

ヘッドマウントディスプレイ(HMD)の光学系－技術史研究家の視点から(補足資料 1)

【2017年3月28日 第119回3Dフォーラム研究会 補足資料-1】

桑山哲郎 Tetsuro KUWAYAMA

個人 / 3D フォーラム

E-mail: tkuwa@ga.catv-yokohama.ne.jp

1 はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD, Head-Mounted Display) に対する注目は近年ますます高まっている。業務への利用という点では、“いよいよ実現化する「スマートグラス」。ヘッドマウントディスプレイとの違いは?”¹⁾ とする解説が Web で公開され、また 9 月 26 日に更新された“【主要 20 機種】VR ヘッドマウントディスプレイ (HMD)。HTC Vive Pre, Oculus Rift VR, PlayStation VR など”²⁾ の報告と、2016 年 5 月付の“【主要 30 機種】AR (仮想現実) ヘッドマウントディスプレイ (HMD)。Microsoft HoloLens, Magic Leap, SONY SmartEyeglass など。”³⁾ を読むことができる。また多くの報告・講演が行われているが、至近では 2016 年 10 月 21 日、日本光学会 光設計研究グループが「バーチャルリアリティとウェアラブル」をテーマにした研究会⁴⁾ を開催している。

HMD に対しては「スマートフォンの次の発展形態」あるいは「眼鏡のインテリジェント化、高付加価値化」という見方からも広く注目が集まっていることと思われる。通常のディスプレイは、装置に視線を向けなければならないのに、HMD ではいつでも目前に表示が行われる。また眼鏡や帽子に装着することで、日常行動の中でいつも利用できる特徴がある。小型軽量で遠方に大画面を表示できることでホームシアターの観賞用に注目されたこともあり、また利用者の姿勢や頭の位置をリアルタイムにディスプレイ内容に反映することができるため、VR, AR, MR (後述) での利用が盛んになった。

一方、技術史研究者の視点⁵⁾ からは、「19 世紀以来の光学技術の伝承」と、「注目の高まりと低下を繰り返してきた特殊な眼鏡を取り巻く環境変化」を指摘したい。日々状況が変化している分野のため正しく全体像を把握し、将来を予測することは困難であるが、可能な限り全体像を展望したい。

HMD については、元の情報が大量であることから、解説する文献も多すぎ代表的な文献を

取り上げるのが困難であるが、学術雑誌の特集号⁶⁾ と最近の総合報告⁷⁾ をあげる。なお歴史的な経緯について英文でまとめた資料は Wikipedia “Optical head-mounted display”⁸⁾ が詳しく、また古くからの光学系と対比させた技術史解説⁹⁾ もある。

2 HMD の用語、分類と用途

2.1 HMD の用語

HMD は新しい技術分野ではあるが、用語の定義や分類については比較的揃っている。一般的な用語の定義を以下に示す。

HMD ヘッドマウントディスプレイ 頭部に装着するディスプレイの総称。ディスプレイ部があるスマートグラスを含めることが多いが、はっきりと区別する人も居る。

HMD ヘルメットマウントディスプレイ (Helmet-Mounted Display) ヘリコプターの操縦士が使用するヘルメット装着するディスプレイとは表記が同じで注意を要する。

HUD ヘッドアップディスプレイ (Head-Up Display) 航空機や自動車などで、操縦者の前方視野に重ねて表示を行う装置。HMD と共通する技術的が多い。

スマートグラス (Smart Glasses) 眼鏡と同様に頭部に装着して使用するウェアラブルデバイス。「スマート」は賢いあるいは知能を持ったという意味で、眼鏡の側からは、知能化・高付加価値化面での拡張とすることができる。

VR (Virtual Reality) 仮想現実, 人工現実感 現実ではないが同等な環境を作り出す技術。HMD では没入感の強い密閉型のディスプレイに対して用いられることが多い。

AR (Augmented Reality) 拡張現実 人が知覚する現実環境をコンピュータにより拡張する技術で、HMD では前方の事物や風景に重ねて関連した意味のある情報の表示を行う。

MR (Mixed Reality) 複合現実 現実空間と仮想空間を混合して、現実の物体と仮想物体がリアルタイムで影響しあう新たな空間を構築

する技術。

2.2 HMD の分類

HMD を論ずる際に、ハードウェア構成や利用目的において大きく異なる機器が併存しているので分類を明確にすることが重要である。表 1, 表 2, 表 3 に分類を示す。

表 1 HMD の形状による分類

眼鏡型	眼鏡のレンズ面,眼球とレンズの間,あるいはレンズ面の外にディスプレイを配置する.
帽子型	帽子のツバからディスプレイ部が下がっている.ヘッドフォン付もあり,ヘルメットマウントディスプレイと呼ばれることもある.
(部分視野型)	非透過型の小型のディスプレイを頭部に装着する.

