

CAVEシステムを用いた仮想空間の実現とその活用

和田 直哉*¹, 小池 淳*², 宮川 紘輔*³, 杉浦 智之*⁴, 鈴木 康大*⁴, 川原 亮輔*⁴

Realization and Utilization of Virtual Reality Environment with CAVE System

Naoya Wada*¹, Atsushi Koike*², Kousuke Miyagawa*³, Tomoyuki Sugiura*⁴, Koudai Suzuki*⁴, Ryousuke Kawahara*⁴

ABSTRACT : In this paper, an installation of our CAVE virtual reality system and its application is described. A CAVE system is based on immersive projection to walls and floors. It can produce virtual reality environments by showing stereo, immersive and interactive view to users. The hardware configuration of our CAVE system consists of triple screen stereo projection and a PC cluster. The application development is performed with CAVELib API and OpenGL. The virtual reality environment realized by this system is utilized for intuitive education and reconstruction of 3D human model.

Keywords : CAVE system, Virtual Reality, Immersive Projection, Image Processing

(Received March 17, 2015)

1. はじめに

近年のコンピュータグラフィックス技術の進歩に伴い、仮想現実にはさらに高度に、かつ身近なものになりつつある。仮想現実においては、ユーザがその世界にどれだけ入り込んだように感じるか、という没入感が重要となり、没入感の高い仮想空間における教育・エンタテインメントなどのアプリケーションは、人間に対しより高い効果を持つことが期待されている。

この没入型のデジタル空間を再現するための主なインタフェースとしては、現在大きく分けて2種類が存在する。1つはヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display: HMD) で、ディスプレイ装置をメガネやヘルメットのような頭部のデバイスに搭載し、人間の眼前に映像を投射するものである。視界を完全に覆うことでより仮想空間への没入感を高められ、近年ではPCインタフェースやゲームなどの分野において様々な製品が開発されてきている¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、HMDにおいては輻輳による提示

距離と焦点調節の不一致による奥行き精度の不一致や眼精疲労が指摘されている⁴⁾。加えて没入型のHMDでは自分の体を視認することができないため、仮想空間とのインタラクションを行う際に不利となることが想定される。

没入型デジタル空間を再現するもう1つの主なインタフェースとしてCAVE (Cave Automatic Virtual Environment) がある⁵⁾⁶⁾。CAVEとは多面スクリーンで囲んだ空間の中にユーザが入り、スクリーンに立体視用のステレオ画像を投影することで没入感を与えるシステムである。HMDと違いユーザは自分の姿を視認することができ、疲労も抑えられる。CAVEの問題点として装置が大変に大規模になってしまうことが挙げられるが、今回我々はこのCAVEシステムを導入し、さまざまな仮想空間を作成してその効果を評価した。以降の章では今回導入したCAVEシステムのハードウェア・ソフトウェア構成とその研究応用例について紹介する。

2. CAVEシステムの概要

CAVEシステムとは1992年に米国イリノイ大学EVL (Electronic Visualization Laboratory) が開発し、その後、世界各国の大学・研究機関・企業等で設置・利用されている立体視表示システムである。多面スクリーンで囲ん

*1 : 理工学部情報科学科 助教(wada@st.seikei.ac.jp)

*2 : 理工学部情報科学科 教授(koike@st.seikei.ac.jp)

*3 : 理工学研究科 博士前期課程2年生

*4 : 工学部情報科学科 学部4年生

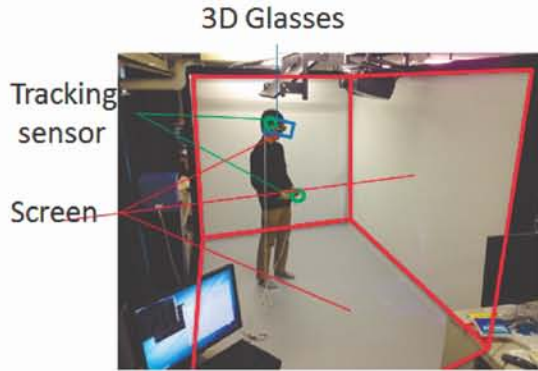


図1 CAVEシステムの外観



図2 液晶シャッターメガネ

だ空間に、立体的にCG映像を表示させて仮想現実を体験することができるので、没入感の高いVRシステムとなっている。

本稿において使用したCAVEシステムの外観を図1に示す。一般的にCAVEシステムの利用空間は3～6面のスクリーンに覆われている。この中にユーザが入り、図2に示す液晶シャッターメガネを装着する。そして周囲のプロジェクタからスクリーンに向けて立体視用の画像を投影することで、ユーザの周囲に仮想的な空間を実現する。

