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]，
福嶋慶繁[†5]，清川　清[†6]，氏家弘裕[†7]

1．まえがき

立体映像技術として3Dディスプレイデバイスそのものに関する研究例は従来に比べ減少しているが，当該技術の応用分野は着実に広まってきている．特に，ヘッドマウントディスプレイ（HMD）の普及に伴い，バーチャルリアリティ（VR）分野への応用事例が増えている．また，Google社のProject Tangoやライトフィールドカメラに関する技術の進展にともない，デプスセンサ等3次元空間情報の取得技術に関しての研究開発事例が増えてきている．本稿では，上記のような状況を鑑み，裸眼立体ディスプレイならびにホログラフィといった立体映像表示技術に関する技術動向のみならず，それらの応用分野としてコンテンツ・アプリケーション分野，デプスセンサとその応用技術，そしてヘッドマウントディスプレイの技術動向について紹介する．また，3D映像の生体影響に関する標準化の状況とともに，HMD等の3D映像における生体影響に関する近年の研究状況について紹介する．（堀越）

2．裸眼立体ディスプレイ

裸眼立体ディスプレイ技術の動向としては，大きな変化はなかった．しかし，数年前に電機メーカ各社が売り出したメガネあり立体テレビの失敗の記憶が薄れ，立体ディスプレイに対する期待が少し持ち直してきたようである．これには，以下で説明する幾つかの要因があると考える．

(1) スーパーハイビジョン放送の実用化の道筋が見えてきて，テレビ技術，カメラ技術，伝送技術などにめどが立ってきた．そのため，その先の放送技術として立体表示に対する関心が高まってきた．特に，今年度のNHK放送技術研究所の技研公開において，将来の放送技術として立体放送を大きく取り上げていたことがあげられる．

(2) ヘッドマウントディスプレイを用いたVR・AR技術がゲーム分野を中心に実用され，注目を集めている．最近では，ゲーム以外にも業務目的の利用も検討され，大きな広がりを見せようとしている．しかし，ヘッドマウントディスプレイは装着の不便さがあるため，メガネなしの立体ディスプレイに対する期待が高まってきた．

(3) 4K解像度や8K解像度のフラットパネルディスプレイの開発が進み，これらを用いると高解像度な立体ディスプレイが実現できる目途がたってきた．特に，SIDの年次大会であるDisplay Week 2016で，サムスンが行ったライトフィールドディスプレイとホログラフィックディスプレイのデモが注目を集めた．

最近では，Optics Express, Optics Letters, Applied Opticsなどの著名な論文誌では，中国や韓国から立体ディスプレイ関連の論文が急激に増加している．残念ながら，論文数においては，日本はかなり負けている状況である．立体ディスプレイはコンテンツも含めて，将来的に大きな産業になる可能性があるので，今後の研究の盛り上がりに期待したいところである．

立体表示方式としては，ライトフィールドディスプレイの研究が増えてきている．その多くは，フラットパネルディスプレイを複数枚重ねて用いることで，光線の進行方向を制御する構成を用いている．複数のフラットパネルディスプレイを用いると利用できる画素数が増えるが，立体表示に必要な光線数に比べると少ないので，最適化計算を用いて可能な限り目的とする光線状態に近づける方法であ

†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 名古屋工業大学 大学院工学研究科
†6 大阪大学 サイバーメディアセンター
†7 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

"ITE Review 2017 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), Norishige Fukushima (Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Department of Computer Science, Aichi), Kiyoshi Kiyokawa (Cybermedia Center, Osaka University, Osaka), Hiroyasu Ujike (Human Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Ibaraki)

映像情報メディア学会誌 Vol. 71, No. 1, pp. 68～73（2017）

る．つまり，適度なハードウェア構成と高度な計算を用いて裸眼立体表示を実現しようとするアプローチである．

上記でも述べたが，最近では4K解像度のフラットパネルディスプレイが普及し，低価格化も進んでいる．今後は，これらの超高精細なフラットパネルディスプレイを用いて，メガネなしの立体ディスプレイの開発や商品化が進むと考えられる．しかし，メガネがなくなれば，本当に問題は解決するのかは考えるべきである．視覚疲労の問題は未解決のままである．以前のメガネありテレビの失敗を教訓に，立体表示が必要な分野を見極め，関連したインフラ技術やコンテンツ開発なども含めた総合的な研究開発が進むことを期待したい．（高木）

