映像情報メディア年報2019シリーズ（第1回）

立体映像技術の研究開発動向

堀越　力[†1]，高木康博[†2]，吉川　浩[†3]，小池崇文[†4]，
氏家弘裕[†5]，山本裕紹[†6]，清川　清[†7]

1．まえがき

ディスプレイやカメラデバイスならびに画像処理技術は近年飛躍的に伸びている．それに伴い，立体映像技術も着実に進歩している．本稿では，自然な立体表示を可能とするホログラフィおよびライトフィールド技術の動向を紹介し，次に新しい立体表示形態としてボリューム型ディスプレイおよびヘッドマウントディスプレイ（Head Mounted Display: HMD）を紹介する．そして，立体表示における生体影響の要因の一つとして，輻輳調節矛盾解決に関する研究開発動向を述べ，立体映像に関する国際標準化に向けた取り組みを紹介する．

2．ホログラフィ

究極の3次元表示方式であるホログラフィは，再生のための光源に制約があることが欠点となっている．ホログラム再生には一般にレーザ光源が必要であるが，白色光で再生可能な場合でも点光源または平行光源が必要である．ホログラムの端面から照明光を入射する「エッジリットホログラム」は，ホログラムと再生用光源を一体化してコンパクトな構成で高画質の再生像が得られる点が特徴である．従来手法の多くは，ガラスのブロックにホログラムを貼り付けているが，文献[1]は，厚さわずか1 mmのガラスに海外企業と協力して開発したフォトポリマのホログラムを貼り付けて，レーザ光による像の再生を可能にした．

レーザリソグラフィ装置を改良して計算機合成ホログラムを記録することにより，ピクセルピッチ0.8 μ mで高画質なホログラムが作成可能である．この場合，作成したホログラムは波長選択性のない平面ホログラムであり，フルパララックスでフルカラーの再生像を得るには専用の再生装置やカラーフィルタが必要である．記録にはクロム金属膜を持つ基盤にフォトレジストを塗布して，レーザ光の照射によりフォトレジストの溶解性が変化する性質を利用する．フォトレジストの残っている部分は現像時に金属膜が残り，それ以外の部分は除去されて透明となる．したがって，記録されたホログラムは，透過型としても反射型としても再生が可能である．そこで，ホログラムの手前に未露光のホログラム記録材料を置き，反射型ホログラムとして再生することで，波長選択性のある体積ホログラムへの転写が可能である．RGB3枚のホログラムを転写し，重ねることでフルカラーのホログラムが作成できるが，ホログラム記録材料を保持しているガラス基板の影響により画質が低下するため，基盤収差を補償する方式を提案し，実験によりその有効性を示した[2]．

ホログラムによる3次元表示では，他の3次元表示方式と同様に再生像をホログラム面（ディスプレイ面）の近くに置くのが一般的である．しかし，物体からの波面を正確に再生できるホログラムでは，像がホログラム面から離れても鮮明な像の再生が可能である点が他の3次元表示方式との違いの一つである．文献[3]では，この特徴を活かして，レーザで照明した105 mm角のホログラムをのぞき込むと，ホログラムの奥の1 m先に，縦・横・高さがそれぞれ1 mの室内空間を再現した3次元像を再生した．ホログラムを点光源法あるいはポリゴン法によるフレネルホログラムとして計算すると，3次元空間の情報量が膨大になり，その計算量も膨大となる．そこで，ホログラフィックステレオグラムを改良した正射影光線サンプリング法により，光線情報を用いているにもかかわらず，奥行きの深い像を鮮明に再生し，かつ高速に計算できることを明らかにした．

ホログラム計算に特化した専用ハードウェアHORN-8[4]

†1 湘南工科大学 情報工学科
†2 東京農工大学 大学院工学研究院
†3 日本大学 理工学部　応用情報工学科
†4 法政大学 情報科学部
†5 独立行政法人産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門
†6 宇都宮大学 オプティクス教育研究センター
†7 大阪大学 サイバーメディアセンター

"ITE Review 2019 Series (1); The Trend of Three Dimensional Image Technology" by Tsutomu Horikoshi (Department of Information Science, Shonan Institute of Technology, Kanagawa), Yasuhiro Takaki (Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo), Hiroshi Yoshikawa (College of Science and Technology, Nihon University, Chiba), Takafumi Koike (Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University. Tokyo), Hiroyasu Ujike (Human Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Ibaraki), Hirotsugu Yamamoto (Center for Optical Research and Education, Utsunomiya University, Tochigi) and Kiyoshi Kiyokawa (Cybermedia Center, Osaka University, Osaka)