3. ハードウェア構成

3.1 イントラ予測符号化

本稿におけるCAVEシステムのハードウェア部の構成図を図3に示す。ハードウェア部は大別して実際に画像が表示される投影部と、動作を制御する制御部の2つで構成される。まず投影部は、正面・側面・床面の3面で構成されるスクリーンと、各面に投影するプロジェクタ3基から成る。正面・側面用のプロジェクタはスクリーンの裏面から、床面用のプロジェクタは天井に設置され、鏡面反射により床面に投影が行われる。これらのプロジェクタは立体視のためにアクティブシャッター方式を採用して、実際には左目用の画像と右目用の画像を交互

に投影している。一方ユーザがかける液晶シャッターメガネには、メガネの眉間の部分に赤外線受光部が付けられていて、プロジェクタとの間で同期をとりつつレンズ部のシャッターを開閉している。そのためユーザの左目には左目用、右目には右目用の画像がそれぞれ見えることになり、この視差を利用して立体画像を表現する。

一方制御部では、図3に示す各プロジェクタへのレンダリングを制御する3台のスレーブ用ワークステーション(WS)と、各スレーブを制御する1台のマスター用WSによってアプリケーションの制御が行われている。マスター用WSにはさらにユーザやコントローラの位置を測定するためのトラッキングシステムが接続されている。このシステムは、強力な電磁波を発してCAVEのフィールド内におけるトラッキングセンサの場所を測定する。トラッキングシステムの写真を図4に示す。トラッキングセンサにはコイルセットが内蔵されていて、トランスミッタからは強力な電磁波が発せられているため、誘導電流の測定によりセンサの3次元位置を特定することが可能となる。制御ユニットには電源が内蔵されていて、アナログ信号データのデジタル変換や複数のチャンネルのコントロールが行われる。トラッキングセンサはユーザが着用するシャッターメガネの1つと、ワンドと呼ばれる

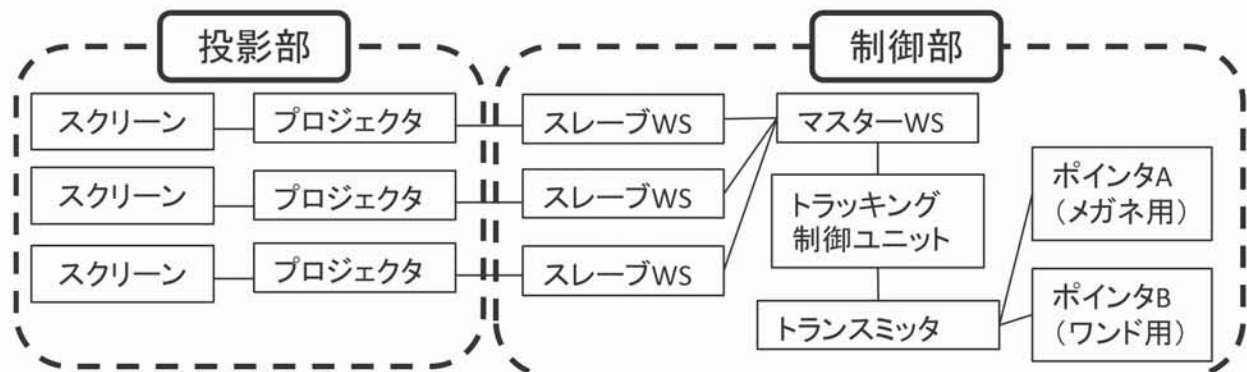


図3 CAVEシステムのハードウェア構成

コントローラに付けられていて、これらの位置の変化に画像を追従させることが可能となっている。加えてユーザはワンドを用いてアプリケーション内において操作を行うこともできる。

4. ソフトウェア構成

4.1 CAVELibを用いたアプリケーション開発

本CAVEシステムのワークステーションは、Windows7の環境において構築されている。よって我々のソフトウェア開発環境も基本的にはWindowsのそれに準じる。3Dグラフィックスをコンピュータ上で再現する開発環境としては、オープンソースのOpenGLが有名である。またOpenGLの拡張ライブラリであるOpenGL Utility Toolkit (GLUT) は、複数ウインドウや種々のデバイスへの対応、基本図形の生成機能といった便利な機能を追加する。しかしながらCAVEシステムのようなマルチスクリーン環境において3Dグラフィックスの投影を行う際には、投影した3次元物体についてスクリーンとスクリーンの間でずれはないか、時間の同期はとれているかといった様々な点に注意を払う必要がある。本来このような問題を解

