

大型ハーフミラーを用いた没入型拡張現実感ディスプレイシステムにおけるオクルージョン表現

村瀬 香緒里[○](筑波大学), 小木 哲朗(慶應義塾大学),

齋藤 康太(株式会社スピン), 小山尚英(株式会社スピン)

The Representation of Correct Occlusion Effect in Immersive Augmented Reality Display System Using Large Semi-transparent Mirror.

Kaori MURASE, Tetsuro OGI, Kota SAITO and Takahide KOYAMA

ABSTRACT

This paper proposes the method to create correct occlusion effect in immersive augmented reality (AR) display system, named "ARView". ARView is a display system that can combine the stereoscopic image of virtual objects and real objects optically with wide field of view, using large and highly transparent mirror film placed at an angle of 45 degrees to the floor. But, AR systems using semi-transparent mirror generally cannot create correct occlusion effects between real and virtual objects because they display the images of virtual objects as virtual image. In order to solve this problem, this paper presents the method of the light projectors for immersive AR display systems. The light projectors are used to illuminate the surface of real objects and create occlusion shadow rather than standard light bulbs.

Keywords: Immersive augmented reality, Half mirror, Occlusion, Three-dimensional displays

1. はじめに

拡張現実感(Augmented Reality)技術は情報提示における新しい表現技術として、エンタテインメントの分野[1]や医療分野における手術支援[2]などさまざまな分野で研究が行われている。

この拡張現実感で利用されるディスプレイ技術は、これまで光学シースルーやビデオシースルーを用いた透過型 HMD (Head Mounted Display) が主流であった[3]。しかし、透過型 HMD ではディスプレイの重量やサイズによる人間の行動に対する制限や、ユーザが視線方向を移動させたときに生じるセンサによる視線方向計測に基づく映像提示の時間遅れなどが問題となっている[4]。

これに対して、VR の分野では近年 CAVE や CABIN に代表される没入型プロジェクションディスプレイが臨場感の高い仮想空間を提示できる装置として広く利用されるようになり、さまざまな研究が行われている[5][6]。没入型プロジェクションディスプレイは、HMD のような重量の大きい装置を頭部に装着する必要はなく、視線方向計測に起因する映像提示の遅延の影響も小さい。しかし、これらのディスプレイは大画面スクリーンを用いて利用者の周囲を覆い、利用者の周りの現実環境を隠してしまうため、そのまま拡張現実感システムに適用する

ことはできない。

以上を踏まえた上で、筆者らは主に拡張現実感技術を用いた新しい表現の舞台や展示、臨場感のあるコミュニケーション環境として利用することを目的とし、大画面ハーフミラーフィルムを用いた広視野の没入型拡張現実感ディスプレイシステム ARView [7]を開発してきた。

ARView は、透過性の高いフィルム型ハーフミラーを用いることによりプロジェクタによって投影された仮想環境の映像とハーフミラーの前後の現実環境を、ディスプレイ面を意識させずに光学的に融合したシーンとして提示することができる。また、大型ハーフミラーを使用することによりユーザの視覚を広い範囲でカバーしており、仮想物体を視差情報を用いた立体視映像として表示することで仮想環境と現実環境を3次元的に融合しているため、高臨場感の没入型拡張現実環境を構築できることが特徴である。

しかし、一般にハーフミラーを用いた光学式の AR システムは、提示する仮想物体が虚像であるため現実物体と仮想物体の間のオクルージョンが正確に表現できないという問題があり、ARView 内でも同様の問題が生じる。

この問題を解決するために本論文では、プロジェクタを照明として用いることで、没入型拡張現実環境における仮想物体と現実物体のオクルージョンを表現する“照

明プロジェクタ”の手法について述べ、その有用性を実験によって検証する。

2. 関連研究

野田らは現実物体とCG像の相互隠蔽可能な光学シースルー方式の複合現実感ディスプレイシステム ZARDを開発した[8]。ZARDではプロジェクタを照明として用い、また実時間距離画像センサを用いて現実環境の3次元情報を取得することで、ハーフミラーディスプレイ内で現実物体と仮想物体間の隠蔽関係を表現している。しかし、このシステムではユーザの視点位置が固定されていることが前提であり、また提示するCG像は立体視映像ではない。本研究ではユーザの自由な視点移動に対応したオクルージョン表現を行っており、立体視映像の仮想物体と現実物体間のオクルージョンについても議論を行った。

