バーチャルリアリティ学ライブラリ 1

ヘッドマウントディスプレイ

日本バーチャルリアリティ学会 編
清川　清 編著

コロナ社

バーチャルリアリティ学ライブラリ出版委員会

委員長	清川　清	（奈良先端科学技術大学院大学，博士（工学））
副委員長	北崎 充晃	（豊橋技術科学大学，博士（学術））
委員	青山 一真	（群馬大学，博士（情報科学））
	山岡 潤一	（慶應義塾大学，博士（政策・メディア））
	嵯峨　智	（熊本大学，博士（情報理工学））
	吉元 俊輔	（大阪大学，博士（工学））

（2024 年 8 月現在）

編著者・著者一覧

編著者	清川　清	1 章，2 章，5 章，あとがき
著者	あるしおうね	3 章
	伊藤 勇太	4 章
	鳴海 拓志	6 章

刊行のことば

今日，バーチャルリアリティ（VR, virtual reality）は誰もが知り，多くの人々が使う技術となった。特に，ヘッドマウントディスプレイ（HMD, head mounted display）を用いたゲームやスマートフォン向けの 360° 動画などは広く普及しつつある。安価な HMD が普及し始めた 2016 年はいわゆる「VR 元年」などと呼ばれ，2020 年からのコロナ禍ではリモートで現実さながらの活動を支援する VR 技術にさらに注目が集まった。現在では，医療，建築，製造，教育，観光，コミュニケーション，エンタテインメント，アートなど，さまざまな分野で VR の活用が進んでいる。VR は私たちの社会生活に少しずつ，かつ確実に浸透しつつあり，今後はメタバースのような社会基盤の基幹技術としてさらに重要度を高めていくと考えられている。

The American Heritage Dictionary によれば，バーチャル（virtual）とは「みかけや形は現物そのものではないが，本質的あるいは効果としては現実であり現物であること」とされており，これがそのまま VR の定義を与える。端的に言えば，VR とは「現実のエッセンス」である。すなわち，VR は人間のありとあらゆる感覚や体験，その記録，再生，伝達，変調などに関わるものである。一般にイメージされやすい「HMD を用いたリアルな視覚体験」は，きわめて広範な VR のごく一部を表現しているにすぎない。

日本バーチャルリアリティ学会は，黎明期の VR を育んだ研究者が中心となって「VR 元年」のはるか 20 年前の 1996 年に発足した。以来，学問としての VR は計算機科学，システム科学，生体工学，医学，認知心理学，芸術などの総合科学としてユニークな体系を築いてきた。学会発足から 14 年後の 2010 年に刊行された『バーチャルリアリティ学』は，当時の気鋭の研究者が総力を挙げて執筆したものである。同書では，VR の基礎から応用までを幅広く取り

扱っている。「トピックや研究事例は最新のものではないが，本質的あるいは効果としてはVRを学ぶこと」ができ，時代によって色褪せることのない「VRのエッセンス」が詰まっている。しかしながら，近年のVRの進展はあまりにも目覚ましく，『バーチャルリアリティ学』を補完し，最新のトピックや研究事例をより深く取り扱う書籍への要望が高まっていた。

「バーチャルリアリティ学ライブラリ」はそのような要望に応えることを目的として企画された。『バーチャルリアリティ学』のようにさまざまなトピックをコンパクトに一括して取り扱うのではなく，分冊ごとに特定のトピックについてより深く取り扱うスタイルとした。これにより，急速に発展し続けるVRの広範で詳細な内容をタイムリーかつ継続的に提供するという難題を，ある程度同時に解決することを意図している。今後，バーチャルリアリティ学ライブラリ出版委員会が選定したさまざまなテーマについて，そのテーマを代表する研究者に執筆いただいた分冊を順次刊行していく予定である。

くしくも『バーチャルリアリティ学』の刊行からちょうど再び14年が経過した2024年に，委員や著者，また学会の協力を得て「バーチャルリアリティ学ライブラリ」の刊行を開始できる運びとなった。今後さらにVR分野が発展していく様をリアルタイムで理解する一助となり，VRに携わるすべての人々の羅針盤となることを願う。

2024年1月

清川　清

ま　え　が　き

ヘッドマウントディスプレイ（HMD, head mounted display）は，バーチャルリアリティ（VR, virtual reality）や拡張現実感（AR, augmented reality）を実現するための代表的なデバイスである。HMD によって，コンピュータグラフィクスや実写の映像をあたかも空間の一部であるかのようにユーザーの視界に提示することができる。視覚は人間の情報入力の 8 割を占めるといわれており，HMD は VR や AR のユーザー体験を大きく左右する重要なデバイスといえる。HMD にはスマートフォンをはじめとする他の視覚ディスプレイにはない特徴がある。まず，HMD はユーザーの頭部に固定され視界に直接働き掛けるデバイスであり，本質的に VR や AR との相性が良い。また，HMD は個人向けであり，他人の視界に影響を与えたり覗き込まれたりする心配がない。さらに，装着型でハンズフリーのため，利用場所の制約が少なく，広範囲に利用できる。

