

## 複合現実感における影の光学的整合性に関する 検討とレイトレーシングによる実現

富手要 藤木真和 麻生隆  
キヤノン株式会社 知覚システム開発センター

あらまし 本稿では、複合現実感において現実の影と光学的な整合性を保って仮想の影を描画する手法を示す。現実物体からの影が投射されている領域は仮想物体からの影の影響を受けないとして、我々の手法では、現実空間を撮影した画像に含まれる現実の影の領域を避けて、仮想光源ごとに現実もしくは仮想物体に起因する影を実画像に加える。本稿では、提案手法の理論的背景について述べた後、レンダリング技法としてレイトレーシングを用いた実装方法を説明する。さらに、検証実験により光学的に矛盾のない影画像を生成できることを確認したので、実験の内容と結果を示す。

キーワード 複合現実感, 光学的整合性, 影, レイトレーシング

### Rendering Shadows with Raytracing in Mixed Reality

KANAME TOMITE MASAKAZU FUJIKI TAKASHI ASO  
Human Machine Perception Laboratory, Canon Inc.

Abstract This paper proposes a photometric consistency method between real shadows and virtual shadows in a mixed reality space. Our method creates virtual shadows of some real/virtual objects caused by virtual light sources, which are not overlaid onto a real shadow region to avoid unnecessary augmentation. In this paper, we mention about the theoretical background and our implementation with a raytracing method for virtual shadow rendering. We also show the evaluation experiment to confirm that our method casts a correct virtual shadow onto a real object in a mixed reality space.

Key words mixed reality, photometric consistency, shadow, raytracing

#### 1. はじめに

昨今、産業分野を中心として3D CADが普及し、製品の3Dモデルを作成することが広く行われている。さらに3D CADで設計した3Dモデルを利用して、計算機上で製品の検証や作業シミュレーションを行うことが一般的になってきた。近年、この用途への複合現実感(Mixed Reality;MR)の応用が進み、実用的なシステムも報告されている[1]。

このような検証や作業をスムーズに行うために、3次元空間内の物体や配置の情報を体験者に正確に認識させることが技術課題となっている[2]。一般に、人間は空間の構造を把握するために様々な視覚的な手がかりを使っている。中でも影の配置や濃さの情報は物体間の位置関係を知る重要な手がかりである。したがって、仮想的な検証や作業を行う場合、仮想物体の影を光学的に矛盾のないように描画することが求められる。特にMR技術を用いる場合、仮想空間の中で影の光学的整合性を実現するだけでなく、現実の影と仮想の影とが整合性を保つようにしなければならない。

MRにおける光学的整合性の実現方法については、幾つかの研究事例が見られる[3,4,5]。これらの研究では、現実の光源環境を推定し、その結果に基づいて仮

想物体の陰影や影を描画している。しかし、従来の影の描画方法では現実物体の存在を考慮していない。したがって、例えば現実物体から影が落ちている領域に仮想物体の影が重畳されると影が濃くなり、観察者に物体の位置関係を誤って認識させる恐れがある。

そこで筆者らは、現実物体と仮想物体が混在するMR空間において、現実と仮想の影の光学的整合性を実現する影の描画手法を開発した。

以降、第2節ではレンダリング技法に依存しない汎用的な影の描画アルゴリズムについて述べ、第3節では、レイトレーシングによるアルゴリズムの実現例を示す。第4節では、検証実験により提案手法の評価を行い提案手法の妥当性を示す。第5節では、MR空間で観察者が作業を行うことを想定した適用例を示し、最後にまとめと今後の課題について述べる。

#### 2. 影付けのフレームワーク

本節では、現実物体と仮想物体が混在するシーンで光学的に正しく影を描画する汎用的な法則について述べる。そのために、影を投射する物体・影を投射される物体の組み合わせを物体の種類(現実物体/仮想物体)によって分類し、それぞれのケースについて光学的に整合する影の条件を分析する。次に、その分析結

