

視線入力を搭載した超小型 HMD

山崎章市

近年 VR (バーチャルリアリティー) が注目を集めている。VR は人間の五感に情報を与え、人工的な空間を作り、あたかも現実の世界にいるような感覚を生むものである。その中でも視覚情報はもっとも情報量が多く、VR のディスプレイは重要な役目を果たさなければならない。

VR のディスプレイとしては、小型 LCD (liquid crystal display) を使用し、光学系を通して拡大する HMD (head mount display) を利用するケースが多く、両眼視差を利用して 3D 画像を形成している。3D 画像形成原理は図 1 に示すように、左右 2 組の LCD と光学系を眼球直前に配置し、左右の LCD に別々の映像信号を送り、光学系により左右の LCD 虚像を所望の位置に形成して、立体視可能としている。また HMD のもうひとつの特徴としてシースルー機能があるが、これはハーフミラー等を利用し、外界に LCD 虚像を重ね合わせ観察する機能である。

だが HMD は頭部に装着するため、あまり重いものは好ましくない¹⁾。そこで我々はゴーグル型 HMD ではなく、メガネ型 HMD をイメージした超小型 HMD の開発を目指した。

またキャノンでは、1992 年 AF 1 眼レフカメラ (EOS 5, 図 2)²⁾、1994 年 8 mm ビデオカメラ (E 1)³⁾ において、視線入力を実現化し発表した。これは眼球の動きを CCD (charge coupled device) に取り込み、現在みている方向 (視線) を画像処理により検出し、“み

つめたところにピントが合う” AF カメラである。我々ではこの技術を HMD に応用し、新しいマンマシーンインターフェースを実現する視線検出可能な HMD の開発も行った。使用目的としては、人間の視線情報を加味した、より完成度の高い VR である。視線検出は将来 3D・シースルーに続く 3 つめの特徴に成り得るものと考えている。

1. HMD の光学系

HMD の光学系の基本的な役目は小型 LCD の拡大像を空中に形成することである。シースルー機能を有する場合 (シースルー型) 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。シースルー光学系は光学的屈折力をもたない透過光学系が一般的であり、透過光学系中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 LCD を拡大する拡大光学系 (反射系) に光路分割されていることが多い^{4,5)}。またシースルー機能がない場合 (クローズ型) は、ハーフミラーを 100% 反射ミラーに置き換え、光学系は拡大光学系 (反射系) のみの構成となる。

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 LCD と接眼光学系からなり、LCD を接眼光学系で直接拡大する虚像タイプ (図 3)。もう 1 つは LCD とリレー光学系と接眼光学系を有し、LCD 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 1 回結像タイプである (図 4)。1 回結像タイプの特徴は、超広視野角 HMD には有利であるが^{6,7)}、小型化という点では不利である。これに対し虚像タイプは小型化に適している。特に図 3 の凹面鏡とハーフミラーを組み合わせたタイプは、最も

Super compact HMD with sight line input (1995 年 9 月 18 日受理)
Shoichi YAMAZAKI キヤノン (株) レンズ開発センター (〒146 東京都大田区下丸子 3-30-2)

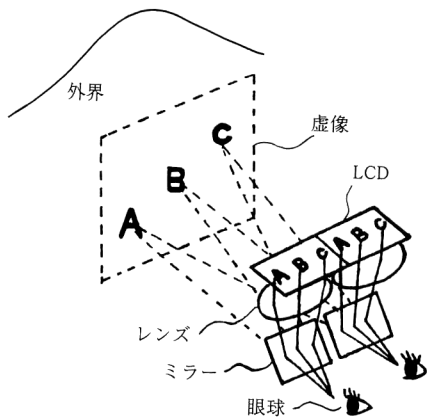


図1 3次元画像形成原理図。

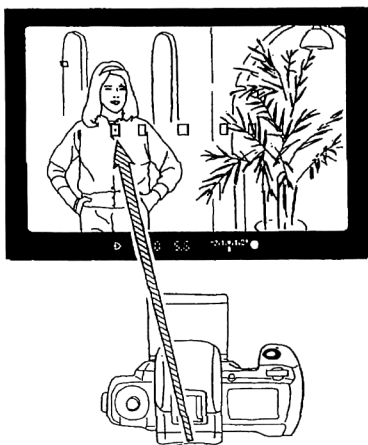


図2 視線入力を搭載した AF1 眼レフカメラ (EOS 5)。

実用的な小型虚像タイプであり、光学部材の厚さは 30 mm くらいである。筆者の経験では、従来のシースルーが可能な虚像タイプは、光学部材の厚さを 30 mm 以下にすることは可能と思われるが、20 mm 以下にすることは非常に困難であると思われる。