HMD は 1960 年代の登場後，大きな注目を集めるサイクルを何度か繰り返してきた。90 年代前半のブームを経て，現在再び HMD に大きな注目が集まっている。2010 年頃までは，民生用 HMD の多くは，あくまでも映画などの既存の映像コンテンツを手軽に楽しむ「パーソナルテレビ」的な用途を想定していた。2010 年代半ばから，VR 用の HMD が Oculus VR 社（当時）や HTC 社などから，また，AR 用の HMD が Microsoft 社や Magic Leap 社などから次々に登場し，現在に至るまで活況を呈している。

一定のクオリティの VR や AR が身近になってきた一方で，近年は HMD の新製品や新サービスがさらに続々と登場し，学術界においても HMD の研究開発が右肩上がりに増えている。多種多様な HMD は，それぞれ何が異なるのだろうか。特定の用途に最適な HMD は，どのような基準で選択すればよいのだ

ろうか。HMD の性能や機能はどのように進化し，どこに向かおうとしているのだろうか。HMD が進化することで，われわれの生活や社会はどのように変化するのだろうか。本書は，こうした疑問に答えるべく，HMD の概要や歴史，典型的な光学系から最新の研究開発事例，さらには生活や社会の未来像まで，HMD に関する話題を網羅的に取り上げた初めての書籍である。

本書では，まず 1 章で HMD の定義や概要について述べ，大まかな分類や用途について説明する。また，これまでの HMD の発展の歴史を振り返る。2 章では，人間の視覚機能について述べる。HMD の性能や機能は，人間の視覚機能と照らし合わせて理解する必要がある。具体的には，眼の構造や視機能，奥行き知覚などについて説明する。3 章では，典型的な HMD の光学系について述べる。古典的な光学系から近年注目されている新しい光学系まで，多様な光学系の特徴をそれぞれの実例を交えて紹介する。4 章では，より先進的な特徴や機能を備えた HMD の研究開発の最新事例を紹介する。「最新」事例はいずれ陳腐化するが，これらを紹介することで普遍的な HMD 進化のベクトルが浮き彫りになることを狙っている。5 章では，HMD を用いて人間の視覚機能を自由自在に編集するさまざまな試みについて述べる。特に，視知覚の困りごとを解決する視覚補正・矯正の試みと，人間拡張の観点からより柔軟に視覚機能を再設計する視覚拡張の試みを紹介する。6 章では，視覚以外のさまざまな感覚を提示するマルチモーダル（多感覚）HMD について取り上げる。あとがきでは，本書全体を振り返り，HMD の進化によって切り拓かれる生活や社会の未来像に思いを馳せる。

本書を通じてエキサイティングな HMD の世界を感じ取っていただけたなら，執筆陣としてこれほどの喜びはない。

2024 年 8 月

清川　清

目　　次

第 1 章　ヘッドマウントディスプレイの概要

1.1　ヘッドマウントディスプレイの歴史 …… 1
1.1.1　ヘッドマウントディスプレイの先史時代　2
1.1.2　ヘッドマウントディスプレイの誕生　4
1.1.3　ヘッドマウントディスプレイの黎明期　7
1.1.4　ヘッドマウントディスプレイの普及期　10
1.2　さまざまなヘッドマウントディスプレイ …… 12
1.2.1　VR 用ディスプレイとしての HMD　12
1.2.2　AR 用ディスプレイとしての HMD　15
1.2.3　透過性と映像チャネル数による分類　17
1.2.4　多様なヘッドマウントディスプレイの必要性　21

第 2 章　人 間 の 視 覚

2.1　眼　の　構　造 …… 23
2.1.1　眼球と外眼筋　24
2.1.2　角　膜　25
2.1.3　虹彩と瞳孔　26
2.1.4　水　晶　体　26
2.1.5　網　膜　27
2.1.6　視　細　胞　29

2.2 視 機 能 ····· 30
2.2.1 視 力 30
2.2.2 視 野 31
2.2.3 色 覚 33
2.2.4 光 覚 34
2.2.5 調 節 35
2.2.6 眼 球 運 動 36
2.3 奥 行 き 知 覚 ····· 38
2.3.1 単眼性の手がかり 38
2.3.2 両眼性の手がかり 39
2.3.3 奥 行 き 感 度 40

第 3 章 ヘッドマウントディスプレイの光学系

3.1 屈 折 型 ····· 42
3.1.1 視距離と視野角 43
3.1.2 アイボックス 45
3.1.3 接 眼 レ ン ズ 47
3.2 反 射 屈 折 型 ····· 50
3.2.1 平面ハーフミラー型 50
3.2.2 Bird Bath 型 51
3.2.3 曲 面 ミ ラ ー 型 52
3.3 自由曲面プリズム型 ····· 53
3.4 ウェーブガイド型 ····· 55
3.4.1 曲面ハーフミラーによるコンバイナ 55
3.4.2 HOE/DOE によるコンバイナ 56
3.4.3 EPE 光 学 系 58