表 2 HMD のディスプレイ方式による分類

密閉型	完全に視野を覆うディスプレイで,外界が見えない.
ビデオシースルー方式	装着したビデオカメラにより取り込まれた外界の様子に,コンピュータによる仮想物体が重なって表示される.
光学シースルー方式	ハーフミラーなどを用い,外界に表示内容を重ねる.多種多様な光学技術が用いられ,また外光の光量を調節して表示を見易くする機器もある.

表 3 HMD の投影方式による分類

拡大遠方表示	小型のディスプレイを接眼レンズ遠方に拡大して表示する.
網膜走査型	レーザービームなど細い光線を 2 次元走査して網膜像に表示を行う.ヒトの瞳面的一部分を利用するためピント外れが無く視覚補助器具に向いている.

2.3 HMD の用途

HMD の用途は多様であり,いろいろな応用分野の境界は明確ではないが,短くまとめると以下となる。

軍事・操縦 戦闘機やヘリコプターの操縦に使用され,歩兵の使用も考えられている。救助活動,探検での民間利用も提案されている。撮影者から離れた場所でのビデオ撮影やドローンの操縦にも使用されている。

商品設計 自動車に始まり,多くの商品の外

形と外観を複数人で検討する用途に使用。

AV 機器 個人が大画面での映画鑑賞を行う。この用途の商品は 1996 年頃多くのメーカーから発売されたが,姿勢を変えても画像がいつも正面に表示される点で使用者にとって不快感があったが,ゲーム機ではこの点が改善されている。

コンピュータゲーム 密閉型のディスプレイを用い,広い表示視野,利用者が姿勢を変えると追従して表示内容を変えることで愛好者の支持が強い。

機器操作・組立シミュレーション 大規模な装置では設計段階での組立調整工程,サービスの訓練に HMD が利用されている。建築や家具などの設計と購入者へのプレゼンテーション等利用されている。医用・手術 手術支援,手術ロボットの操作,医学教育,患者や家族への説明などに利用されている。

3 HMD の基本的な光学系と古くからの光学系との対比

3.1 仮想物体の表示と実物との重畳

光学技術を用いた「からくり」を用いて現実には存在しない光景を表示する技術は,大変長い歴史を持っている。紀元前 2 世紀のヘロン(ギリシャ時代,当時の活動の中心地はアレクサンドリア)は,複数の平面鏡を組み合わせて用いることで,空中に浮かぶ人物を観客に見せたと伝えられている。

一方,実世界にコンピュータグラフィック(CG)による仮想物体を重ねる VR, AR の研究は,1968 年 Sutherland から発表された¹⁰⁾。坂根巖夫氏は研究室を訪問,「電子式起こし絵」として 1969 年朝日新聞紙面の連載記事中で伝え,連載を単行本化した「美の座標」¹¹⁾が 1973 年刊行されると,本の外箱に HMD を装着した人物の写真を掲載(写真 1)した。その後 HMD の研究は続けられたがあまり注目されることが無く,ようやく 1990 年代になり多くの研究者が手掛けるようになった。

執筆時点(2016 年 10 月)でメディアへの登場が多い HMD は,密閉型のビューアを用いた VR(バーチャルリアリティ)ゲームである。左右の目に別々な像を表示し,両眼視差を用いて奥行を持った像を表示する装置は,立体鏡あるいはステレオビューアと呼ばれ,1838 年に論文発表されているが,一般消費者に向けて大量生