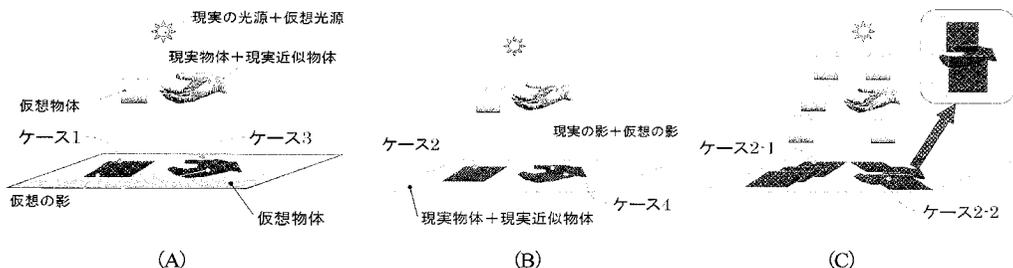


図 1 物体の種類による正しい影の場合分け

果に基づいて、影付けの法則を導き出す。

## 2.1 光学的に正しい影の分析

影の投射における物体の組み合わせとしては、次の4種類が考えられる。図1に物体の種類による正しい影の場合分けを示す。

ケース1：仮想物体が仮想物体に影を落とす(図1-A)

ケース2：仮想物体が現実物体に影を落とす(図1-B)

ケース3：現実物体が仮想物体に影を落とす(図1-A)

ケース4：現実物体が現実物体に影を落とす(図1-B)

以下、それぞれのケースについて正しい影の描画条件を述べる。なお、本節では次の前提条件が満たされていることを仮定する。

- (1) 現実空間の光源環境(光源の配置と色)が既知
- (2) 現実物体の形状および配置が既知

上記(1)(2)の条件は、光源環境の推定手法[4,5]や三次元再構成手法を用いることで実現可能である。これらの前提条件が成り立つときは、仮想空間だけでなく現実空間についても影が発生する領域を求めることができる。また、現実物体が三次元空間中で占める領域を模擬する仮想物体(以下「現実近似物体」と呼ぶ)を仮想空間に配置することにより、CGで現実物体に落ちる影の像を生成することができる。なお、現実物体に落ちる影を描画する方法としては、現実の影を仮想の影で上書きすることも考えうる。しかし、本研究では現実空間を撮影した画像に含まれる影の像を可能な限り活かしてMR画像を生成することとする。

また、以下の分析では光源環境を構成する光源群のうち1つの光源について考える。すべての光源によって生じる影の像は、個々の光源の像を足しあわせればよい。

### ケース1：仮想物体が仮想物体に影を落とす場合

この場合、影を再現すべき仮想物体表面の領域には現実の影は一切存在しない。したがって、純粋な仮想空間と同様に影の像を生成すればよい。すなわち、影を落とす仮想物体によって光源が遮蔽されている領域

については、その光源に照光されないとする。

### ケース2：仮想物体が現実物体に影を落とす場合

このケースはさらに2つの場合に分類できる(図1-C)。すなわち、

ケース2-1：いずれの現実物体も仮想物体の影と同じ領域に影を落とさない場合

ケース2-2：いずれかの現実物体が仮想物体の影と同じ領域に影を落とす場合

ケース2-1の場合、仮想物体をシーンに追加したことによって、影になる領域が光源から遮蔽されていない状態から遮蔽された状態へと変化している。したがって、現実物体の表面のうち光源が仮想物体に遮蔽される領域については、その光源に照らされたことによる明るさの増加分を画素値から差し引く必要がある。

一方、ケース2-2では影が投射される方の現実物体がすでに光源から遮蔽されている。単一の光源の影響だけ考えれば、影の濃さは遮蔽の有無のみ依存する。したがって、ケース2-2の状況でさらに仮想物体が光源を遮蔽しても、その影響を生成する画像に反映させる必要はない。

### ケース3：現実物体が仮想物体に影を落とす場合

仮想空間には現実の影は存在しない。そこで、まず現実物体に対応する仮想物体である現実近似物体をシーンに配置する。その上で、ケース1と同様に仮想物体から仮想物体への影として描画すればよい。

