

シースルーディスプレイ用光学系の基礎

吉川 浩

日本大学理工学部応用情報工学科

E-mail: yoshikawa.hiroshi@nihon-u.ac.jp

1 はじめに

最近, 仮想現実 (VR: Virtual Reality) 用のヘッドマウントディスプレイ (HMD) の低価格化が進み, 個人がゲームなどを手軽に楽しめるようになった. また, 拡張現実 (AR: Augmented Reality), あるいは混合現実 (MR: Mixed Reality) と呼ばれる, 現実世界に文字情報や図形, コンピュータグラフィクスなどを重畳して表示するためのデバイスも数多く発売されている. 以下では, AR と MR を総称して MR と記す.

本稿では, マイクロソフト社の Hololens など光学シースルー方式の MR デバイスの光学系について基本となる事項を概説する. 筆者は3次元表示のためのホログラフィに関し, 計算機での高速生成などについて長年研究を行ってきた [1]. その計算結果を表示して観察するために, ホログラム専用のプリンタ [2] や実時間表示のための音響光学素子や液晶パネルを用いたビデオディスプレイ [3] についても研究を行ってきた. しかし, 本稿で紹介する MR デバイスについて専門に研究をしていた訳ではないので, 詳細な解説は無理であることをあらかじめご了承ください. 本稿執筆にあたっては, マイクロソフト社の Hololens シリーズの開発者によるレビュー論文 [4] を参考にし, 筆者の理解や知識により補足を行っている. 文献 [4] は 34 ページにわたり詳細なレビューが展開され, クリエーティブ・コモンズ・ライセンスにより転載等は自由と明記されているので, 本稿でも出典を示して図版等を引用している. また, 最近の技術動向や将来に向けた視覚拡張については, 電子情報通信学会の招待論文も参考になる [5].

2 光学系の基礎

2.1 VR 用 HMD の光学系

図 1 に VR 用 HMD の光学系を示す. 接眼レンズによりディスプレイの虚像をつくることで, 小さなディスプレイでも広視野の大画面が実現できる. 図中の補助線は, レンズの中心及びレンズ手前の焦点に対する実際の光路 (実線) と見かけの光路 (破線) を示している. この光学系は拡大鏡 (ルーペ) による像の観察と同一である. また, 図 1 は単眼用であるが, これを両眼用にして左右それぞれのディスプレイに対応する視点からの映像を表示すれば立体表示が可

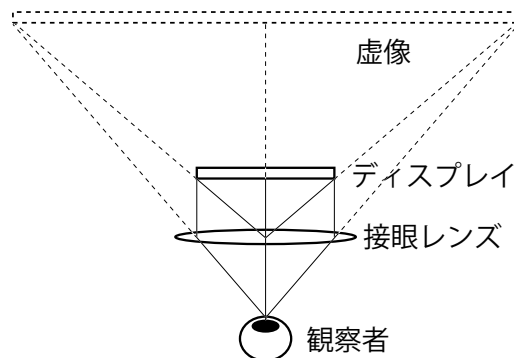


図 1: VR 向き接眼ディスプレイ

能で, Brewster [6] のステレオスコープがまさにこれに当たる.

観察者が像を見込む角度を視野 (角) と呼ぶ. 図 1 では観察者の瞳は接眼レンズの焦点にあるが, この場合は接眼レンズの径と焦点距離が視野の最大値を決める. また, 虚像全体を正しく観察できる範囲をアイボックス (光学では射出瞳) と呼ぶ. 観察者の瞳が焦点位置より後方, または上下左右に移動した場合は虚像の一部が見えなくなるので, アイボックスから外れることとなる. 瞳が接眼レンズに接近した場合は, 上下左右に多少ずれても虚像は観察可能だが, レンズに接した場合はアイボックスはレンズ径の範囲に限られる. 視野とアイボックスはともに大きいことが理想だが, 一般には相反する. 例えば, 接眼レンズの径が一定の場合, 焦点距離を短くすると視野は大きくできるが, 観察可能な範囲, すなわちアイボックスは小さくなる.