では，1枚のPCI Express基板に8個のFPGA（Field Programmable Gate Array）を搭載し，1個を通信用，残りを計算用とすることで効率的な計算を実現している．HORN-8ボード8枚をクラスタ動作させることにより，振幅ホログラムでCPU（Central Processing Unit）の1,200倍，位相ホログラムで630倍の高速計算を実現，4万点からなる物体のHDTV（High Definition Television）解像度のホログラムを30fps（frame per second）で再生できることを示した．（吉川）

3．ライトフィールドディスプレイ・カメラ

ライトフィールドカメラやライトフィールドディスプレイの研究は，当初は，ACM（Association for Computing Machinery）やIEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）での発表が多かったが，その後，SPIE（The International Society for Optics and Photonics）やSID（Society for Information Display）での採択が増えている．最近では，OSA（The Optical Society）の発行する論文誌などで多くの採択が見受けられる．ライトフィールド関連の研究分野が多くの学術分野に広がってきたと言える．ライトフィールドカメラ・ディスプレイの概要については，文献[5]を参考にされたい．

ライトフィールドカメラ分野に関しては，まず，ライトフィールドカメラのベンチャー企業であるLytro社が2018年に事業を停止し，従業員がGoogleに移ったことが，大きなニュースであった．大学でのライトフィールドカメラの研究では，安価なLytro社ライトフィールドカメラを用いたものが多かったため，本研究分野に与える影響が懸念される．

一方で，新しい方式のライトフィールドカメラの提案や，取得できるライトフィールドの情報量を増やし，アプリケーションの可能性を広げる研究が報告されている．日立製作所の島野らは，レンズの代わりに同心円パターンを印刷したフィルムであるフレネルゾーン開口（Fresnel Zone Aperture, FZA）を用いたレンズレスライトフィールドカメラを提案している[6]．FZAを通して撮影した画像に，FZAを重ねてモアレ画像を生成し，そのモアレ画像をフーリエ変換することで撮影画像を復元している．Coded apertureの一種であるが，実装が容易な方式であり，今後，関連研究が増えていくと思われる．Wangらは，Lytro ILLUMとディジタル一眼レフカメラを隣り合わせ同時撮影し，取得したライトフィールドを動画にする方法を提案している[7]．既存のハードウェアだけでライトフィールドの動画撮影を可能としている点が特徴である．

ライトフィールドの可能性を一般によく知らしめた例としては，GoogleのWelcome to Light Fieldsが挙げられる[8][9]．一般的な全周360度映像を撮影するのに用いる円弧状に並べた16台のカメラアレイを縦方向に設置し，30秒で360度回転させて撮影するカメラアレイである．各カメラは30fpsで動画撮影を行っているので，900方向×16台で，合計14,400視点で撮影したライトフィールドを取得している．実際に，ステンドグラスやスペースシャトルの内部などを撮影している．撮影されたライトフィールドは，PC（Personal Computer）ゲームやソフトウェアの配信プラットフォームであるSteamで配信されている．したがって，OculusやVIVEなどのコンシューマ向けHMDを持っていれば，360度の自由視点コンテンツを誰でも体験できる．狭い範囲であるが，6DoF（Degree of Freedom）に対応しているため，臨場感あふれる映像を体験できる．充分に密なライトフィールドを取得し再現すると，鏡面反射成分の再現性が大きく高まることに報告者は改めて驚かされた．

ライトフィールドディスプレイ分野に関しては，ジャパンディスプレイとNHKメディアテクノロジーが，17インチの8Kパネルを用いた広視野角のライトフィールドディスプレイを開発している[10]．大阪大学の安藤らは，LED（Light Emitting Diode）アレイとスリットを持ったシリンダーを回転させる方式の疎なライトフィールドディスプレイを提案し[11]，カメラと組み合わせることによって，ライトフィールドを用いた3次元コミュニケーションシステムを提案している[12]．

長岡技術科学大学の圓藤らは，ミラーボール状の反射デバイスを高速回転させ，DLP（Digital Light Processing）プロジェクタで投影することで，全方位のライトフィールドディスプレイを実現している[13]．筑波大の落合らの研究グループでは，液晶パネルとレンズアレイを用いたライトフィールドディスプレイと，透過型実像鏡を用いて，ライトフィールドと実物体を光学的に重畳している[14]．

