

視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発——注視位置に
高解像度像を提示する映像提示方式の検討——

岩本 和世[†] 谷江 和雄[†] 前田 太郎^{††}

Study on the Eye Movement Tracking Type Head Mounted
Display —— Investigation of the Image Display Method
which can Present High Resolution Images at
the Intensional Visual Area——

Kazuyo IWAMOTO[†], Kazuo TANIE[†], and Taro MAEDA^{††}

あらまし パーチャルリアリティやテレロボティクスにおける視覚映像提示装置としてヘッドマウントディスプレイ(HMD)が注目されている。HMDの基本原理は、小型ディスプレイを両眼の前方にそれぞれ配置し、それに視差のある映像を提示して操作者に立体感のある像を提示する。これら従来のHMDに使われているディスプレイがもつ走査線数は一般に限られている。そのため、解像度を維持しつつ、人の視野をカバーするに十分な映像を提示する立体感ディスプレイを構成することが難しく、現実感の高い映像を提示する上で一つの障害となっている。この問題を解決するため、広視野かつ高解像度の映像を提示し得る視線追従型HMDが提案されている。人間の視覚は注視点近傍でのみ対象を高分解能で観測することができる。視線追従型HMDは、この視覚特性に留意して、視線方向の一定領域に高解像度の映像を提示し、その周囲には低解像度だが広視野の映像を提示することによって等価的に広視野高解像度の映像を提示するシステムである。本論文では、視線追従型HMDを具体化するための映像提示方式を提案すると共に、単純映像を提示する実験によってその妥当性を確認した結果を述べる。

キーワード ヘッドマウントディスプレイ(HMD)、パーチャルリアリティ(VR)、テレロボティクス、ヒューマンインタフェース

1. まえがき

ヘッドマウントディスプレイ(HMD)はパーチャルリアリティ(VR)やテレロボティクスにおいてオペレータに仮想環境あるいは実環境の視覚映像を臨場感をもって提示できる装置として注目されている[1]。しかし、現状のHMDは図1に示すように、人のもつ視野に比べて映像表示画面が小さく、臨場感の高い映像提示が困難なことが指摘されている。臨場感の高い映像を提示するには、広視野・高解像度の映像提示系が必要であるが、現状のNTSC方式ディスプレイで広視野映像

を提示しようとするれば走査線数の制限から、解像度の低下を招く。その結果、解像度を確保するためにはディスプレイの視野角を制限せざるを得ないのが実状である。広視野・高解像度化の実現のために、ディスプレイ自体の解像度を高めるというアプローチをとる場合、我々の試算では、高品位テレビ用のディスプレイ(走査線数1.125本)を使用したとしても、視野角120°のHMDに対し、視力検査で使用される0.1のランドルト環をやっと表示できる程度の解像度しか得られない[4]。高品位テレビを超えるディスプレイデバイスの開発にはかなり時間を要することを前提とすれば、別の広視野・高解像度映像提示方式の検討も必要である。

ところで、人の視覚は、注視する一定領域でのみ高解像度の映像を受容する能力をもつ。そこで、注視している部位の映像のみ高解像度提示し、周辺の映像を

[†] 通商産業省工業技術院機械技術研究所、つくば市
Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba-shi, 305 Japan
^{††} 東京大学工学部、東京都
Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo, 113
Japan

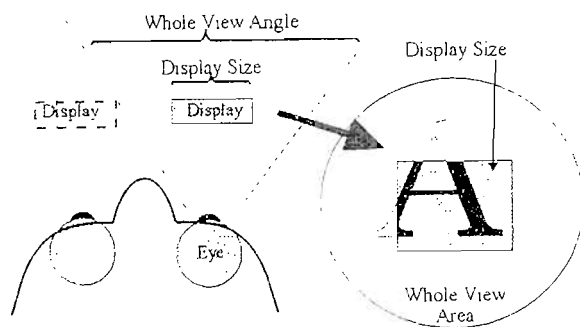


図1 従来のHMD
Fig. 1 Traditional Type HMD.

低解像度であるが広視野提示することで、スクリーン上に映し出される映像を、広視野・高解像度で観測させる技術が検討されている[2], [3]. 我々は、この考えをHMDにも適用し、その広視野・高解像度化を図るべく、視線追従型HMDを提案し、人の視覚の中心視と周辺視の基礎的特性を検討してきた[4].

本論文では、視線追従型HMDを具体化するために必要な、注視点近傍に高解像度映像を提示する方式を提案すると共に、その試作機を設計し、単純映像を対象とする実験によって提案方式の映像提示手法の妥当性を確認した結果を述べる.

2. 視線追従型HMDの概念

図2に視線追従型HMDの概念図を示す. 図に示すようにこのシステムは、二つのディスプレイ、すなわち広視野ディスプレイおよび高解像度ディスプレイと、視線検出センサ、ディスプレイ位置コントローラからなる. 広視野ディスプレイは、画角を広げて広視野の映像を提示するディスプレイである. 画角を広げるために走査線密度が下がり、映像の解像度は低下するが、このディスプレイによって観測者の全視野を覆う映像を提示する. 一方、高解像度ディスプレイでは、画角を小さくして、走査線密度を高め、解像度の高い局所的映像を提示する. また、それは広視野ディスプレイ表面上を自由に移動できるように設置する. この高解像度ディスプレイは眼球運動に応じて絶えず注視部位に位置決めされ、注視部位の映像が高解像度で広視野ディスプレイの映像に重ね合わせて観測者に提示される. 例えば、図3の提示映像が広視野ディスプレイ上に与えられ、観測者が広視野中の+位置を注視しているとき、その注視点周囲の点線で囲まれる限定された領域の映像は別途高解像度ディスプレイで高解像度で

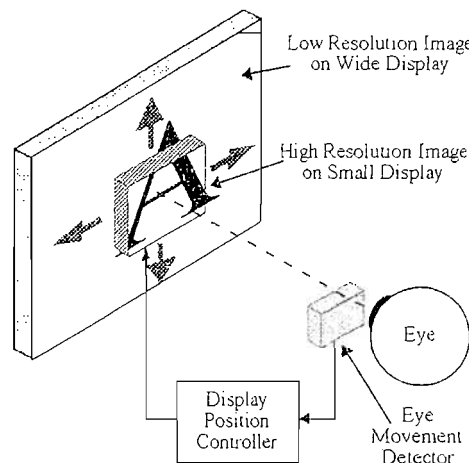


図2 視線追従型HMDの概念
Fig. 2 The concept of EMT-HMD.