2.2 光学シースルー MR デバイスの光学系

図 1 のディスプレイにカメラで撮影した現実世界の映像を重畳すれば, ビデオシースルー方式の MR デバイスが実現できる. それに対して, 肉眼で観察している現実世界に文字や画像を光学的に重畳する光学シースルー方式では, 仮にディスプレイが透明だとしても, 接眼レンズを通して現実世界を観察することになるため図 1 の光学系をそのまま適用することはできない. ディ스플레이部を肉眼の視界を邪魔しない場所に配置し, そこからの光を何らかの仕掛けで伝搬させて瞳に入射する光に合成する必要がある. 簡単な方法として, 瞳の前にハーフミラーを置くことが考えられる. 本稿の説明では以後も光の一部を反射する鏡を

Holographic coupler waveguide combiners	Grating couplers waveguide combiners	Partial mirrors waveguide combiners
<p>United States Patent [19] Upatnick</p> <p>[11] Patent Number: 4,711,512 [45] Date of Patent: Dec. 8, 1987</p> <p>[54] COMPACT HEAD-UP DISPLAY [75] Inventor: Jaris Upatnick, Ann Arbor, Mich. [73] Assignor: Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Mich.</p> <p>[21] Appl. No.: 754,496 [22] Filed: Jul. 12, 1985 [51] Int. Cl.: G02B 5/32; G02B 27/10 [52] U.S. Cl.: 350/3.7; 350/174 [53] Field of Search: 350/176, 3.7 [56] References Cited U.S. PATENT DOCUMENTS 4,309,070 1/1982 St. Leger Seattle 350/3.7</p> <p>[11] Patent Number: 4,711,512 [45] Date of Patent: Dec. 8, 1987</p> <p>[57] ABSTRACT A compact head-up display comprising a combiner which combines light energy from an outside view with light energy transmitted within the combiner and diffracted out by means of an upper diffraction grating. The head-up display disclosed further comprises an image source, a collimating lens, and a lower diffraction grating for diffracting the collimated light energy into the combiner.</p> <p>8 Claims, 5 Drawing Figures</p>	<p>United States Patent [19] Mitzel</p> <p>[11] Patent Number: 5,076,664 [45] Date of Patent: Dec. 31, 1991</p> <p>[54] OFFICAL DEVICE ENABLING THE INTRODUCTION OF A COLLATED IMAGE IN AN OBSERVER'S FIELD OF VISION [75] Inventor: Jean-Benoit Migault, Orsay, France [73] Assignee: Thomson-CSF, Fontenay, France [21] Appl. No.: 824,841 [22] Filed: May 15, 1990 [51] Int. Cl.: G02B 27/10; G02B 27/14 [52] U.S. Cl.: 350/420 [53] Field of Search: 350/176, 177 [56] References Cited U.S. PATENT DOCUMENTS 4,098,841 1/1979 Ede 4,361,342 12/1981 Bowman 4,712,211 10/1991 Upatnick 350/174</p> <p>FOREIGN PATENT DOCUMENTS 202285 12/1979 United Kingdom Primary Examiner—Jim W. Henry Attorney, Agent, or Firm—Crison, Spruill, McClelland, Moore & Nunnally</p> <p>[57] ABSTRACT Disclosed is an optical device designed to enable an observer to look simultaneously at what is normally in his field of vision and at a collimated image introduced so as to be superimposed on his field of vision, by total reflection in a strip which parallel faces forming an optical guide. This introduction of a superimposed image is done by means of successive parallel semi-reflecting panels positioned in the strip and treated so as to be reflective at angles of incidence that get ever smaller with distance from the generator that gives the image. The resulting scene is seen, by transparency, through the panels. The device especially concerns helmets for pilots in the field of aeronautics.</p> <p>3 Claims, 2 Drawing Sheets</p>	<p>United States Patent [19] Mitzel</p> <p>[11] Patent Number: 5,076,664 [45] Date of Patent: Dec. 31, 1991</p> <p>[54] OFFICAL DEVICE ENABLING THE INTRODUCTION OF A COLLATED IMAGE IN AN OBSERVER'S FIELD OF VISION [75] Inventor: Jean-Benoit Migault, Orsay, France [73] Assignee: Thomson-CSF, Fontenay, France [21] Appl. No.: 824,841 [22] Filed: May 15, 1990 [51] Int. Cl.: G02B 27/10; G02B 27/14 [52] U.S. Cl.: 350/420 [53] Field of Search: 350/176, 177 [56] References Cited U.S. PATENT DOCUMENTS 4,098,841 1/1979 Ede 4,361,342 12/1981 Bowman 4,712,211 10/1991 Upatnick 350/174</p> <p>FOREIGN PATENT DOCUMENTS 202285 12/1979 United Kingdom Primary Examiner—Jim W. Henry Attorney, Agent, or Firm—Crison, Spruill, McClelland, Moore & Nunnally</p> <p>[57] ABSTRACT Disclosed is an optical device designed to enable an observer to look simultaneously at what is normally in his field of vision and at a collimated image introduced so as to be superimposed on his field of vision, by total reflection in a strip which parallel faces forming an optical guide. This introduction of a superimposed image is done by means of successive parallel semi-reflecting panels positioned in the strip and treated so as to be reflective at angles of incidence that get ever smaller with distance from the generator that gives the image. The resulting scene is seen, by transparency, through the panels. The device especially concerns helmets for pilots in the field of aeronautics.</p> <p>3 Claims, 2 Drawing Sheets</p>