3.4.4　LOE 光 学 系　60
3.4.5　ピンミラーアレイ型　62
3.5　網 膜 投 影 型 ····· 63
3.6　ライトフィールド型 ····· 65
3.6.1　インテグラルフォトグラフィ　65
3.6.2　2 枚スクリーンによるライトフィールド光学系　67
3.7　ホログラフィック型 ····· 68
3.8　ピンライト型 ····· 70
3.9　頭部搭載型プロジェクタ ····· 71

第 4 章　ヘッドマウントディスプレイの最新研究事例

4.1　位 置 合 わ せ ····· 75
4.2　光 学 的 歪 み ····· 80
4.3　時間的整合性 ····· 82
4.4　色　再　現　性 ····· 87
4.4.1　ディスプレイ色再現　88
4.4.2　色　混　合　89
4.5　ダイナミックレンジ ····· 93
4.6　焦点奥行再現 ····· 95
4.6.1　調整可能焦点型 HMD　96
4.6.2　多焦点型 HMD および可変焦点型 HMD　97
4.6.3　ライトフィールド型 HMD とホログラフィック型 HMD　101
4.6.4　フォーカスフリー型 HMD　104
4.7　画　角 ····· 105
4.8　解　像　度 ····· 109
4.9　光　学　遮　蔽 ····· 113

第 5 章 ヘッドマウントディスプレイによる視覚の解放

5.1 視覚を解放するための要素技術 …… 123
5.2 視知覚の補正・矯正 …… 125
5.2.1 視知覚の補正・矯正のプロセス 125
5.2.2 視力の矯正 127
5.2.3 色覚異常の補正 128
5.2.4 斜視・斜位の矯正 129
5.2.5 変視症の矯正 131
5.2.6 視覚過敏の矯正 133
5.2.7 視機能検査 135
5.3 視覚拡張 …… 137
5.3.1 視力の拡張 138
5.3.2 視野角の拡張 140
5.3.3 可視波長の拡張 144
5.3.4 動体視力・時間感覚の拡張 145
5.3.5 視点の拡張 147
5.3.6 視覚シミュレーション 149
5.3.7 視覚的ノイズの軽減 151
5.3.8 視界の多様な変調・置換 152

第 6 章 ヘッドマウントディスプレイと多感覚情報提示

6.1 ヘッドマウントマルチモーダルディスプレイ …… 156
6.1.1 深部感覚 158
6.1.2 表在感覚 162

6.1.3　前　庭　覚　167
6.1.4　嗅　覚　169
6.2　ヘッドマウントディスプレイによる感覚間相互作用の活用 … 174
6.2.1　感覚間相互作用　174
6.2.2　Pseudo-haptics　177
6.2.3　リダイレクテッドウォーキング　182
6.2.4　感覚間相互作用による嗅覚提示　186
6.2.5　感覚間相互作用による食体験の提示　188

引用・参考文献 …… 196
あ　と　が　き …… 218
索　　引 …… 222

カラー画像

以下よりカラー図面がダウンロード可能です。

https://www.coronasha.co.jp/static/02691/color.pdf

本書の最初に，**ヘッドマウントディスプレイ**（**HMD**, head mounted display）の概要について述べる。1.1 節では，HMD のこれまでの歴史を振り返り，HMD が 50 年以上にわたって徐々に進化してきた過程を概観する。1.2 節では，**バーチャルリアリティ**（**VR**, virtual reality）用および**拡張現実感**（**AR**, augmented reality）用の HMD の特徴を，さまざまなディスプレイとの比較から明らかにする。また，いくつかの典型的な応用例を示し，用途によって HMD に求められる性能が異なることを説明する。

1.1　ヘッドマウントディスプレイの歴史

HMD とは，具体的には目の前の小さな映像をレンズなどの光学的なしくみによって遠方の大きな映像として見せることができるデバイスである。一部の，特に初期の HMD は非常に大きくて重く，「頭部に載せる（ヘッドマウント）」ディスプレイという表現がふさわしかったが，近年の HMD は軽くなり，着け心地も良くなってきた。それにつれて，特に学術的には HMD のことを「頭部に着ける」ディスプレイ（**HWD**, head worn display）と呼ぶことも増えており，単に眼に近接して用いるディスプレイ（**NED**, near eye display）と呼ぶことも多い。しかし，本書では一般により普及していると考えられる，HMD という呼称を用いることにする。

本書の最初にまず，HMD が発展してきた歴史を簡単に振り返る。1980 年代に VR 用のディスプレイ装置として華々しく登場した HMD は，1990 年代に

民生用製品としてブームを興す。その後，停滞期を経て，2010 年代中頃から急激な盛り上がりを見せ，現在 HMD は，VR や AR 用途はもちろん，新しいコンピューティングプラットフォームとしての地位を確立しつつある。