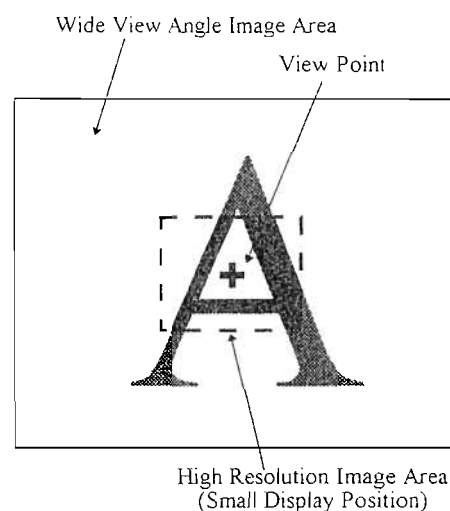


図3 提示映像の一例
Fig. 3 A sample of image presented in EMT-HMD.

提示される. このようにすると、2種の映像が適切に重ね合わされて提示されることを前提とすれば、人の網膜の構造的性質から、視野全域にわたって高解像度の映像が提示されているかのような感覚を観測者に与えることができる.

3. 方式の検討

視線追従型HMDを具体的に構成する際、概念で述べたようにディスプレイを視線に応じて直接動かすことは適切ではない. よく知られているように眼球運動には追従眼球運動、断続性眼球運動の2種があり、特に後者は最大速度 $300^\circ/s$ にもなるといわれ[5], この速度に追従してディスプレイを駆動することは困難である. そこでディスプレイ自体を移動させることなく、

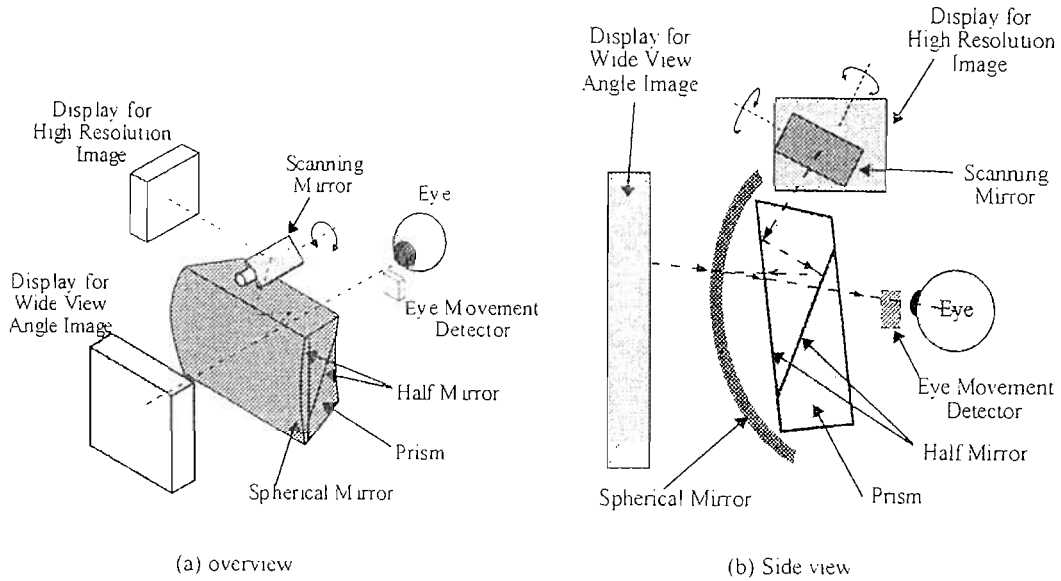


図4 プリズム型ディスプレイ
Fig. 4 Prism type display.

高解像度映像提示位置を制御する手法を検討する必要がある。このような制御は、いくつかの光学的手段により実現可能である。本研究では3種の映像提示位置制御方式を考案し、それらを比較検討して、視線追従型HMDの用途に最も適した方式を選定した。以下にその選定のプロセスを述べる。

3.1 プリズム方式[6]

2.の提案を実現する一方式としてプリズムを用いる手法を図4(a), (b)に示す。この方式ではまず眼前にハーフミラーを含むプリズムと、その背後に球面ハーフミラーを置く。また、その上方に2軸の走査ミラー、球面ハーフミラー後方には全視野をカバーする広視野ディスプレイ、走査ミラー側方には注視点周囲の映像を提示する高解像度ディスプレイを配置する。観測者がプリズム・球面ハーフミラーを通して、広視野ディスプレイ上のある場所を注視すると、まず、眼球センサにより注視点が計測され、その情報に応じて、注視点近傍の映像が高解像度ディスプレイに表示される。同時に、走査ミラーの向きが制御され、高解像度ディスプレイの映像が、プリズム内に投射される。プリズムの内部には2枚のハーフミラーが内蔵されており、投射映像は、図に示すように、ハーフミラーで数回の反射・透過を経て、広視野ディスプレイ上の注視領域に対応する球面ミラー上に投影される。観察者は、この球面ミラー上の映像を広視野ディスプレイの映像と重ね合わせて見ることにより、2.の提案システムが与える映像と同様な特性をもつ映像を観測することがで

