

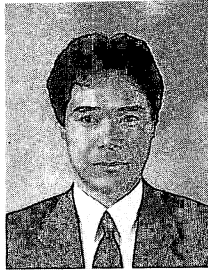
## 【HMD特集】



## HMD光学系の進展

谷口尚郷

(株) エム・アール・システム研究所



## 1. はじめに

HMD (Head Mounted Display)はCRTやLCDなどの小型表示素子の画像を、光学系を介して観察者の眼へ導き、眼前に虚像の大画面映像を表示する装置である。HMDの特徴としては、(1)小型、軽量である、(2)広画角・大画面の映像を呈示できる、(3)立体表示できる、(4)シースルー機能により現実世界とスーパーインポーズできる、などが挙げられる。これらの特徴からパーソナルディスプレイ、VR (Virtual Reality)やTele-existence (遠隔操作)などの視覚ディスプレイ、民生用立体ディスプレイ、携帯用情報端末、など様々な応用が提案され、それぞれの用途に応じたHMD光学系が採用されている。本稿では、これらHMDの光学系について概説する。

## 2. HMDの一般光学系

HMD光学系の基本的な役割は小型表示素子の拡大像を空中に形成することである。拡大光学系については、いろいろなタイプがあるが大きく分けると2つに分かれる。1つは表示素子と接眼光学系からなり、表示素子を直接拡大する接眼系タイプ (図1)。もう1つは表示素子とリレー光学系と接眼光学系を有し、表示画像をリレー光学系で1回結像させ、この結像面を接眼光学系で拡大する接眼リレー系タイプである (図2)。

接眼リレー系タイプの特徴は、広画角HMDには有利であるが、小型化という点では不利である。これに対し接眼系タイプは小型化に適している。特に図1の凹面鏡とハーフミラーを組み合わせた例は、最も代表的な小型接眼系タイプの例であり、多くのパーソナルディスプレイに採用

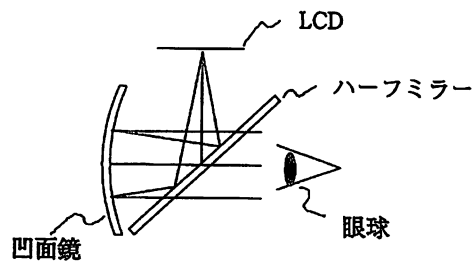


図1 接眼系タイプ

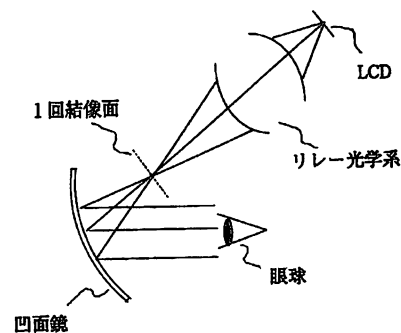


図2 接眼リレー系タイプ

されている。図1の例で水平画角30度の場合、光学系の厚さは約30mmぐらいである。

また小型化・広画角化を達成するために、拡大光学系にチルト偏心・平行偏心を使用した偏心光学系を採用する場合がある。しかし偏心光学系では、通常のザイデルの5収差・色収差の他に、軸上での非点収差、台形型のディストーションなど偏心系特有の偏心収差が加わり、良好な光学性能を得ることは非常に難しい。

さらにシースルー型HMDの場合は、外界が観察可能なシースルー光学系も同時に成り立たせなければならない。

光学系は光学的パワーを持たない透過光学系が一般的であり、光学系に存在するハーフミラーを境に、シースルー光学系（透過系）と拡大光学系（反射系）に光路分割されている場合が多い。またシースルー機能がない場合（クローズ型HMD）は、ハーフミラーが形成された凹面鏡を100%反射ミラーに置き換えるのが一般的である。

次節では、特許や文献などで公開されている代表的なHMD光学系を例示しながら、その特徴を説明し、HMD光学系の進展を概観する。

### 3. HMD光学系の進展

VRの分野でのHMDのルーツはI. Sutherlandが1968年に発表したシステムである [1]。1/2インチ角のCRTを用いた観察者の前方約45cmの位置に約18インチの虚像を形成する画角約40度のシースルーHMDであり、現在VRで用いられているHMDと比較するとかなり画角の小さいHMDであった（図3参照）。しかし、SutherlandのHMDにはリンク式のヘッドトラッキング機構が装着されており、この情報をコンピュータにフィードバックして画像生成することで観察者の周囲360度の映像を提示できるシステムとなっていた。この様な全天周映像の表示装置としての提案はSutherlandが最初であった。