また、Bimberらはハーフミラーを用いた光学式の拡張現実感ディスプレイ Virtual Showcase[9]内で、プロジェクタを照明として用い、現実物体と仮想物体間のオクルージョンを表現する研究を行った[10]。この研究ではユーザの自由な視点移動に対応しているが、あらかじめ現実環境のデプス情報が取得され、Virtual Showcaseの性質上現実環境は固定であることを前提としており、移動する現実物体と仮想物体間のオクルージョンについては議論していない。本研究では移動する現実物体に対するオクルージョン表現手法についても議論している。

また、これらの研究はどちらもデスクトップのシステムでの利用であり、本研究では没入型拡張現実感環境として構築される広視野空間内でのオクルージョン表現を行うことを目的としている。

3. 没入型拡張現実感ディスプレイシステム

Fig.1 に本研究で用いた没入型拡張現実感ディスプレイ ARViewの外観、Fig.2 にシステム構成を示す。

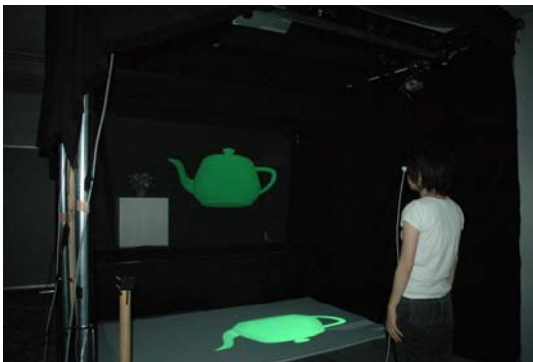


Fig. 1 Photograph of 'ARView' equipment.

ARViewでは広視野の仮想環境映像を提示するため、装置上方にステレオプロジェクタを2台設置し、プロジェクタの前に設置された鏡を通して床面スクリーンに仮

想環境の映像を投影する。ユーザはこの床面スクリーン上の映像を床面に対し45度に設置されたフィルム型のハーフミラーを介して、正面に見ることができる。つまり、床面スクリーン上の映像は虚像としてユーザの正面に表示される。このとき、使用したフィルム型ハーフミラーは透過性が高いため(可視光透過率87.8%)、ユーザはハーフミラーの手前だけでなく後方の現実環境と融合した拡張現実世界を見ることができる。

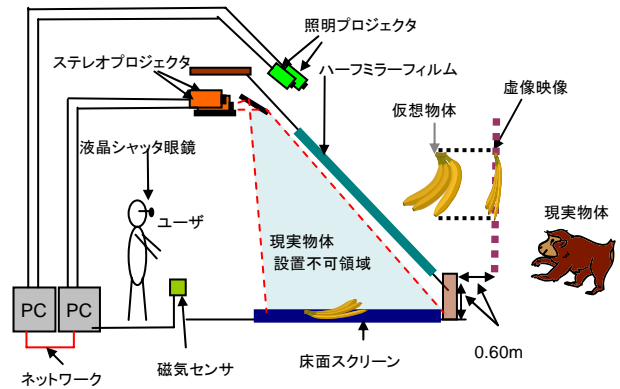


Fig. 2 Structure of 'ARView' system.

ハーフミラーの大きさは幅2.6m、高さ1.95mである。また、ユーザに提示される映像の大きさは高さ1.40m、上底2.22m、下底2.54mの等脚台形となっており、ソフトウェア上で台形歪み補正を行っている。

また、ステレオプロジェクタには1チップのDLPプロジェクタ Infocus DepthQを使用し、PCのリフレッシュレート(100Hz)と同期させて左右の視点画像を切り換えながら表示し、ユーザは液晶シャッター眼鏡(StereoGraphics CrystalEYES3)を装着することで時分割立体視の映像を見ることができる。

さらに、液晶シャッター眼鏡には視点位置を計測するための磁気センサ Polhemus FASTRAKを取り付けており、ユーザの視点に応じた立体視映像を提示することで仮想環境と現実環境を3次的に融合することができる。

