バーチャルリアリティの要素技術 Ⅲ*

佐藤 誠**

Elementary Techniques for Virtual Reality Ⅲ

Makoto SATO

1. はじめに

オランダの古都デン・ハーグ (Den Haag) にパノラマ・メスダグという現存する数少ないパノラマ館の一つがある。狭い螺旋階段を登り詰めると、観客は突如、北海に面した漁村スヘフェニンヘンの小高い丘の東屋に出る。東屋からは、静かな海岸線が左右に長く伸び、沖には漁船が点在す

(a)

(b)

図1 パノラマ・メスダグ(オランダ ハーグ市)

る。振り返ると、ハーグの町の遠景が望まれる。観客は誰れしも一瞬、19世紀の漁村を訪れたような錯覚をおこすほどリアルである。リアリティに欠けるのは、風景がまったく静止していることと、寄せ来る波のざわめきが聞こえないことぐらいである。

パノラマ・メスダグはオランダの画家H.W.メスダグ(1831-1915)が1880年代のスヘフェニンヘンを描いたパノラマ風景画を展示するために作られたものである。この建物の全体図と断面図を図1(a)と(b)に示す。図1に示すようにパノラマ風景画は東屋を中心とした円筒形の壁の内面に描かれている。東屋の周囲に作られた砂丘の一部と、大きな庇のため、観客には、これらの構造物の他に目に入るものは、風景画だけである。建物の天井からは、自然光が明るく風景画を照らすように工夫されている。

18世紀から19世紀にかけて、ヨーロッパ絵画は、眼に見えるものを可能な限り、リアルに描くことに腐心した時代であった。パノラマはそうした時代精神の究極の産物である¹⁾。パノラマのパイオニアといわれる、イギリスのR. Barkerはパノラマの見せ方として次のような要点を列挙して、特許を取得している。すなわち、(1)円形の建物をつくること、(2)観客は絵に接近できないように鑑賞台のようなところから見るようにすること、(3)光を上部から入れ、観客は光源を眼にすることがないように鑑賞台に覆いをつけること、(4)鑑賞台には下部から出入りすること。

パノラマは前世紀のバーチャルリアリティと言ってよいであろう。仮想世界をよりリアルに見せるため、当時の人々もさまざまな工夫を考え出し

*原稿受付 1994年6月13日

**東京工業大学 精密工学研究所

ているのである。

さて、今日のバーチャルリアリティの技術においても、仮想世界への没入感を高める上で、視覚情報の占める情報量は極めて大きい。没入感に関連する視覚要素を列挙すると、(1)視野の広がり、(2)視野の奥行き表現、(3)映像の品質などである²⁾。

これらの視覚要素をどのように実現するか、このためのさまざまなディスプレイが提案され、開発されている。本稿では、バーチャルリアリティの要素技術として、視覚ディスプレイを取り上げ、いくつかの最新の技術について見てみることにしよう。

2. パノラマ型映像ディスプレイ

人間の周りの全景を映像で覆い、没入感のある仮想世界を作り上げる方法として、近年、博覧会やテーマパークなどに使われる全天周映像ディスプレイがある。オムニマックスシステムと呼ばれる映像ディスプレイは、図2に見られるように半球上のスクリーンにフィルムを投影するものである²⁾。このような大型スクリーンへの投影による、映像品質の劣化を防ぐために、フィルム幅70mmという特別なフィルムを用いている。この世界最大のフィルムを、超広角(魚眼)レンズをとおして、水平角180°、垂直角125°の範囲に映写する。人間の両眼による視角の範囲は、ほぼ垂直に90°、水平に120°といわれており、眼球を動かさなければ、人間の視角を完全に包みこんでしまうことができる。