また小型化・超広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⁴⁻⁷⁾。

次に HMD、特に拡大光学系の明るさについて述べる。現状の TFT (thin-film transistor) 小型 LCD による HMD は、屋外使用を考えると十分明るいとは言えない。明るさは主に LCD と光学系で決まり、現在の

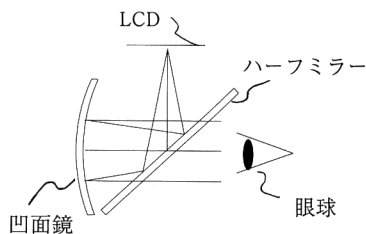


図3 従来の虚像タイプ HMD の光学系。

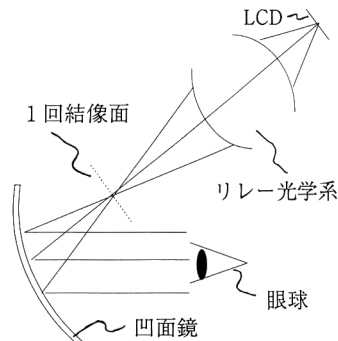


図4 従来の1回結像タイプ HMD の光学系。

TFT 小型 LCD の透過率が 2~3% と非常に少ないため、拡大光学系は光量ロスの少ない明るい光学系が望まれる。前述した図 3 の光学系は現状では最も実用性のある小型タイプであるが、光線がハーフミラーを 2 回通るため、クローズ型で光量が 1/4 になってしまう欠点がある⁷⁾。そこで我々はクローズ型で光量ロス“0”を前提とし、超小型化を目指した。

2. 超小型 HMD の技術開発

以下に、我々の技術開発による 4 つの成果を記述する。

- (1) 自由曲面を使用したプリズム型光学系 (自由曲面プリズム) の新開発により、HMD 用光学部材の超薄型化を達成した (厚さ 10~15 mm, 図 5)。
- (2) 新開発の自由曲面プリズムを HMD に搭載したクローズ型単眼 HMD システム“スカウター”の重量を 80 g にまで抑え、光学系の光量ロス“0”も併せて実現した (図 6)。
- (3) 自由曲面プリズムと補正用自由曲面プリズムを接合し、超小型のシースルー型 HMD を開発した。
- (4) キヤノン視線入力技術の応用により、眼球の動き検知、視線入力を搭載した視線検出可能な HMD を開発した。

次項以降では技術開発の詳細について述べる。

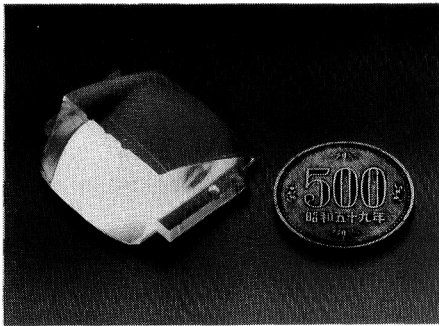


図5 プリズム型光学系“自由曲面プリズム”。



図6 クローズ型単眼 HMD “スカウター”。

2.1 自由曲面プリズムとクローズ型 HMD

クローズ型 HMD では超小型化を目指すため虚像タイプを採用している。光学構成は図7に示すように小型 LCD と自由曲面プリズムの2部材からなり、光学系は自由曲面プリズム1つで構成されている。カメラのファインダー光学系、双眼鏡の接眼光学系などでは、平面構成による光学的屈折力をもたないプリズムと光学的屈折力を有する接眼レンズの2つからなっている。この自由曲面プリズムは、光学系を薄型化するために接眼レンズを取り除き、プリズム面を曲面化することでプリズム自体に光学的屈折力をもたせ、プリズムでありながら集光レンズの作用をもつ複合光学素子として開発した。

光路としては図7に示すように、LCD から発せられた光は自由曲面プリズムに入射し、全反射面（反射面1）で全反射され、さらにもう1度反射面2で反射され、今度は前記全反射面を透過してプリズムを射出し、眼球に導かれ所望位置に虚像を形成する。この全反射面（反射面1）と反射面2による光線の折り畳みが、自由曲面