ライトフィールドディスプレイのソフトウェアに関しては，名古屋大の藤井・高橋らの研究グループでは，透過型の液晶パネルを複数用いたスタック型方式のライトフィールドディスプレイの画像生成ソフトウェアを公開している[15]．ライトフィールドディスプレイとしては，Tensor Displayが近年注目されているが，テンソル分解を用いているため．ソフトウェアの開発が難しい課題があった．ソフトウェア公開により，誰でも研究を再現できようになり，Tensor Displayの研究が進むと予想される．また，同じく名古屋大の高橋らは，focal stackからTensor Displayのデータを生成する方法を提案している[16]．従来は多視点画像からライトフィールドディスプレイ用の画像を生成することが多かったが，多焦点画像からライトフィールドディスプレイ用の画像を生成することが可能となり，データ制作が容易になった．

紙面の都合で一部を取り上げたが，ライトフィールドカメラ・ディスプレイに関しては，着実な技術の進歩が見られ，今後も発展が期待される．（小池）

4．ボリューム型ディスプレイ

ボリューム型ディスプレイについて定まった定義はな

く，ここでは，広義に「3次元（3D）空間内に映像を表示する技術」と捉えて，近年の動向についてまとめる．

2次元（2D）映像を用いてさらに次元を増やすには走査を行えばよい．高速のガルバノミラーを操作することで体積表示を行う研究が進められている．従来はリレーレンズ系の大掛かりな光学系を用いて実現されていたが，反射型の結像光学素子を用いることでコンパクトな構造でのボリューム型表示が実現されている[17]．この方法では光源として超高速のフレームレートが求められるため，テキサスインスツルメンツ社のDMD（Digital Micro-mirror Device）が利用されることが多い．高速走査のためのミラーの小型化と軽量化が必要であり，手のひらサイズを超えるような3D映像の形成が難しい．

2D映像を用いるのではなく，ドットを用いて3D映像を表示する手法についても，近年の進展が著しい．この分野に関して執筆者の知る限りでは，実用的な映像の表示に成功したのは，（株）バートン，慶応義塾大学，産業技術総合研究所のグループより発表された空中プラズマ表示である[18]．高出力レーザを大気中で集光することで，プラズマ発光がなされる．レーザ走査により3D情報をドット表示可能であるが，予想される通り，高出力レーザを使うことによる安全性とプラズマ発光時に発生する騒音が課題となる．これらに対して，フェムト秒パルスレーザと対物レンズを用いることで，極小領域でのプラズマ発光と描画を実現した例が，宇都宮大学と筑波大学の研究グループから報告されている．高時間密度と高NA（Numerical Aperture）レンズによる集光によるため，1パルス当たりのエネルギーは生体に対して大きなダメージを与えることなくプラズマ発光を実現している[19]．最近では，この集光システムを応用して水中に泡で映像を表示する実験に成功している[20]．いずれにしても，対物レンズの視野とワーキングディスタンスの範囲内での集光であり，現状は指先サイズの3Dディスプレイであり，今後，手のひらサイズ程度への拡大が期待される．

近年の特筆事項として，空中ディスプレイについて紹介したい．2D映像を空中に結像するディスプレイであるため，厳密な意味ではボリュームがあるわけではない．しかしながら，空中に実像を形成することから，国際会議にてボリューム型ディスプレイのセッションに分類されることが多々ある．何もない空中に映像を表示するディスプレイは，古くは映画「スターウォーズ」で描かれたように夢のディスプレイとして注目がなされている．空中への実像の形成はホログラフィを利用する方式やフレネルレンズを利用する方式，スリット状のミラーアレイを直交させた反射型結像素子を用いる方法，四角柱型の2面コーナーリフレクターアレイを用いる方法，再帰反射シートを用いる方法が提案され，各種のプロトタイプが開発されている[21]．

2層のスリット状のミラーアレイを直交させて用いる手法では，1層目と2層目で各1回反射することで，素子に対して光源の面対称位置に結像がなされる．ガラス製の素子を用いる場合には，2面コーナーリフレクターアレイを用いる場合に比べて明るく鮮明な映像が形成される利点があるが，製造コストが高く，大量生産に向けた樹脂化が期待されている．樹脂成型の場合には，型抜きの都合で設定されたテーパー面が画質を劣化させる原因となりえるため，改良が進められている．ガラスタイプの反射型結像素子を用いた空中インタフェースのプロトタイプは，旅行代理店の窓口や近未来的な受付システムとして実際に運用されている．

