*, pp. 213–222 (1984)

[21] H. W. Jensen: *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*, A.K. Peters, Ltd (2001)

著者略歴

よこ 横 矢 なお かず 直 和

学会誌 Vol. 49, No. 12, p. 494 参照