1.1.1 ヘッドマウントディスプレイの先史時代

頭部に何かを装着して見え方を変化させようという考え方は，古くから存在する。古代ローマ皇帝ネロ（在位 54〜68 年）は，円形闘技場の催しを観戦する際に，エメラルドのレンズを眼鏡にして減光フィルタとして使用したとされる。「光学の父」とも呼ばれる科学者イブン・アル＝ハイサム（Ibn al-Haitham）は，11 世紀に「適度に加工された光学レンズは視力を補助する可能性がある」と述べ，後世の眼鏡の開発に多大な影響を与えた。その後，視力矯正用の眼鏡は，13 世紀後半にイタリアで生まれ，日本には 16 世紀にフランシスコ・ザビエル（Francisco de Xavier）が初めて持ち込んだといわれている（**図 1.1** 参照）。

図 1.1　初期の木製リベット眼鏡（複製）
© Ocular Heritage Society

18 世紀になると，眼鏡屋が浮世絵に登場するなど（**図 1.2** 参照），眼鏡はすでに一般に普及していた。興味深いことに，落語家・桜川慈悲成と浮世絵師・歌川豊国による黄表紙本（大衆向け読み物）「福徳寿五色眼鏡」（1797 年）には，「掛けた人の見たいものを何でも映し出す眼鏡」が登場する（**図 1.3** 参照）。まさにバーチャルリアリティを先取りするような内容である。

図 1.2　眼鏡屋が描かれた浮世絵

図 1.3　福徳寿五色眼鏡（作 桜川慈悲成，絵 歌川豊国）

多くの HMD では，わずかに視差がついた異なる映像を左右の眼の前に配置することで，立体的な映像を提示できる。2 枚の異なる映像で立体視が可能であることを発見したのは，物理学者**ホイートストン**（Wheatstone）で，彼は 1838 年に鏡を用いて**両眼立体視**を行える**ステレオスコープ**（Stereoscope）を発明している[1)] †（**図 1.4** 参照）。

ゴーグル型デバイスを装着して，人工的な感覚刺激を提示することで現実感

† 肩付数字は巻末の章ごとの引用・参考文献番号を表す。

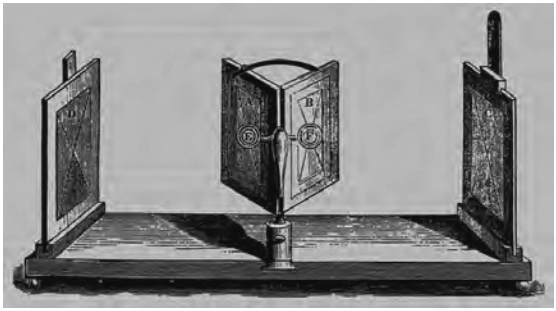

図 1.4　ホイートストンのステレオスコープ

を感じさせるという，現代に通じる VR のコンセプトを初めて明確に示したのは，1935 年のワインバウム（Weinbaum）による短編 SF 小説「Pygmalion's Spectacles（ピグマリオン眼鏡）」だったといわれている。「But what is reality?」で始まるこの小説には，高度な科学技術によって物語の映像や音，匂い，味，手触りなども再現できる「魔法の眼鏡」が登場している。

1.1.2　ヘッドマウントディスプレイの誕生

SF 小説の世界ではなく，実際に頭部に電子ディスプレイを装着するというアイデアは，1945 年の**マッカラム**（McCollum）による特許「Stereoscopic Television Apparatus（立体テレビ装置）」が最初とされる[2]（**図 1.5** 参照）。これは，眼鏡フレームに取り付けられたブラウン管を用いて立体的にテレビを見るための装置であり，複数の人が同じ放送を同時に立体的に見ることが目的であった。

映像技師であった**ハイリグ**（Heilig）は，1960 年に「Telesphere Mask」の特許を取得する[3]（**図 1.6** 参照）。これは，ディスプレイの位置調節機能，音響効果を得るためのイヤホン，匂いや温度が異なる空気を顔に吹き付けるエアノズルなどを備えており，没入感を高める工夫がされた HMD であった。なお，ハイリグは 1962 年に立体映像，立体音響，匂い，風，振動など多感覚の提示が可能なシミュレータ「**センソラマ**（Sensorama）」[4] を発表したことでも知られており，VR の技術史に多大な足跡を残している。