### ケース4：現実物体が現実物体に影を落とす場合

この組み合わせによる影は現実空間を撮影した画像上に含まれている。すなわち、実画像から影に相当する領域の画素値は、影が投射される物体の陰影と影が混合された色となっている。したがって、仮想の影は計算せずに取得した影領域の画素値を、生成するMR画像の対応する画素の画素値に設定すればよい。ただし、仮想物体が同じ領域に影を作る場合はケース2-2となる。

```

シーンに含まれる各光源について、
その光源がいずれかの物体によって遮蔽される
3次元空間中の領域を検出し、

if (上記領域が現実近似物体上にあり、
    and 上記領域がいずれかの現実近似物体によって
    光源から遮蔽されているなら) {
    その領域に対応する合成画像上の画素に対して
    遮蔽の影響を無視する
}
else{
    その領域に対応する合成画像上の画素に対して
    遮蔽の影響を加味して画素値を決定する
}

```

図2 影付けの法則

## 2.2 影描画のための法則

2.1節の分析をまとめると、現実物体・仮想物体が混在するシーンの影を描画する方法は図2のようになる。

## 3. レイトレーシングによる影描画手法の実現

本節では、第2節で述べた影の像の生成手法をレンダリング処理として実現した例を示す。この例では、レンダリング技法としてレイトレーシングを用いた。その理由は、本研究の目的が現実世界で起こる現象をシミュレートすることであり、物理現象に忠実な技法を用いることによりアルゴリズムの実装が容易になると考えたからである。

### 3.1 処理の概要

我々の実現例では、仮想視点から発生させたレイ（プライマリレイ）が交差する描画対象の点から各光源に向かうレイ（シャドウレイ）を発生させ、シャドウレイと交差する仮想物体を探索する。この探索処理により描画対象の点に関して光源を遮蔽する物体を判別することができる。そして、描画対象の点が現実近似物体上の点か否か、およびシャドウレイが交差する仮想物体の種類（現実近似物体/非現実近似物体）に応じて、注目画素に仮想の影の影響を加えるか否か判定する。最後に、その判定結果に基づいて画素値を決定する。

なお、ここでは仮想空間の光源環境が現実空間と同等に設定されているものとする。また、仮想空間のモデルデータは現実近似物体・非現実近似物体の両方を含み、物体ごとに種類の属性を持つものとする。仮想カメラの属性は、現実空間を撮影するカメラの内部パラメータ・外部パラメータに一致するように設定する。

### 3.2 レイトレーシング法による描画処理

以下、影の描画処理の流れを具体的に説明する。

図3は、生成するMR画像の各画素に関する処理の

流れを示すフローチャートである。実際に1枚のMR画像を生成する際には、図3の処理を画素数分だけ繰り返す。現実物体により光源が遮蔽されている現実物体上の点に対する処理の流れは図3の太線の部分に相当する。

図3の処理を開始すると、プライマリレイを発生させ、仮想物体との交差の有無と交差する物体の種類を判別する（図3：ステップ1→2→3）。

ここで、プライマリレイが現実近似物体と交差する場合、すなわち現実物体に相当する画素を描画する処理について説明する。

まず、注目画素の位置に対応する実写画像中の画素の画素値を取得し、注目画素の画素値に設定する（図3：ステップ5）。次に、1つの光源に向けてシャドウレイを発生させ（図3：ステップ6）、シャドウレイといずれかの仮想物体との交差の有無、および現実近似物体との交差の有無を判別する（ステップ7および9）。シャドウレイと現実近似物体との交差がある場合（例：図4のケース2-2およびケース4）、注目画素の画素値を変更せずに処理を終了する。これは、ステップ5で設定した画素値に光源が遮蔽されて生ずる影の影響がすでに反映されているからである。一方、シャドウレイと現実近似物体との交差がない場合（例：図4のケース2）、注目画素に対応する実画像上の画素値から光源により照光されて生じる明るさを差し引く（図3：ステップ10→11）。