産・販売されるようになるのは、1849年発明の画像が左右に並んだ立体鏡からである。

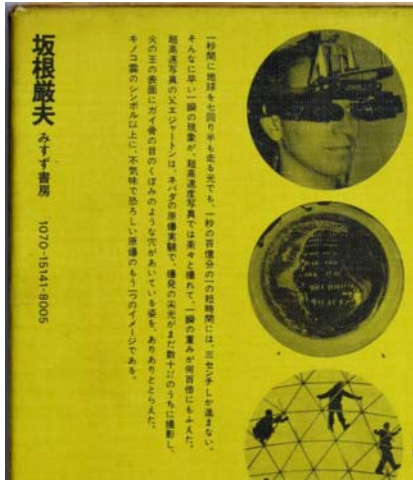


写真1 「美の座標」¹⁾の外箱

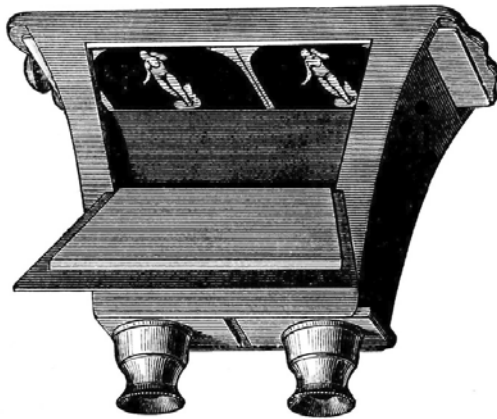


図1 立体鏡(ステレオスコープ, 1849年発明)

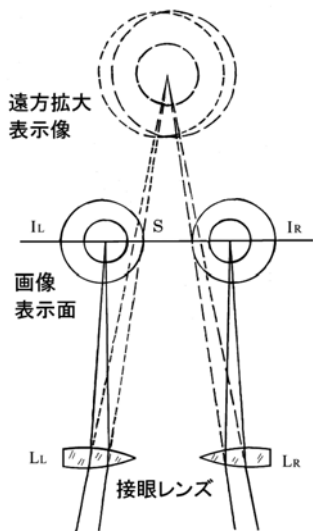


図2 立体鏡による表示

図1は当時の製品の外観、図2はその光学原理の模式図⁵⁾である。図2で左右それぞれの画像は接眼レンズの働きにより遠方に拡大表示され、同時に、レンズ光軸と像間隔を適切に調節することで輻輳角を小さくして遠方を見るのと相似な状態が作り出される。現在多くのビューアでは、スマートフォンの表示画面を2分割して用いているが、これはダゲレオタイプ(銀板写真)あるいは湿板写真を用い商品化された時代と光学原理は全く同一である。

3.2 瞳分割による像の合成

結像光学系において、像を合成する技術の一つに瞳(ひとみ)分割がある。図3は、19世紀の初頭、「カメラ・ルシダ」(明るい場所で使用する写生器具)として使用された光学系である⁹⁾。遠方の物体からの光は、プリズムの内部で2回全反射し、使用者の瞳の上半に入射して網膜に達する。一方紙の上に描かれているスケッチからの光は、瞳の下半分に入射し、網膜上では2つの像が重なって見える。図4は、カメラ・ルシダを使用している状態である。

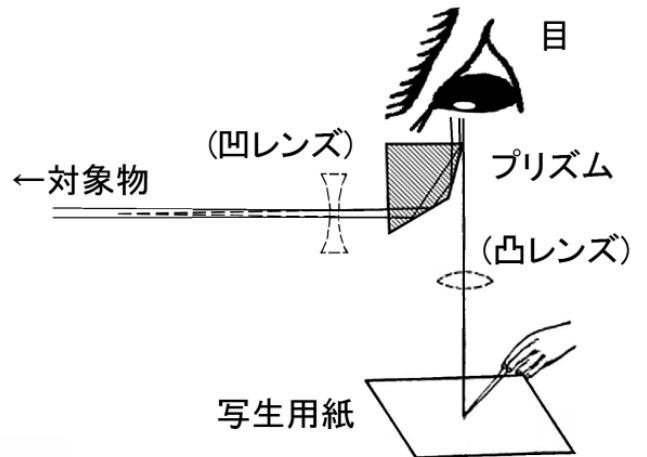


図3 カメラ・ルシダの光学系

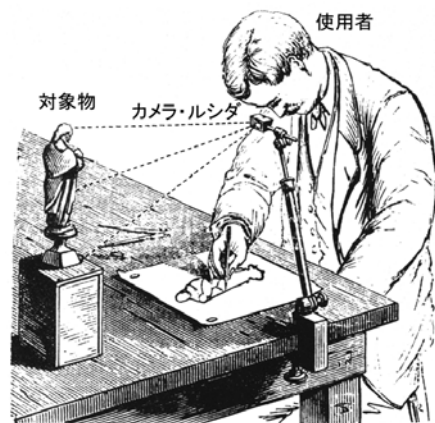


図4 カメラ・ルシダの使用状態

現在の HMD の一部の機種では、使用者の角膜の直前に光路を折り曲げるプリズムを配置し、前方視野の一部だけを覆う小型の表示装置を実現している。図 5 はその例^{1 2)}である。

