

没入型拡張現実感ディスプレイ AR View の開発

Development of Immersive Augmented Reality Display: AR View

小木哲朗、村瀬香織里 / 筑波大学 大学院システム情報工学研究科、斉藤康太、小山尚英 / 株式会社スピン
Tetsuro Ogi, Kaori Murase / University of Tsukuba, Kota Saito, Takahide Koyama / Spin Inc.

This paper proposes an immersive augmented reality display system, named “AR View”, that generates a high presence augmented reality environment using the immersive projection technology. In this system, the stereoscopic image of virtual objects is projected onto a floor screen by stereo projectors and it is combined optically with real objects placed in front of or behind a highly transparent mirror film placed at an angle of 45 degrees to the floor. In order to create correct occlusion effect in large area of the augmented reality environment, light projectors have been used to illuminate the surface of real objects using the occlusion shadow function, rather than standard light bulbs. The AR View was applied not only to stand-alone applications but also to networked applications such as the high presence communication using a video avatar, by connecting it to a broadband network.

1. 緒言

近年、拡張現実感 (AR: Augmented Reality) や複合現実感 (MR: Mixed Reality) の技術は、医療支援、作業支援、ナビゲーション等、さまざまな分野で利用されるようになってきた[1][2]。現状の拡張現実感システムではシースルー型の HMD が使用されることが多いが[3]、HMD には装着時の負担やセンサによる時間遅れの影響等の問題が存在する。一方、最近の VR システムでは、CAVE や CABIN 等の立体視プロジェクタと大画面スクリーンを用いた没入型ディスプレイ技術 (IPT: Immersive Projection Technology) が利用されることが多くなってきた[4][5]。没入型ディスプレイは、HMD のような装着感や時間遅れの問題が少なく、利用者に対して没入感の高い仮想世界を提示することができる。本研究では、このような没入型ディスプレイ技術を用いることで、没入感、臨場感の高い拡張現実環境を構築することを目的としている。

プロジェクタを使用した拡張現実環境の構築手法に関しては、これまでに透明スクリーンを用いる方法、ハーフミラーを用いる方法、実物体スクリーンを用いる方法等が提案されている。透明スクリーンを用いるシステムとしては Invisible Interface 等があるが、投影された光が指向性を持つため視野角が制限される等の制約がある[6]。ハーフミラーを用いるシステムとしては Virtual Showcase 等があげられるが、これはデスクトップ型のシステムのため没入感は少ない[7]。また実物体スクリーンを用いるシステムとして Shader Lamps 等があげられるが、スクリーンとして用いる

物体の形状や色によって、表現される映像は大きく制限される等の問題がある[8]。

本研究では没入感の高い広視野の拡張現実環境を構築することを目的に、没入型拡張現実感ディスプレイ AR View の開発を行った。このシステムは透過性の高い大画面ハーフミラーフィルムを使用し、現実世界のシーンに 3 次元の仮想世界の映像を融合することで、広視野の拡張現実環境を生成する。また照明プロジェクタを使用することで、実物体と仮想物体の間のオクルージョン表現を行う等の特徴を持つ。以下、開発した本システムの構成、映像提示手法、生成される拡張現実空間の評価、応用例等について論じる。

2. AR View の構成

本研究では大画面ハーフミラーフィルムを使用した没入型拡張現実感ディスプレイ AR View の開発を行った。図 1 は AR View の外観を、図 2 は AR View のシステム構成を図示したものである。このシステムでは、2.60m×1.95m のハーフミラーフィルムを床面に対して 45 度の角度で設置し、2 台並べて天上に配置した DLP プロジェクタ (InFocus DepthQ) からミラーを介して時分割の立体視映像を床面スクリーンに投影する。利用者は液晶シャッター眼鏡 (StereoGraphics CrstalEyes3) を使用し、ハーフミラーフィルムで反射した床面スクリーン上の立体視映像を虚像として見る。使用したハーフミラーフィルムは透過率が 87.8%と高いため、利用者はハーフミラーフィルムの後方の現実空間と重ね合わせて仮