図2 オムニマックスシステム²⁾

1985年に開かれた筑波科学万博の富士通館において、世界ではじめてこのオムニマックスシステムに立体映像を組み合せ、極めて質が高く、没入感のあるCG映画“ザ・ユニバース”を公開した³⁾。立体映像の映写方式としては、一駒に赤青2色で左右それぞれの目に対応する両方の映像を合成してプリントして、映写し、観客は赤青フィルタの付いた眼鏡を着用する、いわゆるアナグリフ方式が採用された。このため、立体映像はモノトーンであったが、銀河系宇宙からDNAにいたるまで、科学的データに基づいた素晴らしい映画が作られ、娯楽性だけでなく、Scientific Visualizationの分野からみても先駆的な試みであったように思う。

オムニマックスシステムは、あくまでも不特定多数の観客のための劇場であり、インタラクティブではない。シカゴのイリノイ大学で開発されたCAVEと呼ばれるシステムは、人間とのインタラクションのできるパノラマ型映像システムである(CAVEという名前はCAVE Automatic Virtual Environmentの再帰的頭字語であるとともに、プラトンの“共和国”に出てくる洞穴(cave)の壁に写る影と現実との話によっている)⁴⁾。

CAVEの概略図を図3に示す。このシステムは、約3m四方の大型の背面投影型スクリーンを前方、左右、そして床面に配置し、図3のように立方体の映像空間を構成するものである。プロジェクタからの映像は反射鏡を介して、各スクリーンに背面投影される。プロジェクタは、1280×512画素のステレオ画像を120Hzでスクリーンに投影する。利用者は、液晶シャッター眼鏡をかけ、頭

図3 CAVEの概略図⁴⁾

部と手には、ポヒマスセンサのような空間座標センサを装着する。

CAVE 中の使用者の位置を計測することにより、4 台のグラフィックワークステーションが、実時間で適切なステレオ映像を合成し、それが4枚のスクリーンに投影される。仮想世界とのインタラクションは、利用者の手の動きをセンシングすることにより行われる。

CAVE は、高精度な映像ディスプレイにより、利用者の周囲にインタラクティブな仮想世界を作り上げることができる。しかも、HMD と異なり、数人の利用者が同じ仮想世界の中での体験を共有できるという点からも興味深く、今後の応用が期待される。なお東大工学部の広瀬研究室でも、コンパクトな CAVE システムを開発している。

3. メガネなし立体ディスプレイ

仮想世界のディスプレイにおいて重要な課題の一つに立体ディスプレイがある。立体映像の表示技術については、いくつかのすぐれた解説書がすでに出ている(例えば文献5)ので、ここでは述べないが、最近、液晶プロジェクタを用いたメガネなしの立体表示システムが開発され⁹⁾、また商品化もすすめられているので簡単に紹介したい⁷⁾。

立体映像の表示システムとしては、大きくメガネ方式とメガネなし方式がある。メガネ方式としては、偏光メガネ、シャッターメガネあるいはアナグリフなどの方式がある。一方、メガネなし方式としては、スリット格子を用いたパララクスバリア方式とレンチキュラ板を用いたレンチキュラ方式がある。従来、大型ディスプレイにおける立体映像の表示方式としては、メガネ式が主に用いられてきたが、メガネをかけることの煩しさを考えると、メガネなし方式が好ましい。

ATR 研究所で開発された立体表示システムは、レンチキュラ方式である。この方式ではレンチキュラ板と呼ばれる、スクリーン表面に縦に並べた半円柱状レンズの働きにより、スクリーンから適正距離上で両眼間隔上に右眼用映像と左眼用映像が結像するようになっている。立体視できる位置が限られるのが、本方式の欠点である。複数視点からの画像を同時に表示することにより、

図4 視点追従型立体ディスプレイ⁹⁾

この欠点はある程度解消されるが、ATR ではこの問題を根本的に解決するためにさらに視点検出技術を応用した視点追従型両眼主体表示を提案、開発している(図4)。この表示システムでは、頭の左右の動きを赤外線カメラで検出し、頭の位置に従ってプロジェクタの投写レンズを左右に動かすとともに、プロジェクタとスクリーンの間に挿入したミラーを上下に動かすことにより、観客の位置によらない立体視を可能にしている。