本システムではPCを2台使用している。1台は視点位置の計測と仮想物体の映像生成に使用し、もう1台は本研究の目的である仮想物体と現実物体間のオクルージョンを表現するために用いる“照明プロジェクタ”を制御するために使用する。これらの2台のPCはGigabit Ethernetで接続され、磁気センサのデータや仮想物体のアニメーション映像用のカウンタの値等を送受信することで、仮想環境の映像と照明プロジェクタによる映像の同期を取っている。

4. 照明プロジェクタによるオクルージョン表現

4.1 照明プロジェクタの目的と概要

筆者らが提案・開発してきた大型ハーフミラーを用い

た没入型拡張現実感ディスプレイシステムでは通常のハーフミラーを用いたディスプレイシステムと同様に、ユーザが見る映像がハーフミラーで反射された虚像であるため、虚像平面上に表示された映像がハーフミラー後方の現実物体と重なるように表示されると、Fig.3 のように仮想物体と現実物体が両方見えてしまい、オクルージョンが正しく表現できないという問題点がある。これは、虚像によって現実物体からの反射光を遮ることができない、あるいは現実物体が虚像を遮ることができないため、仮想物体の輝度が現実物体からの反射光に対して十分に高い、あるいは十分に低くないと両者を知覚してしまうためである。

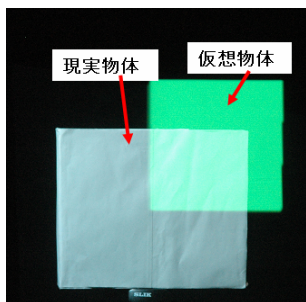


Fig. 3 The example of occlusion between virtual objects and real objects.

この問題を解決するため、本研究では大型ハーフミラーを用いた没入型拡張現実感ディスプレイシステム内で現実物体と仮想物体間のオクルージョンを表現する手法として照明プロジェクタを用いた手法を提案する。

照明プロジェクタは通常照明の代わりに、ハーフミラー後方の現実環境にプロジェクタの光を直接投影するもので、局所的に光の当たる場所を制御することのできる照明光として利用することができる。現実環境に対して、全体には白色光を投影し、ユーザから見て仮想物体と重なり、仮想物体よりも後方になる部分には光を投影しないことで現実物体に影を作る。これにより、二つが重なって見える部分に関して仮想物体の輝度が現実物体の輝度に対して十分になるため、Fig.4 左のように正しいオクルージョンを表現できるようになる。また、仮想物体が現実物体の後方にある場合は、Fig.4 右のように二つが重なって見える部分の仮想物体を黒くすることで正しいオクルージョンを表現することができる。

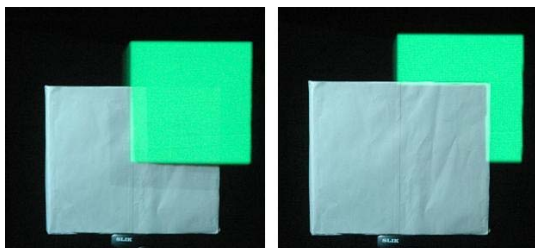


Fig. 4 Use of the light projector.

本研究では、ハーフミラー後方の現実環境に人間が入

ることも想定し、プロジェクタの光を直接人間に照射してもまぶしくないように照明プロジェクタに最大輝度が15 ANSI ルーメンの低輝度LEDプロジェクタ（東芝製TDP-FF1A）を使用し、装置上部に設置した。

4.2 照明プロジェクタの制御手法

照明プロジェクタによって現実環境に影を作り出すための映像はOpenGLをベースとしたプログラムにより、シャドウマッピングのアルゴリズム[11]を応用して生成している。

照明プロジェクタで投影する照明映像の生成手法は以下の通りである。

(1) 現実環境の3次元情報を取得する

固定されている現実物体はあらかじめ3次元形状と位置を取得しておく。ディスプレイシステム使用中に移動する現実物体に対して照明プロジェクタを用いる場合は、現実物体に対して赤外光を照射した状態で赤外線のみを受光するカメラを複数台使用し、現実物体を撮影することで、視体積交差法[12]を用いてリアルタイムで現実物体の3次元形状と位置を取得する。視体積交差法を用いた3次元情報取得については4.3項で詳細を説明し、5.2項で実例を示す。