想物体の映像を見ることができる。また利用者の眼鏡には磁気センサ (Polhemus FASTRAK) が取り付けられており、視点位置に応じた仮想物体の映像を生成することで、利用者は3次元の拡張現実空間を体験することができる。



図1 AR Viewの概観

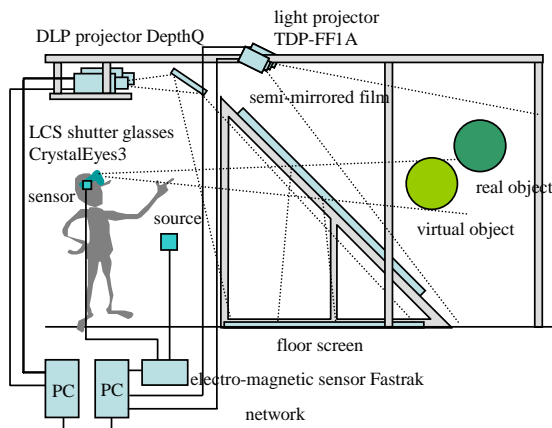


図2 AR Viewのシステム構成

仮想物体の映像の生成は1台のPC (Pentium4 3GHz, Quadro FX1400)で行い、TwinViewのマルチ画面出力の機能により横2面分の映像を出力する。生成された映像は2台のプロジェクタでブレンディング処理を行い、投影することで広視野角の映像を提示することができる。この際、映像はプロジェクタからハーフミラーフィルムに沿って投影されるため大きな台形歪を有している。この歪はプロジェクタの歪補正機能だけではカバーできず、ソフトウェアによる補正を併用しているため、投影映像の有効領域は台形になる。2台のプロジェクタで投影される最終的な映像の大きさは、高さ1.40m、上底2.22m、下底2.54mとなる。

またハーフミラーフィルムは床面から60cm上げて設置することで、利用者が床面スクリーン上の映像を同時に見ないようにしている。利用者が見る虚像面は、ハーフミラーフィ

ルムに対して床面スクリーンの対称位置にあたるため、ハーフミラーフィルムの後方60cmの位置となる。そのため、利用者が床面スクリーン手前の中央位置に立った場合、図3に示すように視野角の大きさは水平方向61.5度、垂直方向38.6度となり、十分に広視野の没入型拡張現実空間が生成されたと言える。

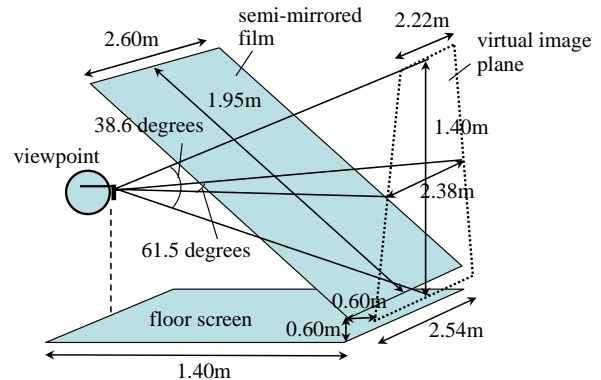


図3 利用者の視野角

3. 照明プロジェクタ機能

ハーフミラーを用いた拡張現実感システムでは、利用者の視点から見たときに仮想物体と実物体が重なると、両者の前後関係を判断することが困難である。本システムでは、正確なオクルージョン表現を行うための方法として照明プロジェクタを使用した。一般に、実物体に照明が当てられている場合は、仮想物体の映像よりも実物体の方が明るく見えるため、実物体が手前にあるように感じる。反対に実物体に照明が当てられていない場合は、仮想物体の映像の方が実物体よりも明るく見えるため、仮想物体の方が手前にあるように感じる。

照明プロジェクタは照射する照明光の形状を任意に制御することで、現実空間の中で必要な部分だけに照明をあてる機能である。例えば図4に示すように、仮想物体が実物体より奥にある場合は、照明プロジェクタは実物体の形状全部に照明をあて、仮想物体の映像は実物体によって影になる部分を黒くする(図4左)。また仮想物体が実物体の手前にある場合は、仮想物体の映像は形状全体を描き、照明プロジェクタは仮想物体の影になる部分を黒くした照明を実物体にあてる(図4右)。