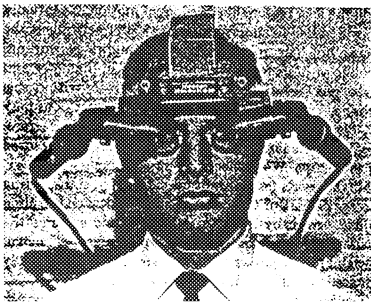


図3 I. SutherlandのHMD[1]

一方、HMDを用いて立体映像を見るというシステムは、1945年に米国特許が成立している[2]。図4にこのHMD光学系を示す。両眼の前に配置されたCRTの画像をレンズを介して拡大表示する光学系で、それぞれのCRTに左右の視差画像を表示し立体視を実現している。VPL社からEyephone02として1989年に発売されたHMDも基本的な構成はこの米国特許と同じであり、図5に示す様に約3インチ、8.6万画素の液晶表示素子の画像を拡大表示し、画角80度のクローズ型HMDを実現していた。この改良品であるEyephone LXではフレネルレンズを採用して軽量化を実現し、02型で発生していた画像周辺部での歪みを大幅に改善している。

また、航空機のパイロットへの情報表示などの用途として、画像情報を視野内に呈示し同時に見ることができ

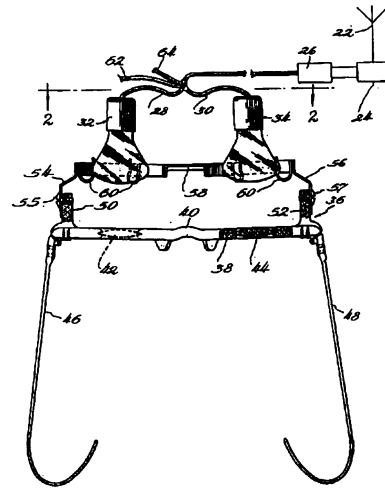


図4 立体TVとしてのHMD[2]

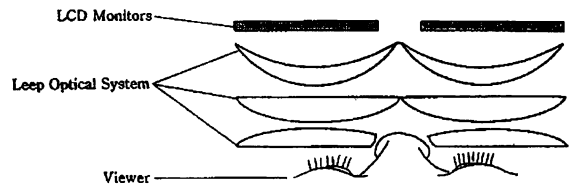


図5 V P L社Eyephone光学系

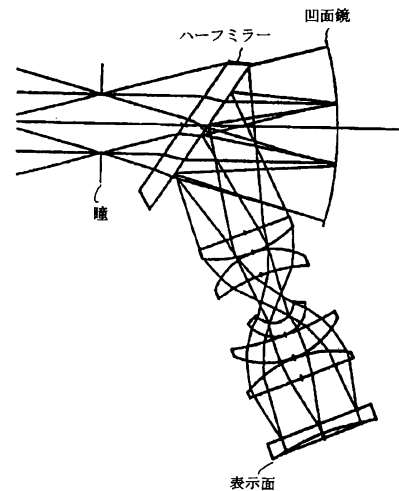


図6 共軸系の接眼リレー系タイプ[3]

るシースルー型のHMDの提案も古くから行われている。図6に共軸系の接眼リレー系タイプの例を示す[3]。

このHMDは図1で述べた接眼系タイプのシースルーHMD光学系へ共軸系のリレーレンズを導入し、画角は30度である。図7は図6の凹面鏡を偏心凹面鏡にして広画角化した偏心光学系であり、画角50度である[4]。偏心凹面鏡で発生する非点収差やコマ収差を補正するためにプリズムや偏心レンズなどが用いられている。これら航空機用HMDでは表示画像のコントラストを高めるために高輝度のCRTを用いなければならず、装置全体が大型化し、ほ

とんどがHelmetに装着したHelmet Mounted Displayであった。また、高輝度CRTの発光波長にホログラムの回折波長を一致させたHOE (Holographic Optical Element) を凹面ハーフミラーの代りに用いることで、表示輝度と外界の明るさの両方を向上させた光学系も提案されている(図8参照)[5]。また、HMD光学系の色収差を補正するために、回折光学素子(Diffractive Optical Element)を用いた例もあり、この光学系を図9に示す[6]。