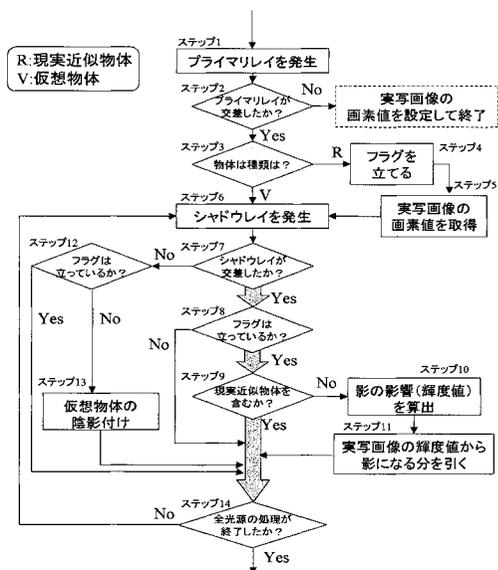


図3 各画素に関する描画処理の流れ

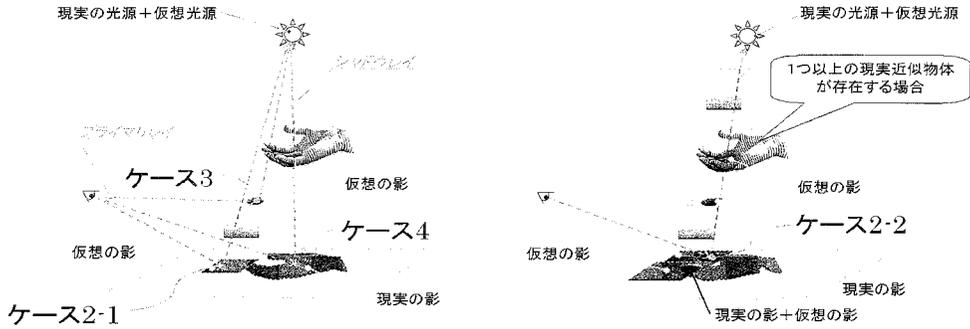


図 4 レイトレーシングによる実現方法

なお、シャドウレイが仮想物体と交差しないう場合は影の影響はないので、実写画像から取得した画素値を変更せずにおく(図3:ステップ7→12→14)。

次に、プライマリレイが非現実近似物体に交差する場合の処理を説明する。

まず、1つの光源に向けてシャドウレイを発生させる(図3:ステップ6)。次に、シャドウレイと仮想物体との交差の有無をチェックする(図3:ステップ7)。仮想物体との交差がある場合、描画対象の点は光源から遮蔽されているので当該の光源による陰影付けを行わない。一方、仮想物体との交差がない場合(例:図4のケース3)、当該の光源によって描画対象の点の陰影付け処理を行う(図3:ステップ13)。

なお、プライマリレイがいずれの仮想物体とも交差しないう場合、注目画素は実写の背景部分に相当するので、画素値を実写画像の対応する画素値と同じに設定して処理を終了する。

#### 4. 影の整合性の検証実験

第2節に述べた提案手法の妥当性を検証するため、現実物体と仮想物体を含むシーンを構築し、影を含むMR画像を生成する実験を行った。

##### 4.1 実験方法

正確な光源環境を設定し、かつ描画した影の位置や濃さが光学的に正しいかどうかを判別しやすくするために、比較的単純な光源環境でかつ単純な形状の物体のみを含む実験環境を構築した。図5に実験環境を示す。図5に示すように、完全拡散反射面と見なせる白色の紙を平面上に置き、影を落とす対象とした。この紙上の所定の位置に球形の物体を載せ、その周囲に2灯のライトと現実空間を撮影するカメラ(ELMO社TN411)を配置している。また、カメラの位置・姿勢