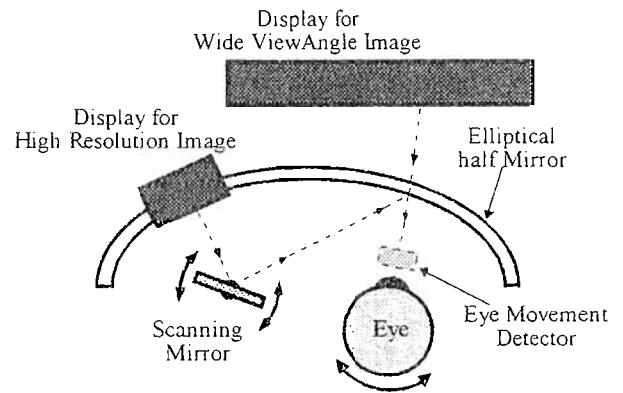


図5 だ円鏡型ディスプレイ(上面図)
Fig. 5 Elliptical mirror type display (Top View).

きる。

3.2 だ円鏡方式[7]

2.のコンセプトはだ円鏡を用いても実現し得る可能性がある。図5にだ円鏡方式のアイデアを示す。この方式では図に示すように、だ円鏡を観測者の眼球および走査ミラーをそれぞれの焦点に一致するように、また、高解像度ディスプレイをだ円鏡上に図のように配置する。だ円鏡には、一つの焦点から出た光は、もう一つの焦点に集まるといった性質がある。そこで、観測者が図5に示すように広視野ディスプレイ上のある位置を注視したとき、それを眼球センサで検知して、注視領域の映像を高解像度ディスプレイ上に表示すると共に、走査ミラーの向きを制御して、広視野ディスプレイの注視領域に対応するだ円鏡上の位置に、その高

刃に
人の
象度
に与

で述
すこ
運動
特
の速
であ
く、

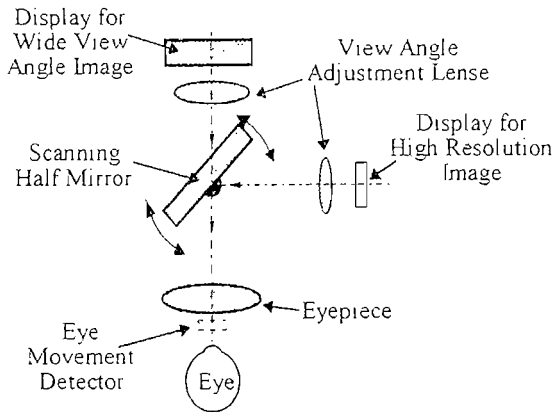


図6 前方投射型ディスプレイ(上面図)
Fig. 6 Front project type display (Top View).

解像度ディスプレイ映像を投影する。観測者は、このだ円鏡上の高解像度ディスプレイ映像と広視野ディスプレイ映像を重ね合わせて見ることにより、2.で提案するシステムが提示する映像と同様の特性をもつ映像を観測できる。

3.3 前方投射方式[8]

図6に前方投射方式の構成を示す。システムの基本構成は接眼レンズ、走査ハーフミラー、広視野および高解像度ディスプレイ、画角調整用レンズ、眼球センサからなる。まず、観測者は接眼レンズおよび走査ハーフミラーを介して、広視野ディスプレイに映し出される広視野映像を観測する。そしてこのときの注視位置を眼球センサで検出し、上記二つの方式同様、高解像度ディスプレイ上に、注視領域の映像を表示する。一方、また、眼球センサ出力に応じて、走査ミラーの角度を制御し、広視野ディスプレイの注視領域に対応する走査ハーフミラー上の位置に画角レンズで大きさの調整された高解像度ディスプレイの映像を提示する。この映像を接眼レンズを介して、広視野ディスプレイ映像と重ね合わせて見ることにより、2.で提案するシステムが提示する映像と同様の性質をもつ映像を得ることができる。

3.4 各方式の検討

上記の各方式を比較選定するに際しては、より広視野で、高解像度の映像が提示できる方式に注目することは無論であるが、臨場感の高い映像提示系を得る意味では、十分な明るさを持ち、かつひずみのない映像が提示できる方式を選定することも重要である。また、実用に共ずするためには、製作が容易なこと、そして、HMDの使用形態を考えると、コンパクト化が可能なこ

とも重要な選定基準となろう。

これらの項目に留意して、各方式の比較評価を行った。

まず、提示映像の明るさは、ディスプレイ上に表示された映像が観測者の目に達するまでの光路長や、光路中に存在するハーフミラーおよびレンズ等による光の減衰の度合に依存する。プリズム方式は、光路長が比較的長く、かつ走査ミラーより投射された映像がプリズム内で複雑な反射を繰り返すため、提示映像の十分な輝度を確保することが困難である。このことは試作した実験モデルにより確認された。すなわち、高解像度ディスプレイとして高輝度のものを用いてもなお提示映像の十分な輝度を確保することが困難であることが、被験者2名の主観的判断による評価実験によって確認された。また、プリズム周辺領域においては画像ひずみが大きくなり、十分な解像度を確保することが困難であり、更にひずみの少ないプリズムの製作にコストを要すると共に、プリズム上部の走査ミラーの設置スペースが観測者と干渉するため狭く、コンパクトな走査ミラーを選定しなければならないことも課題があることが判明した。