3．ホログラフィ

被写体からの光を波面として記録・再生が可能なホログラフィは，レーザ光源と感光材料を用いるアナログ的な方法では実物と区別がつかない高画質のものが実用化されている．さらに，ディジタル技術を導入して計算機でのホログラムの合成や，プリンタ，ビデオディスプレイについても研究が進められている．

レーザによる記録のための書換え可能なホログラム材料としてはフォトリフラクティブ効果を利用したものがあるが，記録保持のために高電圧を印加する必要があった．これに対して，フォトクロミック効果を利用して高電圧の印加が不要な書換え可能な記録材料が提案された[1]．この材料は応答速度が速く，実時間での記録と再生が可能であることが示された．

ホログラフィックビデオディスプレイのためのファラデー効果（磁気旋光）を利用した空間光変調器が提案された[2]．ホログラムの干渉縞を3次元物体のデータから生成する計算機合成ホログラム（CGH）のパタンをDMD（Digital Micromirror Device）に表示して光学的に縮小転写し，14 mm角で画素サイズ1 μ mのホログラムから視域角22°の3次元像を再生することができた．

CGHの計算においては，物体を点光源の集合としてあらわす「点光源法」と，コンピュータグラフィックス（CG）のようにポリゴンの集合として表す「ポリゴン法」がある．点光源法は1点ごとの計算は単純だが，点光源数の多い複雑な物体では計算時間が長くなる．それに対して，ポリゴン法ではポリゴン数は点光源数より少なくできるため計算の繰り返し回数は減少するが，ポリゴンごとの計算は点光源法より複雑で時間がかかる．同じ物体を用いて，点光源法とポリゴン法の計算時間と再生像を比較した研究が報告され[3]，両方法の特徴が明らかにされた．CGHの高速計算として，ポリゴンを規則的に並んだ点光源に置き換え，さらに幾何級数により一つにまとめることで，ポリゴン当たりの計算を高速化する方法が報告されている[4]．グラフィックプロセッサ（GPU）を用いて行った計算では，従来のFFTを用いたポリゴン法よりも高速に計算できることが示されている．点光源法によるフルカラーのCGHをリアルタイムに計算・表示するシステムとして，13個のGPUを用いた5台のPCによるシステムが提案された[5]．1台のPCにGPUを1個搭載し制御と表示に使用し，4台のPCにGPUを3個ずつ搭載しCGHの計算に使用している．物体の点光源情報をRGBの三原色に分解し，各GPUで各色の計算を行い，4台のPCを時分割で計算させることにより，1色あたり約21,000点で構成される物体を毎秒60で生成することに成功した．

CGHをハードコピーとして出力するためのプリンタの研究が活発である．情報通信研究機構は反射型液晶（LCOS）に表示したCGHを光学的に転写して反射型体積ホログラムを出力するプリンタを開発している[6]．原理自体は先行研究と大きな違いはないが，要素ホログラムの繋ぎ目が目立たない，コントラストの高い再生像が得られている．また，東京藝術大学COIとのコラボレーションによりアートとしての応用についても研究している[7]．（吉川）

4．コンテンツ・アプリケーション

本章では，立体映像に関連したコンテンツ・アプリケーション，産業応用について報告する．まず，全天球映像を撮影する全天球カメラ，続いてHMD向けを中心とするVRコンテンツ，さらにAR・MR応用の順に紹介していく．また，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最近の事業化動向についても述べ，最後に産業応用につながる研究例を取り上げる．

まず，全天球カメラは，2013年に発売されたRICOH THETAから火が付き，多くのカメラメーカから同等の機能を持つカメラが発売された．一般に，2台の魚眼カメラを表裏に付けた構成となっている．最近では，iPhone等のスマートフォンに接続するタイプの全天球カメラも登場している．

ハイエンド向けの全天球カメラとしては，FacebookのSurround 360は全天球映像や立体映像を撮影するカメラアレイシステムであり，システムの側面に広角レンズのカメラを14台，頂点に魚眼レンズを1台，底面に魚眼レンズを2台の計17台のカメラを配置している．ハードウェア含めた設計図とソフトウェアが公開されおり，誰でも製作できようになっている[8]．