2面コーナーリフレクターアレイを用いる方式は，ナノインプリントのプロセスで製造されるため，樹脂成型による大量生産に適している．四角柱のエッジ部分で外光が散乱することによる黒部分の白浮きが課題であったが，最近では遮光処理をすることによるコントラスト向上が達成されている．空中にボタンの映像を浮かばせた空中ボタンやスマートフォンの画面を空中に結像するプロトタイプの開発が進む．

再帰反射による空中結像（AIRR: Aerial Imaging by Retro-Reflection）は，道路標識などに使われる再帰反射素子を用いて空中映像を形成する手法である．大型・大量生産可能な光学素子を用いるため，他の方式に比べて大画面化のスケーラビリティと大量生産による低コストの点で実用的である．また，半値全幅90度を超える広い視野角を有する空中像が形成される特長がある．一方で，他の方式に比べて光路長が2倍程度に長くなることから，再帰反射素子の開口制限に起因する回折による点像の広がりが課題である．AIRRの視野角の広さを活かして，自動車の運転席からも助手席からも観察できる空中ディスプレイのプロトタイプ開発が進んでいる．AIRRを使って空中にバーチャルエージェントを表示するインタフェースを搭載したモデルカーが2017年東京モータショーや2018年CES（Consumer Electronics Show）で発表された．また，等身大の大画面化が可能であることから，有名ボーカロイドの等身大映像をステージに表示して，実際のダンサーと踊るオペラの上映が実際に行われた[22]．

ボリューム型ディスプレイにおいて3D映像を視覚的に見せるだけでなく，空中で映像に触れることのできるようなマルチモーダル3Dディスプレイの進展が期待されている．

（山本）

5．ヘッドマウントディスプレイ

近年注目されるHMDに関しては，超広視野，被写界深度ボケの再現などのユニークな特徴を備えるさまざまなHMDや，HMDを観察するユーザ自身の計測に関するさまざまな研究事例が登場している．

(1) 広視野・高精細

商用HMDでは広視野と高角度分解能の両立という長年のテーマに関連し，約210×130度の超広視野と高精細（解像

度は非公開）を両立するStarVR Oneがリリースされた．また，Varjoからは広視野低角度分解能のスクリーンに，視線に追従する狭視野高角度分解能のスクリーンを重ねることで，水平視野角100度の全域に渡り換算視力1.0を実現する超高精細HMDが発表されている．映像素子の高精細化に伴い，特にクローズド型HMDにおいては広視野化・高精細化が徐々にヒトの知覚限界に近づいているといえる．

(2) 奥行きの再現

通常のステレオHMDは光学上の焦点距離とスクリーン距離が異なり，いわゆる輻輳調節矛盾の問題が発生する．また，スクリーン全体がある視距離に観察され，被写界深度ボケのような自然な奥行き感は得られない．こうした問題に取り組み，自然な奥行き感を再現するHMDに関する研究が近年極めて活発になっている．例えば，2017年にNVIDIAは透明シリコン薄膜による可変焦点ミラーを空気圧で制御する広視野（100度）・可変焦点HMDを提案している[23]．ただし，時分割で奥行きを再現する方式ではちらつきが発生するなどの問題がある．

時分割ではなく同時刻に常に複数の視距離の映像を提示するマルチレイヤ方式もよく用いられる．ついに初号機が北米で発売され話題となったMagic Leap Oneでは，一般的なLight Field Displayではなく，回折光学素子（Diffractive Optical Element, DOE）による遠近二つのスクリーンを持つマルチレイヤ方式として実装されている．

単一の映像面でありながら同時刻にさまざまな奥行きを再現する方式として，2017年にOculusは空間光位相変調器（LCOS-SLM）を用いて，焦点面の形状自体に起伏を持たせることで自然な奥行きを再現するFocal Surface Displaysと呼ぶHMDを提案している[24]．