一方、だ円鏡方式は、光路が短く、光の減衰の点では、プリズム方式に見られるような問題点はない。しかし、走査ミラーや眼球に投影する映像を、正確に焦点上に結像させないと、だ円鏡の性質上像がぼやけて、十分な解像度の映像が提示できないという問題が推測された。すなわち図5に示すだ円鏡型ディスプレイにおいて、仮に高解像度ディスプレイの中心部に点光源が配置されているとすると、その光は図中の点線に示す光路を通り眼球に投影されるため、問題は発生しない。しかし高解像度ディスプレイのような面光源が配置された場合には、面光源の中心部以外はひずみが常に発生し、そのひずみ方は、視線位置、すなわちだ円鏡上の提示位置によっても変化するため、その補正は極めて困難と思われる。更にこの方式では、面光源の中心部以外は視線位置によって、眼球までの光路長が変化するため、高解像度映像光軸上に光学レンズを配置して画角調整などの対策をとる場合、映像のぼけなどに対する対策も必要となる。また、走査ミラーや眼球を正確に焦点上に配置することも困難なことや、だ円鏡の製作が容易ではなく、かつコストを要するという生産技術上の問題も推測される。

前方投射方式は、プリズムやだ円鏡といった特殊な光学要素を使わずに構成できることに特徴がある。ま

た、高解像度映像を眼球正面から投影することができるため、プリズム方式に見られるような走査ミラー設置スペースの問題もない。映像の光路長も比較的短く設計できるため、映像の輝度の低下も少なく、映像ひずみに関しても、それを低く抑える画角調整レンズの設計は、プリズムや円鏡よりも低コストでかつ技術的にも容易である。

以上視線追従型 HMD 実現のための 3 方式について検討を行った結果、前方投射方式が、製作面や性能面において、他の 2 方式よりも優れていると判断し、この方式を採用することとした。以下では前方投射方式視線追従型 HMD の具体化について述べる。

4. 試作システムの構成

前章での検討結果に基づき、前方投射方式の設計を行った。図 7 にその光学系を示す。広視野ディスプレイ、画角調整用レンズ f_1 , f_2 、走査ハーフミラーおよび接眼レンズ f_5 は同一光軸 l 上に配置されている。一方、ハーフミラー中心を通り、光軸 l と直交する方向の光軸 m 上に、高解像度ディスプレイ、画角調整用レンズ f_3 , f_4 が配置されている。映像提示に際してはまず、広視野ディスプレイより像 O_1 を提示し、それを画角調整用レンズ f_1 , f_2 により広視野映像用に画角を拡大調整した後、走査ハーフミラー後方に像 O_2 を結像させる。一方、注視点近傍の映像を提示する高解像度ディスプレイの像 O_3 を、レンズ f_3 , f_4 により高解像度映像用に縮小調整した後、走査ハーフミラーにより角度を変え、像 O_2 と同じ平面上に結像 (像 O_4) させる。ここで、像 O_1 と像 O_3 の生成には同一のディスプレイを用いる

が、前章でも述べたように、各々の像が画角調整レンズにより拡大・縮小されるため、像 O_4 には像 O_2 のそれよりも高解像度な映像が形成される。用いたディスプレイの大きさは 5.3 インチで、広視野、高解像度視野角は水平・垂直方向ともにそれぞれ 46° , 14° であり、結果として、注視点近傍の映像の解像度は周辺領域に対し、約 3 倍となる。人は、上記の同一平面上に形成された二つの像を、図 3 に示すような、解像度の異なる二つの像の重ね合わせ映像として、接眼レンズ f_5 を介して観測する。

人の視覚系はおよそ水平 100° 、垂直 80° の視野をもつ [9]。従って、上記の広視野映像の視野角の仕様は、人の視野をカバーするには不十分である。この問題は市販レンズを用いたことによるが、本研究では、提案する映像提示方式の機能の確認を主眼としたため、試作システムで十分と考えた。この広視野映像の視野角はレンズ系を特別に設計することにより、人の視野をカバーする程度に拡大することは技術的に可能である。また、高解像度映像の視野角も同じく画角調整レンズの焦点距離および位置を調整することによって変更可能である。

さて、本システムでは、高解像度ディスプレイに注視点位置の映像を常に表示し、かつそれを注視点位置に投影しなければならない。これを実現するために以下の映像提示制御系を構成した。すなわち、まず、接眼レンズ f_5 と眼球との間の視野を妨げない位置に、眼球の運動を検出するセンサを設置し、それによって検出した眼球の運動に応じて、走査ハーフミラーの角度を制御することによって、像 O_2 の結像面上の視線が向いて