決するには、3次元情報の軸変換など多くの専門的知識が必要となるため、これは開発者にとって大きな負担となる。そこでCAVEシステムを用いたソフトウェアの開発用インタフェースとして、Mechdyne社によりCAVELibというAPIが開発されている。CAVELibは前述の問題を抽象化し、開発者が容易にインタラクティブな3次元空間を作成することを可能とする。我々はこのCAVELibとOpenGLおよびGLUT、そしてプログラミング環境としてVisual Studio 2010を併せて開発環境とし、C++をプログラミング言語としてアプリケーションの開発を行うこととする。

4.2 trackdを用いた位置トラッキング

本CAVEシステムの位置トラッキングを制御するのがtrackdと呼ばれるMechdyne社のソフトウェアである。trackdのパッケージはtrackd Serverとtrackd Daemonの2つのアプリケーション、そしてデバイスサポート用に共有オブジェクトライブラリとしてコンパイルされた様々なモジュールで構成されている。trackd Serverはトラッキングセンサやコントロールデバイスとの通信を開くために用いられ、trackd Daemonはそれにより接続された機器からデータの収集を行ったり、共有メモリとの間でデバイスデータのやりとりを行ったりするために用いられる。共有メモリ上のデータはCAVELibにより開発されたアプリケーションやtrackdからアクセス可能である。

5. CAVEシステムの活用

本章ではこれまで紹介したCAVEシステムの応用例として、臨場感通信に関する研究への活用や教育分野における3つの研究応用例を示す。

5.1 3次元人物モデルの復元

遠隔拠点間でビデオ会議を行う際に、双方の参加者があたかも同じ空間を共有しているような感覚を味わえるテレプレゼンスシステムでは、等身大の人物の映像、及び周辺設備の位置の設定を詳細に行うことで、従来よりも実際にその場で会議を行っているかのような感覚、臨場感のある通信が可能となる。我々は人物の3次元形状モデルの再現に着目し、運動視差を再現するために従来手法よりも簡易かつ環境に左右されずに人物の3次元形状モデルを復元する手法について提案した。ここで我々はこの3次元人物形状モデルをCAVEにおいて再現する。まず3次元形状データを読み込み、CAVELibを用いて各ディスプレイに立体視に対応するように描画し、トラッ



図4 トラッキングシステムの外観



図5 トラッキングセンサに追従した3次元人物形状モデル描画

キングセンサの位置(ユーザ位置)に合わせて描画位置・向きが変更されるように処理を行った。描画結果を図5に示す。立体として人物モデルを認識させることにより、テレプレゼンスシステムに適したより臨場感のある環境の作成が可能となった。

5.2 多視点型太陽系VRシステム

近年日本の初等教育において、天文分野での理解度の低下が問題となっている。この問題に対し直観的な教材の必要性が言及されてきているが、従来型の曲面スクリーンを用いたVR教材においては教育効果の確認が元々視点移動能力をほとんど持たない者に限られていた。これに対してより没入感の高いVRシステムの構築を目指す。まずOpenGLを用いて球状モデルを構築し、テクスチャマッピングにより画像を貼り付け惑星モデルとする。次に各惑星や月に自転と公転の設定を付け加え、地球に視点を設定してCAVEシステム上で動作させる。完成した太陽系VRシステムの動作の様子を図6に示す。教育効果について確かめるため、外観や速度、位置関係に関するテストを被験者10名に対しVRシステムの体験の前後にそれぞれ行った。その結果正答率は30%から76%に上昇し、教育効果の改善を確認できた。同時に行ったアンケートの結果、没入感に関しては非常に高い評価が得られた一方、情報量が十分でなく文字情報による解説が必要との意見も見られた。また太陽系の惑星間の距離や



図6 太陽系VRシステムの動作の様子

大きさは実際には非常に大きく、再現するには視認可能な距離設定が足りず十分にそれらの点を伝えられないことが問題として挙げられた。今後は視点の移動をより自由なものとし、距離や大きさの関係についてよりユーザにわかりやすい形で伝えることが必要と考えられる。

