

没入型ディスプレイの特性と応用の展開

小木哲朗*1

Characteristics of Immersive Projection Displays and their Applications

Tetsuro Ogi*1

Abstract - Immersive projection technology has become very popular for virtual reality display. In this paper, the characteristics of several kinds of immersive projection technologies such as CAVE configuration, wall configuration, theater configuration, and curved screen configuration are described. In addition, the features of the perceived virtual world using these displays are discussed focusing on the effects of tracking error, and the screen angles. This technology can be applied to various application field. By connecting these displays via the broad band network, they can be used for communication environment. Several research projects about the video conference and sharing virtual world using video avatar method are also described.

Keywords : Virtual Reality, Immersive Projection Technology, CAVE, Screen Configuration, Video Avatar

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティのディスプレイ装置として注目されているものに、没入型ディスプレイ技術 (Immersive Projection Technology: IPT) があげられる[1]。これは、高精細の立体視プロジェクタを用いることで、没入感の高い広視野の仮想世界を提示しようという技術である。没入感 (Immersion) とは、利用者が映像世界の中に入り込んでいるかのような感覚を得られることを意味しており、バーチャルリアリティの重要な構成要素の1つと考えられている。

これまでのバーチャルリアリティの代表的なディスプレイ装置であったHMD (Head Mounted Display) は、利用者の身体に装着して使用するのに対し、没入型ディスプレイは周りの空間をディスプレイ装置として利用するのが特徴である。この際、大規模なスクリーンで利用者を取り囲むことによって、高度な没入感覚を生成することが可能になる。この種の技術が注目されるきっかけになったのは、アメリカのイリノイ大学で開発されたCAVE (Cave Automatic Virtual Environment) と呼ばれるシステムの影響が大きい。

本稿では、現在研究が盛んになってきた種々の没入型ディスプレイの構成について整理し、利用者の知覚特性という点からこの技術を用いる際の問題点を述べ、最後に今後の応用分野の展開について概観する。

2. 没入型ディスプレイ技術の現状

2.1 CAVE

没入型ディスプレイ技術のきっかけとなったCAVEは、1993年のSIGGRAPH'93でイリノイ大学から発表された

[2]。これは10×10×9フィートの大きさの部屋状の空間の正面、左右、床面を、それぞれプロジェクタによる立体映像のスクリーンとして利用したシステムである (図1)。CAVEの中の利用者は液晶シャッター式的眼鏡を使用することでプロジェクタから投影される立体視映像を見ることができる。映像の投影にはそれぞれのスクリーンに対し、合計4台のプロジェクタが使われるが、これらが同期を取ることで全体として1つの立体映像空間が生成される。利用者の視点位置は磁気センサによって計測され、常に利用者の視点位置から見た映像が描画される。またCAVEの中でのインタフェース装置としては、小型のジョイスティックに位置センサを取り付けたWandと呼ばれるデバイスが使用された。

CAVEの特徴は、スクリーンで利用者を取り囲むことで広視野の映像空間を容易に体験できることである。またプロジェクタを用いているため、HMDのように実世界の視界を完全に遮らず、利用者は自分自身の身体を視界の中に入れながら、体性感覚を伴った行動を取ることができる。この身体が見えるという特徴は、広視野の効果

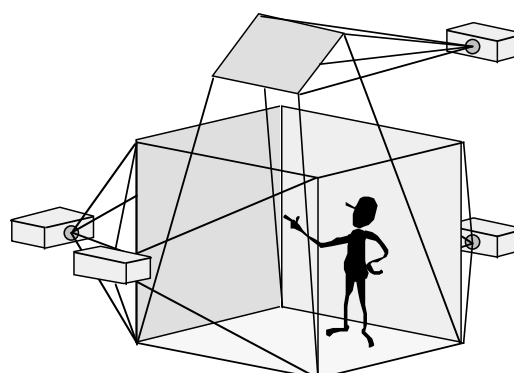


図1 イリノイ大学で開発されたCAVEの構造
Fig.1 Construction of CAVE at the University of Illinois

*1: 通信・放送機構 / 東京大学 IML / 三菱総合研究所

*1: Telecommunications Advancement Organization of Japan / Intelligent Modeling Laboratory, the University of Tokyo / Mitsubishi Research Institute, Inc.