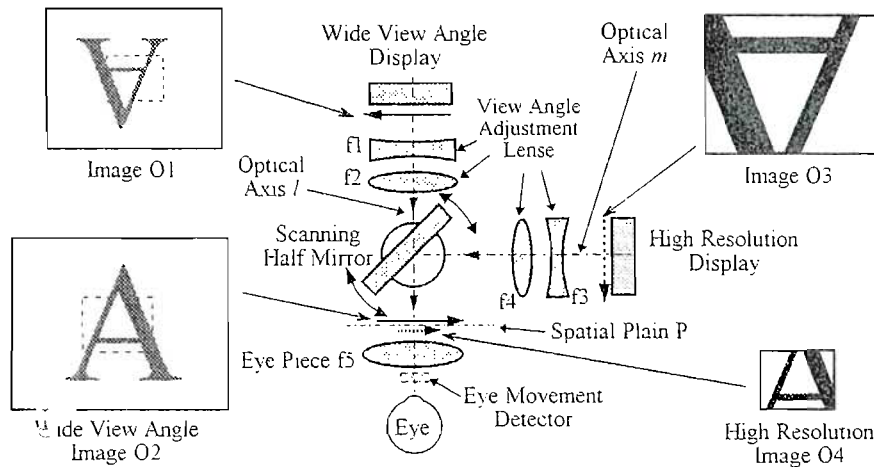


図 7 視線追従型 HMD の光学システム
Fig. 7 Optical system of EMT-HMD

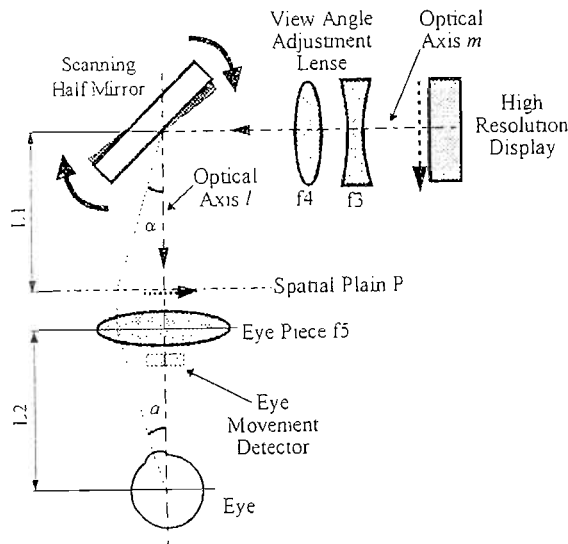


図8 角度関係
Fig. 8 Relation between α and α .

いる位置に像 O4 を投影した。ここで視線検出センサには市販品(竹井機器製)を用いている。このセンサは赤外 LED とホトダイオードから構成されており眼球に赤外光を照射し、黒眼と白眼の反射率の差を利用して、視線位置が検出される。また以上のミラー制御を行うとき、人の視線は結果的に眼球の動きによらず高解像度ディスプレイの中心に拘束されることになる。眼球が運動し広視野上の注視位置が変化した場合、高解像度ディスプレイにはその注視位置の映像が提示されなければならないから、高解像度ディスプレイに表示される映像は眼球運動に応じて逐次計算機のプログラムによって更新される。試作装置では、原理の確認に目的を絞るために構成を単純化し、走査ハーフミラーは水平方向の1自由度とし、視線の水平方向の移動に対してのみ映像制御を行った。図8に高解像度映像提示系の詳細構造を示す。高解像度ディスプレイに表示される画像を常に視線方向に提示するために、図8中のミラーの姿勢を眼球位置に対し次の関係を満たすように制御した。

$$\alpha = \tan^{-1}(L2/L1 \times \tan \alpha) \quad (1)$$

ここで、 α は光軸 l からの視線の振れ角で、視線検出センサによって計測される量である。また α は、光軸 l からの高解像度映像軸の振れ角であり、制御される走査ハーフミラーの振れ角の2倍に対応する量である。 $L1$ は光軸 l と m の交点から高解像度映像が結像する空間平面 P までの距離、 $L2$ は眼球から接眼レンズまでの距離である。なお本実験装置においては、 $L1=120$ mm、 $L2=60$ mm である。また前述のように広視野、高解像

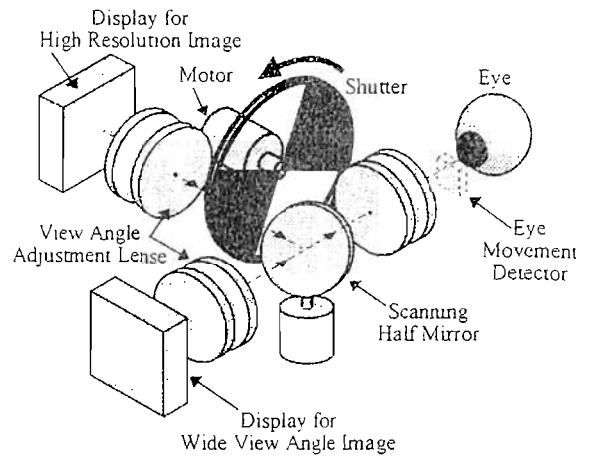


図9 実験システム
Fig. 9 Experimental setup.

度映像の視野角はそれぞれ 46° 、 14° であることから、高解像度映像が広視野映像領域内を移動するためには、 $\alpha=0\sim 16^\circ$ の値をとる必要があり、その結果式(1)より $\alpha=0\sim 8.2^\circ$ の範囲で変化する。

走査ハーフミラーの制御と映像の更新は、高解像度ディスプレイの映像とそれがスーパーインポーズされる場所の広視野ディスプレイの映像とが常に一致するように行わなければならない。これを実現するためには、注視位置の広視野の映像を眼球運動に応じて正確に高解像度ディスプレイを介して提示することが求められるが、ミラーの回転や映像の更新には有限な時間を要するから、これを厳密に実現することは困難である。すなわち、ミラー回転や画像更新の過渡期間中に高解像度領域に提示されるべき映像内容とそれがスーパーインポーズされるべき場所の広視野ディスプレイ映像の間に違いが生じ、このような状態で、広視野ディスプレイ上に高解像度映像がスーパーインポーズされると、その境界部分で映像にずれが生じることは避けられない。そこでこの問題を回避するために、過渡期間の画像の提示を遮断する方式を導入した。すなわちディスプレイの垂直同期信号(60 Hz)に同期して、作動するシャッター機構を用い、画像の更新、ミラー回転期間中は画像を一時期遮断する。シャッター機構には、図9中に示すような、映像の遮断・透過を可能にする透明部と遮蔽部をもつ円盤を速度制御可能なモータに取り付けたものを用い、高解像度ディスプレイの画調整レンズと走査ハーフミラーの中間に配置した。システムのタイミングチャートを図10に示す。まず、期状態ではシャッターは開放状態にある。システムは

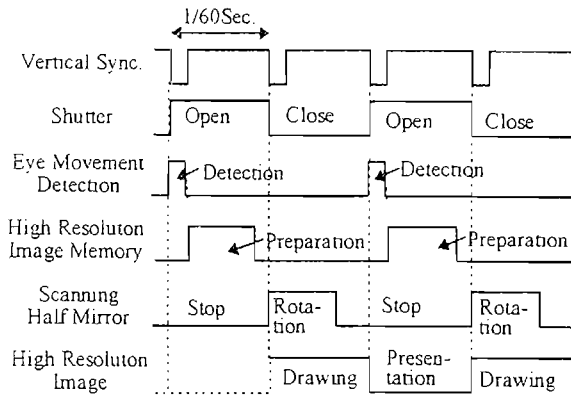


図 10 高解像度映像提示のタイミングチャート

Fig. 10 Timing chart of high resolution image presentation.