民生用のパーソナルディスプレイとしての応用も活発であり、1991年にはソニーから“バイザートロン”が試作発表されている。この光学系は図1に示す接眼系タイプであり、画素数約10万の液晶素子を用いた画角30度のHMDである。このHMDは視度調整機構が付いていたが、その後の検討によりユーザが過度に視度を調整することで悪

影響を引き起こす可能性があることが指摘され[7]、これ以降の民生用HMDには視度調整機構はほとんど採用されていない。このタイプの光学系は眼前に45度に傾けたハーフミラーが配置され、光学系の小型化にはあまり適しておらず、この光学系の厚みは約30mmである。この問題を解決するため、1995年にキヤノンから自由曲面プリズムを採用したHMD光学系が発表されている。この自由曲面プリズムは、図10に示すようなクサビ型の特種レンズであり、プリズム形状でありながら接眼レンズの作用を有する。この自由曲面プリズムと18万画素の小型LCDとを使用し、水平画角34度のHMD光学系を厚さ15mm以下で達成している[8]。

さらに、キヤノンではこの自由曲面をミラー系に使用して接眼リレー系タイプを構成し、画角43.5度を実現してい

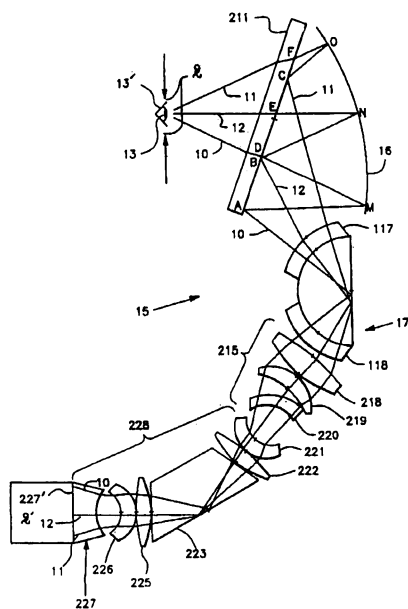


図7 偏心凹面鏡リレー系タイプ[4]

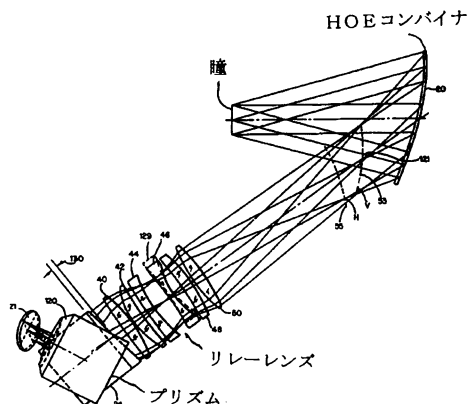


図8 HOEコンバイナタイプ[5]

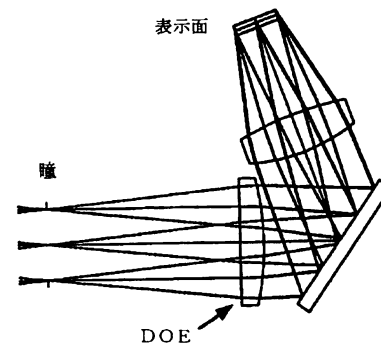


図9 DOEを用いた色収差補正光学系[6]

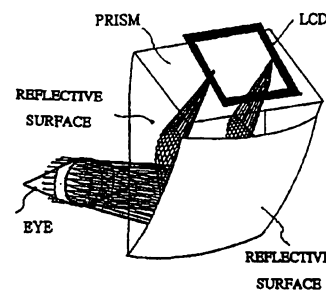


図10 自由曲面プリズム型接眼系タイプ[8]

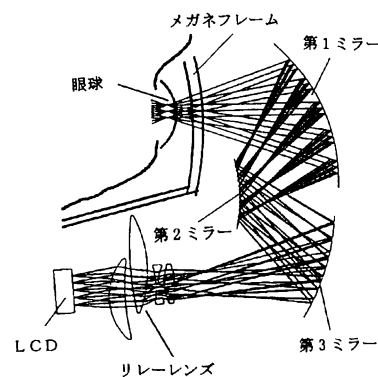


図11 自由曲面ミラーを用いた接眼リレー系タイプ[9]