図2 岐阜県テクノプラザのCOSMOS
Fig. 2 COSMOS at the Gifu Technoplaza

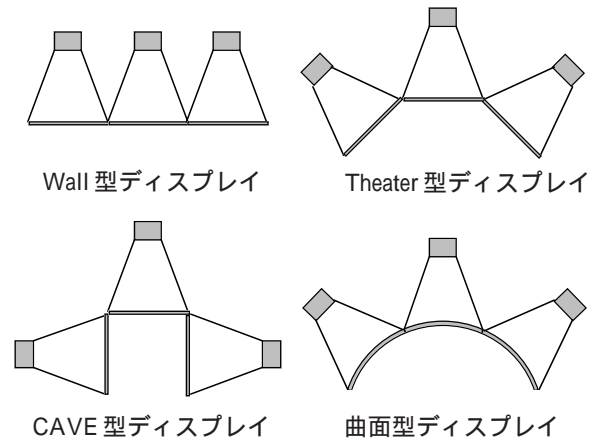
とも重なり、自分の身体をスケールの基準として大きさや距離感の判断を行うことを可能にする。つまり、仮想世界において1/1の実寸感覚が得られるということの意味している[3]。

このCAVEのシステムは多くの研究者に影響を与え、現在では米国内を始めとして日本、ドイツ、シンガポール等の世界各地で同種のシステムの研究開発が行われている[4]。以下、CAVEの拡張や改良を含め、種々の没入型ディスプレイを幾つかのタイプに分類しながら、その特徴について整理を行う。

2.2 CAVEの拡張システム

CAVEの拡張システムとして、まず使用するスクリーン枚数の増加を考えることができる。CAVEでは立方体状の空間に対して、4面のスクリーンが使用されたが、東京大学インテリジェント・モデリング・ラボラトリーで開発されたCABIN(Computer Augmented Booth for Image Navigation)[5]、ドイツのFraunhofer-IGDで開発された5面CAVE[6]では、正面、左右、床、天井の5面がスクリーンとして使用されている。天井と床面を同時にスクリーンとして使用するためには、両者を背面投影にする必要がある。そのためこれらのシステムでは、ディスプレイ装置全体を持ち上げ、床面スクリーンに強化ガラスやアクリルを用いることで、映像の上に利用者が立てるようにしている。5面のディスプレイでは天井スクリーンが加わることで、アプリケーションにおいても有効性が広がってくる。例えば、建物の設計に利用する場合には、天井を見れるかどうかという直接的な効果となり、都市空間の設計等においても、高層ビルを見上げるというような動作が可能になる。

また更にスクリーン枚数を増やした6面ディスプレイとして、スウェーデンのKungl Tekniska HogskolanのVR-CUBE[7]、岐阜県テクノプラザのCOSMOS[8]が開発されている(図2)。6面全てをスクリーンにするためには、床面の構造に加えて、利用者の出入口をどのように確保するかという問題がでてくる。VR-CUBEでは6面目の



Wall型ディスプレイ

Theater型ディスプレイ

CAVE型ディスプレイ

曲面型ディスプレイ

図3 多面ディスプレイのスクリーン構成

Fig.3 Screen Configuration of Multiscreen Display

スクリーンを回転式のドア構造としているのに対し、COSMOSの場合は電動で前後に平行移動させることで開閉させているのが特徴である。

また5.5面のディスプレイとして、メディア教育開発センターで開発されたTEELeXがある[9]。このシステムでは、天井スクリーンに穴を開けそこから床面を前面投影にすることで、天井と床面を同時に使用する際にシステム全体を持ち上げなければならないという問題を解決している。また出入口用のスクリーンとしては、左右スライド式の構造を使用している。

2.3 スクリーン構成

複数のプロジェクターを用いる場合、前述のCAVE型のディスプレイ構成以外にも種々の方法が考えられている(図3)。例えば、イリノイ大学で開発されたInfinity Wallでは、4台のプロジェクターを2台ずつ2段に並べて使用することで、1面のスクリーンに対して高解像度の映像を実現している[10]。またFakespace社のImmersive WorkWallではプロジェクターを横一列に3台並べ、自動車等のモデルを実寸で表示することを可能にしている[11]。CAVEのように複数のスクリーンで囲い込む構造では、一度に体験できる利用者数が4~5人程度に制限されるが、Wall型のディスプレイ構成では、前面に広い空間を確保することができるため、数十人単位の利用者が同時に映像を体験することができる。そのため、この方法はプレゼンテーション等の用途に有効に使われている。