初の垂直同期パルス信号を受けると、視線位置の検出とそれに基づく高解像度映像データの更新を行う。また、二つ目のパルスで、シャッタを閉じ、ミラーを回転させると共に、更新映像をディスプレイに書き込む。三つ目のパルスで、シャッタを開き、映像を提示すると共に、次に備えて、視線方向の計測と映像データの更新を行う。四つ目のパルスで、再びシャッタを閉じ、ミラーの回転角を制御すると共に、更新データのディスプレイへの書き込みを行う。以下、前記三つ目のパルス以降の動作を繰り返す。試作したシステムでは、以上の説明からも明らかなように、高解像度映像は $1/30$ s の開閉周期で表示される。被験者 2 名を用いてシャッタ開閉周期を変化させつつ、画像の明るさを主観的に評価する実験を行った結果、開閉周期が $1/26 \sim 1/27$ s よりも高速の場合には明るさの連続性には影響を与えないことが確認された。すなわち上記の $1/30$ s の周期は人の視覚系の残像特性から考えて、映像の連続性を十分保証し得るものである。またシャッタ機構の円盤の回転はホトインタラプタによって回転位置を検出し、PLL 回路を用いて、映像の遮断・透過と垂直同期信号のタイミングが一致するように制御した。シャッタ機構に関しては、将来的には液晶シャッタの導入を検討している。映像の制御、シャッタおよび走査ハーフミラーの制御はパーソナルコンピュータ (PC98) を用いた。また走査ハーフミラーの位置制御にはオープンループ型のスキャナを使用した。図 11 に制御システム全体の構成を示す。試作システムは、その構成部品であるレンズ、ハーフミラーを含む光学系および二つのディスプレイ等をスタンドを介して、水平な基盤の上に適切に配置して構成した。また、接眼レンズの手前には、

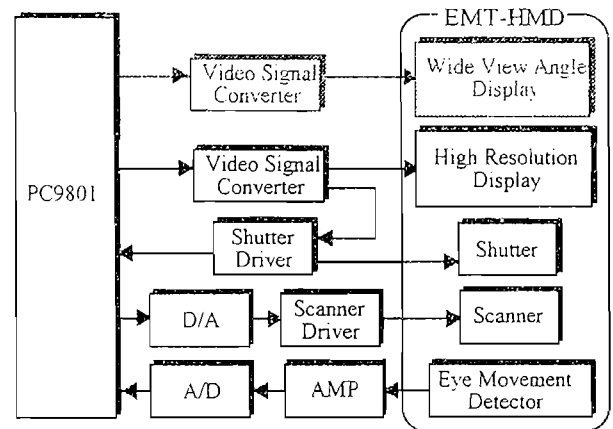


図 11 制御システム

Fig. 11 The control system.

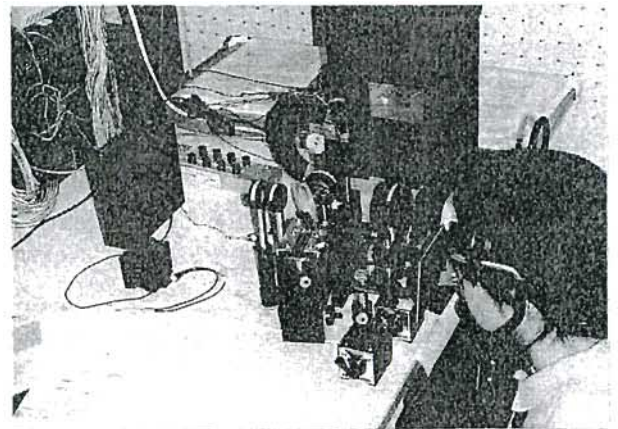


図 12 実験システム概観

Fig. 12 Overview of experimental system.

顎台を設置し、被験者には、この台上に顎をのせて映像を観測させた。図 12 に装置全景を示す。

5. 評価実験

提案した前方投射方式によるシステムの妥当性を確認するために、高解像度提示系に注目して、機能評価を行った。機能評価では、まず眼球運動に対するミラーの追従性の実験を行い、この機能を保証した上で、上述した眼球運動に基づくミラーの制御方式や映像の制御系が安定な高解像度映像を提示することに効果的かを心理物理的実験手法を用いて評価することを試みた。