照明プロジェクタ (light projector) は、Bimber等によって開発されたVirtual Showcaseのデスクトップ型システムで使用された手法であるが[9]、ここでは2台の照明プロ

ジェクタを使用し、広視野の没入環境で実装している点の特徴である。照明用のプロジェクタとしては、LED プロジェクタ（東芝 TDP-FF1A）をハーフミラーフィルム後方の天井の両脇に設置して使用した。この LED プロジェクタは 15 ANSI ルーメンと低輝度であるため、現実空間の中に人間が入った場合でも照明光として使用することができる。

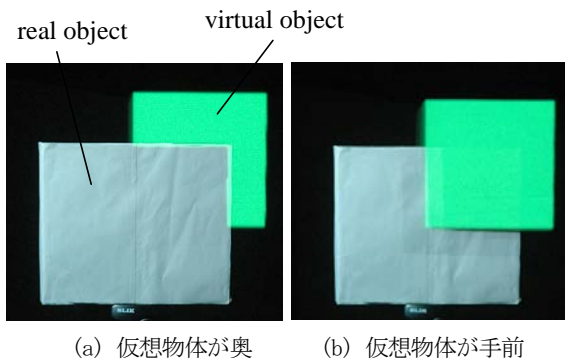


図 4 照明プロジェクタの効果

照明プロジェクタによって照射される照明映像の生成には、もう 1 台の PC (Pentium4 3GHz, Quadro FX1400) が使用され、仮想物体の映像生成用の PC と同期して処理が行われる。照明映像は、利用者の視点位置に応じてリアルタイムで制御を行う必要があるが、ここではシャドウマッピングの手法を用い、以下の手順で生成を行っている。

- 1) ユーザの視点位置を計測し、視点位置から見た仮想物体の映像を生成し、デプステクスチャとして格納する。
- 2) あらかじめ形状と位置を計測してある実物体の 3 次元形状モデルを生成し、これにユーザの視点位置からデプステクスチャを投影マッピングする。この際、実物体の 3 次元モデルのデプス値がデプステクスチャの対応する値よりも大きい場合は黒色、小さい場合は白色とする。
- 3) デプステクスチャをマッピングされた実物体の 3 次元モデルを、照明プロジェクタの位置から見た映像としてあらためて生成し、これを照明映像として照明プロジェクタから投影する。
- 4) 仮想物体の映像に関しては、実物体の 3 次元モデルを黒色で同時に描画することで、仮想物体上の実物体による影の部分を表示する。

以上の方法を用いることで、実物体が仮想物体を隠す、あるいは仮想物体が実物体を隠すといった、拡張現実環境における実物体と仮想物体の間のオクルージョン関係を正しく表

現することが可能になる。ただし、ここで使用している照明プロジェクタは時分割立体視に対応していないため、単眼の視点映像を用いている。またこの方法は、実物体の形状と位置をあらかじめ計測しておく必要があるため、拡張現実環境の中で仮想物体は自由に移動することができるが、実物体は静止している必要がある。

4. レジストレーションの評価

本研究の目的は、没入感の高い広視野の拡張現実環境を構築することである。ここでは本システムで生成される拡張現実空間の位置の融合に対するレジストレーションの精度を調べるため、以下の評価実験を行った。

図 5 は AR View で使用する座標系を示したものである。実験では、ハーフミラーフィルムの前後の実空間内に 21 箇所（図 6 の格子点）の目標位置を定めラベルをぶら下げた。次に仮想物体としてカーソルの映像を任意の初期位置にランダムに表示し、カーソルが目標位置と重なるように、被験者にキー操作でカーソルを移動させた。カーソルの移動量は 1 回のキーボード操作で x、y、z 方向にそれぞれ ±1cm 単位で移動させることができる。上記の実験を 7 人の被験者に対して 3 回ずつ行った。