レンチキュラ方式の技術的問題の一つは、レンチキュラと左右画像の相対位置を正確に合わせることであるが、液晶プロジェクタを採用することにより、この位置合せが容易になる。この方式による40インチおよび70インチのメガネなし方式立体テレビが商品化されている⁷⁾。

4. 頭部搭載型ディスプレイ(HMD)

CG により作られる3次元仮想世界を表示するために、1968年にサザランドが開発した頭部搭載型のディスプレイ(HMD)が⁸⁾、近年バーチャルリアリティのための仮想世界表示ディスプレイとして、広く使用されるようになり、商品化が進められている。HMD システムの構成ブロックを図5に示す⁹⁾。使用者は、目の直前にレンズ系を介して装着された小型のディスプレイユニットと、頭部の位置と方向を検出することのできる空間位置センサの付いたヘルメット状のディスプレ

図5 HMD システムの構成ブロック⁹⁾

イ装置を装着する。シンボルジェネレータは、シンボル情報信号と仮想世界の画像信号からディスプレイユニットにシンボルおよび画像を表示するための映像信号を発生し、左右のディスプレイユニットに送る。この際、空間位置センサからの頭部位置情報をヘッドモーショントラッカから受け取り、それに応じた映像信号を逐次合成する。このように構成することにより、利用者は、自らの頭部の動きに連動して、広大な仮想空間を見回すことができる。

HMD の構成要素としては、表示素子と光学系が重要である。表示素子としては、液晶ディスプレイ (LCD)、CRT および LED 等がある。現在、バーチャルリアリティ用 HMD として製品化されているものは、ほとんどが LCD を使用している。HMD の光学系は性能を大きく左右する重要な設計要素である。設計上の仕様項目としては次のようなものがある⁹⁾。

(1) 視野の広さ

視野とは、表示された画像を見ることのできる角度範囲である。人間の視野 (水平約 200°) をカバーするのが理想であるが、すくなくとも十分な没入感を得るためには、視野角度 80° 以上が必要であると考えられている。

(2) 瞳移動範囲

瞳を動かしても画像全体を見ることのできる範囲であり、これも十分に広いことが必要である。

(3) 画像解像度

表示される画像においてどこまで小さな物が識別できるかを示すものである。人間の眼の中心窩における解像度は約 0.01 度と極めて高解像度であることから、これにできる限り近い画像解像度が

要求される。

(4) 表示焦点距離

瞳から表示画像までの距離であり、利用者の視力に合わせて調整する必要がある。

(5) HMD の重量

頭部搭載のためには、重量もなるべく軽く、また重量バランスも考えた機構部を設計する必要がある。

その他の設計要素として、表示輝度、表示色、表示歪等がある。これらの設計仕様をバランス良く満たすように、HMD の光学系を設計しなければならない。HMD の光学系は接眼光学系の一つである。顕微鏡や天体望遠鏡などの接眼光学系については、長い研究開発の歴史があり、すぐれたレンズ系などの設計技術が集積されているが、HMD の光学系には、小型軽量などのヒューマンインタフェースとしての要件が新たに加わるため必ずしもこのような設計技術が活用できず、新しい設計開発が必要とされている。

最近開発されたオリンパス光学工業¹⁰⁾の HMD を紹介しよう (図6)。この HMD は、プラスチック製の非球面レンズとハーフミラー等を組み合わせた特殊光学系を採用することにより、歪みの少ない映像を実現している。また、液晶シャッタの採用により、シースルー機能とスーパーインポーズ機能を可能にしている。

5. 視点追従型 HMD

LCD を用いた HMD の問題点の一つに、視野角の狭さがある。現在の LCD の画素数では、十分な画像の解像度を確保するためには、視野角を十分に大きくとることができない。このため、デ

図6 ゴーグルタイプの小型液晶 HMD (オリンパス社)

ィスプレイ画像の回りのフレームが見えてしまい、仮想世界への没入感が大きく損なわれてしまう。この問題を解決するための一つの方法として機械技研により提案された視点追従型 HMD について紹介しよう¹⁰⁾。