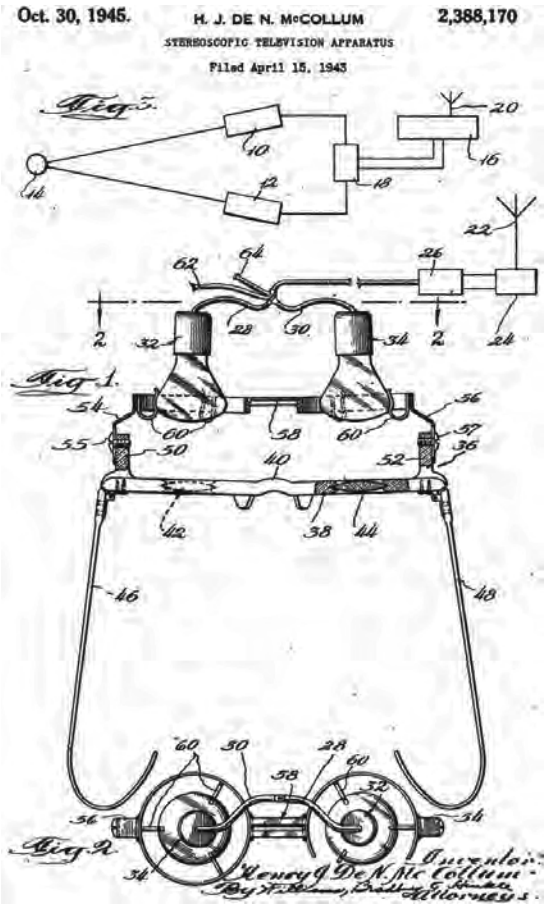

図 1.5　マッカラムの Stereoscopic Television Apparatus[2)]

小説や特許のレベルに留まらず，実際に頭部に装着できる電子ディスプレイを開発した事例は，1961 年の Philco 社による「Headsight TV Surveillance System」[5)] が最初とされている（**図 1.7** 参照）。おもに遠隔監視の用途を想定しており，頭の向きに連動して回転する遠隔カメラの映像をスクリーンに映し出すことができた。同様の事例として，1960 年代にベル・ヘリコプター社は，夜間飛行のパイロット支援のために，機体の下部に取り付けられた赤外線カメラ

あ　と　が　き

本書では，VR や AR を実現する代表的デバイスである HMD について，その概要や歴史，典型的な光学系から最新の研究開発事例までを幅広く見てきた。まず 1 章では，HMD のこれまでの発展の歴史を振り返り，今日の HMD がある日突然出現したわけではなく，50 年以上の年月を積み重ねて徐々に進化してきたことを確認した。また，HMD 以外の VR 用ディスプレイや AR 用ディスプレイと HMD を比較することで，HMD が備えるユニークな特徴を浮き彫りにした。さらに，HMD にはさまざまな応用が考えられるが，すべての要求を満たす完璧な HMD を実現することは難しく，目的に合った HMD を選択あるいは設計することが重要であることを確認した。

2 章では，人間の視覚機能について整理した。HMD の機能の過不足や良し悪しを判断する上で，人間の視覚機能の諸性質を理解することはきわめて重要である。まず，眼の構造をカメラになぞらえて，眼が光をどのようなしくみで映像として捉えているのかを学んだ。また，視力，視野，調節，眼球運動などのさまざまな視機能の性質や，各種の奥行き手がかりについて学んだ。

3 章では，典型的な HMD の光学系について整理した。まず単眼式・両眼式，ビデオシースルー方式・光学シースルー方式などの分類について確認し，つぎに屈折型，反射屈折型，自由曲面プリズム型，ウェーブガイド型などの典型的な光学系の特徴について学んだ。さらに，網膜投影型やライトフィールド型，ホログラフィック型などのより先進的な光学系のしくみに触れた。

4 章では，より先進的な特徴や機能を備えた HMD を紹介した。位置合わせ，光学的歪み，時間的整合性，色再現性，ダイナミックレンジ，焦点再現，画角，解像度，光学遮蔽などのさまざまな課題を取り上げ，それぞれの解決を意図した「尖った」HMD の研究開発事例を俯瞰した。いまだ完璧な HMD にはほど

遠いが，これらの課題を解決していくことで，理想的な HMD の実現に一歩ずつ近づいていくことを学んだ。

5 章では，HMD を用いて人間の視覚機能を自由自在に編集するさまざまな試みを紹介した。前半では，HMD を用いて視知覚の困りごとを解決する視覚補正・矯正の事例に触れ，後半では，人間拡張の観点からより柔軟に視覚機能を再設計する視覚拡張の事例について概観した。これらの事例を通じ，HMD を活用することで，人間がものを見る能力を生物的制約からある程度解き放つことができることを学んだ。

6 章では，視覚以外のさまざまな感覚を提示するマルチモーダル（多感覚）HMD について解説した。前半では，深部感覚，表在感覚，前庭覚，嗅覚などを提示するヘッドマウントデバイスの事例について学び，後半では感覚間相互作用を活用して触力覚，味覚，嗅覚，内臓感覚などを提示するヘッドマウントデバイスの事例について学んだ。