また、CAVE型とWall型の間中間的な形態として、角度を付けたTheater型ディスプレイと称するシステムも提案されている。東京電力のTEPCO銀座館に導入されたVirtual Magic Theaterは、床面を含め4面のスクリーン構成であるが、側面の3枚のスクリーンは45度の角度を付けて配置されている[12]。

また最近では、Wall型からCAVE型の利用まで、スクリーンの角度を可変にできるディスプレイ装置も開発されている。通信総合研究所で開発されたUNIVERSは3面

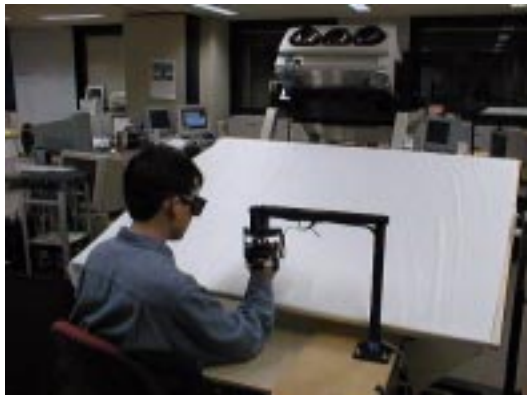


図4 東京大学の HapticWorkBench
Fig.4 HapticWorkBench at the University of Tokyo

構成であるが、各スクリーンがユニット化されているため、スクリーン構成を平面のWall型から90度に配置したCAVE型まで変更することができる[13]。また MechDyne社では床面を含めた4面構成のうち側面のスクリーン角度を可変にし、CAVE型からTheater型までスクリーン角度を変更できるディスプレイを開発している[14]。

このように複数のプロジェクタを用いる場合、スクリーンの構成方法によって、多人数に対する高解像度の映像提示が優先されたり、囲い込みによる没入効果が優先されたりする。

2.4 簡易没入型ディスプレイ

多面型のディスプレイ装置は、その構造上、設置するために大規模な空間を必要とする。そのため、没入感を備えつつ個人利用が可能な簡易没入型ディスプレイに対する要求が高まってきた。例えば、イリノイ大学で開発された ImmersaDesk は、スクリーン面を製図板のように斜めに配置することで、1面のスクリーンを用いながら広い視野を映像で覆うことができている[10]。またスタンフォード大学とドイツのGMDで共同開発された Responsive Workbenchは、スクリーンを水平に設置したテーブル状のディスプレイ装置であり、机上での立体作業や手術シミュレーション等に有効に使われている[15]。

1面のディスプレイでは、利用目的に応じて最適なスクリーン角度が異なることが考えられる。そのため、イリノイ大学の ImmersaDesk2[16]、Fakespace社の Immersive WorkBench[17]等の、スクリーン角度を可変にできるディスプレイ装置も開発されている。スクリーンの可変角度が最大のものでは、水平から垂直まで変えることができるため、机上作業からプレゼンテーションまで目的に応じて幅広く利用することができる。

また、スクリーン角度だけではなく投影方式が可変なものとして、東京大学の HapticWorkBenchがある[18]。これは、触覚ディスプレイと併用することを目的に開発されたディスプレイである。Workbench型のディスプレイは、一般にはプロジェクタを背面投影として用いている

ものが多いが、この方式では利用する触覚ディスプレイが大きくなってくると、デバイス自体が映像を隠してしまうという問題が生じる。そのため HapticWorkBenchでは、利用する触覚ディスプレイに応じてスクリーンとプロジェクタの位置関係を変更し、背面投影の方式と前面投影にして触覚デバイスをスクリーンの後ろに配置する方式を自由に切り替えられる構造になっている(図4)。

これらの Workbench 型のディスプレイでは、CAVEのように利用者が実空間の中を移動して映像を見回すということはできないが、大規模な装置を必要とせずにデスクトップ環境の拡張として広視野の映像を体験することができる。

2.5 曲面型ディスプレイ

これまでに述べてきたディスプレイ装置は、平面スクリーンを単体であるいは組み合わせて用いるものであった。これに対して、曲面スクリーンを用いる方法もある。例えば、ソリッドレイ社のアーチスクリーン[19]やPanoram Technologies社の曲面スクリーン[20]では、プロジェクタを横方向に2台あるいは3台用いて円筒形の大画面スクリーンを構成している。