一方，自然な奥行きの再現ではなく，焦点距離によらず常に先鋭な映像を提示する新たな方式も提案されている．従来，このような目的を実現する方式として，マクスウェル視を用いた網膜投影ディスプレイがよく知られている．これは，すべての光線が瞳孔中心を通るように制御することで水晶体の厚みによらず網膜に先鋭な映像を提示する方式である．弱視でも鮮明な映像が見えるなど優れた特性を持つが，アイボックスが極めて小さく，眼球を大きく動かすと映像が見えなくなるという問題がある．

また，2017年にスタンフォード大は，HMDの焦点面までの距離を連続的または離散的に高速に切り替えることで，その被写界深度を大幅に拡張し，実質的に観察者の焦点距離によらず常に鮮明な映像を提示する方式を提案している[25]．このような方式でも輻輳調節矛盾は解消され，眼精疲労などが抑制されると期待される．

2017年にソウル大学校では，レーザ走査型プロジェクタの投影方向を瞳孔追跡で調整することで，網膜投影ディスプレイのアイボックスを実質的に拡大する方式を提案している．また，ステアリングミラーによる時分割などの方法で，これをLight Field Displayに拡張している[26]．

2017年にマイクロソフトでは，小型高精細のホログラフィックHMDを提案している[27]．LCOS-SLMを用いてフレネルホログラムを電子的に制御し，高コントラスト，画素単位の距離調整，近視や乱視などの矯正を同時に実現している．

(3) カスタム光学系

従来，光学部品の製造は一般ユーザでは手が届かず，既存のものを使うか，非常なコストを掛けて特注するしかなかった．しかし，上述の可変焦点ミラーやLCOS-SLMをはじめとして，一般ユーザが柔軟にパラメータを変更してさまざまな光学系を試作する事例が増えている．特に2018年にノースカロライナ大やNVIDIAらは，3Dプリンタを用いて自在に光学部品を設計・試作する方式を提案している[28]．これは紫外線を照射すると硬化する光学部品用接着剤を材料に3Dプリンティングを行い，真空圧着成形機を用いて滑らかな表面仕上げを実現する方式であり，非常に安価に自前の光学部品を製造できる．用途ごとに最適な光学部品を事前にシミュレート設計し，オンデマンドで制作することが可能になりつつある．

(4) ユーザ計測

近年HMDを装着するユーザ自身を計測することで，ユーザ体験を向上する考え方が広がっている．最も一般的な計測対象は視線であり，研究用途だけではなくMagic Leap OneやStarVR Oneなど，視線追跡機能付きの市販HMDが増えている．筆者らは，赤外LEDの角膜反射像（第3プルキニエ像）の撮像位置が水晶体の厚みに敏感であることを利用して，眼の焦点距離を推定する方式を提案している[29]．また，瞳孔径からHMDバックライト輝度を自動調整する方式を提案している[30]．ミュンヘン工科大らは眼領域の画像とゴーグルを被った顔画像から，ゴーグルを被っていないユーザの顔画像を推定する手法を提案している[31]．一般にVR（Virtual Reality）ゴーグルを用いたシステムではユーザの表情がわからないという問題を解決でき，SNS（Social Networking Service）などの応用が考えられる．（清川）

6．輻輳調節矛盾の解消

立体映像は，VRやAR（Augmented Reality）の分野で実用化が大きく進み，低価格のHMDが多数商品化された．HMDでは，解像度，フレームレート，画角，輻輳調節矛盾の解決が大きな課題である．解像度に関しては1,000 ppi（pixel per inch）の液晶パネルが開発され，ピクセルが知覚されにくくなった．フレームレートに関しては120 HzのOLED（Organic Light Emitting Diode）パネルが開発された．画角に関しても，光学系の工夫で180度に迫るものが実現されている．AR用のシースルー機能を有するHMDでは，ホログラム光学素子を用いることで，装置の小型化が可能になった．しかし，輻輳調節矛盾の解決については，さまざまな方式が提案されている段階である．以下にそれ

らについて説明する．

(1) 複数の像を表示する方法

アリゾナ大学から提案された方法[32]で，左右の目それぞれに可変焦点距離ミラーとディスプレイを含む虚像結像系を対応させる．可変焦点距離ミラーを用いて，ディスプレイの画像の虚像を複数の異なる奥行き位置に結像することで，立体像への目のピント合わせを可能にする．ディスプレイには高速表示できるDMDを用いて，時分割で立体像を表示する．