図 2: 文献 [4] の Fig. 5 から転載した HUD 用導光板コンバイナの米国の特許文書. (左) ホログラフィック (図中のキャプションでは回折格子). (中) 回折格子列. (右) ハーフミラー列.

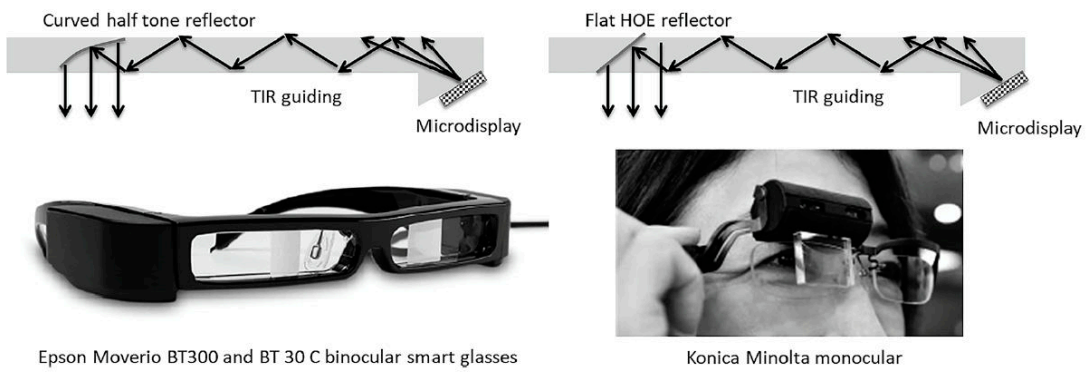


図 3: 文献 [4] の Fig. 7 から転載した平面導光板コンバイナの例. (左) 入射側にプリズム, 出射側に曲面ハーフミラーを用いたエプソン社の Moverio BT300. (右) 入射側にプリズム, 出射側に平面 HOE(ホログラフィック光学素子)を用いたコニカミノルタ社の単眼デバイス.

「ハーフミラー」と記述するが、必ずしも反射率が 50%とは限らないことをお断りしておく。このハーフミラーの反射率が高いと現実世界が暗くなってしまい、低くすると重畳する映像が暗くなってしまう。また、映像の視野が狭くてもよければ接眼レンズの焦点距離を長くとることができ、焦点距離がディスプレイ部から瞳までの距離より長ければハーフミラー等の光を反射あるいは屈折・回折させるだけの仕掛けで十分あるが、視野を広く取りたい場合は何らかの工夫が必要となる。

ディスプレイ部から観察者の瞳の手前までの光の伝搬には、平板または曲面状の透明な導光板内の全反射を利用する方式が広く用いられている。この考え方は 1970 年代から航空機などのヘッドアップディスプレイ (HUD) 用として検討されている。図 2 に文献 [4] の Fig. 5 から転載した HUD 用導光板コンバイナの米国の特許文書を示す。導光板内を光が全反射して伝搬する点は共通しているが、導光