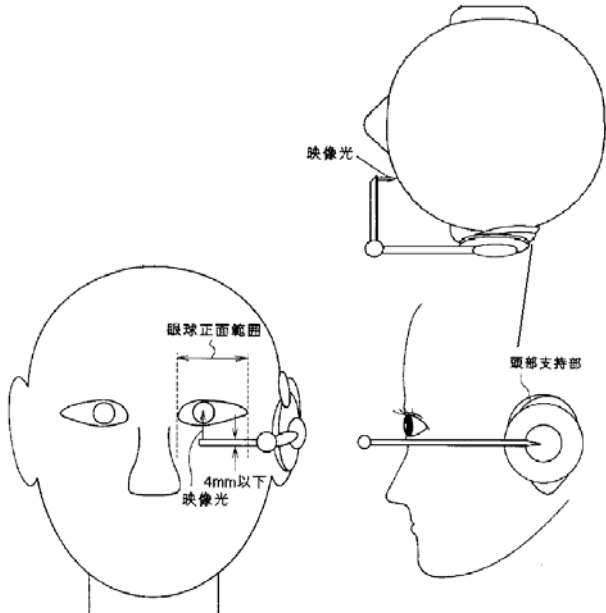


図 5 瞳分割方式の HMD^{1 2)}

3.3 ハーフミラーによる像の合成

目の前に置かれた実物に、仮想的な像を重ねる欲求は古くからあるが、興行・ビジネスとして著名なのが、「ペッパーズ・ゴースト」である。図 6 は、1863 年からイギリスで始まった「幽霊舞台」の様子^{1 3)}である。舞台の上の役者が剣を振り回しても、半透明の幽霊の体を通り抜けるだけである。図 7 は、その光学系のしかけを説明した図^{1 3)}である。



図 6 ペッパーズ・ゴースト
(ハーフミラー合成の舞台, 1863 年)



図 7 ペッパーズ・ゴーストのしかけ

HMD においては、使用者の前方の物体あるいは光景と表示を重ねるためにハーフミラーは多く用いられている。図 8^{1 4)}で、表示器からの光束は凸レンズを通った後、ハーフミラーを透過し、凹面鏡で反射されて再度ハーフミラーに入射し、反射された光束は使用者の目に入射する。この光学系では、表示に用いる光束がハーフミラーによる透過と反射を経ることから利用できる光量が 1/4 以下となる欠点があるが、光軸上に配置された凹面鏡の働きで、高解像力の拡大遠方表示が達成される。また光学系を折り曲げていることで、小型軽量の表示光学系を実現している。

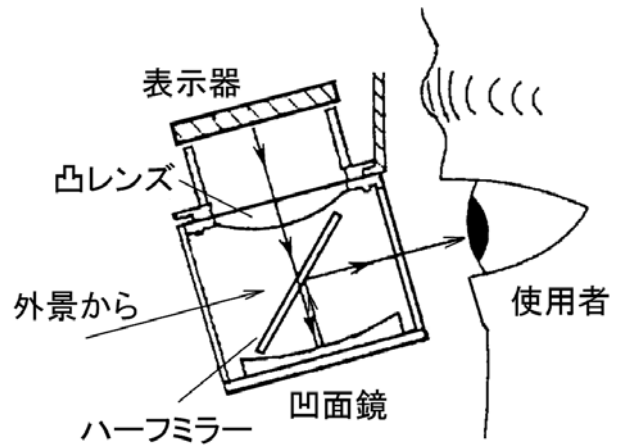


図 8 ハーフミラーを用いる HMD の光学系

3.4 ビデオシースルー方式の HMD

ビデオシースルー方式では、目前に置かれた物体に 3D-CG により描画する仮想物体を重ねる。CG 描画に際する基準点としては、物体上に描いたマーカーあるいは物体の像を用いる。ビデオ信号上で外景の像と仮想部隊を重ねるため、相互の 3 次元の位置関係がきちんと保た