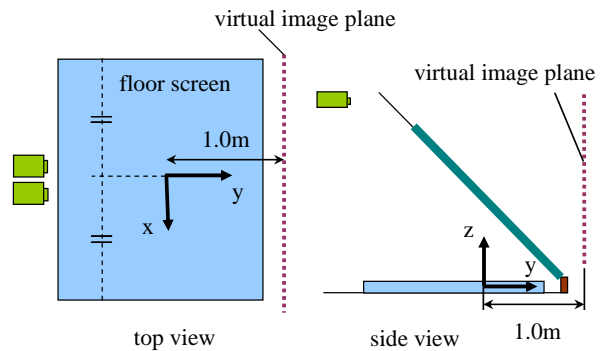


図 5 AR View の座標系

表 1 は x、y、z の各方向に対して目標位置とカーソルの移動位置の誤差の大きさ（絶対値）を計測し、平均値と標準偏差で示してある。また図 6 は目標位置とカーソルの移動位置の誤差について、ずれの方向を考慮して図示したものである。この結果から左右（x 方向）、上下方向（z 方向）に関しては 2.0cm 以下の誤差であり、現実世界と仮想世界の位置合わせは精度よく行えていると言える。奥行き方向（y 方向）に関しては誤差が多少大きいですが、これは人間の奥

行き知覚に関する精度に依存しているものと考えられる。

医療応用等の精密な作業が必要とされるアプリケーションでは3次元的に精度の高い位置合わせが要求されるが、本システムでは空間的に大きな広視野の拡張現実環境を実現することを目指しているため、上記の結果は十分な精度と判断することができる。

表1 実験結果

	x	y	Z
average (cm)	1.91	6.68	1.65
standard deviation (cm)	1.50	4.66	1.31

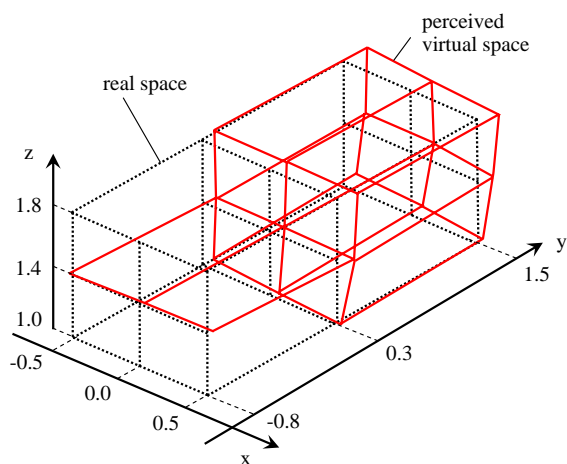


図6 レジストレーションの評価実験の結果

5. オクルージョン表現の評価

次にシステムの評価として、照明プロジェクタによるオクルージョン表現に関する評価実験を行った。

実験では、仮想物体と実物体の位置関係を変えながら、両者の前後関係を被験者に判定させた。実物体としては大きさ $0.31 \times 0.09 \times 0.26\text{m}$ の白い箱をハーフミラーフィルムの後方位置 $(0.0, 1.15, 1.25)$ に置き、仮想物体としては立方体の映像を奥行き (y 座標) を $1.8, 1.4, 1.0, 0.6, 0.2, -0.2, -0.6, -0.8$ の8通りに変えながら実物体と一部分が重なって見えるように表示した。この際、仮想物体の映像は透視投影で表示しているため、被験者の近くにあるほど大きく見えてしまう。そのため、仮想物体の立方体の大きさは奥行き距離に反比例させることで、虚像面に表示される見かけ上の大きさを一定にした。

照明プロジェクタは、仮想物体の各配置条件に対して、実物体全体を照明する場合と、オクルージョン表現の機能を用いて必要な領域だけ照明する場合とで比較を行った。また仮想物体は、低輝度の白色、高輝度の白色、低輝度の緑色、高輝度の緑色の4通りの色を用い、8通りの奥行き位置にランダムに提示した(図7参照)。このとき被験者には、知覚された実物体と仮想物体の位置関係について、(a)仮想物体が手前、(b)実物体が手前、(c)どちらが手前かわからない、の3通りで答えてもらった。被験者は4人で、上記の実験を3回ずつ行った。