(2) 仮想環境のデプステクスチャを取得する

ユーザの視点位置（ここでは左目の位置）を計測し、その位置をカメラ視点とした透視投影により、仮想物体の画像をレンダリングし、その結果をデプステクスチャとして保存する。

(3) シャドウマッピングを行う

現実物体の3Dモデルを作成し、白色でレンダリングする。これにユーザの視点（左目）位置からデプステクスチャを投影マッピングする。この時、ピクセルのデプス値がマッピングされるデプステクスチャの値よりも大きければ黒色がマッピングされる。

(4) 照明プロジェクタで生成した映像を投影する

デプステクスチャがマッピングされた現実物体の3Dモデルを、照明プロジェクタのレンズ位置をカメラ視点とした透視投影によりレンダリングし直し、これを照明プロジェクタから現実環境に対して直接投影する。

上記の方法により、仮想物体の影になっていない部分だけ現実世界に白色の照明が当たるため、仮想物体が現実物体よりも手前にある場合には現実物体に影を作ることができ、Fig.4 左に示す正しいオクルージョン表現を行うことが可能になる。

また、ステレオプロジェクタで投影する映像に関しても現実物体の3Dモデルを黒色で表現し、仮想物体と一緒に表示する。この方法により現実物体が仮想物体よりも手前にある場合にもFig.4 右のように正しいオクルージョン表現を行うことができる。

4.3 移動する現実物体の3次元情報取得とボクセルモデルの生成

照明プロジェクタ機能を用いてオクルージョンを表現

するには 4.2 項で述べたように現実物体の 3 次元情報を取得し、3D モデルとして生成する必要がある。本研究では対象となる現実環境に赤外光を照射し、赤外線透過フィルタを取り付けた赤外線カメラ 2 台を用いて、視体積交差法によって移動する現実物体の 3 次元形状と位置をリアルタイムで取得し、ボクセルモデルとしてその 3D モデルを生成した。

視体積交差法とは「対象は任意の視点から撮影して得られる物体の 2 次元シルエットを実空間に投影して得られる錐体（視体積）の中に含まれる」という制約条件から、複数の視点から撮影した対象物体のシルエットそれぞれに対応する視体積の共通部分の内側に対象が存在することを利用し、対象物体の 3 次元形状を復元する手法である[12]。

また、本手法では赤外光を対象となる現実物体に照射し赤外線透過フィルタを取り付けて赤外光のみを受光するようにした赤外線カメラを用いて撮影する。これは、視体積交差法を用いて 3 次元情報を取得する際に、背景差分によって対象物体のシルエット画像を生成する必要があるのに対し、照明プロジェクタで投影する照明光は変化するため、通常のカメラでは照明条件が変化してしまい背景差分が行えないためである。そのため、カメラによる撮影は人間の目に見えない赤外光の範囲でのみ行うようにすることでカメラ撮影は安定した照明条件の下で行えるようにし、かつ照明プロジェクタによる照明の変化には影響しないようにした。

以上を踏まえて、本手法では以下の手順で移動する現実物体の 3 次元情報を取得し、ボクセルの 3D モデルとして復元する。

- (1)赤外線透過フィルタを取り付けた赤外線カメラを 2 台以上、ハーフミラー後方にある移動する現実物体を撮影できるように設置し、カメラキャリブレーションを行ってカメラ姿勢情報とカメラの射影行列を取得する。
- (2)移動する現実物体が存在しない状態を背景画像として各カメラで撮影し、保存する。
- (3)各カメラで、移動する現実物体を撮影し、(2)で撮影した背景画像を用いて背景差分を行う。さらに背景差分を行った画像を 2 値化し、シルエット画像として保存する。
- (4)移動物体が存在する範囲の 3 次元空間を任意の大きさのボクセルで区切り、それぞれのボクセルの中心座標をカメラの射影行列によって撮像面に投影し、シルエット画像のシルエット内に含まれるかどうかを判定する。全てのカメラにおいて撮影されたシルエット内に含まれるボクセルは物体が存在する座標であるとみなし、ボクセルモデルを描画する。これを全てのボクセルに対して行い、ボクセルによる物体の 3D モデルを生成する。
- (5)(3)~(4)をディスプレイシステム使用の間繰り返す。