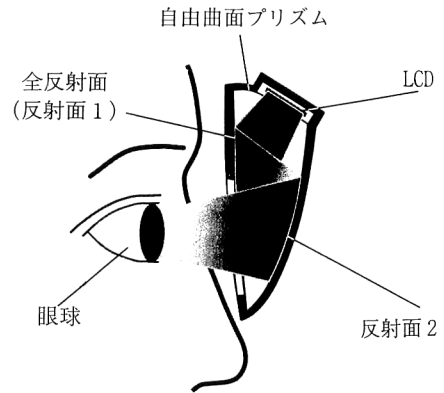


図7 自由曲面プリズム光学系の原理図。

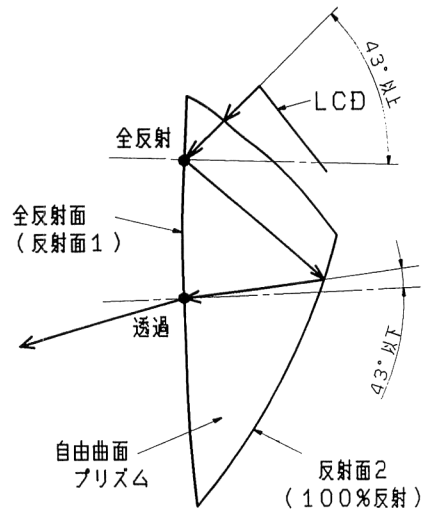


図8 自由曲面プリズム内に設定されている全反射条件。

プリズムの超薄型化をもたらしている。

また全反射面（反射面1）は全反射条件（臨界角条件）を満たすように設定しており、自由曲面プリズムの屈折率を1.466とすると全反射条件より43°以上で入射した光は100%全反射し、43°以下で入射した光は100%透過することになる。この性質を図8を用いて説明する。LCD から発せられた光が1回目に全反射面（反射面1）に入射する際はすべての光束が43°以上で入射して全反射し、2回目に入射する際はすべての光束が43°以下で入射して透過する。我々はこの条件を満たすように全反射面（反射面1）の面形状を設定したので、クローズ型 HMD なら、LCD からの光はすべて眼球に導かれ、光学系での光量ロス“0”となる。また全反射条件の設定は反射面2のチルト偏心率も小さくすることが

できるため、自由曲面プリズムの薄型化、後述する偏心収差の抑制にも寄与することになる。

残る大きな問題点は光学性能である。自由曲面プリズムのプリズム面はすべて偏心しており、特に反射面2の偏心量は大きい。反射による色収差の発生は原理的にはないため、色収差については良好であるが、前節で述べたように偏心光学系ではザイデル収差のほかに膨大な偏心収差が発生する。そこで我々は、通常の球面・非球面のような回転対称曲面でなく、非回転対称な3次元非球面（自由曲面、図9）^{4,6)}をプリズム面に採用することにより、十分な光学性能を得ることができた。