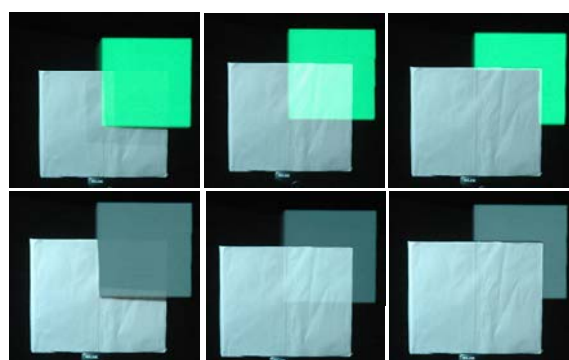


図7 オクルージョン実験の提示映像例

図8は上記の実験結果について、オクルージョン表現の機能を用いた場合と用いなかった場合の判定結果を比較したものである。グラフでは、仮想物体の配置位置ごとに全被験者の正答率を示してある。この結果から、オクルージョン表現の機能を用いることで、実物体と仮想物体の前後関係の判定について正答率が大きく向上していることがわかる。またオクルージョン表現の機能を用いた場合のデータの中では、仮想物体の配置位置が被験者に近いと ($y \leq -0.2\text{m}$)、正答率がやや低下しているが、これは照明プロジェクタが単眼でしか使用していないことが原因と考えられる。

仮想物体と実物体の前後位置が大きくずれてくると、左右の視点に対する実物体上で重なる仮想物体の領域が大きく異なってくるが、照明プロジェクタで投影される影の領域は単眼の視点だけで生成しているため、これが被験者の判断に影響したものと考えられる。本システムで使用した照明プロジェクタはリフレッシュレートが低く時分割映像に対応していないため単眼で用いたが、立体視に対応した照明プロジェクタを使用することで、この問題は解消できることが期待される。

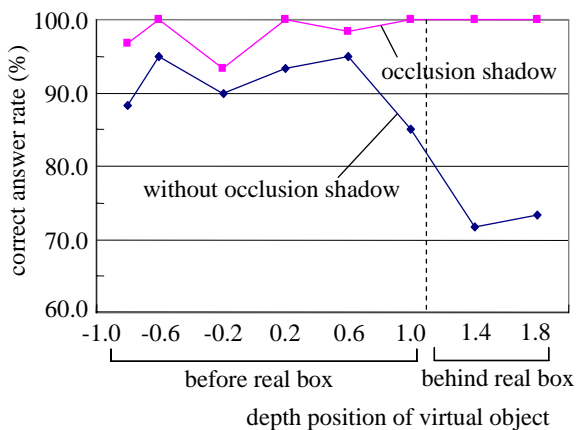


図8 オクルージョン実験の判定結果

6. 応用

AR View は広視野の没入型拡張現実環境を構築することができるため、現実世界と仮想世界を融合する種々のアプリケーション分野で利用できることが期待される。本研究では、まず展示環境への応用について検討を行った。図9はハーフミラーフィルムの後方の実空間に計算機が展示してあり、CG映像で表現されたキャラクターが仮想映像として合成され、展示物の説明を行っている例を示したものである。

この例では、CGのキャラクターが拡張現実空間の中を移動する際に、照明プロジェクタの機能を使用することで、正しいオクルージョン表現を行えることを確認できた。図9(a)はキャラクターが展示物の前に立っている状態、図9(b)は展示物の後ろに立っている状態を示したものである。