れる、不透明の像を重ねることができるという利点がある。写真2は、ビデオシースルー方式のHMDを装着している状態、図9は、製品に使用されている光学系¹⁾⁵⁾である。使用者の目の位置が移動しても物体と仮想物体の位置関係を正確に保つため、撮像光学系のレンズ位置は正確に、使用者の目と合わせて配置している。撮像素子からの像の信号には3D-CGによる像と重ねられ、表示される。図9では、表示器からの光束は自由曲面プリズムに入射し、遠方への拡大表示が行われる。



写真2 ビデオシースルー方式HMDの使用状態 (写真提供：キヤノン(株) 2010年10月)

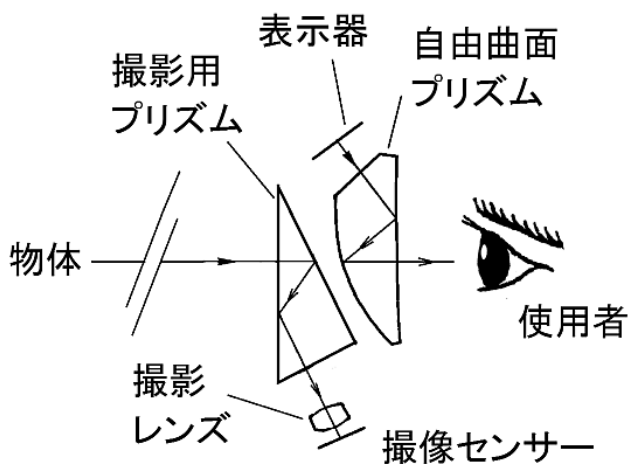


図9 ビデオシースルー方式HMDの光学系

4 視覚光学系に関して注意が必要な事項

HMDの技術を正確に理解し、適切に使いこなすためには、レンズ、プリズムなどの結像光学と、特有の性質を持った視覚光学系に対する知識が不可欠である。ところが専門家でない方

にHMDの技術を説明して理解していただこうとすると、数々の困難に直面する。一般の方が手軽に知識を得ようとした際に、書店に並んでいる書物を頼ろうとするのは自然であるが、視覚光学系では、特定の技術要素について、間違った情報、あるいは不適切な方向に初学者を導く情報が大変多い。

間違い方は様々で、一つずつ取り上げるのは不適切であるので、まず正確な眼球光学系の結像の図を図10に示し、続いて代表的な不適切な例を図11に示す。図10は、1637年に出版されたデカルトの著書「屈折光学」に収められている図である。光軸上の点から発する光線は空气中を直進、角膜の第1面で屈折され、瞳を通して網膜上に結像する。一方光軸外に置かれた点(軸外物点)からの光線も同様に屈折率が異なる各境界面で屈折した後に網膜に到達する。この軸外物点の結像は、目の前に広がる光景を目にする場合にも、カメラにおいてある撮影画角を持った撮影レンズで撮影を行う場合にも同一の作図が行える。ところが多くの解説では物体を瞳と同じ大きさに描いている。ところが結像光学において光線の直進と屈折は「図式算法」になっているため、直径3mmの物体についての結像を説明する図となってしまっている。また眼球の水平断面図を、垂直に配置されているように間違っ説明している例も多い。

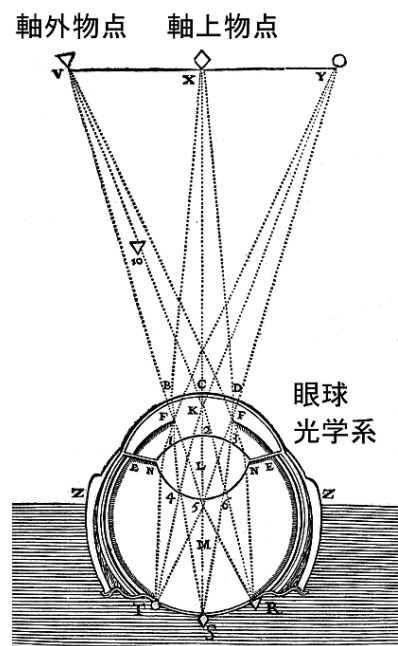


図10 眼球における結像の正確な図 (デカルト, 1637年)