上記の手法により、移動する現実物体の 3D モデルを生成し、4.2 項で述べた照明映像の生成手法を用いて移動する現実物体に対して照明プロジェクタ機能を使用

できるようにした。

5. 照明プロジェクタの使用実例

5.1 固定された現実物体に対する使用実例

Fig.5 は ARView 内で照明プロジェクタの機能を用い、あらかじめ 3 次元情報を取得しておいた固定の現実物体と仮想物体を融合した没入型拡張現実環境における展示での応用例である。ノート PC と白い台はあらかじめ位置と形状を計測し、ハーフミラー後方に設置された固定の現実物体であり、CG キャラクタはノート PC を説明する仮想物体映像である。Fig.5 の左の図は CG キャラクタがノート PC よりも手前、Fig.5 の右の図は CG キャラクタがノート PC よりも後ろにいる状態を示している。

照明プロジェクタを用いることで仮想物体である CG キャラクタアニメーションの表示可能な範囲を広げることができ、正確にオクルージョンを表現することでより現実物体と仮想物体を効果的に融合することができた。



Fig. 5 Use of the light projector for fixed real objects.

5.2 移動する現実物体に対する使用実例

本研究では、移動する現実物体に対して照明プロジェクタを使用する実験を、ARView を用いて行った。本実験では仮想物体が現実物体よりも手前に存在する場合のみを対象とした。実験条件は以下の通りである。

移動する現実物体を撮影する赤外線 USB カメラ (NETCOWBOY DC-NCR131) を 2 台使い、1 台は照明プロジェクタの真上、もう 1 台は ARView の側面かつハーフミラー後方に設置した。また、赤外線カメラのレンズ部分には IR-78 光吸収・赤外線透過フィルター (富士フィルム) を取り付けた。

2 台の赤外線 USB カメラは照明プロジェクタで投影する映像生成用の 1 台の PC (CPU: Intel® Pentium® M processor 2.00GHz, グラフィックカード: NVIDIA GeForce Go 6400) に接続される。また、照明プロジェクタの映像生成用 PC は Gigabit Ethernet でユーザの視点計測を行う PC と接続され、ユーザ視点位置情報を取得する。

シルエット画像生成の際には RGB で背景画像と撮影画像の差分を取り、差分画像をグレースケールに変換した後、各画素の差分が閾値以上かどうかを判定して 2 値化を行い、シルエット画像を生成した。また、生成されたシルエット画像に対しては画像の雑音除去としてモル

フォロジの基本演算 Erosion[13]を行った。

通常、カメラの映像はレンズにより歪みを生じるため、本実験では Zhang の手法[14]を用いて赤外線カメラの内部パラメータと歪み係数を求め、背景差分によって得られたシルエット画像の歪み補正を行った。

以上の条件の下、4章で述べた手法を用いて移動する現実物体と仮想物体間のオクルージョンを表現した。その結果が Fig.6 である。Fig.6 では移動する人間と仮想物体である緑色の立方体の映像を融合している。



Fig. 6 Use of the light projector for a human.

この結果から、固定された現実物体の場合と比べると境界線の精度は低い、移動物体に対しても照明プロジェクタ機能が十分に使用可能であることが確認された。

また、本実験での照明プロジェクタからの投影映像のフレームレートは平均 2.76fps であったが、これは使用する PC のスペックや台数に依存するものであり、今後改良できると考えられる。

6. 照明プロジェクタの評価実験

次に照明プロジェクタによってオクルージョン表現が向上しているかどうかを検証するため、照明プロジェクタを使用した場合としなかった場合の現実物体と仮想物体の奥行き関係の知覚を調べる評価実験を行った。

6.1 実験手法

まず、被験者は ARView のハーフミラー手前に固定された椅子に座り、磁気センサのついた液晶シャッター眼鏡を装着する。次に、あらかじめ 3 次元情報を取得した現実物体として大きさ $0.31\text{m} \times 0.09\text{m} \times 0.26\text{m}$ の白い箱をハーフミラー後方、高さ 1.25m の位置に配置する。現実物体と被験者の奥行き距離は 3.25m とした。それと同時に、仮想物体として立体視映像の立方体を ARView で表示する。