5.1 ミラー追従特性の評価

走査ハーフミラー 駆動系は、視線すなわち眼球の移動速度に十分追従し得る応答特性を備えていなければならない。本システムでは、図 10 のタイミングチャー

トに示されるように、1/30 s ごとに走査ハーフミラーは駆動され、この1周期 1/30 s のうち半分の 1/60 s 間は高解像度映像の提示期間、残りの 1/60 s は走査ハーフミラーの駆動期間となる。視線の最高速運動であるサッカーは約 300°/s であるが、ここで仮に視線が最高速の 300°/s で移動したとすれば図 8 に示す視線の振れ角 α は 1/30 s で 10° 変化することになる。この場合、高解像度映像が視線追従して提示されるためには、高解像度映像軸の振れ角 α は走査ハーフミラーが駆動される 1/60 s の間に、式(1)に従って少なくとも $\tan^{-1}(L2/L1 \times \tan \alpha)$ 、 $\alpha = 10^\circ$ は回転しなければならない。この点を評価するために、以下に示す確認実験を行った。まず、広視野ディスプレイの中心から右側視線振れ角 $\alpha = 5^\circ$ の位置に指標を提示し、続いて瞬間的に指標を広視野ディスプレイの中心から左側視線振れ角 $\alpha = -5^\circ$ の位置に移動させ、これら指標を被験者に注視させたときの眼球運動の測定結果に基づき、式(1)に従って、走査ハーフミラーを駆動し、その応答を記録した。ミラーの角度の測定には、レーザ距離センサを使用した。結果として、視線の振れ角 α の 10° の変化に対応した高解像度映像軸の振れ角 α の回転は、駆動開始から終了まで 10 ms 程度で終了することが確認された。これは 1/60 s (約 17 ms) に対し十分小さく、このことから仮に眼球が最高速の 300°/s で視線移動したとしても高解像度映像の視線追従は可能であることが確認された。更にサッカーの視線移動中には人間の視力は低下し、視線移動終了後、視力回復までに 200~400 ms を要する[10]という人間の視覚特性を考慮すれば、走査ハーフミラー制御系は安定な映像提示に必要な追従能力を有していることがわかる。また上記の実験で得られたミラー追従特性は視覚センサの特性も含むものであり、従って以上の結果から視覚センサの応答特性も十分なことが併せて確認される。

5.2 高解像度映像制御系の評価

5.2.1 実験方法

構築した前方投射方式システムにおいて、安定に高解像度映像が提示されるかを以下のようにして評価した。すなわち、まずサンプル映像として、固定された指標が存在する環境を取り上げる。この環境を試作システムで被験者が観測するとき、画面の種々の位置(本研究の試作システムの場合、視線の水平移動のみ考慮しているので、厳密には水平方向の任意の位置)に注視点を移動させると、当然高解像度ディスプレイはその注視点位置に応じて、異なった映像を提示する。この

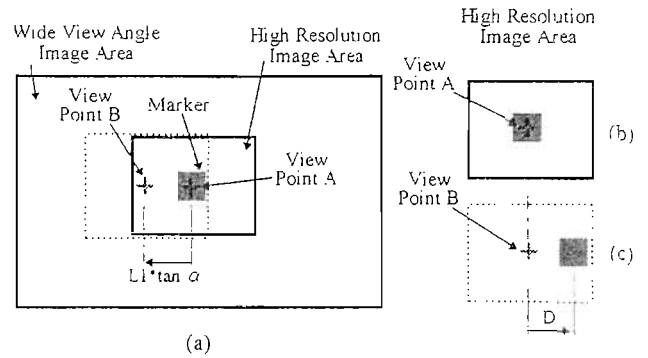


図 13 評価実験で使われた視覚環境
Fig. 13 Visual environment used in experiments.

注視点を変化させて映像を観測する被験者が、提示される指標が常に固定されているように感じるならば、提示系の性能がほぼ確認されることになる。本実験では、これを心理物理的方法により確認するために、前節で述べた視線計測に基づく高解像度映像の制御を行った場合と、一部高解像度映像制御則を乱して高解像度映像提示を行った場合とを比較評価させることを試みた。図 13(a) に用いた提示映像を示す。今、被験者が点 A を注視しているとき、実線で囲まれた領域が高解像度ディスプレイによって高解像度で提示される。次に被験者が点 B を注視したとすると、高解像度映像領域は視線移動に伴い、点線で囲まれた領域が高解像度映像領域となる。ここで図 8 で定めたように視線の振れ角を α 、高解像度映像軸の振れ角を α とすると式(1)から提示映像面上の注視点の移動量は $L2 \times \tan \alpha$ 、高解像度映像中心の移動量は $L1 \times \tan \alpha$ であり、この二つの移動量は常に等しくなるように制御されなければならない。このとき高解像度映像の提示内容と提示位置を一致させるには、高解像度ディスプレイ上において指標が視線移動と反対方向に移動するように映像を書き換える必要がある。図 13(b), (c) は、被験者が点 A および B を注視しているときの高解像度ディスプレイの提示映像の様子をそれぞれ示している。映像が図 13(b) から (c) に移行するときの指標の移動量を D とするとき、次式を満たすように、映像の書き換えを行えば、理論的には提示映像面上の指標が固定されて見えるはずである。

$$D = -L1 \times \tan \alpha \quad (2)$$

こうして提示される映像を一つの刺激提示映像とした。これに、上式に変数 X を導入した次式において、

$$D = -X \times L1 \times \tan \alpha \quad (3)$$

X を 0.8, 0.9, 1.1, 1.2 とし指標の移動量 D を制

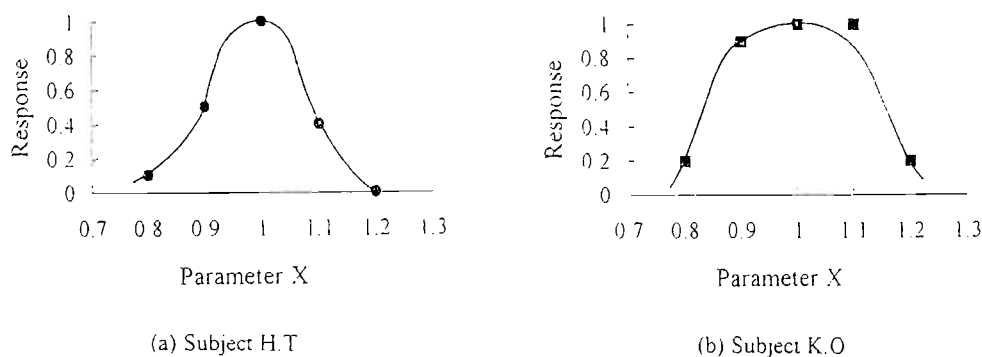


図14 実験結果
Fig. 14 Experimental results.