全天球映像は，FacebookやYouTubeでサポート，Gear VRやハコスコといった手持ちのスマートフォンでコンテンツを閲覧できる手軽さ，VRブームとの親和性の良さ等のさまざまな状況が手伝ってか，ここ数年で一般的となった．リオオリンピックでも，NBCがSamsungのGear VR向けに，全天球のオリンピックコンテツ映像を配信している[9]．また，Googleは，Google Spotlight Storiesと題して，全天球映像のコンテンツを実験的に制作し配信している[10]．

続いて，VRコンテンツに関して，研究段階のものと，商用のものと二つ紹介する．

まず，研究段階のものは，東京大学の廣瀬・谷川・鳴海研究室による，“無限回廊- Unlimited Corridor”が挙げられ

る[11]．HMDを装着して，VR空間を歩くコンテンツであるが，実際には，直径5ｍの円形の壁に沿って歩いているのに対して，体験者はVR空間中をまっすぐに歩いているように感じる．VR空間で体験者の誘導手法として知られるRedirected Walking[12]を用いており，とても興味深い．

商用のコンテンツとしては，バンダイナムコが，“VR ZONE Project i Can”と題して，実験的に一般向けのVRコンテンツサービスを行った[13]．2016年4月15日（金）から10月10日（月）までの約半年間，東京の臨海副都心にあるダイバーシティ東京にて，コンシューマ向けHMDであるHTC VIVEを用いて，有料VR体験コンテンツの展示を行った．8種類のコンテンツを用意しており，ガンダムなどの人気アニメを題材にしたものや，スキー，高所体験，ホラーなどである．いずれも，VRコンテンツとして効果的だと思われる題材であり，商用コンテンツとはいえ，実証実験的な意味合いも強かったようである．1時間半の入れ替え制で，大変な人気を博し，予約制であったが，だいぶ先まで予約が取れないという状況であった．

また，AR・MR応用として，マイクロソフト社のHMDであるHoloLensを用いて，ボーイング社が，ドローンと消防隊を管制するシステムのデモを公開している[14]．また，JALも同様にHoloLensを用いて，飛行機整備士の訓練用シミュレーションシステムを開発している[15]．

ライトフィールドカメラに関しては，Light社は13Ｍピクセルのイメージセンサ16個を用いたカメラを発売している[16]．各センサはレンズが異なっており，5個は28 mm，5個は70 mm，残りの6個は150 mmという構成である．また，配置も一見ランダムに見えるような配置となっている．16個のセンサで撮影し，高解像度画像の生成やリフォーカス画像の生成を行っている．一種のライトフィールドカメラであり，立体映像技術の新しい事業化例といえる．また，Appleも，iPhone7 plusで2個のイメージセンサを搭載しており，今後，複数イメージセンサを持ったカメラの普及が期待できる．

一方で，ライトフィールドカメラの製品として有名なLytro社は，創業者が去り，方向性も大きく変わったようである．今までのコンシューマ，プロシューマ向けの製品の新製品は登場せず，映画撮影用やVR用のプロ向けのライトフィールドカメラをリリースしている．

立体ディスプレイの事業化については，HMD以外の目立ったものはないが，MITの元研究者のHirshらにより立ち上げられたスタートアップ企業のLumiiが注目されている[17]．ライトフィールドディスプレイとカメラによる視点認識を組合せて，より自然な裸眼立体ディスプレイを目指しているようである．現状では，Kinect等の3Dスキャナで上半身を撮影し，上半身の3D形状を復元し，その結果を，立体ポートレイトとして，印刷するデモを行っている．テンソルディスプレイ（多層方式のライトフィールドディスプレイ）と同等の原理を用いており，2枚の透明シートに印刷して貼り合わせるものである．今年のSIDやSIGGRAPHで実際に展示をしている．

また，空中像と3Dプリンタを組合せた研究も，慶應義塾大学の筧研究室により提案されている．“MiragePrinter”は，体験者が3Dプリンタの中を覗くと，3Dプリントされる位置に空中像が映しだされており，実寸大の映像を編集すると造形物が3Dプリントされる[18]．（小池）