ここでもう少し自由曲面について説明する。図7, 8

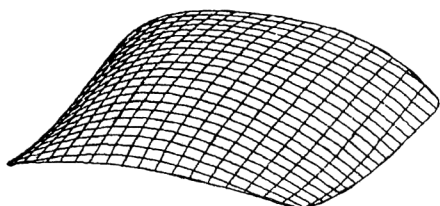


図9 自由曲面形状の立体表示図。

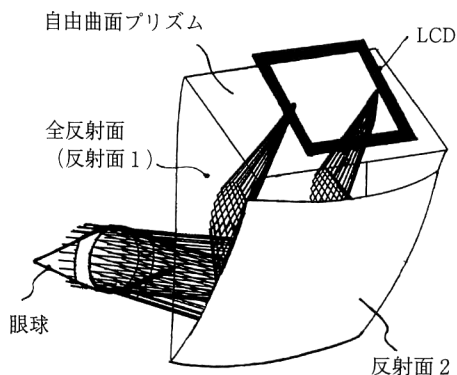


図10 クローズ型 HMD の立体トレース図。

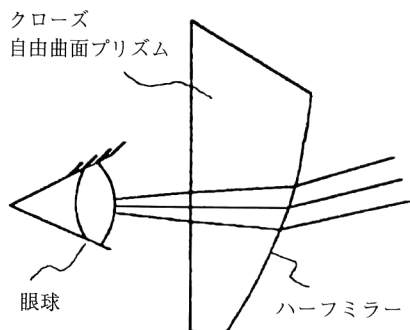


図11 自由曲面プリズムによるシースルー系の問題点。

における紙面を母線断面、紙面と垂直な面を子線断面とすると、回転対称な球面・非球面は母線断面と子線断面で曲率半径が等しく、両断面の焦点距離は同一になる。しかしながら非回転対称な自由曲面では、母線断面と子線断面の曲率半径が異なり、当然両断面の焦点距離も異なってくる。このような性質を有する自由曲面を複数のプリズム面に採用することにより、偏心収差を良好に補正することが可能となった。またLCDとLCD虚像のアスペクト比を合わせるために、各プリズム面の母線断面焦点距離と子線断面焦点距離を適切に設定し、自由曲面プリズムの全系母線断面焦点距離と全系子線断面焦点距離が同一になるようにした。

2.2 シースルー型 HMD

我々が開発したクローズ型光学系は光学的屈折力を有したプリズム型光学系である。したがって、光学系の一部の反射面をハーフミラーに代えただけでは拡大光学系（反射系）は成り立っても、シースルー光学系（透過系）は成り立たない。理由は2つあり、1つは、図11に示すように透過系においてはプリズム作用が生じ、眼球光軸から外れた外界が観察されてしまうということである。2つめは、シースルー光学系（透過系）にも光学屈折力が生じてしまい、外界と等倍のシースルー光学系が形成できずかつ膨大な収差が発生してしまうという点にある。

これらの問題点を解決するために、我々は図12に示すようなシースルー用自由曲面プリズムを開発し、クローズ型自由曲面プリズムに接合して用い、シースルー光学系（透過系）の光学的屈折力とプリズム作用を取り除いた。この方法によりシースルー光学系（透過系）の欠点はすべて解決され、クローズ型光学部材の厚さとほぼ

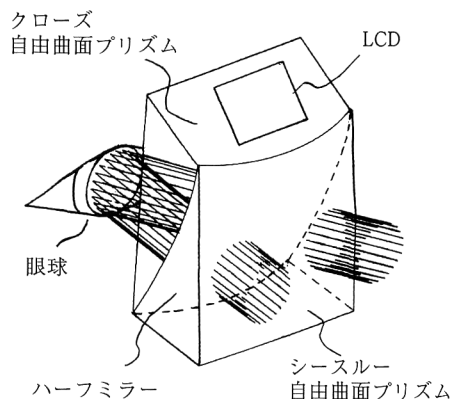


図12 接合自由曲面プリズムシースルー光学系の原理。

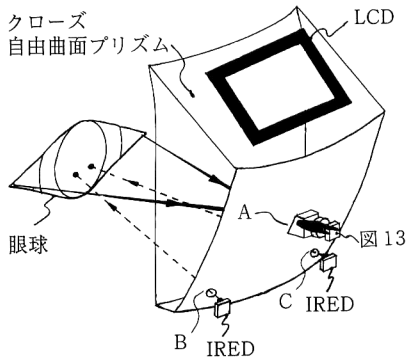


図 13 視線光学系の原理図。

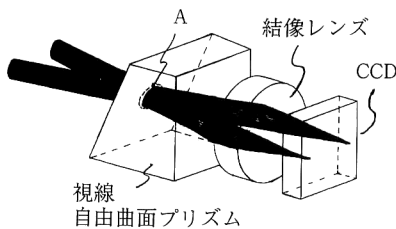


図 14 視線センサー光学系。

同等の超薄型のシースルー光学部材が構成できた。

また我々は自由曲面同士の接合も試みた。従来、球面の接合は頻繁に行われているが、非球面の接合となるとあまり報告がないようである。ましてや非回転対称の自由曲面の接合などは例がないと思われる。

2.3 視線検出可能な HMD

一般的に HMD の光学系は広視野角が要求されるため、視線入力技術を搭載したカメラ・ビデオのファインダーよりも広視野角、すなわち高倍率に対応した HMD 独自の視線光学系の開発が必要であった。そこで我々は図 13 に示すような光学構成を採用した。クローズ型自由曲面プリズムの 1 つの反射面に、赤外光が透過するような 3 つのホール (A・B・C) を用意し、A ホールの背後には視線センサー光学系を配置し (図 14)、B・C ホールの背後には IRED (infrared-emitting diode) を配置した。この 2 つの IRED から発光された赤外光は B・C ホールを透過し、クローズ型自由曲面プリズムを通過したあとと眼球部を照射する。眼球部で反射された赤外光は、再びクローズ型自由曲面プリズムを通過し、A ホールを透過したあと、視線センサー光学系で CCD 上に結像される (図 15)。視線センサー光学系は良好な光学性能を得るために、視線用自由曲面プリズムをクローズ型自由曲面プリズムに接合し、その背後に