(2) 可変結像系を用いる方法

スタンフォード大学から提案された方法で，ディスプレイを含む虚像結像系において可変焦点距離レンズやモータを用いて虚像の結像関係を動的に変更できるようにする[33]．左右の目の回転角を検出して輻輳による奥行き知覚位置を算出し，その奥行き位置にディスプレイの画像を虚像結像するように結像系の結像関係を変更する．これにより，輻輳と調節による奥行き知覚位置を一致させる．

(3) 超多眼表示を用いる方法

超多眼表示は，視点間隔を瞳孔径以下にすることで，輻輳調節矛盾を解決する．高フレームレート表示できる強誘電性液晶パネルと照明用にLEDアレイを用いて，時分割表示でアイボックス内に多数の視点を生成することで，超多眼表示を実現する方法が提案されている[34]．（高木）

7．立体映像と生体影響

HMDが一般に市販されるようになり，改めてVR技術が注目を集めると同時に，それを利用することで生じ得る生体影響への配慮の必要性が再認識されている．VRを構成する基本三要素であるAutonomy（自律性），Interaction（相互作用），Presence（存在）[35]を実現するために欠かせないものの一つとして，現在の技術では，立体視表示があると考えられる．このVR技術における生体影響は，立体映像において配慮されるべき視覚疲労に加え，車酔いのような症状の動揺病にも注目が向けられ，両者の要素が複合的に含まれた形で「VR酔い」として表現されることも多い．

ISO（国際標準化機構：International Organization for Standardization）では，人間工学をテーマとする技術委員会TC 159のSC 4（人間とシステムのインタラクション）の下に存在する，視覚表示の要求事項をテーマとするWG 2と映像の生体安全性をテーマとするWG 12において，立体映像に関連する人間工学についての規格化が審議されてきた．このうちWG 2においては，2014年1月に提案が行われたメガネ式立体ディスプレイに関する規格化審議が順調に進展し，2017年6月に国際規格（ISO 9241-333:2017）として発行された[36]．一方WG 12においては，2015年5月に立体映像による視覚疲労軽減のための人間工学的指針に関する国際規格がすでに発行されている[37]が，これに関連する映像の生体安全性に関する国際規格として，HMDでの酔いを含む映像酔いについて，関連する文献情報を整理した技術報告書と人間工学的指針の国際規格化審議が行われた．技術報告書については2017年1月に提案され，審議を経て2018年8月には発行が承認され[38]，現在発行の準備が進められている．一方，国際規格化については2017年1月に提案され，2018年5月に委員会原案（CD）として承認されて[39]，引き続き国際規格化に向け審議中である．さらに，WG 2とWG 12とで，HMDの人間工学に関する国際規格として，光学特性，VR酔い軽減，装着特性の三つの規格化審議が，今後開始されようとしている[40]．立体映像による生体影響の基盤研究についても引き続き継続的に行われており，2007年から隔年で開催されている「映像の生体安全性に関する国際シンポジウム（International Conference on Visually Induced Motion Sensations, VIMS）」は，2017年11月に第6回がカナダ・トロントにて開催され，その中でも関連発表が行われている[41]．現在のVR製品の普及とともに，立体映像による生体影響を抑えることの重要性が改めて認識されている．このような新たな立体表示技術の普及・促進を図るために，引き続き科学的な知見の集積とこれに基づくより利用しやすい指針の普及が望まれる．（氏家）

8．むすび

VRでは，立体映像技術が重要である．しかし，立体映像は，生体影響を充分に考慮しなければいけない点が従来の2D表示技術と大きく異なる点である．表示デバイスと立体映像コンテンツの双方がうまく設計・製作されたとき，初めて高品質な立体映像を見ることができる．このような観点で，現在さまざまな視点で研究開発が進められている．立体映像技術は，今後さらに普及していくことを期待する．