5.3 海洋生物の外観観察教材

本研究では直観的な教材の対象として海洋生物の外観に着目する。まず仮想世界の環境構築として海底の地形オブジェクトを作成する。ここではランダムな表現の地形を作成するため、地形モデリングにはマンデルブロ集合とエレベーショングリッド表現を使用する。マンデルブロ集合はフラクタル図形であり、どんなに拡大しても決して平坦な線が現れることはなく、自己相似的な図形があちこちに現れる。しかし、マンデルブロ集合は他の自己相似的な図形と異なり、完璧に同じ形のものも無く、全て微妙に異なっている。この特性を用いてランダムな地形作成に用いることとする。またエレベーショングリッド(Elevation Grid)表現は、平面メッシュを基本として高さ情報を変えることで地形図などを表現するモデリング手法である。これらの手法を用いて作成した海底の地形オブジェクトを図7に示す。

次に魚の3Dオブジェクトの作成には、視覚的な没入感を高めるため、クオリティの高いフリーモデル計7体を、3Dモデリング素材を販売しているサイトTurboSquid⁷⁾からダウンロードし使用する。3Dオブジェクトの形式としてはobj形式を選択する。この形式の3Dオブジェクトは以下のファイルで構成されている。

- objファイル

幾何形状のデータを取り扱う。マテリアル情報を格納しているファイル名、頂点のX値、Y値、Z値、UV値、法線情報、マテリアル名が書かれている。

- mtlファイル

材質データを取り扱う。マテリアル名、環境光、拡散光、鏡面反射光、鏡面係数の値が書かれている。

- png画像ファイル

物体の表面の質感を表現するために貼り付けるpng形

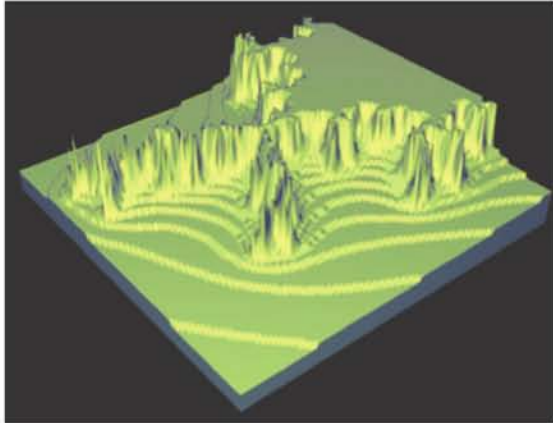


図7 海底の地形オブジェクト

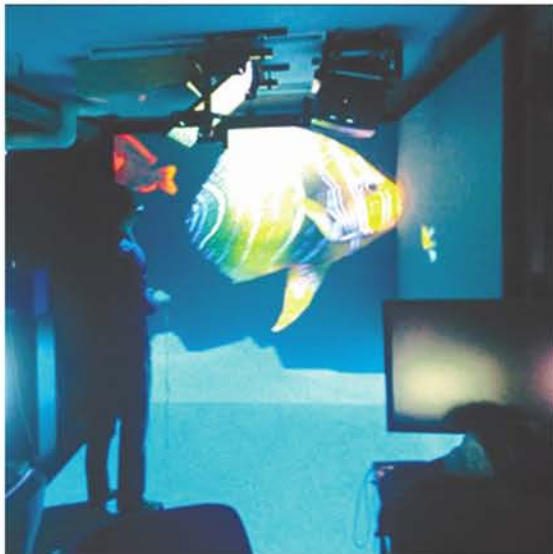


図8 海洋生物の視覚的教材を用いた実験風景

式の画像。

有効性評価のための対照実験では、5名ずつの2グループに対し一方には作成した視覚的教材を、もう一方には紙による資料で学習を行わせ、同じ内容の理解度テストを行った。実験の様子を図8に示す。その結果、魚の大きさなど直観的な内容を問う問題については作成した教材を利用したグループの正答率が上となり、学習効果が示された。反面、魚とその名称を結び付けるような文字情報が重要となる問題においては改善が見られなかったことから、双方の情報の必要性が示される結果となった。

5.4 文字情報の提示とビルボード

前項の応用例から、直観的なコンテンツであっても教育効果を向上させるためには文字情報が必要であることが分かる。ここでの応用例は直観的コンテンツと文字情報の融合に関するものである。