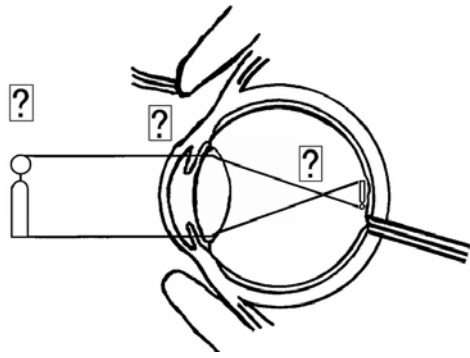


図 11 間違いがある眼球の図の例

表 4 視覚光学系に関する間違っただあるいは不適切な記述と正しい記述

間違っただあるいは不適切な記述	正しい記述
水晶体はカメラのレンズに対応する。	結像レンズとしての屈折力（レンズとしての働き）の 70%は角膜第 1 面が分担，残りを水晶体が分担している。
瞳の大きさの変化で光量調節が行われる。	物が見える明るさの範囲は 1 : 1,000,000 に及び，瞳による光量調節の寄与は 1 : 10 以下である。
眼球光学系は垂直断面で表される。	通常見かける断面図は眼球の水平断面図で左右方向の座標として「鼻側」と「耳側」となり，右眼と左眼は左右対称である。
2 次元の範囲の視野が一度に見える。	視力が良いのは視野中心部の狭い範囲だけで，周辺は脳内情報処理で補完されている。
視野全体がフルカラーで見える	視野の周辺では明暗しか分からず，RGB の 3 色が見えるのは視野の中心だけである。
網膜は撮像素子に対応する。	対応は正しいが，光検知部は眼球の外側を向いていて血管や神経の影が網膜に映っている。
眼球光学系には色収差が無く，色滲みが見えない。	眼球光学系は色収差が補正されておらず，色の像のボケは脳内情報処理で補正されている。
物体を瞳と同じ大きさに描く。	レンズの結像の図は正確な図式算法なので瞳と同じ大きさの物体は直径 7 mm 以下の物体に相当する。物体からの光束のほとんどは，目に大きな角度で入射する。

日常目にする，眼球光学系と結像に関する間違っただあるいは不適切な記述を表 4 に示す。

5 種々の HMD の光学系との対比

5.1 ライトフィールド技術を用いる HMD

HMD の光学系として提案され，使用されている技術は多岐に及び，限定されたスペースではとても全部説明しつくすことは不可能である。以下では，特異な光学系を取り上げる。

図 12 は，ライトフィールド技術を用いて，薄型ながら大画面で目の焦点調節も満足させる HMD を構成している例¹⁶⁾である。マイクロレンズアレイと，その背後に配置された表示器により，多くの進行方向と強度・色を持った光線束が作り出され，使用者の目に入射する。

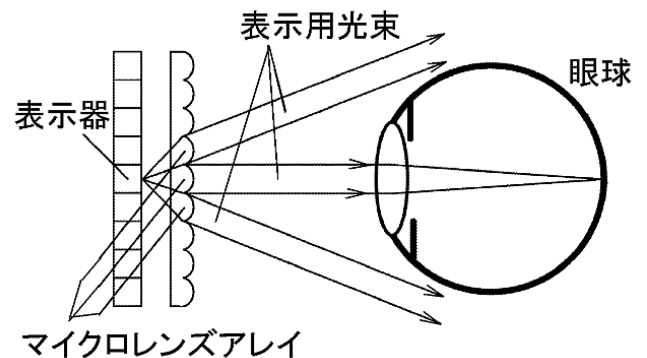


図 12 ライトフィールド技術を用いる HMD の光学系

5.2 プリズムブロックを用いる HMD

HMD では，プリズムブロックとハーフミラーを用いる光学系においても，技巧的な光学設計が採用されている。図 13 では，平行平板のブロックの中を，ほぼ平行な光束が表裏面で全反射を繰り返して伝送され，薄型の光学系を構成している⁷⁾。この図で，右側の視野では 7 回反射の光学系となっているが，左側は 5 回反射となっていて，レンズの口径を小型化し，光学系を薄型化している。

5.3 ホログラム光学素子を用いる HMD

これまでに取り上げた光学素子の範疇に入らないものとしてホログラム光学素子がある。図 14 は，使用者の目の直前に拡大レンズの効果を持つホログラム光学素子（ホログラムレンズ）を配置した HMD の製品例である（コニカミノルタ¹⁷⁾カタログより）。ここでは，体積位相型で反射型のホログラムレンズを R,G,B の 3 本の単色光に対応して作成，配置している。