よく知られているように、人間の眼の網膜上の分解能は一樣ではない。中心窩と呼ばれる中央部では分解能は極めて高いが、周辺に行くに従って、急激に低下する。中心窩での視野角はわずか 0.5° の範囲であり、人間が物体の細部を観測するのは、この中心窩である。この視覚特性に注目し、視点の周囲だけを選択的に高解像でディスプレイしようというのが、視点追従型 HMD (EMT-HMD) の基本的考えである。図 7(a)に、EMT-HMD の概念図を示す。EMT-HMD は、大きさの異なる二つのディスプレイを用いる (Display A と Display B)。Display A は周辺視のため

図 7 視点追従型 HMD¹⁰⁾

図 8 視点追従型 HMD の実験システム (機械技研)

の広視野角のディスプレイであり、Display B は中心視のためのディスプレイである。図 7(a)に示すように Display A と手前に Display B のスクリーンが置かれる。図 7(b)に本システムにより表示される画像の具体例を示す。十字のマークを中心とした小さなサイズのウィンドウの部分が、使用者が注視している部分であり、ここに高解像のディスプレイ領域が配置される。

EMT-HMD を実現するために、使用者の視点の動きを正確に追跡することと、その動きに追従して、二つのディスプレイを重ね合せて表示する制御系が重要である。視点追跡については、いくつかの手法があり、すでに商品化もされている。ディスプレイの重ね合せ制御については、ハーフミラーを用いた方法が提案されており、すでに光学系の実験システムにより、本方法の有効性が確認されている (図 8)。

EMT-HMD を通常の HMD のようにコンパクトにまとめ上げるには、まだ多くの課題が残されているが、今後の発展が期待される。なお、EMT-HMD と同様な視点追従の考え方を大型ディスプレイに適用した実験システムの開発が ATR 研究所において行われている¹¹⁾。

6. 懸架型ディスプレイ

HMD と同様に、利用者の眼にディスプレイを密着させる没入型ディスプレイの一つに BOOM (Binocular Omni-Orientation Monitor) と呼ばれるディスプレイ装置が Fakespace 社により、開発され、商品化されている¹²⁾。このディス

プレイは、図9のようにカウンタバランスの付いた関節アームにCRTを懸架したものである。利用者はCRTボックスの取っ手をつかんで、CRTモニタを引き寄せ、覗き込む形で立体映像を見る。

研究室や実験室における研究開発のための支援システムとしてVRを考えた場合、研究者は多くの装置に囲まれており、何か扱いにくいデバイスを身の回りに装着することを嫌う。そして、複数の研究者が共同作業する際には、ディスプレイ装置を、互いの会話を妨げることなく、手軽に隣人に手渡せることが必要である。さらに研究、開発中において、仮想世界を覗かなければならないのは、短時間であり、完全に長時間、仮想世界に没入することはない。

以上のことから、このような研究環境で、HMDのような装着型のディスプレイは必ずしも適したものではなく、むしろ、両眼へのアクセスが手軽で容易なことが重要である。これが、BOOMの開発思想である。

ディスプレイを懸架式にすることにより、軽量化の問題は、HMDほど重要ではなく、このため、高解像度のCRTを使い、さらにレンズ系を工夫することにより、広視野角のディスプレイを実現している。

BOOMのもう一つの利点は、頭部の追跡が極めて高精度なことである。BOOMではアームの各関節に光学式のエンコーダを付け、磁気や音響的ノイズに影響されずに、利用者の頭部の動きを正確にトラッキングし、安定した仮想世界への没

入感を可能にしている¹²⁾。

7. 網膜直接投影型ディスプレイ

HMDにおいて広視野角、高解像度および軽量化の三つの条件を十分に満たすことは、現状の技術レベルでは限界がある。これを解決するためのもう1つのディスプレイの方法として、人間の網膜に直接映像情報を投影する考え方がある。