5．デプスセンサと自由視点画像合成

2010年にマイクロソフトから発売されたコンシューマ向けデプスセンサであるKinectの登場以来，いくつものデプスセンサが発売されてきた．VRが盛り上る2015年，2016年中でも，いくつも新たなデプスセンサが登場している．コンシューマ向けデプスセンサにはいくつかの種類があり，プロジェクタ・カメラによるStructured Light形式，ToF（Time-of-Flight）形式，古典的なステレオカメラ形式がある．Kinectは初代V1（2010年）がStructured Light形式，次世代のV2（2014年）がToF形式である．また，近距離用のナチュラルユーザインタフェースであるLeap Motion（2012年）は，赤外線画像による古典的なステレオカメラである．

2015年の早期から，新たなデプスセンサであるIntel RealSense（元の名はIntel Perceptual Computing）がノートPCやタブレットに搭載されて発売された．このセンサは，インテルが開発する3Dセンサであり，PC等へ内蔵することを前提としている．開発者用には，単独で動作するものも発売されており，2015年には，近距離用のデバイスRealSense F200や中距離用のデバイスRealSense R200が100ドル程度で購入可能になった．2016年頭には，近距離用のデバイスの新型RealSense SR300が発売され，2016年夏には，さらに新型のRealSense 400が発売されることが発表されるなど活発な動きが見られる．この次世代機では，大幅な小型化と点群量の倍増が達成されるとされている．現行のRealSenseの動作原理として，F200とSR300がIRカメラとIRプロジェクタ一つずつからなるStructured Cording形式で動作している．また．IRカメラ二つとIRプロジェクタ一つで構成されるR200は，Structured Codingとステレオカメラを混合したアルゴリズムで動いていると考えられる．R200はVGAなら30 fpsで取得可能であり，またSR300はVGAで60 fps，640 × 240のサイズなら110 fpsで取得可能であり，1秒当たりに取得可能なデプスの点群量は，コンシューマ向けの中で現伏，最も多い．加えて，分解能や精度も非常に高いセンサである．VR元年と呼ばれる2016年において，VRデバイスが数多く登場する中，これらのRealSenseデバイスもインテルの提唱するVRプロジェクトであるProject Alloyに組込まれ，更なる発展をすると考えられる．他にも，ヘッドマウントディスプレイOculus Rift用に，最大2560 × 1920の解像度で撮影することが可能な高解像度ステレオカメラOvrvision Pro(2015年）も発売された．

ステレオカメラ化の流れは，スマートフォンにもあった．

2016年6月発売のHUAWEI P9や2016年9月発売のiPhone 7 Plusはデユアルカメラを搭戦している．HUAWEIの端末は．1,200万画素のステレオカメラを搭載し，一つは通常のカメラ，もう一つはカラーフィルタのないカメラである．二つのカメラから，画質を向上させたり，任意のぼけを再織成させたりする機能を付与している．アップルの端末は，左右で焦点距離の違うレンズを搭載している．カメラを切替えることで，光学ズームを実現したり，ステレオカメラとして奥行き情報を取出し，レンズのぼけを再現したりしている．また，機械学習を用いることで，より高精度な奥行き情報を復元できるようになるとアップルは発表している．

アルゴリズムの面からもいくつかの特徴的な発表があった．デプスセンサに偏光フィルタを複数追加するだけで，既存のコンシューマ向けデプスセンサの精度を，精密なレーザレンジファインダクラスまで向上させ得ることがMITから報告されている[19]．また，機械学習をデプスセンサや自由視点画像合成に応用する例もいくつか登場している．例えば，マイクロソフトからStructured Light形式で撮影されたデプスセンサのデータの復号をランダムフォレスト用いて行うことで，Kinect V1のセンサを用いながらも，ノイズの低減や分解能の向上を達成し，現行のKinect V2やR200よりも高精度なデプス復元が可能とした．加えて，アルゴリズムの並列性が向上したことにより，計算の大幅な高速化を達成することに成功したことが報告された[20]．その他にも，自由視点画像合成をディープラーニングの枠組みで行う方法がGoogleから提案された[21]．このアルゴリズムでは，任意の2視点の画像を，合成したい仮想視点上に張られるプレーンスイープ平面に複数投影し，その投影画像群をディープラーニングの入力として，仮想視点上に合成画像を生成する．学習は，画像が撮影済みの位置に合成視点を設定し，それを正解画像とすることで行った．この技術を使うことでGoogleストリートビューの自由視点化などが期待されている．また，これらのように3次元のアルゴリズムに機械学習が取り入れられていく流れが加速すると予想される．（福嶋）