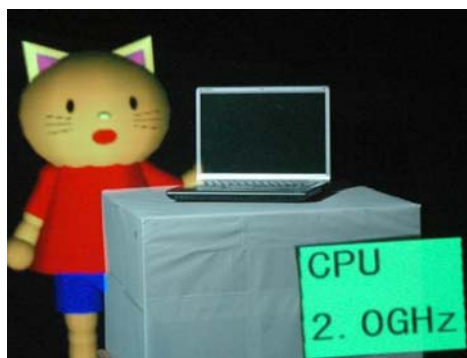
また次の例では、AR View を JGN2(Japan Gigabit Network 2)の広帯域ネットワークに接続し、遠隔地の利用者とのコミュニケーションに利用した。図10はビデオアバタ技術を使用したコミュニケーションを行っている様子を示したものである。ビデオアバタとは利用者の姿を遠隔地間で送受信し、仮想世界に合成することで、空間を共有したコミュニケーションを実現する技術である[10]。

特にディスプレイ環境としてAR Viewを使用する場合は、利用者を撮影するビデオカメラをハーフミラーフィルム後方の利用者の正面位置に置くことができる。照明プロジェクタの機能によって、利用者からはCG映像しか見えない状態で、CG映像ごしに裏から利用

者の姿を撮影することができる。図11はハーフミラーフィルムの裏面からビデオカメラで利用者の姿を撮影している様子を示したものである。



(a) CGキャラクターが展示物の手前にいる例



(b) CGキャラクターが展示物の後方にいる例

図9 AR Viewの展示への応用



図10 AR Viewのコミュニケーションへの応用



図 11 ハーフミラー後方からの利用者の撮影

7. 結論

本研究では、没入型拡張現実感ディスプレイ AR View の開発を行った。AR View は、大画面のハーフミラーフィルムを使用することで、現実空間と仮想空間を光学的に融合した、広視野の拡張現実環境を構成することができる。また、照明プロジェクタを導入することで、実物体と仮想物体との間の正しいオクルージョン表現を広い空間内で行うことができるのが特徴である。本研究で開発した AR View の応用としては、没入型拡張現実感ディスプレイとして単独で使用するだけでなく、JGN2 等の広帯域ネットワークに接続することで高臨場感のコミュニケーション環境としても有効に利用されることが確認された。

今後の課題は、実空間の変化に対応したオクルージョン表現手法の開発と、実用的なアプリケーションへの適用を通して、システムの有効性に関し、更に評価を行っていく予定である。

8. 謝辞

本研究を行うにあたり、情報通信研究機構つくばリサーチセンターの協力をいただいたことに感謝します。

参考文献

- [1] S. Feiner, B. Macintyre, D. Seligmann: Knowledge-based Augmented Reality, *Communications of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 53-62 (1993)
- [2] M. Majura, H. Fuchs, R. Ohbuchi: Merging Virtual Objects with the Real World: Seeing Ultrasound Imagery within the Patient, *Computer Graphics*, Vol. 26, No. 2, pp. 203-210 (1992)
- [3] R. Azuma: A survey of augmented reality, *PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 4 pp. 355-385 (1997)
- [4] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. DeFanti: Surround-Screen Projection-based Virtual Reality: The Design

and Implementation of the Cave, *ACM SIGGRAPH' 93*, pp. 135-142 (1993)

- [5] M. Hirose, T. Ogi, S. Ishiwata, T. Yamada: Development and Evaluation of Immersive Multiscreen Display "CABIN", *Systems and Computers in Japan*, *Scripta Technica*, Vol. 30, No. 1, pp. 13-22 (1999)
- [6] T. Ogi, T. Yamada, K. Yamamoto, M. Hirose: Invisible Interface for the Immersive Virtual World, *IPT/EGVE2001*, pp. 237-246 (2001)
- [7] O. Bimber, B. Fröhlich, D. Schmalstieg, L. M. Encarnação: The Virtual Showcase, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 48-55 (2001)
- [8] R. Raskar, G. Welch, K. L. Low, D. Bandyopadhyay: Shader Lamps: Animating Real Objects with Image-based Illumination, *Proc. the 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*, pp. 89-102 (2001)
- [9] O. Bimber, B. 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)* pp. 186-195 (2002)
- [10] T. Ogi, T. Yamada, Y. Kurita, Y. Hattori, M. Hirose: Usage of Video Avatar Technology for Immersive Communication, *Proc. of First International Workshop on Language Understanding and Agents for Real World Interaction*, pp. 24-31 (2003)