また更に大規模なものとして、航空宇宙技術研究所で開発されたハーブドーム[21]や松下電工で開発されたドーム型スクリーン[22]等があげられる。これらのシステムでは上下方向にも曲率を持った球面形のスクリーンを使用し、2段に並べた6台のプロジェクタを用い、垂直方向に70~90度の視野角を実現している。

大型の曲面スクリーンではプロジェクタを前面投影で使用することができるが、個人利用を対象とした小型ディスプレイでは、利用者の邪魔にならないようにプロジェクタを背面投影で用いることが必要になる。この場合、映像の歪み補正の問題が重要になるが、筑波大学で開発された背面投射型球面ディスプレイ[23]や東京電力の小型円筒面スクリーン[24]では、ソフトウェアによって曲面歪みを補正することで曲面スクリーンへの背面投影を実現している。

広視野を実現するために、曲面スクリーンと前述のCAVE等のような多面スクリーンのどちらがいいかは、議論が分かれるところである。多面型のスクリーンではスクリーン境界でスクリーン面の角度が急激に変化するため、輝度の変化等少なからず映像に不自然さが生じる。これに対して曲面スクリーンでは利用者とスクリーンの位置関係が均等に保てるため、スクリーン間で継ぎ目の少ない映像を提示することができる。この効果は、見回し等の動作に対してはより自然な映像を提示するが、利用者がいろいろな方向から提示映像を見たいという場合には、スクリーンの曲率によって利用者の移動範囲が制限され、かつ視点移動に対して複雑な画像の補正を行うことが必要になる。このように、多面スクリーンと曲面スクリーンではそれぞれ長所、短所があるため、利用目

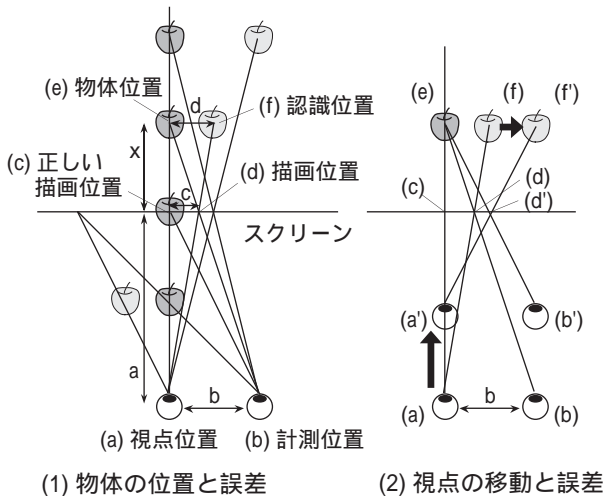


図5 視点位置の誤差による映像のずれ
Fig.5 Shift of Displayed Image by Tracking Error

的に応じた方式を選択することが必要であると言える。

3. 没入型ディスプレイにおける仮想空間の知覚特性

次に没入型ディスプレイによって生成される仮想空間の特性について考えてみたい。バーチャルリアリティで利用される没入型ディスプレイの特徴は、広視野のスクリーンを提供するだけでなく、その中で利用者が視点に追従した立体映像を体験できる点である。本章では、没入型ディスプレイの利用時に、視点と映像の関係が仮想空間の知覚に与える問題点、特性について考察する。

3.1 視点位置の計測誤差の影響

一般にバーチャルリアリティでは、利用者の視点位置を計測しその視点から見た映像が描画されるが、この視点位置の計測に誤差が含まれると映像にどのような影響が及ぼされるであろうか。ここではまず、視点位置計測の誤差が映像に与える影響について考えてみる。HMDの場合は、利用者が装着したディスプレイ面に映像が描画されるため、映像に与える計測誤差の影響は一定である。これに対してプロジェクタを用いる場合は、固定されたスクリーン面に映像が描画されるため、利用者と仮想物体、スクリーンの位置関係によってその影響が異なってくる[18]。