6．ヘッドマウントディスプレイ

近年注目されるヘッドマウントディスプレイ（HMD）に関しては，超広視野，被写界深度ボケの再現など，新しい特徴を備えるさまざまなHMDや，HMDを観察するユーザの眼を考慮した高度な校正手法，視覚拡張に関する新しい応用事例等が次々に登場している．

⑴ 広視野化

非シースルーHMDでは水平視野角150°～210°程度のものが存在し，VRでは広視野であるほど周囲の状況認知に有効であることが知られる．一方，光学シースルーHMDは広視野化が困難であり，ARではどの程度の視野角が必要かも明らかでない．大阪大学の岸下らはHMDの一種である頭部搭載型プロジェクタに双曲面ハーフミラーを併用し広視野化を達成している．2014年には屋内外の被験者実験を通じ，ARでも広視野であるほど情報探索効率が向上し，水平視野角120～130度程度で飽和することを明らかにした[22]．2014年，ノースカロライナ大とNVIDIAは広視野光学シースルーHMDの新たな構成方式としてピンライトディスプレイを発表した[23]．これは，点光源アレイと透過型液晶ディスプレイから構成される微小なプロジェクタアレイを眼前に構成するもので，原理的には任意の広さの視野角を実現できる．ただし，瞳孔位置の正確な計測や光学的アーチファクトの解消などの課題がある．

⑵ 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．一方，高密度映像素子とマイクロレンズアレイを用いた光線情報（ライトフィールド）の原理に基づくHMDが2013年にNVIDIAから提案されている[24]．光線情報を再現するため両眼立体視はもちろん，視点移動に伴う運動立体視や焦点調節などのさまざまな奥行き手がかりを提供できる．接眼光学系が不要なため全体を極めて薄くでき，映像面に眼球を近接するため，視野角も大きくしやすい．ただし，レンズアレイ方式は映像素子の画素数に比べて同時に観察できる画素数が少なく，望まれない映像ボケも発生しやすい問題がある．

2015年にはNVIDIAとスタンフォード大から，こうしたレンズアレイ方式の問題点を緩和するHMDが提案されている[25]．これはスタックした複数の透過型液晶パネルを用いて，それらを通過する光線情報を非負値行列の因子分解により再現するものである．この方式は映像素子の解像度をフルに活用できる利点があり，レンズアレイに起因する映像ボケも生じない．光線再生によるHMDは将来の本命として飛躍的に発展する可能性が高い．

一方，光学シースルーHMDで自然な奥行き感を提示するためには，液体レンズやMEMSなどを用いて複数の焦点距離に時分割で映像を提示することが多い．ノースカロライナ大では，複数の透過型液晶ディスプレイをスタックする，光学シースルーの光線再生式HMDを提案している[26]．Magic Leap社は導光板と回折素子，光ファイバアレイを用いて高精細な光線再生式の光学シースルーHMDを開発していると言われている[27]．導光板を用いたHMDにはさまざまな種類があるが，いずれも薄型軽量化に適しており光学シースルーHMDの本命としてさらに発展していくだろう．

⑶ 校正技術

近年ユーザの眼を考慮してより厳密な校正を行い，全体としてのHMDの性能を向上する考え方が広がっている．例えば，大阪大学のプロプスキらはユーザ視点でのHMD映像がユーザの角膜に映り込んでいることに着目し，眼球位置を実時間かつ高精度に推定する手法を実現している[28]．角膜反射像の解析により注視物体の同定，実環境と重畳映像のコントラストや位置合わせなどの最適化なども可能になる

と期待している．また，光学シースルーHMDの視点依存の収差の様子を4次元の光線情報として学習し補正する手法も提案されている[29]．これらの手法を組合せることで，これまでにない精度でのAR体験が可能になると考えられる．