を計測するためのビジュアルマーカは白い紙と同一平面状にある。

上記の現実空間に対応する仮想空間は、球および白色の紙の形状を近似する現実近似物体、仮想カメラ、現実のライトをシミュレートする2つの点光源を含む。この仮想空間に立方体形状の仮想物体を追加した。この立方体の位置は球の上方であり、球の影の領域と立方体の影の領域が一部重なる関係にある。ここで、仮想カメラの位置・姿勢は、実写画像中のビジュアルマーカに基づいて算出している[6]。一方、点光源の位置は、メジャーで計測したライトとビジュアルマーカとの相対位置に従って設定した。なお、仮想光源の色は佐藤らの方法[4]と同様に、実写画像から取得した影領域の画素値に基づいて算出した。

実験に用いた計算機はデスクトップPC(CPU: Xeon 2.66GHz, Quad-Core 2CPU, メモリ: 16 GByte, グラフィックスカード: NVIDIA Quadro FX 4600)である。

##### 4.2 提案手法による画像合成の結果

図6に、ライトを1灯点灯した場合の実験結果を示



図 5 検証実験の実験環境

す。同図(a)は、カメラで撮影した実写画像、(b)は提案手法を適用せずに描画した画像、(c)は提案手法を適用して描画した画像である。ここで、球が影を落とす領域は既にライトから遮蔽されているので、さらに遮蔽物体として仮想の立方体を加えても影の濃さが変化しないので光学的に正しいといえる。

同図(b)は現実の影の上に現実近似物体による仮想の影が重なるため、同図(a)の影よりも濃い影になってしまっている。それに対し、同図(c)は現実の影を考慮しているため、同図(a)と同じ濃さの影で描画することができている。

図7に、ライトを2灯点灯した場合の実験結果を示す。同図(a)~(c)の関係は図6と同様である。

ライト1灯の場合と同様、提案手法を用いない場合、現実の影の領域に仮想の影を重畳しており、その結果、光学的に正しい影よりも濃い影が出現している。一方、提案手法を用いると、現実の影を阻害せずにMR画像を生成している。

#### 4.3 考察

実験により、仮想の影の描画する領域を制御する方法として提案手法が妥当であることを確認した。

ただし、実験結果からわかるように、現実の影と仮想の影の境界付近では、MR画像の影が実画像の影よりも影が濃くなる現象がみられる。これは実験で用いた照明モデルに関する精度の限界のためと考えられる。すなわち、実験では現実の光源を少数の点光源として近似しているが、実際の光源環境はより複雑である。この影響で現実の影が周辺部でソフトシャドウ状に拡大している。このため、影がより濃く描画されたのである。この問題は、より精度の高い近似を行えば、軽減可能であると考ええる。

### 5. 任意形状の現実物体への適用例

本節では、MR空間内での作業を想定した適用例を示す。ここでは、観察者が現実物体と仮想物体を含むMR空間に没入し、自身の手を使って物体に触れたり、動かしたりすることを念頭においている。このような想定では、観察者の手に対応する現実近似物体をシーンに配置し、手から投射される影・手に投射される影を光学的に正しく描画しなければならない。ここで問題となるのは、観察者の手の形状が時々刻々と複雑に変化することである。したがって、本適用例では手の現実近似物体を球の集合体として表現し、球の位置をリアルタイムに移動させている。このとき、ステレオカメラによって現実空間を撮影した画像から手の領域の奥行き値を算出し、算出した奥行きに基づいて球の

位置を決定している。

図8は本適用例において描画した画像の例である。同図(a)は、提案手法を適用せずに描画したものである。このシーンには手に影を投射する物体は手自体しかないが、光学的には存在し得ない影が手の上に現れている。これは手の形状を模擬する現実近似物体から落ちるセルフシャドウである。一方、提案手法を用いて描画すると、同図(b)のように不要なセルフシャドウが描画されることを防ぐことができる。

なお、同図(c)は仮想物体の球が実物体の手に影を落とす様子を描写したものである。このように、任意形状の現実物体についても仮想物体からの影を描画することができる。観察者は影が手がかりに、自らの手と仮想物体との位置関係を容易に把握することが可能である。

### 6. まとめと今後の課題

本稿では、MRにおける影の描画方法を示した。我々の手法は、現実の影の像に対して光学的な整合性を保って仮想の影を生成することを特徴としている。考案した手法をレイトレーシングにより実装し、少数の現実光源を置いた環境下で検証実験を行った結果、その妥当性が確認された。