この先，HMD は何を目指し，どのように進化していくのだろうか。究極の HMD が合格すべきテストとして，Meta 社は**ビジュアルチューリングテスト**を提唱している。ビジュアルチューリングテストとは，HMD に表示された映像が現実と見分けられるかを判定するテストである。これに合格するためには，4 章で見たようなさまざまな課題について，より高性能で小型軽量のハードウェアを開発する必要がある。例えば，Meta 社は焦点再現，解像度，歪み補正，ハイダイナミックレンジ（HDR）という 4 つの課題に対応する一連の試作機を開発している。また，ビジュアルチューリングテストに合格するために必要な要素技術を統合した HMD のコンセプトデザイン「Mirror Lake」を発表している。Mirror Lake は，先の 4 つの課題を解決する要素技術をすべて取り入れているだけではなく，ホロケーキレンズ（ホログラフィックレンズとパンケーキレンズの特徴を兼ね備えたレンズ）やレーザバックライトを備えており，従来よりも薄型で軽量なデザインとなっている。また，光の波長より小さい微細加工を施したメタマテリアルによって，従来にはない光学特性を持たせる試みや，さまざまな光学特性を深層学習によって最適化する試みなども，ますます活発

になっていくだろう[1)]。こうした技術の進展により，HMD の高性能化・小型軽量化の流れは今後も継続していくと考えられる。

メタバースの利活用が本格化してくるにつれて，リアルとバーチャルは渾然一体となり，ユーザーはリアル，AR，VR などを自在に行き来するようになると考えられる[2)]。そのため，頻繁に HMD を着脱するのではなく，単一の HMD を装着したままでこれらのすべてをサポートすることが求められるようになるだろう。単一のデバイスでリアル，AR，VR などをすべてサポートするためには，ビデオシースルー方式か，実環境を遮蔽できる機能を備えた光学シースルー方式が必要である。また，HMD を装着するユーザーと周囲の人々の自然なコミュニケーションをサポートすることも重要である。Meta 社が試作しているような，HMD によって隠れてしまうユーザーの眼とその周囲の 3 次元映像を，HMD の外側に配置したライトフィールドディスプレイで再現する「リバースパススルー」機能は，そのための有力な解決策の 1 つである[3)]。Apple Vision Pro には，EyeSight と呼ばれるリバースパススルーの簡易的機能が搭載されている。このように，周囲との自然なコミュニケーションの確保は，今後必須の機能になっていくだろう。

一般的な HMD 以外にも，さまざまな視覚提示デバイスが研究されている。例えば，コンタクトレンズ型ディスプレイは，2008 年頃からいくつかの研究機関で研究されている[4)]。コンタクトレンズ型ディスプレイは，目に直接装着することで，外部のディスプレイやカメラを必要とせずに，AR やバイオセンシングなどの機能を提供することができる。具体的には，視力補正や色覚補正，画像投影や視線追跡，血糖値測定や眼圧測定などの機能が考えられる。しかし，コンタクトレンズ型ディスプレイは，電源供給，ワイヤレス通信，光学系の小型化，生体適合性や安全性などの課題がある。

また，HMD とは呼べないが，体に機器を埋め込む侵襲型の**人工視覚**（**人工網膜**）も盛んに研究されている[5)]。人工視覚は，外部カメラからの映像を電気信号に変換し，電極を通じて視神経に刺激を与えることで，視覚を回復させるしく

みであり，失明原因の 1 つである網膜変性症などに対する治療法として期待されている。人工視覚には網膜刺激型，視神経刺激型，脳刺激型などがあり，特に脈絡膜上経網膜刺激（STS, suprachoroidal transretinal stimulation）型[6)]は，安全性や大型化の点で優位であるとされ，各国で臨床試験が相次ぎ，米国食品医薬品局の承認を得た機種もある。ただし，これらの手法は解像度が低く，色再現が困難という大きな問題がある。例えば，STS 方式の解像度は精細なものでも 7×7 画素程度であり，近年ようやく 1000 画素程度の開発が進んでいるレベルである。侵襲型ディスプレイは視覚障害者にとってはこの上ない福音であるが，画質・性能の点では現時点で一般的な HMD と比較するレベルにはない。しかし，遠い将来には，自由自在な視覚体験を実現する本命の技術となるかもしれない。

以上のように，HMD は今後も着実に進化し続けることが予想され，その一方で，HMD 以外の装着型視覚ディスプレイもおおいに発展していくことが見込まれる。いずれの技術も，それぞれに異なる特徴や可能性を持っており，ユーザーのニーズや目的に応じて選択されるようになるだろう。その中でも，本書で取り上げた HMD は，最も重要な選択肢として残り続けることだろう。

今後の HMD のさらなる進化に期待したい。

謝辞　本書の執筆にあたり，多岐にわたる内容について多くの方々から技術的なご教示とご助言をいただいた。また，特に画像を多くご提供いただいた Tobias Langlotz 博士および校閲作業にご協力いただいた太田裕紀，大橋夢叶，高橋茉莉香，山岡裕希の諸氏に感謝する。

索　　引

【あ】

アイフォン 8
アイボックス 45, 46
アイレリーフ 46
アウトサイドイン 75
アクロマートレンズ 48
アプラナートレンズ 48
アムスラーチャート 132
暗順応 35
暗所視 35
安定注視野 33
アンブリオピア 130