（2018年10月2日受付）

〔文　献〕

1) 加瀬澤ほか：“次世代ホログラム技術: Egarim & Holo-Window～フォトポリマFIGURA FILMが開く高度ホログラム技術の応用”，HODIC Circular, 37, 2, pp.9-15（2017）
2) 國枝ほか：“フルカラー積層体積型CGHにおける基板収差の補正”，映情学技報，42，29，pp.1-4（2018）
3) 五十嵐ほか：“大型の3D室内空間を再生する計算機合成ホログラムの計算法”，映情学技報，42，29，pp.5-8（2018）
4) 山本ほか：“電子ホログラフィ専用計算機HORN-8を用いた3次元映像システム”，映情学技報，42，29，pp.13-16（2018）
5) 小池：“ライトフィールドカメラ&ディスプレイ”，映情学誌，71，1，pp.36-40（2017）
6) T. Shimano, et al.: "Lensless light-field imaging with Fresnel zone aperture_: quasi-coherent coding", Applied Optics, 57, 11, pp.2841-2850（2018）
7) T.-C. Wang, et al.: "Light field video capture using a learning-based hybrid imaging system", ACM Trans. On Graphics, 36, 4, Article 133（2017）
8) https://www.blog.google/products/google-ar-vr/experimenting-light-fields/（2018）
9) R.S. Overbeck, et al.: "The making of welcome to light fields VR", ACM SIGGRAPH 2018 Talks, Article 63（2018）
10) T. Koito, et al.: "Newly developed light field display with ultra-wide viewing angle and high resolution", SID Symposium Digest of Technical Papers 2018, 21-4, pp.263-266（2018）
11) H. Ando, et al.: "Slit-based light field 3D display", ACM SIGGRAPH

2014 Emerging Technologies, Article 22（2014）
12) T. Tanoue, et al.: "3D communication system using slit light field", ACM SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies, Article 1 (2017)
13) H. Yano, et al.: "Spherical full-parallax light-field display using ball of fly-eye mirror", ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, Article 16（2018）
14) K. Otao, et al.: "Light field blender: designing optics and rendering methods for see-through and aerial near-eye display", ACM SIGGRAPH Asia 2017 Technical Briefs, Article 9（2017）
15) http://www.fujii.nuee.nagoya-u.ac.jp/~takahasi/Research/LFDisplay/index.html（2018）
16) K. Takahashi, et al.: "From focal stack to tensor light-field display", IEEE Transactions on Image Processing, **27**, 9, pp.4571-4584（2018）
17) Y. Maeda, et al.: "Volumetric display using rotating prism sheets arranged in a symmetrical configuration", Opt. Exp. **21**, 27074-27086（2013）
18) H. Kimura, et al.: "True 3D display using laser plasma in the air", ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies, p.20（2006）
19) Y. Ochiai, et al.: "Fairy lights in femtoseconds: aerial and volumetric graphics rendered by focused femtosecond laser combined with computational holographic fields", ACM Trans. On Graphics 35, **2**, 17（2016）
20) K. Kumagai, et al.: "Volumetric bubble display", Optica **4**, pp.298-302（2017）
21) 山本裕紹（監修）：“空中ディスプレイの開発と応用展開”，シーエムシー出版（2018）
22) 冨田勲×初音ミク：“ドクター・コッペリウス”，http://www.dr-coppelius.com/（accessed on Sep. 28 2018）
23) D. Dunn, et al.: "Wide Field of View Varifocal Near-Eye Display Using See-Through Deformable Membrane Mirrors", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **23**, 4,（2017）
24) N. Matsuda, et al.: "Focal surface displays", ACM Trans. On Graphics（TOG），**36**, 4,（2017）
25) R. Konrad, et al.: "Accommodation-invariant computational near-eye displays", ACM Trans. On Graphics（TOG），**36**, 4,（2017）
26) C. Jang, et al.: "Retinal 3D: augmented reality near-eye display via pupil-tracked light field projection on retina", ACM Trans. On Graphics（TOG），**36**, 6,（2017）
27) A. Maimone, et al.: "Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality", ACM Trans. On Graphics（TOG），**36**, 4,（2017）
28) K. Rathinavel, et al.: "Steerable application-adaptive near eye displays", Proc. ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies, Article No.17（2018）
29) Y. Itoh, et al.: "Monocular Focus Estimation Method for a Freely-Orienting Eye using Purkinje-Sanson Images", Proc. of IEEE Virtual Reality 2017（Mar. 2017）
30) C. Liu, et al.: "IntelliPupil: Pupillometric Light Modulation for Optical See-through Head-mounted Displays", Proc. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality（ISMAR）(Oct. 2018)
31) J. Thies, et al.: "FaceVR: Real-Time Gaze-Aware Facial Reenactment in Virtual Reality", ACM Trans. On Graphics（TOG），**37**, 2,（2018）
32) X. Hu, et al.: "High-resolution optical see-through multi-focal-plane head-mounted display using freeform optics", Optics Express **22**, 13896（2014）
33) N. Padmanaban, et al.: "Optimizing virtual reality for all users through gaze-contingent and adaptive focus displays", PNAS **114**, 2183（2017）
34) T. Ueno, et al.: "Super Multi-View Near-Eye Display Using Time-Multiplexing Technique", OSA Imaging and Applied Optics Congress, Orlando, Florida, USA, 26（June 2018）
35) 宮澤篤ほか：“ゲームにおける立体視表現の技法”，映情学誌，**67**，1，25-31（2013）
36) ISO 9241-333: "Stereoscopic displays using glasses"（June 2017）
37) ISO 9241-392:2015: "Ergonomic recommendations for the reduction of visual fatigue from stereoscopic images"（May 2015）
38) ISO/DTR 9241-393: "Structured literature review of visually induced motion sickness during watching electronic images of human-system interaction"（Nov. 2017）
39) ISO/CD 9241-394: "Ergonomic requirements for reducing undesirable biomedical effects of visually induced motion sickness during watching electronic images"（May 2018）
40) K. Hyodo, et al.,: "Recent achievement of standardization activities for head-mounted displays", IDW2017, Sendai, JP（2017）
41) N. Sugita, et al.: "Adverse Effect of Watching Three-Dimensional Image with Vertical Disparity", VIMS2017, Toronto, CA（2017）