今後の課題としては、より現実の状況に近い光源環境における妥当性の検証や、影が観察者が知覚する物体の位置関係に与える影響の調査、さらにはMR空間におけるインタラクティブな作業への効果の測定が挙げられる。

### 参考文献

- [1] Y. Ohta and H. Tamura (eds.), "Mixed Reality: Merging Real and Virtual Worlds," Ohm-sha & Springer-Verlag, 1999.
- [2] 大島, 山本, 田村: "実体触知機能を重視した複合現実感システム~自動車インテリア・デザイン検証への応用~, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.9, no.1, pp.79-88, 2004.
- [3] 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, 1998.
- [4] I.Sato, Y.Sato, K.Ikeuchi, "Illumination Distribution from Brightness in Shadows: Adaptive Estimation of Illumination Distribution with Unknown Reflectance Properties in Shadow Regions," Proc.ICCV'99, pp. 875-882, 1999.

- [5] 神原, 横矢: “光源環境の実時間推定による光学的整合性を考慮したビジョンベース拡張現実感,” 信学技報, PRMU2002-190, 2003.
- [6] 佐藤, 田村: “複合現実感における位置合わせ手法,” 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU 2002) 論文集I, 情報処理学会シンポジウムシリーズ, vol.2002, no.11, pp.I.61-I.68, July 2002.

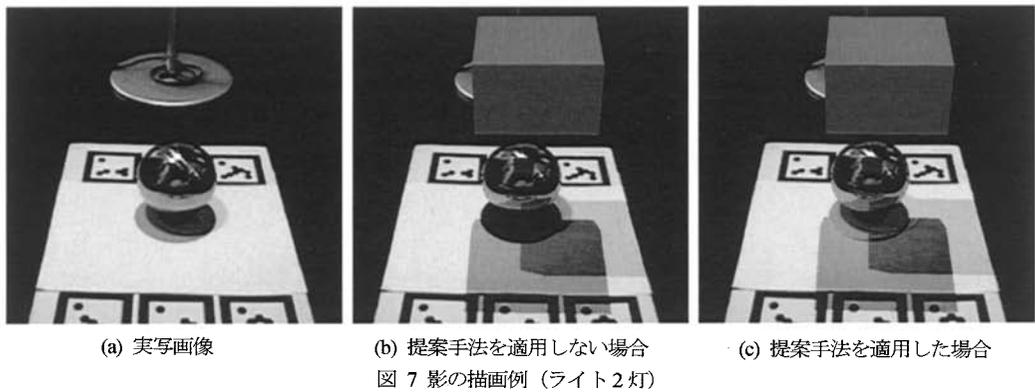
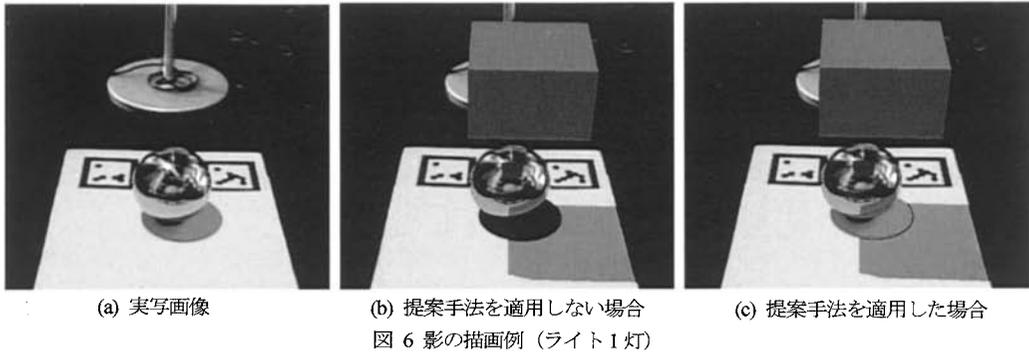


図 8 任意形状の現実物体に適用した例