【い】

医学的弱視 130
位相限定空間光変調器 93
一般感覚 156
色収差 13, 47
色の恒常性 34
インサイドアウト 75
インテグラルフォトグラフィ 65

【う】

ウェーブガイド型 55
運動視差 38

【え】

エアリーディスク 68
液晶ディスプレイ 44
遠　視 35, 127
遠　点 36

【お】

黄　斑 28
オキュラスリフト 10
奥行き手がかり 38
オクルージョン 113

【か】

絵画的手がかり 38
外眼筋 25
開散運動 37
回折光学素子 56
拡張現実感 1
角　膜 24, 25
可視光 33
可変焦点 45, 97
加齢黄斑変性 131
眼　窩 24
感覚間一致 175
感覚間相互作用 155
眼　球 24
眼球外膜 26
眼球中膜 27
眼球内膜 27
眼軸長 24
桿　体 29
眼内閃光 143
眼　幅 24

【き】

キャリブレーション 76
究極のディスプレイ 6
球面収差 48
球面レンズ 54
強　膜 24
近　視 35, 127
近　点 36

【く】

空間校正 75
空間光位相変調器 93
空間光変調器 68
屈折異常 36, 127
屈折型 42
グラストロン 9
クローズド型 17
クロスモーダル 155

【け】

計算機生成ホログラム 68, 102

【こ】

光　覚 34
光学コンバイナ 50
光学シースルー 17
光学遮蔽 92, 113
虹　彩 26
光線場 81
光路長 50
固視微動 37
固定焦点 45
コマ収差 48
コンタクトレンズ 107
コンテクスト 175

【さ】

再帰性反射スクリーン 72
最小可読閾 30
最小視認閾 30
最小分離閾 30
最尤推定 175
サザランド 6
サッケード 36, 145
サッケード潜時 37
サッケード抑制 37
散　瞳 26

【し】

ジオプトリ 35
視覚拡張 124
視覚過敏 127, 133
視覚的顕著性 151
視覚鈍麻 127
時間的整合性 82
色　覚 33
色覚異常 29, 34, 128
色　弱 29
色　盲 29
自己運動感覚 33, 158
視細胞 29
視神経乳頭 28
シースルー型 17
視　度 36
視　野 31
斜　位 126, 129
弱　視 31, 128
斜　視 126, 129
射出瞳 58
射出瞳拡張 58
自由曲面 53
自由曲面光学系 106
自由曲面プリズム型 54
周辺視野 33
周辺視力 31
縮　瞳 26
順　応 34
硝子体 26
視　力 30
人工視覚 220
人工網膜 220
心拍変動 174
深部感覚 156

【す】

水晶体 26
錐　体 29
据置型ディスプレイ 15
ステアリングミラー 103
ステレオスコープ 3
スネレン式視力表 135

【せ】

正　視 35
接眼光学系 13
接眼レンズ 44, 47
線維膜 26
センソラマ 4
前庭電気刺激 167
前庭動眼反射 37

【そ】

双眼式 19
像面湾曲 48

【た】

体性感覚 156
タイムワービング 84
タイリング 106
多焦点 97
多焦点ディスプレイ 96
ダモクレスの剣 6
単眼式 19

【ち】

知覚的充填 28
中心窩 28
中心窩レンダリング 83, 109
中心視野 33
中心視力 31
調　節 26, 38
調節異常 127
調節幅 36
跳躍運動 36
チン小帯 26

【つ】

追従運動 37

【て】

ディオプタ 35
定型視知覚 124
敵対的生成ネットワーク 191
データグローブ 8
テレイグジスタンス 9
点拡がり関数 81

【と】

投影型システム 16
投影行列 77
瞳　孔 26
瞳孔間距離 24, 76
頭部搭載型プロジェクタ 71
特殊感覚 156

【な】

内臓感覚 156
内部全反射 53

【に】

人間拡張 124

【は】

ハイダイナミックレンジ 85
ハイリグ 4
薄明視 35
バーチャルボーイ 9
バーチャル網膜ディスプレイ 104
バーチャルリアリティ 1
ハンガー反射 161
反射屈折型 50
ハンドヘルドディスプレイ 15

【ひ】

ビジュアルチューリングテスト 219
非定型視知覚 124
ビデオシースルー 18
非点収差 48
表在感覚 156
ピンミラーアレイ型 62
ピンライトディスプレイ 70

【ふ】

フィリングイン 28
フォーカスフリー 104
フォーカルスイープ 100
複　視 130
輻　輳 39
輻輳運動 37
輻輳調節矛盾 39, 95

不正乱視 36, 126
フライアイレンズ 65
フリッカ 84
プルキニエ現象 35
フレネルレンズ 49
分光特性 33

【へ】

ベクション 33, 168
ヘスチャートテスト 130
ヘッドトラッキング 10
ヘッドマウントディスプレイ 1
変視症 131
弁別視野 31, 32

【ほ】

ホイートストン 3
補償画像 126
補助視野 33
ホログラフィック型 HMD 96
ホログラフィック光学素子 56
ホログラフィックディスプレイ 101
ホロレンズ 11