例えば図5(1)は、仮想物体を見たときに、視点の誤差が映像に与える影響を図示したものである。利用者はスクリーンからaだけ離れ、仮想物体はxの距離にあるとする。利用者の視点位置が、実際の位置(a)から誤差bだけずれた(b)の位置に計測されたとすると、仮想物体の映像は、スクリーン上の正しい位置(c)からcだけずれた位置(d)に描画される。これを利用者の視点(a)から見ると、実際の位置(e)よりdずれた位置(f)に認識されることになる。この認識位置の誤差dは、仮想物体がスクリーンから離れるほど大きくなり、スクリーンの奥と手前では反対の

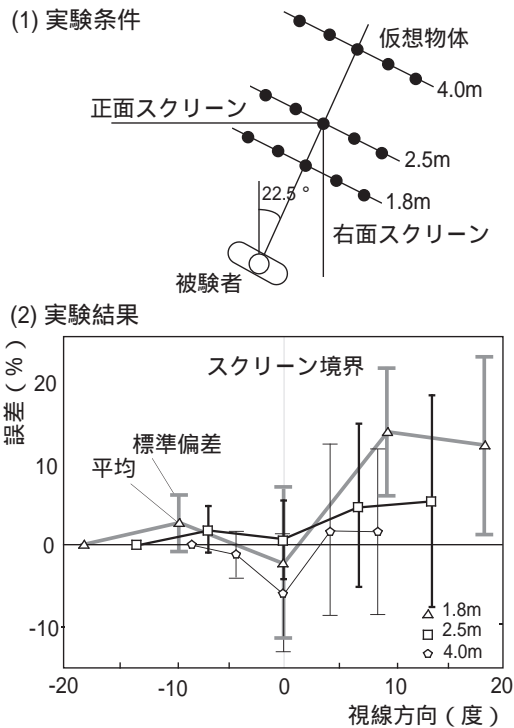


図6 スクリーン角度と空間知覚
Fig.6 Distortion of Perceived Space by Screen Angle

方向になる。そのため、視点位置の計測誤差が大きいと奥行き方向の直線を斜めに認識してしまうことになる。図5では平面スクリーンの場合を図示しているが、提示されるスクリーン面が曲面の場合には、映像が描画される場所によってスクリーン面までの距離も異なってくるため、計測の誤差はさらに複雑な映像の歪となって表れる。

また図5(2)に示すように、仮想物体が(e)の位置にあり、視点の計測誤差がbあるとする。このとき、視点位置を前後に動かして(a)から(a')に移動すると、認識される仮想物体の位置は(f)から(f')に移動する。このことは、仮想世界の中で物体が一定位置に存在せず、視点位置の移動に応じて動いてしまうことを意味し、著しく現実感を損なうことになる。

このようにプロジェクタを用いた没入型ディスプレイでは、利用者と提示物体、スクリーンの位置関係によって視点の誤差が映像に大きな影響を及ぼしてしまうため、トラッキング精度は非常に重要な問題となる。

3.2 斜めスクリーンの影響

また没入型ディスプレイにおいて、利用者が知覚する仮想世界の歪みについても考慮しておく必要がある。利用者がディスプレイの空間内を移動する場合、視点とスクリーンの位置関係が変化するため、状況によっては利用者がスクリーンを極端に斜めに見るといった状況が発生する。このような利用者の視点とスクリーンの位置関係が、仮想空間の知覚にどのような影響を与えるかを調べ

るために、以下の知覚実験を行った[5]。

実験では平面型の多面ディスプレイを用い、図6(1)に示すように被験者が一方のスクリーンの近くからコーナーに向かって斜めに立ち、5つの仮想物体を被験者から等距離に一直線に並べさせるという課題を行った。物体を並べる距離は、被験者から1.8m、2.5m、4.0mの3通りで、左端の固定された物体を基準として、残りの物体の位置を前後に移動させることで一直線に並べさせた。図6(2)は6人の被験者に対する実験結果を示したものである。グラフの横軸は被験者から見た物体の方向、縦軸は目標位置に対する誤差の値を平均値と標準偏差で示してある(奥行き方向の誤差が正)。この結果から、中央のスクリーン境界では物体を最も近くに配置し、左右に離れて行くほど物体を遠くに置き、その誤差は大きくなっていることが分かる。この傾向は、スクリーンに対する視線角度が急な右側スクリーンの方が大きく表れた。これは、端いくほど被験者とスクリーンの距離が近づくため、目の焦点調節と視差情報の違いが大きくなっていくことが原因と考えられる。つまり目の焦点調節からは物体の位置を近くに認識してしまうため、結果として物体を遠くに並べてしまうことが考えられる。