仮想物体は配置された現実物体の位置を基準として、現実物体より $0.15, 0.55, 0.95, 1.35, 1.75, 1.95\text{m}$ 手前 (被験者側) と現実物体より $0.25, 0.65\text{m}$ 後方のいずれかの 8 箇所に存在して見えるように立体視映像として表示し、被験者の左目から見て Fig.7 のように仮想物体と現実物体の一部が重なるように表示した。

また、ARView では仮想環境の映像を透視投影で表示しているため、手前にある物体ほど大きく描画される。このため、本実験では仮想物体が現実物体より 0.15m 手前にあるときに仮想物体の大きさが 0.20m 四方となることを基準として、仮想物体の映像の大きさを被験者からの奥行き距離に反比例させることで、虚像平面に表示される仮想物体の大きさを一定にし、被験者が仮想物体の見かけの大きさで奥行きを判断できないようにした。



Fig. 7 The examples of the displayed images.

上記の 8 箇所の仮想物体に対して、照明プロジェクタ機能を用いて仮想物体または現実物体に影を投影する場合と、照明プロジェクタ機能を用いずに影を投影しない場合の 2 通り、合計 16 パターンの映像をランダムに提示した。

被験者にはランダムに提示された上記の 16 パターンを見てもらい、以下の質問に答えてもらった。

質問：現実物体 (白い箱) に対して仮想物体 (立方体) は手前に見えるか奥に見えるかを次の 3 つの選択肢から答えよ。

(a) 白い箱が手前 (b) 白い箱が奥 (c) わからない

この実験を 5 名の被験者に対して、仮想物体の色を白と緑、さらにそれぞれについて輝度の高いものと低いものの合計 4 通りで 3 回ずつ行い、データを取った。

6.2 実験結果と考察

実験結果に対し、照明プロジェクタを使用した場合 / 使用しなかった場合、仮想物体の色が白 / 緑、仮想物体の輝度が高い / 低い、の 3 要因の分散分析を行ったところ、照明プロジェクタの使用に関しては 1% 水準で有意性があつたが、交互作用を含めその他の因子については有意性は認められなかった。質問に対して照明プロジェクタ機能を使用した場合と使用しない場合の奥行き判定の正答率を比較したものが Fig.8 のグラフである。被験者の答えが正解でなかった場合と、"(c) わからない" を選択した場合は不正解として正答率を計算した。

グラフより照明プロジェクタを使用することで全体的に正答率が上がっている。

以上の実験結果から、照明プロジェクタ機能を使用することで、全体としてユーザの現実物体と仮想物体の奥行きに関する知覚精度を向上させることができたといえる。ただし、Fig.8 の照明プロジェクタ機能を使用した場合の結果だけを見ると仮想物体が被験者に近い位置 (現実物体から $1.35 \sim 1.95\text{m}$ 手前) にある場合、多少評価が下がっている。照明プロジェクタに使用した LED プロジェクタではリフレッシュレートが 75Hz までしか

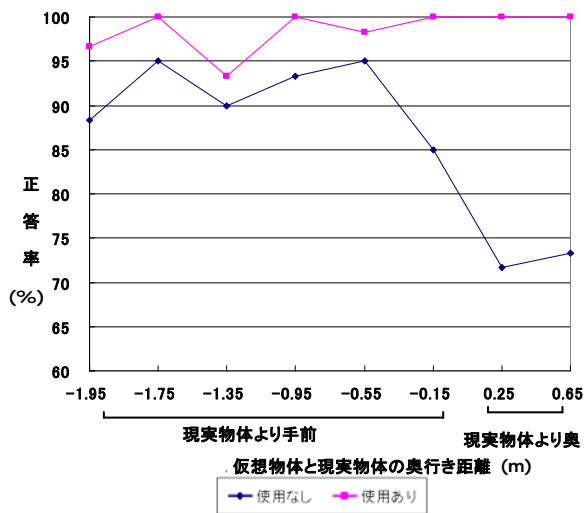


Fig. 8 Comparison of results, with and without occlusion correction of images.