すでに、Reflection Technology社は、1次元LEDアレーからの光パターンを振動ミラーにより走査することにより、2次元の映像を網膜上に写し出すディスプレイを開発し、Private Eyeという商品名で市販している。解像度は 720×280 画素、重量は片目用で100g程度と極めて軽量に作られている⁹⁾。LEDアレーの画素数を増すことにより、さらに高解像度のディスプレイが可能である。技術的問題点の一つとして指摘されていたカラー化の問題についても、近年の青色LEDの研究開発の進歩は目覚ましく、いずれ解決するものと考えられる。将来的には、さらにLEDアレーではなく、レーザ光を2次元的に走査して網膜に直接投影する方法が有望視されている¹³⁾。その基本原理を図10に示す。レーザからの光ビームは、モジュレータMにより、光変調された後、2組の偏向デバイスM、Vを通過して、網膜に投影される。瞳孔に到達するビームがコリメートするように、レンズ系(R₁, R₂)を配置することにより、網膜上には小さなスポットとして投影される。レーザ光を走査するための偏向デバイスとしては、回転ポリゴンのような反射鏡によるもの、ピエゾ素子や光音響デバイスなどが考えられる。

軽量化のための、技術的問題点や使用者の眼に対する安全性の問題（特に何らかの理由で走査が停止してしまった場合の危険性）など解決すべき問題点は多いが将来の新しいディスプレイとして期待できる。

図9 懸架型ディスプレイ BOOM¹²⁾

図10 網膜直接投影型ディスプレイの原理¹³⁾

8. おわりに

VRにおいて、仮想世界をどこに生成するかにより、さまざまな視覚ディスプレイが考えられる。不特定多数が仮想世界を共有するためには、利用者から数十m離れた位置に映像を写し出す大型ディスプレイが必要である。一方、個人のための仮想世界の表示には、HMDのように眼前に密着してディスプレイを置くことも考えられる。この究極の姿が、網膜上に直接映像を投影することであろう。

ここでは、これらのさまざまなタイプの視覚ディスプレイについて、最近のいくつかの研究開発を取り上げた。ここでは紹介できなかったが、この他にも数多くの工夫が臨場感、没入感を高めるために提案されており、今後の発展が期待されている。

参考文献

- 1) 中原佑介：巨大な騙し絵—パノラマ，3D映像，Vol.5，No.3，pp.26-31 (1991-06)
- 2) 廣瀬通孝：バーチャル・リアリティ，産業図書 (1993)
- 3) 加藤，柳瀬：全天周立体CG映画“ザ・ユニバース”FUTURES Vol. 36, No.2, pp.141-149 (1985-03)
- 4) C. Cruz-Neira 他：Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, SIGGRAPH '93, Proc., pp. 135-142 (1993-08)
- 5) 安居院，中嶋：ステレオグラフィクス and ホログラフィ，産業報知センター (1985)
- 6) 伴野他：視点追跡を用いた広視域両眼立体視表示方法の一提案，1990年信学秋期全体，no. SA-6-1, pp.1-234-235 (1990)
- 7) 細井：立体テレビはやはりメガネなしで!!，エレクトロニクス，pp.81-85 (1994.6)
- 8) I. E. Sutherland: A Head-mounted Three Dimensional Display, Proc. Fall Joint Computer Conf. pp.757-764 (1968)
- 9) 深井克明：ヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) の開発，画像ラボ，1994.2，pp.54-58 (1994)
- 10) K. Iwamoto 他：Development to an Eye Movement Tracking Type Head Mounted Display: System Proposal and evaluation experiments, IEEE Infer. Workshop on Robot and Human Communication pp.287-290 (1993-07)
- 11) 山口，伴野，岸野：視線検出を利用する高広視野高精細表示方法の検討：信学論 C-II，J73-C-II，pp.721-732 (1990-11)
- 12) M. T. Bolas: Human Factors in the Design of an Immersive Display, IEEE Computer Graphics Applications, Vol. 14 No. 1, pp.55-59 (1994-01)
- 13) D. E. Holmgren and W. Robinett: Scanned Laser Displays for Virtual Reality: A Feasibility Study, PRESENCE, Vol.2, No.3, pp.171-184 (1994)