板への光の入射と導光板からの光の出射方法に違いがある。左の図は入射と出射にホログラフィック光学素子 (HOE) を用いた例として紹介されているが、図中の記述では回折格子 (Grating) と示されている。いずれにしても、回折して導光板内に入射した光の伝搬角が外部との境界面での臨界角より大きくなれば、全反射により導光板内を伝わっていく。出射側ではこの逆に回折光の角度が臨界角以下になり外部に光が出る。中央の図は、回折格子を使用した例であるが、出射側に 2 つの回折格子を用いている。最初の回折格子の回折効率を 50% として半分の光を出射させ、2 番目の回折効率を 100% として残り半分の光を出射させる。その目的は、像が観察可能な範囲を拡大するためであるが、副作用として像の明るさが半分になる。このような観察域の拡大は MR デバイスでもアイボックスの拡大として行われている。HOE あるいは回折格子には多くの種類がありそれぞれに特徴があるが、例えばある程度厚みのあるホロ

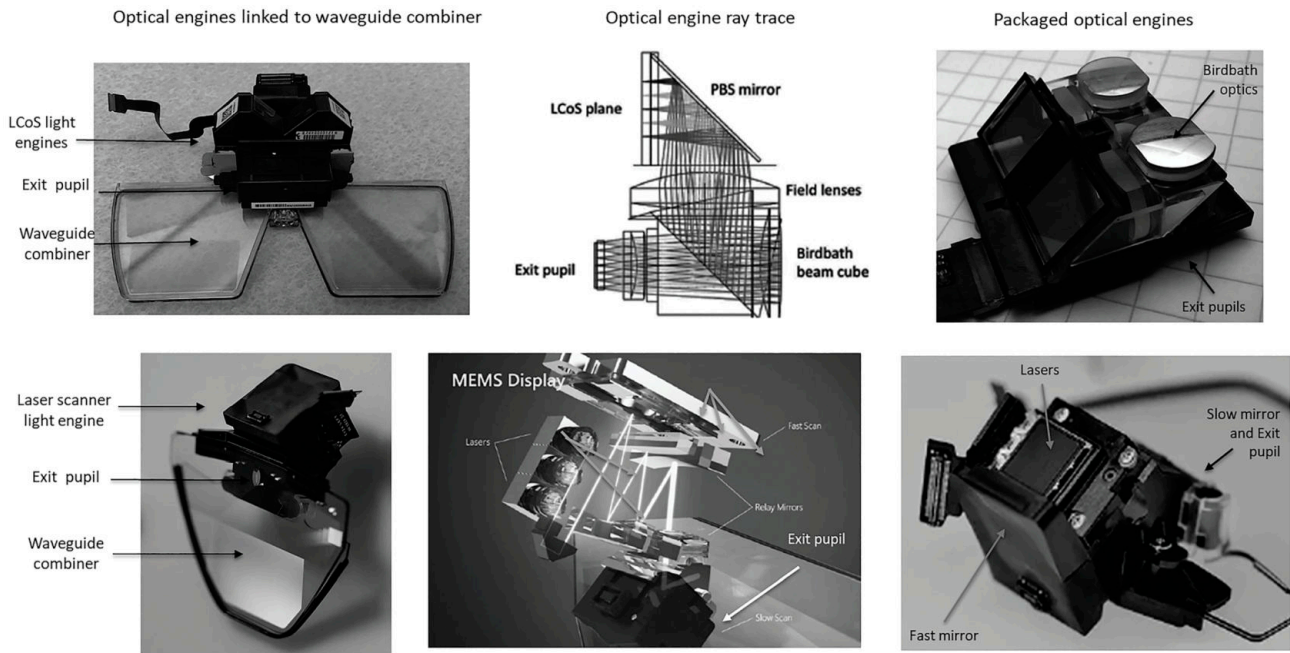


図 4: 文献 [4] の Fig. 4 から転載した HoloLens(上段) および HoloLens 2(下段) の内部構成. どちらも左がディスプレイ部と導光板コンバイナの外観写真, 中央がディスプレイ部の光学系, 右がディスプレイ部の外観写真である.