液晶パネルのバックライト照明光は高い利用効率で使用者の目に到達し、一方外光の損失は、狭い波長領域に限られるので明るさを損ねることが少ない。

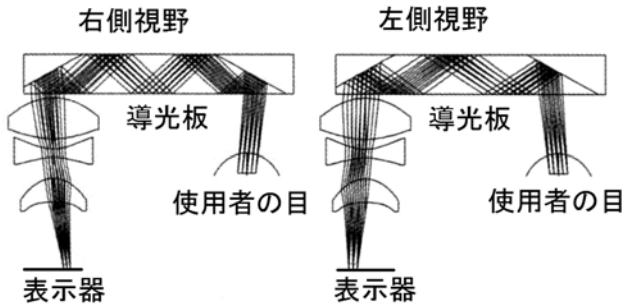


図 13 プリズムブロックで構成された HMD 光学系

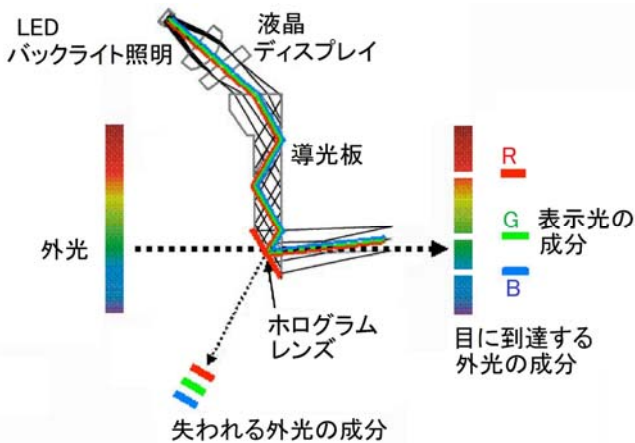


図 14 ホログラム光学素子(ホログラムレンズ)を用いる HMD の光学特性の説明図

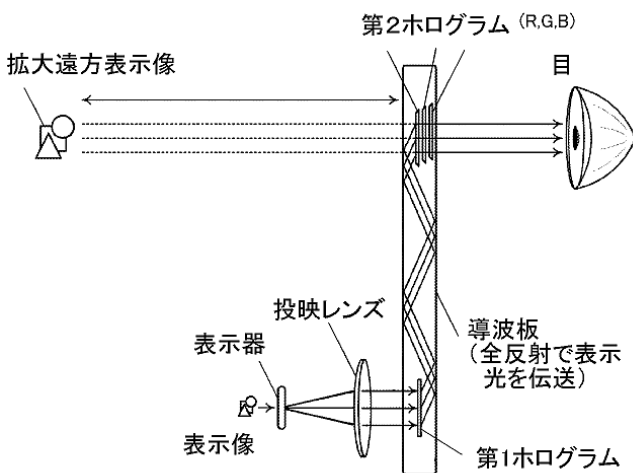


図 15 直線ホログラム回折格子を用いる HMD の光学系

5. 4 直線ホログラム格子を用いる HMD

ホログラム光学素子の使いこなしとして、直線ホログラム格子を用いる HMD が各種制作されている。図 15¹⁷⁾で、表示器からの光束は第一のホログラムにより回折されて平行平板の導光板に入射して伝搬し、第2のホログラム格子により回折されて空气中に射出し、使用者の目に入射する。この光学系では、これまでに上げたハーフミラー面あるいはホログラム光学素子を用いる場合と異なり、光軸に対して斜設した面が不要であり、生産上の利点がある。

5. 5 網膜走査方式の HMD

2次元の像を結像する以外の方式を用いる HMD も製品化されている¹⁸⁾。図 16で、強度変調された半導体レーザからの光は、光ファイバーを介して HMD 装置に導かれる。光ファイバー端面から射出する光束は、集光光学系と走査ミラーを介して使用者の瞳上に入射し、網膜上に作り出された光スポットは2次元に走査される。ここでは網膜の残像効果により、2次元像の表示が実現される。ここで用いるレーザ光は細い光束のため、使用者が近視あるいは遠視であってもピンボケを生じない。また白内障などの使用者でも、水晶体の一部分が障害を生じていない場合には、十分な視力を与える像の表示が可能となるという利点を持っている。