このように、没入型ディスプレイでは利用者の視点とスクリーンの位置関係によって、空間知覚に大きな影響が与えられる。曲面型ディスプレイの場合は、利用者とスクリーンの距離がなめらかに変化するため、知覚に与えられる影響も少しずつ変化するが、平面型の多面ディスプレイではスクリーン境界で利用者とスクリーンの位置関係が大きく変わる。そのため、境界をはさんだ左右において、利用者の空間知覚に関しても大きな変化が表れたものと考えられる。いずれの場合においても、利用者がスクリーンに近づきすぎたり、極端に斜めに見る等の場合には、知覚される空間の歪みを十分に考慮する必要がある。

4. 没入型ディスプレイの応用分野の拡張

最後に、没入型ディスプレイの応用分野の動向と今後の展開について考えてみる。

4.1 可視化環境からコミュニケーション環境へ

イリノイ大学のCAVEはもともとサイエンティフィック・ビジュアライゼーションの用途で開発されたように、これまでの没入型ディスプレイは、可視化環境、体験環境として応用が考えられてきた[25][26]。ところが、世界各地で種々の没入型ディスプレイが開発されてくると、これらを広帯域ネットワークで接続し、コミュニケーション環境として利用しようとする研究が注目されるようになってきた[27]。ネットワーク化された没入型ディスプレイでは、遠隔地の利用者が提示される仮想世界を高臨場感で共有できることが期待される。イリノイ大学のDeFanti等は、このような概念をTele-immersionと表現し



図7 ネットワークCABINを用いたビデオ会議
Fig.7 Video Conference Using Networked CABIN

ている[28]。

現在、東京大学のCABINは、筑波大学のCoCABIN、通信総合研究所のUNIVERS、メディア教育開発センターのTEELeX、イリノイ大学のCAVE、岐阜県テクノプラザのCOSMOS等の幾つかの没入型ディスプレイとの間でネットワーク化され、高臨場感コミュニケーションに関する研究が行われている[29]。没入型ディスプレイを用いた最も簡単なコミュニケーションは、ビデオ会議システムとしての利用であろう。広視野のディスプレイを用いてお互いの利用者の映像を送り合うことで、臨場感の高いコミュニケーションを行うことができる。例えば図7は、東京大学のCABIN、筑波大学のCoCABIN、通信総合研究所のUNIVERS、メディア教育開発センターのTEELeX間で4者間会議を行っている様子を示したものである[30]。CABINでは3側面のスクリーンを利用し、右面のスクリーンには筑波大学、正面は通信総合研究所、左面にはメディア教育開発センターの利用者の様子が投影されている。この4者の位置関係は各サイトで共通であり、設置カメラの向きやスピーカの配置を調整することで、それぞれの相手と視線を合わせられ、かつ相手の映像の方向から声が聞こえる空間型の会議システムが構築される。

4.2 アバタによる仮想空間の共有

また、同様のネットワーク環境を用い、CG空間の共有に関する研究も行われている。この場合も、お互いのビデオ映像を送受信することで臨場感の高いコミュニケーションを行うことを目指している。そのためには、カメラで撮影された映像から人物像だけを切り出して仮想空間の中に合成する、いわゆるビデオアバタと呼ばれる技術が重要となる。単面のディスプレイで背面にブルーバックを使用できる場合は、クロマキー合成の手法を用いることができる[31]。これに対し、CAVEやCABIN等の多面ディスプレイの場合には、背面も映像の一部となるため、別なアプローチが必要になる。