御した四つの映像を加えた合計五つの刺激提示映像をランダムに提示して、被験者に指標の移動が感じられるか否かを判定させた。刺激の提示回数は50回である。実験は高解像度映像の書換えと走査ハーフミラー角度の制御タイミングの一致の確認に目的を絞り、広視野ディスプレイには、何も表示しない状態で行った。以上の実験はすべて試作システムを用い、被験者を顎台上に固定した状態で行った。被験者数は2名である。

5.2.2 実験結果と評価

図14に結果を示す。各被験者ともほぼ同様の傾向を示した。横軸は、式(3)のパラメータ X を示し、縦軸は X の各値ごとに10回の試行で得た回答の平均値を示す。この平均値は、指標が完全に停止し、かつ指標の振動も感じられないと回答したときとそうでないときに、それぞれ得点1, 0を与えて計算した。この図から両被験者とも $X=1.0$ のとき、すなわち式(2)の関係を満たすように走査ハーフミラーを視線に対し制御したときに、ほぼ100%の「指標は静止している」との回答が得られ、また $X=1.0$ の周辺部では、両者の結果には多少の差はあるものの、 $X=1.0$ に近いほど「指標は静止している」と答える率が高くなる傾向が認められる。以上から、高解像度ディスプレイ系の光学系、駆動系、センサ系などの各要素が期待どおりに機能していること、および提案した前方投射システムの映像制御の妥当性が確認される。

6. むすび

本論文では、視線追従型HMDの具体的構成法を提案した。広視野高解像度映像提示の3種類の実現方法について検討を行い、前方投射方式の有効性を指摘すると共に、実験システムを試作してその高解像度映像提示系の評価を行った。まず走査ハーフミラーの応答特性を測定し、それが視線の移動速度に十分追従し得

るものであることを確認した。更に高解像度映像を視線に応じて制御する手法の妥当性を心理物理的実験により確認した。

今後の視線追従型HMD開発の課題としては、視線追従範囲の2次元化と、視野角拡大のための光学設計、および両眼化が挙げられる。また広視野映像と高解像度映像の重ね合わせ手法などの検討も行う必要がある。

謝辞 本研究は、通商産業省工業技術院産業科学技術研究開発プロジェクトで実施したテーマ「人間感覚評価のための人工現実感創出技術に関する研究」の成果の一部をまとめたものである。本研究を進めるにあたり、御支援頂いた産業科学技術研究開発室関係者各位、当所野崎武敏ロボット工学部長、東京工科大学川崎寛司教授および実験に御協力頂いた当時卒業研究生の東京工科大学勝又聡氏(現(株)タイトー)、と当所バイオロボティクス研究室員各位に謝意を表す。

文 献

- [1] 前田太郎, 荒井裕彦, 舘 暉, “頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価.” 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 5, pp. 655-665, 1992.
- [2] 山口博幸, 伴野 明, 岸野文郎, “視線検出を利用する広視野高精細表示方法の検討,” 信学論(C-II), vol. J73-C-II, no. 11, pp. 721-732. Nov. 1990.
- [3] N. M. Dalton and C. S. Deering, “Photo based image generator.” Proc. SPIE, vol. 1116, pp. 61-75. 1989.
- [4] 岩本和世, 前田太郎, 谷江和雄, “視線追従型映像提示系への応用を目的とした注視点近傍における視覚特性の検討,” 人間工学, vol. 30, no. 2, pp. 99-109. 1994.
- [5] 渡部 勲, 坂田晴夫, 長谷川敬, 吉田辰夫, 畑田豊彦, “視覚の科学,” pp. 43-48, 写真工業出版社, 1981.
- [6] 谷江和雄, 前田太郎, 市江更治, 安川 学, “眼球運動追従型視覚提示装置,” 特許公開6-326946.
- [7] 前田太郎, 谷江和雄, “視線追従型ヘッドマウントディスプレイ,” 特許公開6-38142.
- [8] 岩本和世, “投射方式による眼球運動追従型視覚提示装置,” 特許公開7-87374.
- [9] 野呂影勇, “図解エルゴノミクス,” pp. 292, 日本規格協

会, 1990.

- [10] 田崎京二, 大山 正, 樋渡涌二, "視覚情報処理," pp. 368-371, 朝倉書店, 1984.

(平成7年6月5日受付, 12月11日再受付)



岩本 和世 (正員)

昭61同志社大・工・電気卒, 昭63同大学院修士課程了, 同年松下電器産業(株)入社, 平4工業技術院機械技術研究所入所, 現在に至る. パーチャルリアリティ, テレロボティクスに関する研究に従事, 日本ロボット学会, 人間工学会各会員.



谷江 和雄

昭44早大・理工・機械卒, 昭46同大学院修士課程了, 同年工業技術院機械技術研究所入所, 工博, 昭60ロボティクス部感覚機構課長を経て, 現在ロボット工学部バイオロボティクス研究室長, 平4より筑波大学大学院工学研究科教授併任, 昭56~57カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員, ロボットの機構と制御, テレロボティクス等の研究に従事, 日本機械学会, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, IEEE 各会員.



前田 太郎 (正員)

昭62東大・工・計数卒, 同年工業技術院機械技術研究所入所, 工博, ロボット工学部バイオロボティクス課研究員を経て, 平4東大先端科学技術研究センター助手, 平6東大工学部助手, 現在に至る. 人間の知覚特性とモデル化, 神経回路網モデル, マンマシンインタフェース, テレレイグジスタンスなどの研究に従事, 平2計測自動制御学会論文賞, 平3日本ロボット学会技術賞受賞, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 人間工学会, 日本視覚学会, 神経回路学会, IEEE 各会員.