【ま】

マイクロサッケード 37
マイクロレンズアレイ 101
マクスウェル視 64, 104
マクスウェル視光学系 64
マッカラム 4
マリオット盲点 28

【み】

脈絡膜 27

【め】

迷　光 49
明視域 36
明順応 35
明所視 35
メタサーフェス 107

【も】

盲　点 28
網　膜 27
網膜走査型ディスプレイ 104
網膜投影型 HMD 63
網膜剥離 131
毛様体筋 26

【ゆ】

優位眼 126
有機 EL ディスプレイ 44
有効視野 32
誘導視野 33

【よ】

抑　制 130
4f 光学系 114

【ら】

ライトフィールド 81
ライトフィールド型 65
ライトフィールドディスプレイ 101
ラニア 8
乱　視 36
ランドルト環 30

【り】

リダイレクテッドウォーキング 168, 182
両眼共同運動 36
両眼式 20
両眼視差 39
両眼視野 31
両眼視力 31
両眼立体視 3
両眼離反運動 36

【れ】

レイテンシ 82
レジストレーションエラー 83

【ろ】

老　眼 127
ロコモーションインタフェース 183
ロービジョン 31, 128

【わ】

歪曲収差 47

【A】

AR 1
augmented reality 1

【B】

bi-ocular 19
binocular 20
Bird Bath 型 51

【C】

CAVE 12
CGH 68

【D】

DLT 78
DMD 63, 85
DOE 56

【E】

EPE 58
exit pupil 58
EyePhone 8

【F】

focus-free 104
foveated rendering 83, 109

【G】

GAN 191
Google Glass 11
GVS 167

【H】

handheld display 15
HDR 85
head mounted display 1
head worn display 1
Heilig 4
HMD 1
HOE 56
HoloLens 11
human augmentation 124
HWD 1

【I】

immersive projection technology 12
IP 65
IPD 76
IPT 12

【L】

Lanier 8
latency 82
LCD 44
LCoS 68
LEEP 7
liquid crystal display 44
LOE 60

【M】

maximum likelihood estimation 175
McCollum 4
MEMS 63
MLE 175
monocular 19
Motion-to-Photon 82
multifocal 97

【N】

near eye display 1
NED 1

【O】

occlusion 113
Oculus Rift 10
OLED 44
optical see-through 17
organic electroluminescent 44
organic light emitting diode 44
OST 17

【P】

phase-only SLM 93
PlayStation VR 11
ppd 109
projection system 16
Pseudo-haptics 177
PSF 81
Pupil Swim 48
pursuit movement 37

【R】

RANSAC 78
RB2 8
RDW 183
redirected Walking 183
RRV 174

【S】

saccade 36
saccadic movement 36
Sensorama 4
SLAM 75
SLM 68
spatial light modulator 68
stationary display 16
Stereoscope 3
Sutherland 6

【T】

The Sword of Damocles 6
The Ultimate Display 6
TIR 53

【V】

VAC 95
varifocal 97
video see-through 18
virtual reality 1
vision augmentation 124
VOR 37
VR 1
VST 18

【W】

Wheatstone 3

――編著者・著者略歴――

清川　清（きよかわ　きよし）
1996 年　奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了（情報システム学専攻），博士（工学）
2017 年　奈良先端科学技術大学院大学教授，現在に至る

あるしおうね
VR 系の研究室博士課程修了，博士 (工学)
2024 年　外資系大手 HMD メーカ勤務，現在に至る

伊藤　勇太（いとう　ゆうた）
2016 年　ミュンヘン工科大学情報科学科博士号取得，Dr. rer. nat.
2021 年　東京大学特任准教授，現在に至る

鳴海　拓志（なるみ　たくじ）
2011 年　東京大学大学院工学系研究科博士課程修了（先端学際工学専攻），博士（工学）
2019 年　東京大学准教授，現在に至る

ヘッドマウントディスプレイ　（バーチャルリアリティ学ライブラリ 1）
Head Mounted Display

© 特定非営利活動法人　日本バーチャルリアリティ学会 2024

2024 年 10 月 7 日　初版第 1 刷発行　★

検印省略

編　　者	特定非営利活動法人 日本バーチャルリアリティ学会
編 著 者	清　川　　清
発 行 者	株式会社　コ ロ ナ 社 代 表 者　牛 来 真 也
印 刷 所	三 美 印 刷 株 式 会 社
製 本 所	株式会社　グ リ ー ン

112−0011　東京都文京区千石 4−46−10
発 行 所　株式会社　**コ ロ ナ 社**
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan
振替00140−8−14844・電話(03)3941−3131(代)
ホームページ　https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-02691-7　C3355　Printed in Japan　(新宅)G

JCOPY　＜出版者著作権管理機構 委託出版物＞
本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は，そのつど事前に，出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088，FAX 03-5244-5089，e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー，スキャン，デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は，いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。