(4) 日常的な視覚拡張ツールとして

これまでHMDは計算機情報を提示することに専ら用いられてきた．近年，HMDを用いて現実世界そのものの見え方を変化させ，ひとの視覚を自由自在に再定義しようという考え方が広がっている．これまでに筆者らは，動物体の予測軌道が見られるARシステム[30]や，凝視すると視界がズームしたり周囲を見回すと超ワイドの視界が得られたりするビデオシースルーHMD[31]などを開発している．筆者らはHMDが小型軽量高性能になるにつれ，特殊用途ではなく日常生活をより便利，快適，安全にするためにオンデマンドで適応的に視覚を再定義するこうしたHMDの応用が盛んになると考えている． （清川）

7. 生体影響とガイドライン

立体映像による生体影響は，ここに来てヘッドマウントディスプレイ（HMD）やこれを用いたバーチャルリアリティ（VR）技術が注目されることで，改めてその配慮への必要性が再認識されている．特に，こうしたVR環境での生体影響は，従来立体映像で焦点の当てられていた視覚疲労に加えて映像酔い的要素も合わせることで，「VR酔い」として表現されることが多い．

ISO（国際標準化機構）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，立体映像に関わる人間工学についての規格化が審議されてきた．このWG 2においては，2眼式裸眼立体ディスプレイおよびメガネ式立体ディスプレイに関する規格化の検討が行われ，それぞれ2014年2月と1月に提案が行われた．その結果，2眼式裸眼立体ディスプレイについては，投票総数14ヵ国中賛成11ヵ国反対なしであったが，規格化審議への参加登録国が定数の5ヵ国に満たず，承認されなかった．一方メガネ式立体ディスプレイについては提案が承認され，2016年1月には委員会原案（CD）として，また2016年9月には国際規格原案（DIS）として，投票の結果承認されており[32]，2017年6月に国際規格（IS）発行の見通しとなっている．

一方WG 12においては，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化が，2011年に提案され，その後の審議を経て2015年5月に国際規格（ISO 9241-392:2015）として発行された[33]．この規格では，立体映像による視覚疲労の要因を主に両眼映像間の幾何学的ズレ，測光的ズレ，クロストークおよび調節と輻輳の距離情報の不一致に分類し，それぞれについて留意すべき点と考慮すべき基準値を提示している．また現在，HMDなどVRによる観点を含めた映像酔い軽減のための人間工学的指針について，日本国内にて経済産業省の国際標準化事業によりその国際規格化が検討され，2016年度中にISOにおいて具体的な審議の開始が見込まれている．さらにこの他，HMDに関わる人間工学的側面について総合的に指針を作成し，その国際規格化を進めることも検討されている．

ガイドラインの基盤となり得る立体映像における生体影響の研究についても，さまざまな観点で報告が行われている．その一つの例として，2007年に第1回が開催された「映像の生体安全性に関する国際シンポジウム（VIMS）」は，2015年9月に第5回として東京・お台場にて開催され，17件の講演の中で，立体映像による生体影響について6件の発表が行われた．具体的には，招待講演にて，HMDにおける生体安全性の視点での現場での映像制作の課題[34]や，この分野のエキスパートの視点による立体映像表示における生体影響の主要な点[35]について講演されるとともに，一般講演では，映像酔いと身体動揺について2Dと3D映像での比較や垂直視差による視覚疲労への影響[36]，また快適視差範囲の個人差の問題[37]，さらに視差の分布と快適視差範囲の問題[38]について発表が行われた．

現在のVR技術やその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高まると思われる．今後，こうした新しい立体表示技術の普及を促進するためには，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

立体映像技術およびその関連技術に関する研究開発動向について，主に最近の2年間の進展をまとめた．立体映像表示・入力（取得）デバイス自体の高性能化・小型化・低コスト化が進み，立体技術の応用分野は今後もますます増大していくことが期待できる．

4年後の東京オリンピック・パラリンピック開催に向け，立体映像に対する期待は高い．そのため，立体映像に触れる利用者層はさらに広がり，今後，より安全で見やすい立体映像技術の確立が急務である． （堀越）