る。この光学系では3枚の自由曲面ミラーとリレーレンズを平行偏心させることで光学系全体の偏心収差をバランスさせている(図11参照)[9]。また、オリンパスからは図12に示すような偏心凹面鏡とリレーレンズを用いた光学系により、画角85度を実現した例が発表されている。この光学系では偏心凹面鏡で発生する偏心収差(主に非点収差、コマ収差)を補正するために特殊プリズムと呼ばれる自由曲面光学素子を用いている。しかしながら、歪曲収差についてはこの光学素子では補正しきれず、表示画像を光学系の収差とは逆に歪ませて呈示することで補正している[10]。

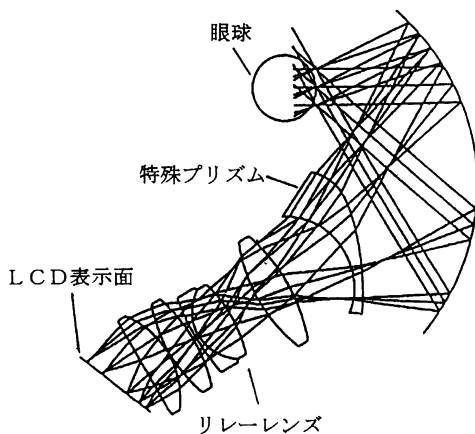


図12 特殊プリズムを用いた接眼リレー系タイプ[10]

#### 4. まとめ

以上の様に、HMD光学系はその用途に応じた様々なタイプがあり、それぞれの特長を実現するために最適化されながら発展してきた。たとえば民生用HMDでは、クローズ型で画角は30度程度でも良いが、小型・軽量であることが要求され、共軸光学系から偏心光学系へそして自由曲面光学系へと進展してきた。また、最近の話題としてウェアラブルコンピュータ用のヘッドセットとして、単眼のHMDがXYBERNAUT社や日本IBMなどから相次いで発表されている。これらの用途ではコンピュータモニタの代わりとして用いるために、立体表示は必要がなく、画角も15度から30度程度のもので、解像度もVGAクラスである。ウェアラブルコンピュータは表示画像と外界とを重畳して見るという利用方法が提案されており、HMD光学系はシースルー機能を有していることが要求される。この様に、今後も用途に応じた最適な光学系を実現する形でHMDの光学系は展開すると思われる。

#### 5. 参考文献

- [1] I. E. Sutherland, "A head-mounted three dimensional display", Proc. of the Fall Joint Computer Conference, Vol.33, pp.757-764, (1968)
- [2] H. McCollum, "Stereoscopic Television Apparatus", USP2,388,170, (1945)
- [3] D. J. Rotier, "Optical Approaches to the Helmet Mounted Displays", Proc. of SPIE, Vol.1116, pp.14-18, (1989)
- [4] M. J. Hayford, et al., "Optical Arrangement", USP4, 854,688, (1989)
- [5] R. J. Withrington, "Optical Display Systems Utilizing Holographic Lenses", USP3,940,204, (1976)
- [6] J. A. Cox., et al., "Application and demonstration of diffractive optics for head-mounted displays", Proc. of SPIE, Vol.2218, pp.32-40, (1994)
- [7] 鶴飼一彦, "ヘッド・マウンテッド・ディスプレイの視覚への影響を実験", NIKKEI ELECTRONICS, No.668, pp.153-164, (1996)
- [8] 山崎章市, 他, "視線入力を搭載した超小型HMDの開発", 3次元画像コンファレンス'95, pp.70-75, (1995)
- [9] 森島英樹, 他, "非対称非球面を用いたOff-Axial HMD光学系の設計", 第20回光学シンポジウム, pp.53-56, (1995)
- [10] 高橋浩一, "偏心光学系による広画角HMD", 第20回光学シンポジウム, pp.57-58, (1995)

(株) エム・アール・システム研究所 〒220-0022  
 横浜市西区花咲町6丁目145番地 横浜花咲ビル  
 Tel ; 045-411-8111、 Fax ; 045-411-8110  
 e-mail ; naotani@mr-system.co.jp

#### 略歴

谷口尚郷 (TANIGUCHI Naosato)

1981年熊本大学理学部物理学学科卒。1983年九州大学大学院工学研究科応用物理学専攻修士課程修了。同年、キヤノン株式会社入社、中央研究所にてホログラフィー技術を中心とする物理光学技術に関する研究に従事。

現在、基盤技術研究促進センターとキヤノンとで設立した株式会社エム・アール・システム研究所へ出向し、HMDやメガネなし3Dディスプレイの研究開発を行っている。