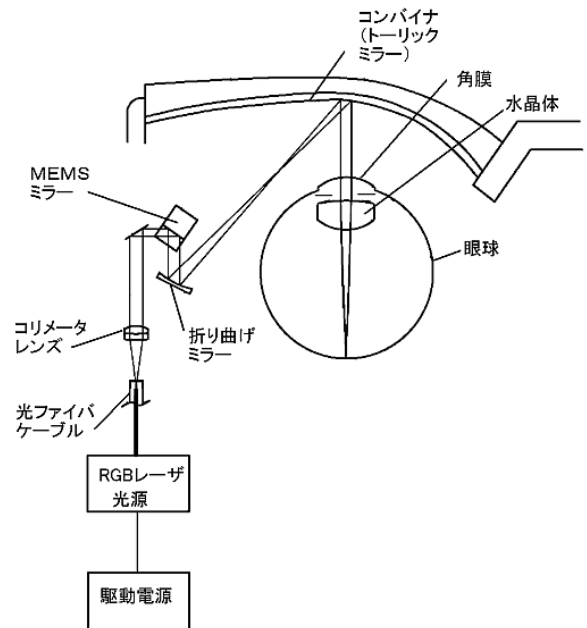


図 16 網膜走査方式 HMD の光学系

6 まとめ

HMD について、用語と分類を解説し、基本的な光学系、構成を歴史的な光学系と対比させて解説した。また、結像光学系と視覚光学系に関する知識として注意すべき事柄を指摘し、HMD 特有の特異な光学系を解説した。

HMD に関する情報は大量に流通しているが、本報告で触れた歴史的な光学系に対する知識と、結像光学系と視覚光学系に関する注意すべき項目を元に、正しい理解を深めていただければ幸いである。

文 献

- 1) KDDI ICT 用語辞典 ,
<http://time-space.kddi.com/ict-keywords/kaisetsu/20160421/index.html> (2016年4月21日更新)
- 2) DRONE DIY,
<http://www.dronedi.jp/2016/01/2016-vr-htc-oculus-razer.html> (2016年9月26日更新)
- 3) DRONE DIY,
<http://www.dronedi.jp/2016/05/ar-hmd-holoLenses-magicleap.html> (2016年5月5日更新)
- 4) 日本光学会 光設計研究グループ第 60 回研究会, 「バーチャルリアリティとウェアラブル」, (2016年10月21日)
- 5) 桑山哲郎 : 覗き眼鏡方式(HMDを含む); 「3次元映像ハンドブック」, 朝倉書店 pp.175 - 183 (2006).
- 6) 特集「ウェアラブル機器の現状と将来」, 光技術コンタクト, (一社) 日本オプトメカトロニクス協会 (2015年5月)
- 7) 小松朗: スマートグラスの開発, オプトロニクス, pp.93 - 98 (2016年 No. 4)
- 8) Wikipedia: “Optical hear-mounted display”
- 9) 鏡惟史: ヘッドマウントディスプレイ (HMD) 光学系の技術史; O plus E, Vol.37 (No.12), pp.990-998 (2015)
- 10) Ivan E. Sutherland, A Head Mounted Three Dimensional Display, Proceeding AFIPS'68 (Fall Part I), pp. 757-764 (1968)
- 11) 坂根厳夫, 「美の座標」, みすず書房(1973).
- 12) 特許 第4766913号 (2005年5月10日出願).
- 13) L. de Vries 著: 本田 成親 訳, 「ヴィクトリアン・インベンション - 19世紀の発明家たち」, シグマ (1977)
- 14) U.S. Patent 5,844,530, (優先権主張日, 1994年12月9日, 日本)
- 15) キヤノン(株)編: “The Canon Frontier 2016”,

pp. 28 (キヤノン株式会社)

- 16) U.S. Patent 公開 US 2013/0285885 A1 (2012年12月19日出願)
- 17) U.S. Patent 公開 US 2013/0285885 A1 (2012年12月19日出願).
- 18) 特許出願公開, 特開 2015-111231 (P2015-111231), (優先権主張日 2013年5月31日, 日本)

【2016年11月1日 CAVE 研究会資料 日本眼鏡学会年次大会 (2016年5月25日) 講演資料に加筆】