堀越　力（ほりこし　つとむ）1985年，慶應義塾理工学部卒業．1987年，同大学大学院理工学研究科修士課程修了．同年，NTT入社．HI研究所，NTTデータ技術開発本部，NTTドコモ先進技術研究所を経て，2014年より，湘南工科大学情報工学科教授．主に，3Dディスプレイ，ユーザインタフェースに関する研究に従事．博士（工学）．正会員．

高木　康博（たかき　やすひろ）1986年，早稲田大学理工学部卒業．1988年，同大学大学院理工学研究科修士課程修了．1991年，同大学理工学部助手．1992年，同大学大学院理工学研究科博士後期課程修了．1994年，日本大学文理学部専任講師．2000年，東京農工大学工学部助教授．2014年，同大学教授．立体ディスプレイ，ホログラフィーの研究に従事．博士（工学）．正会員．

吉川　浩（よしかわ　ひろし）1985年，日本大学大学院理工学研究科博士課程修了．同年，同大学助手．現在．同大学教授．理工学部応用情報工学科勤務．1988年～1990年，MITメディアラボ客員研究員．計算機合成ホログラム，フリンジプリンタ，電子ホログラフィックディスプレイ，コンピュータグラフィックスなどの研究に従事．工学博士．当会フェロー認定会員．

小池　崇文（こいけ　たかふみ）1995年，東京工業大学理学部卒業．1997年，東京大学工学系研究科修士課程修了．同年，（株）日立製作所入社．2013年，法政大学情報科学部教授．コンピュテーショナル・ディスプレイ/カメラ，バーチャルリアリティ・拡張現実感，CGに関する要素技術から全体システム，応用までの研究に従事．博士（情報理工学）．正会員．

氏家　弘裕（うじけ　ひろやす）1991年，東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了．1995年，工業技術院生命工学工業技術研究所入所．現在，産業技術総合研究所人間情報部門感覚知覚情報デザイン研究グループ，グループ長．視覚の心理物理学を基盤として，運動立体視，奥行き知覚の基礎的研究に関わるとともに，映像の生体安全性に関する国際標準化と研究開発に携わる．正会員．

山本　裕紹（やまもと　ひろつぐ）1994年，東京大学工学部計数工学科卒業．1996年，同大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了．1996年，徳島大学工学部光応用工学科助手．2009年，同大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部講師．2014年より，宇都宮大学准教授となり，現在に至る．主に，情報フォトニクス，特に空中ディスプレイや高速表示技術の研究に従事．博士（情報理工学）．

清川　清（きよかわ　きよし）1994年，大阪大学基礎工学部情報工学科三年次中途退学．1998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．同年，日本学術振興会特別研究員．1999年，郵政省通信総合研究所（現 情報通信研究機構）入所．2002年，大阪大学サイバーメディアセンター助教授．2001年～2002年，ワシントン大学HITLAB客員研究員を兼務．2007年，同大学准教授．2017年，奈良先端科学技術大学院大学教授となり，現在に至る．博士（工学）．正会員．