グラムの場合は波長選択性が強くなり, 特定の波長帯の光は強く回折するが, それ以外の光に対しては透明となるために現実世界の光が透過した際の影響を少なく抑えることができる. ホログラムが「厚い」というのは, 記録材料が干渉縞の周期よりも十分に厚いという意味であり, 条件次第では $10\ \mu\text{m}$ でも厚いとみなせる. これとは逆に, 「薄い」ホログラムの場合は波長により回折角が変化するためディスプレイ部に波長帯域の広い光源やフルカラーとする場合にはそれを考慮した設計が必要となる. 右の図は, ディスプレイ部からの光を導光板の端面から角度をつけて入射させ, 出射には複数のハーフミラーを用いて観察域を拡大している. 右の図の構成では入射側に空隙があるため空気と導光板の屈折率の違いにより光の一部が反射してしまうので, 空隙をなくすためにプリズムを使用することが多い.

MR デバイスの例として, 図 3 に文献 [4] の Fig. 7 から転載した平面導光板コンバイナの例を示す. 導光板への入射光に角度をつけるためにいずれもプリズムを用いているが, 出射側は左が曲面ハーフミラーで, 右は HOE を用いている.

マイクロソフト社の HoloLens および HoloLens 2 では, その製品名称のとおり HOE を用いている印象を与えるが, どちらも表面レリーフ回折格子と導光板を組み合わせた構成となっている. 図 4 に文献 [4] の Fig. 4 から転載した HoloLens および HoloLens 2 の内部構造を示す. ディスプレイ部には, HoloLens が LCOS(liquid crystal on silicon), HoloLens 2 はレーザースキャンディスプレイを使用している. ちなみにマジックリーブ社の Magic Leap One も回折格子を使用しているが, 入射側は金属コートのブレード

回折格子で, 出射側は 2 値位相回折格子である. HOE を入射・出射に用いた方式としては, ソニー社が厚いホログラムである体積ホログラムを用いた方式の研究開発を行っている [7]. ところで, マイクロソフト社が HoloLens を発表したときにホログラムの研究者である筆者はその名称から関心を持って情報を収集したところ, 販促用のビデオで「HoloLens はリアルなホログラフィックイメージを表示します」という意味のことを言っていたのが用語の誤用だと憤慨したことがあった. ところが, これは誤用ではなく確信犯であることが文献 [4] の用語説明で明らかになった. 「ホログラム」の項目では, 「3 次元シーンの波面と参照波の干渉縞の記録であるが, AR/VR のフォーラムでは空間にホログラムのように現れる立体の虚像を指す」と解説されている. しかし, 同じマイクロソフト社の研究所では「本当の」ホログラム技術を用いた VR や MR 向けの接眼デバイスが研究されている [8].

2.3 アイボックスの拡大

先に述べたように, 観察者の瞳がアイボックスの内部に位置したときに重畳された虚像を正しく観察できる. 単眼式のデバイスなら, 像が正しく見える位置に装着すれば良いが, 両眼用のデバイスを複数人で使用する場合は両眼間の距離に個人差があるため, アイボックスの範囲が個人差をカバーしきれない場合は装着の都度眼間距離を調整する必要があり不便である. また, 同一人物が使用する場合でも, アイボックスが小さいとデバイスがずれたり視線を動かした場合に瞳の位置がアイボックスから外れる恐れがあ

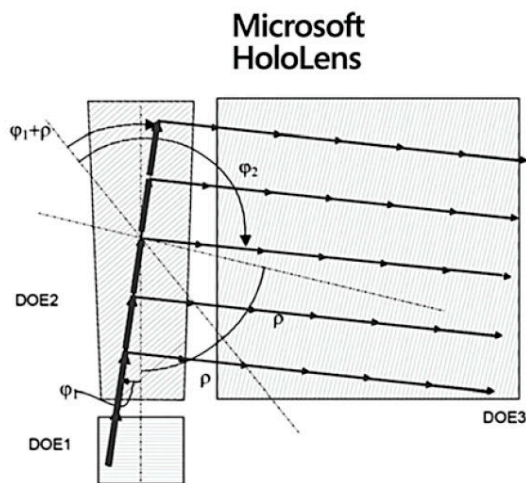


図 5: 文献 [4] の Fig. 9 から抜粋して転載した HoloLens のアイボックスの拡大. DOE は回折光学素子を表す.