筆者等の研究では、人物撮影用にステレオカメラを使用し、視差情報から距離データを算出し、人物までの距

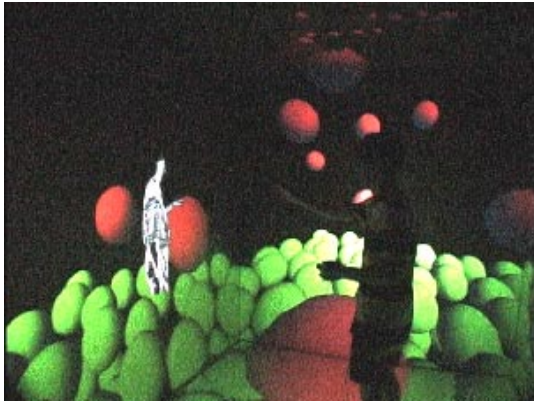


図8 ビデオアバタによる仮想空間の共有
Fig.8 Sharing Virtual Space Using Video Avatar

離に従って切り出しを行う方法を開発している[32]。また仮想世界に合成する際には、お互いの位置関係を考慮した3次元位置に配置することで、お互いに3次元空間を共有しているという感覚を作り出すことができる。図8は、ビデオアバタを用いて3次元の仮想世界を共有している様子を示したものである。このような高臨場感での仮想世界の共有技術は、協調設計、サイエンティフィック・ビジュアライゼーション等、さまざまな応用分野で利用することが期待される。

4.3 MVL プロジェクト

また現在、郵政省が進めているプロジェクトにMVL (Multimedia Virtual Laboratory) がある[33]。MVLとは、マルチメディアやバーチャルリアリティ環境を広帯域のネットワークを介して接続することで、遠隔地の研究者があたかも同じ場所にいるかのような仮想の研究室の構築を目指した概念である。このMVLプロジェクトにおいても、没入型ディスプレイ間の通信は重要な技術要素として取り上げられ、東京大学のCABINと岐阜県のCOSMOSの間で実験研究が始められている。この研究では、没入型ディスプレイ同士をネットワークで接続するだけでなく、ネットワーク上にデータベースサーバ、シミュレーションサーバ等を接続し、具体的な応用を目指したコミュニケーション環境の実現が進められている。

5. おわりに

CAVEに代表される没入型ディスプレイの研究は非常に盛んになり、各地で開発が行われている。この技術は、プロジェクタ、スクリーン等の比較的安定した技術を用いて構成されているとは言え、そのトータル技術としての研究は日進月歩である。本稿では、筆者等のこれまでの研究成果をふまえながら、没入型ディスプレイのスクリーンの構成方法とそこに生成される仮想世界の特性、応用の展開等について述べた。プロジェクタ、スクリーン、入力装置等の要素技術については、改めて技術的な整理、検討を行ってみたいと思う。

参考文献

- [1] Bullinger, H., Riedel, O., Breining, R.: Immersive Projection Technology- Benefits for the Industry; Proc. of 1st International Immersive Projection Technology Workshop, pp.13-25 (1997).
- [2] Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE; Proc. of SIGGRAPH'93, pp.135-142 (1993).
- [3] Muller, S.: Experiences and Applications with a CAVE at Fraunhofer-IGD; Proc. of 1st International Immersive Projection Technology Workshop, pp.97-108 (1997).
- [4] 澤田: 高臨場感ディスプレイ - 多様化する高臨場感没入形視覚ディスプレイ; 映像情報メディア学会誌, Vol.53, No.7, pp.927-931 (1999).
- [5] 廣瀬, 小木, 石綿, 山田: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価; 信学会論文誌, J81-D-II-5, pp.888-896 (1998).
- [6] Unbescheiden, M.: Evaluation of VR-Technology: Applications using 3- and 5-sided CAVES; Proc. of 2nd International Immersive Projection Technology Workshop (1998).
- [7] Ihren, J., Frisch, K.: The Fully Immersive CAVE; Proc. of 3rd International Immersive Projection Technology Workshop, pp.59-63 (1999).
- [8] Yamada, T., Hirose, M., Iida, Y.: Development of Complete Immersive Display: COSMOS; Proc. of VSMM98, pp.522-527 (1998).
- [9] Asai, K., Osawa, N., Sugimoto, Y.: Virtual Environment System on Distance Education; Proc. of EUROMEDIA'99, pp.242-246 (1999).
- [10] Czernuszenko, M., Pape, D., Sandin, D.J., DeFanti, T.A., Dawe, G.L., Brown, M.: The ImmersaDesk and Infinity Wall Projection-Based Virtual Reality Displays; Computer Graphics, Vol.31, No.2, pp.46-49 (1997).
- [11] <http://www.fakespace.com/>
- [12] 南雲, 甘利, 中山, 岡田: 広視野角表示装置によるVRシステムの開発; 第12回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.689-692 (1996).
- [13] 鈴木(健), 田中, 鈴木(龍), 荒川: UNIVERSを用いたネットワーク実験計画; 信学会ソサイエティ大会, A-16-8 (1998).
- [14] Hoffmeister, K., Hancock, M., Gruening, J.: Developing World-Class Immersive Environment Facilities; Proc. of 3rd International Immersive Projection Technology Workshop, pp.113-121 (1999).
- [15] Frohlich, B., Agrawala, M., Beers, A.C., Hanrahan, P.: The Responsive Workbench Two-Handed Input and Two-Viewer Output; Proc. of 1st International Immersive Projection Technology Workshop, pp.65-66 (1997).
- [16] DeFanti, T., Sandin, D., Dawe, G., Brown, M., Rawlings, M., Lindahl, G., Johnson, A., Leigh, J.: Personal Tele-Immersion Devices; Proc. of 7th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, pp.198-205 (1998).
- [17] McDowall, I.E., Bolas, M.T.: Immersive Display Technology Developments; Proc. of 1st International Immersive Projection Technology Workshop, pp.87-95 (1997).
- [18] 矢野, 寛, 小木, 廣瀬, 中垣: 複数の触覚ディスプレイに対応したHaptic Workbenchの開発; 第14回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.429-434 (1998).
- [19] <http://www.solidray.co.jp/>
- [20] <http://www.panoramtech.com/>
- [21] 竹田, 川原, 金子: 大型ディスプレイによる重心動揺の影響; Human Interface News and Report, Vol.11, No.2, pp.295-300 (1996).
- [22] 柴野, 畑中, 中西, 星野, 長濱, 澤田, 野村: 都市環境ヒューマンメディアにおける大ドーム型VR体験システムの開発; 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, pp.145-148 (1998).