出せず、仮想物体の映像に対応した時分割方式の照明を投影できないため、本システムでは照明プロジェクタから現実物体に投影される影は、被験者の左目から見たときの影を投影している。そのため、仮想物体が被験者に近づくほど提示される映像の視差が大きくなり、Fig.9のように右目から見たときの仮想物体の映像と現実物体に投影された影がずれてしまっていることが、奥行き判定の正答率を下げる原因になっていると考えられる。

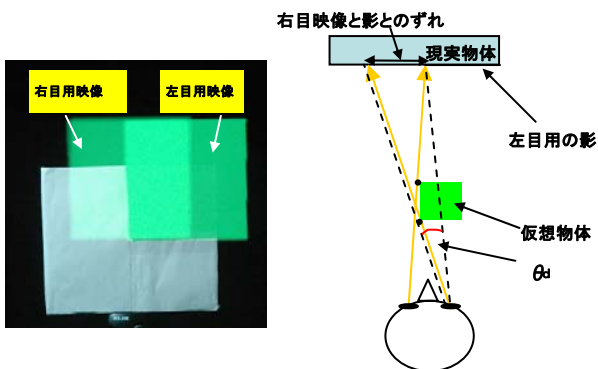


Fig. 9 Stereo parallax image and shadow projected onto the surface of real object.

この点に関しては、照明プロジェクタに映像用のプロジェクタと同じリフレッシュレートのものを使用し、映像と照明の同期を取ることで解決できると思われる。ただし、今回は人間がハーフミラー後方の現実環境に入っていることを想定し、輝度の低い LED プロジェクタを使用している。

7. まとめ

本研究では没入型拡張現実感ディスプレイシステムにおける現実物体と仮想物体間のオクルージョン表現の手

法について提案し、実験を行った。また、被験者実験を行い、本手法の有用性を検証した。

今後の課題としては、移動する現実物体と仮想物体間のオクルージョン表現の精度を向上させることが上げられる。

参考文献

- 1) 一刈良介, 川野圭祐, 天目隆平, 大島登志一, 柴田史久, 田村秀行: 映画制作を支援する複合現実型プレジューア リゼーションとカメラワーク・オーサリング; 日本バーチャリアリティ学会論文誌, Vol.12, No.3, (2007), pp.343-354.
- 2) J. Fischer, M. Neff, D. Freudenstein, D. Bartz: Medical Augmented Reality based on Commercial Image Guided Surgery; Eurographics Symposium on Virtual Environments, (2004), pp. 83-86.
- 3) Ronald T. Azuma: A Survey of Augmented Reality.; PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, vol.6, No.4 (1997), pp.355-385.
- 4) Oliver Bimber, Ramesh Raskar: Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds.; A K Peters Ltd, (2005), pp.74-76.
- 5) Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, Thomas A. DeFanti: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE.; ACM SIGGRAPH'93, (1993), pp.135-142.
- 6) 小木哲朗:PC-CABIN による共有型没入仮想環境の構築; 第 32 回可視化情報シンポジウム講演論文集, 可視化情報, Vol.24, Suppl. No.1, (2004.7), pp.305-308.
- 7) Kaori Murase, Tetsuro Ogi, Kota Saito, Takahide Koyama: Immersive Augmented Reality Display System Using a Large Semi-transparent Mirror, IPT-EGVE Symposium (2007)
- 8) 野田真一, 伴好弘, 佐藤宏介, 千原國宏: 実時間計測と動的パターン照明による光学シースルー型複合現実感ディスプレイ; TVRSJ, Vol.4, No.4, (1999), pp.665-670.
- 9) Oliver Bimber, Bernd Fröhlich, Dieter Schmalstieg, L. Miguel Encarnação: The Virtual Showcase.; IEEE Computer Graphics and Applications, vol.21, No.6, (2001), pp.48-55.
- 10) Oliver Bimber, Bernd Fröhlich: Occlusion Shadows: Using Projected Light to Generate Realistic Occlusion Effects for View-Dependent Optical See-Through Displays.; Proc. International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '02), (2002), pp.186-195.
- 11) Mark Segal, Carl Korobkin, Rolf van Widenfelt, Jim Foran, Paul Haeberli: Fast Shadows and Lighting Effects Using Texture Mapping; ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.26, Issue 2, (1992), pp.249-252.
- 12) 酒井満隆, 小木哲朗: テレマージョン環境における 3 次元ビデオアバタの実時間表現; 日本バーチャリアリティ学会 第 12 回大会, (2007)
- 13) 小畑秀文: モルフォロジー, コロナ社, 1996.
- 14) Z. Zhang: A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), pp.1330-1334, 2000.