まずシナリオとして、古代の恐竜ティラノサウルスの

生態に関する学習を想定する。仮想空間上の指定した位置にユーザの視点が入るとアニメーションが行われるほか、必要に応じた文字情報が画面上に図9のように提示される。この文字情報は画像データであり看板のようなものである。常にユーザに正対するように回転が行われているため、ユーザがどこにいても文字情報を正面から読むことが可能となっている。このための変換技術をビルボードと呼ぶ。ビルボードを行うには、画像が常に参加者視点（カメラ）を向いている必要がある。

カメラに関するものはビュー座標変換が決めている。ビュー座標変換行列には、カメラの向き、場所の情報が含まれている。これをモデル座標変換に使用する。個々のモデルには原点を中心とした座標系を持つ、これがモデル座標系である。



図9 直観的コンテンツと文字情報の融合

例えば、カメラがある座標 (x,y,z) にあり、画像のある原点を見ている時、ビルボードを行うには画像がカメラの方を向いていなければならない。つまり、カメラが原点を見るベクトルと逆のベクトルを持たないといけないという事である。そこでカメラからではなく、画像からカメラへのベクトルを取り出す。次にカメラに与えられている回転と逆の回転を加味する。回転は取得したビルボード用の変換行列から逆行列を作り使用する。逆行列を使うのは、例えばカメラがY軸を中心に45度回転している時、ビルボードを行うには図10のように逆方向に45度回転している必要があるからである。このようにすると画像が常にカメラを向いているビルボードを作成することが出来る。

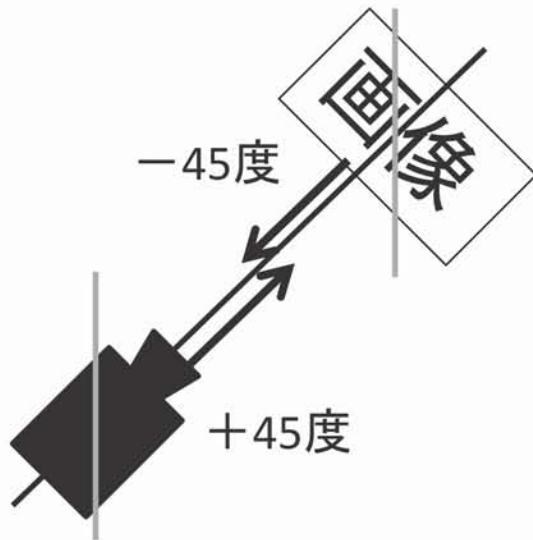


図10 ビルボードの原理

6. まとめ

本稿では没入型デジタル空間を再現するためのインタフェースとしてCAVEシステムを取り上げ、導入したシステムの構成と研究応用例について紹介した。応用の中で行われたアンケートでは没入感に関して高い評価を受ける一方で、文字情報などの必要性も言及され、仮想空間を活用した理想的なコンテンツに関する知見が得られた。今後は3次元物体モデルやそのアニメーション、視点移動などをさらに洗練化し、ユーザやコンテンツ作成者の意図がより仮想空間に反映されやすい環境の構築が必要となる。またHMDでは不可能な、CAVEならではの特性を活かした研究についてもアイデアを創出する必要がある。例えば複数人による協調作業はそのニーズの一端となるものである。

参考文献

- 1) Steven M. Lavallo, Anna Yershova, Max Katsev, Michael Antonov: "Head tracking for the Oculus Rift", IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 187-194, (2014)
- 2) OSVR – Open-Source Virtual Reality for Gaming
<http://www.osvr.com/>
- 3) H. Moustafa, H. Kenn, K. Sayrafian, W. Scanlon, Y. Zhang: "Mobile Wearable Communications", IEEE Wireless Communications, Vol. 22, pp.10-11, (2015)
- 4) 畑田豊彦 " 疲れない立体ディスプレイを探る", 日経エレクトロニクス, pp. 205-223, (1988)

- 5) C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, T. A. Defanti: "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE", Proc. of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.135-142, (1993)
- 6) 小木哲朗 " 没入型ディスプレイの特性と応用の展開", ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.1, No.4, pp.43-49, (1999)
- 7) 3D Models for Professionals : TurboSquid
<http://www.turbosquid.com/index.cfm>
- 8) 瀬戸崎典夫 " 多視点型 VR 教材の開発および効果的な活用に関する研究" 九州大学学位論文 甲第9830号, (2009)