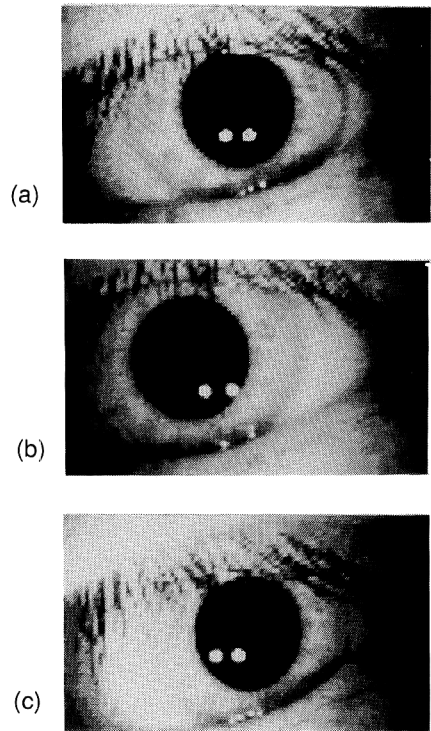


図 15 視線光学系の CCD 像。(a)中心、(b)右、(c)左。

凸レンズ、CCD を配置した構成としている。

次に視線検出原理を簡単に説明する⁸⁻¹¹⁾、図 15(a)において中央の大きな黒い円形部は瞳孔、瞳孔内の 2 つの白い点は 2 つの IRED 光源の角膜面反射による虚像 (プルキニエ像) である。瞳孔中心とプルキニエ像の相対位置は眼球の回転角と一定の関係があるため、画像処理より相対位置関係を算出し、眼球の回転角すなわち視線方向を検出することができる。IRED は照明上と情報処理上の理由により 2 個配置されている。図 15(b)は眼球光軸が右側に動いた場合の CCD 画像、図 15(c)は眼球光軸が左側に動いた場合の CCD 画像である。

3. 試作機“スカウター”の仕様

[クローズ型単眼 HMD タイプ (図 6)]

- ① 表示素子：0.7 インチ 18 万画素 LCD
- ② 視野角度：水平 34°、垂直 26°
- ③ 重量：80 g
- ④ 視度調整：+1~-5 デイオプター
- ⑤ 眼鏡使用：可

自由曲面プリズムの新開発により、従来のクローズ

型・シースルー型の HMD を超小型化した。さらにキャノンの「視線入力技術」を応用してマンマシンインターフェースの充実した視線検出可能な HMD を開発した。

近年、HMD の長時間立体視に伴う疲労問題等が指摘されている。真のマンマシンインターフェースを実現するためにも、疲労等の問題をクリアすることが今後の課題と考える。

文 献

- 1) 廣瀬通孝：“次世代画像技術の研究動向”，テレビジョン学会誌，**48** (1994) 1170-1178.
- 2) キヤノンカメラ開発センター：“キャノン EOS 5”，写真工業，**525** (1993) 58-72.
- 3) “ムービーボーイ E 1”，ビデオサロン (玄光社) (1994) pp. 28-33.
- 4) 森島英樹，ほか：“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 (1995) pp. 53-56.
- 5) 井場陽一：“HMD の光学系”，第 2 回産業用 VR 展講演要録 (1994) pp. 1-5.
- 6) 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 (1995) pp. 57-58.
- 7) 研野孝吉：“HMD”，微小光学研究グループ機関誌，**13** (1995) 37-42.
- 8) 鈴木謙二：“カメラの視線入力技術の開発”，精密工学会誌，**61**, 1 (1995) 35-39.
- 9) 鈴木謙二：“1 眼レフカメラの視線入力 AF の開発”，日本写真学会，**56** (1993) 369-371.
- 10) 鈴木謙二：“カメラの視線入力 AF 技術”，光学，**23** (1994) 25-26.
- 11) 荒井 崇：“視線入力光学系—キャノンムービーボーイ E 1 への応用”，光学系の歩みと最新の話題小冊子 (光設計研究グループ他主催) (1994) pp. 46-51.
- 12) 山崎章市，ほか：“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 (1995) pp. 70-75.