- [23] 岩田, 橋本: 背面投射球面ディスプレイ; Human Interface News and Report, Vol.12, No.2, pp.119-124 (1997).
- [24] 南雲, 中山, 甘利, 岡田: 小型円筒面スクリーンによる運転・保守作業訓練環境の構築; 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.3, pp.207-208 (1998).
- [25] Roy, T.M., Cruz-Neira, C., DeFanti, T.: Cosmic Worm in the CAVE: Steering a High Performance Computing Application from a Virtual Environment; Presence, Vol.4, No.2, pp.121-129 (1995).
- [26] 小木, 渡辺, 廣瀬: 仮想環境を用いた可視化におけるインタラクション手法; 日本機械学会論文集(C 編), Vol.65, No.634, pp.289-295 (1999).
- [27] Johnson, A.E., Leigh, J., DeFanti, T.A., Brown, M.D., Sandin, D.J.: CAVERN: The CAVE Research Network; International Symposium on Multimedia Virtual Laboratory, pp.17-27 (1998).
- [28] Leigh, J., DeFanti, T.A., Johnson, A.E., Brown, M.D., Sandin, D.J.: Global Tele-Immersion: Better Than Being There; International Conference on Artificial Reality and Tele-existence '97 (ICAT'97), pp.10-17 (1997).
- [29] Hirose, M., Ogi, T., Yamada, T., Tanaka, K., Kuzuoka, H.: Communication in Networked Immersive Virtual Environments; 2nd International Immersive Projection Technology Workshop (1998).
- [30] 鈴木(健), 田中, 鈴木(龍), 荒川, 小木: 4 者間討議空間システムの構築; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.1, No.2, pp.39-42 (1999).
- [31] Insley, J., Sandin, D., DeFanti, T.: Using Video to Create Avatars in Virtual Reality; In the Visual Proceedings of the 1997 SIGGRAPH Conference, pp.128 (1997).
- [32] 廣瀬, 小木, 山田, 玉川, 金: CABIN 間通信におけるビデオアバタの生成; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.1, No.2, pp.43-46 (1999).
- [33] Shiomi, T.: CRL/MPT R&D for Multimedia Virtual Laboratory; International Symposium on Multimedia Virtual Laboratory, pp.3-14 (1998).

著者紹介

小木 哲朗 (正会員)



1986年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1986年(株)三菱総合研究所入社。1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1996年東京大学IML助教授。1999年より通信・放送機構研究員、東京大学IML客員研究員、(株)三菱総合研究所主任研究員。バーチャルリアリティ、ビジュアルイゼーションの研究に従事。日本機械学会、計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会会員。博士(工学)。