る. そのような場合は, 図 2 の中央および右の図で説明したように, 導光板からの出射口を複数にすることでアイボックスを拡大する. アイボックスの拡大には 1 次元及び 2 次元の拡大があるが, 両眼間距離の個人差に対応する場合は最低限水平方向の 1 次元拡大でよい. 1 次元の拡大ならば, 図 2 の様に回折格子またはハーフミラーを一直線に並べて, 導光板内の光を徐々に外部に取り出せばよい. 2 次元に拡大する場合は, まず回折格子やハーフミラーなどにより導光板内の光の進行方向を徐々に直角に変えて, それぞれの光を 1 次元の拡大と同様に徐々に導光板の外に取り出せばよい. 図 5 に文献 [4] の Fig. 9 から抜粋して転載した HoloLens でのアイボックスの 2 次元拡大の図を示す. DOE とあるのは回折光学素子の事で, DOE1 でディスプレイ部からの光を導光板内に導入し, DOE2 で導光板内の光を徐々に方向転換させ, DOE3 で導光板外に徐々に光を取り出してアイボックスを多数複製している. HoloLens 2 では, 図 4 の左下の写真にあるように, DOE1 に相当する回折格子が導光板の上部中央に配置され, 導光板に入射した光を左右に回折させて, 左右それぞれでアイボックスを 2 次元に拡大している. 入射光を左右に分ける目的は虚像の視野の拡大である.

2.4 フルカラー化

プリズムやハーフミラーなど, 特性の波長依存性が低い場合は 1 枚の導光板コンバイナでフルカラーの MR デバイスが構成できる. HOE の場合も, 波長選択性の強い厚いホログラムの記録材料に, RGB の各波長で多重露光を行うと単板で構成可能だが, 多重露光による回折効率の低下は避けられない. 波長によって回折角が変化する薄いホログラムや回折格子の場合は, RGB の各波長ごとに導光板コンバイナを用意して重ねる必要があり, HoloLens ではこ

の方式を採用している. RGB のうち G と B は比較的波長が接近しているため, 同一特性を持つ回折格子を入射口と出射口に対称に配置することで波長による回折角の違いを補償する方法により 1 枚の導光板コンバイナで 2 波長用とする試みもある. 文献 [4] の Fig. 16 では, HoloLens 2 は 2 枚の導光板コンバイナと分類されているが, 技術の詳細は記述されていない.

3 むすび

本稿では, 光学シースルー MR デバイスの光学系のごく基本的な解説を, 主として文献 [4] の引用により行った. 本稿が多少なりとも読者の役に立てれば幸いである. より詳細な説明は参考文献を参照していただきたい.

参考文献

- [1] H. Yoshikawa, "Computer-Generated Holograms for White Light Reconstruction," in *Digital Holography and Three Dimensional Display*, T.-C. Poon, Ed. Springer, 2006, ch. 8, pp. 235–255.
- [2] H. Yoshikawa and T. Yamaguchi, "Review of Holographic Printers for Computer-Generated Holograms," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 12, no. 4, pp. 1584–1589, aug 2016. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7236904/>
- [3] 吉川浩, "レーザーホログラフィック立体ビデオディスプレイ," *レーザー研究*.
- [4] B. C. Kress and I. Chatterjee, "Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective," *Nanophotonics*, vol. 10, no. 1, pp. 41–74, oct 2020.
- [5] 清川清, "AR 用ヘッドマウントディスプレイの動向と視覚拡張への応用," *電子情報通信学会論文誌 C*, vol. J102-C, no. 5, pp. 170–178, 2019. [Online]. Available: <https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j102-c.5.170&category=C&year=2019&lang=J&abst=>
- [6] D. Brewster, *The Stereoscope; its History, Theory, and Construction, with its Application to the fine and useful Arts and to Education*. John Murray, 1856. [Online]. Available: <https://archive.org/details/stereoscopeitsh02brewgoog/>
- [7] 吉田, 阿久津, 松村, 中野, 桑原, 相木, and 武川, "ホログラム導光板を用いたシースルーメタネ型ディスプレイの開発," *HODIC Circular*, vol. 28, no. 4, pp. 6–11, 2008.
- [8] A. Maimone, A. Georgiou, and J. S. Kollin, "Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 36, no. 4, pp. 1–16, jul 2017. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3072959.3073624>