（2016年10月10日受付）

〔文　献〕

1) 阿部二郎：“高速フォトクロミック材料を用いたリアルタイムホログラフィー”，HODIC Circular，35，1，pp.6-10（2015）
2) K. Nakamura, H. Takagi, T. Goto, P.B. Lim, H. Horimai, H. Yoshikawa, V.M. Bove, Jr. and M. Inoue: "Improvement of diffraction efficiency of three-dimensional magneto-optic spatial light modulator with magnetophotonic crystal", Appl. Phys. Lett., 108, p.022404（2016）
3) 中辻憲昭，松島恭治，伊藤智義，下馬場朋：“点光源法とGPUで計算した全方向視差高解像度CGHの再生像”，映情学技報，40，29，pp.13-16（2016）
4) 坂本雄児，菅原拓弥，渡邊良亮：“幾何級数を用いた計算機合成ホログラムの高速計算法”，映情学技報，39，34，pp.17-20（2015）
5) 高田直樹，荒木啓充，猪川祥平，庭瀬裕章，藤原将人，前田祐貴，中山弘敬，角江崇，下馬場朋禄，伊藤智義：“レーザ光源を用いたGPUクラスタシステムによるリアルタイム電子ホログラフィ”，3次元画像コンファレンス，P-5（2016）
6) K. Wakunami, R. Oi, T. Senoh, H. Sasaki, Y. Ichihashi and K.

Yamamoto: "Wavefront printing technique with overlapping approach toward high definition holographic image reconstruction", Proc. SPIE 9867, p.98670J（2016）
7）東京藝術大学COI：“共感覚メディア研究グループ成果報告会開催”，http://innovation.geidai.ac.jp/information/160331/（2016）
8）Surround 360，https://github.com/facebook/Surround360
9）Experience the Rio Olympics in virtual reality, NBC, 2016，http://www.nbcolympics.com/news/experience-rio-olympics-virtual-reality
10）Google Spotlight Stories，https://atap.google.com/spotlight-stories/
11）K. Matsumoto et al.: "Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction", SIGGRAPH 2016, E-Tech（2016）
12）S. Razzaque et al.: "Redirected walking", EUROGRAPHICS, 9（2001）
13）VR ZONE Project i Can，https://project-ican.com
14）Boeing: UAVs. Holograms. Wildfire.，https://youtu.be/omGoz66xHU8
15）JALプレスリリース：“ JAL, マイクロソフトの最新ホログラフィックコンピュータ「Microsoft HoloLens」の業務活用プロトタイプを開発”，16013（2016）
16）Light L16 camera，https://www.light.co/camera
17）Lumii，http://www.lumiidisplay.com
18）J. Yamaoka and Y. Kakehi: "MiragePrinter: interactive fabrication on a 3D printer with a mid-air display", SIGGRAPH 2016 Studio（2016）
19）A. Kadambi, V. Taamazyan, B. Shi and R. Raskar: "Polarized 3D: Depth Sensing with Polarization Cues", in Proc. International Conference on Computer Vision（ICCV）（2015）
20）S.R. Fanello, C. Rhemann, V. Tankovich, A. Kowdle, S.O. Escolano, D. Kim and S. Izadi: "HyperDepth: Learning Depth from Structured Light without Matching", in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR）（2016）
21）J. Flynn, I. Neulander, J. Philbin and N. Snavely: "DeepStereo: Learning to Predict New Views from the World's Imagery", in Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition（CVPR）（2016）
22）Kishishita et al.: "Analysing the Effects of a Wide Field of View Augmented Reality Display on Search Performance in Divided Attention Tasks", Proceedings of the IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality（ISMAR）2014, pp.177-186（2014）
23）Maimone et al.: "Pinlight displays: wide field of view augmented reality eyeglasses using defocused point light sources", ACM Transactions on Graphics（TOG）, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2014, 33, 4（2014）
24）Lanman et al.: "Near-Eye Light Field Displays", ACM Transactions on Graphics（TOG）, 32, 6, Proceedings of SIGGRAPH Asia（2013）
25）Huang et al.: "The Light Field Stereoscope: Immersive Computer Graphics via Factored Near-Eye Light Field Display with Focus Cues", ACM Transactions on Graphics（TOG）, Proceedings of ACM SIGGRAPH 2014, 34, 4（2015）
26）Maimone et al.: "Computational Augmented Reality Eyeglasses", Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality（ISMAR）2013, pp.29-38（2013）
27）US Patent Application, US 2015/0016777 A1（2015）
28）Plopski et al.: "Corneal-imaging calibration for optical see-through head-mounted displays", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 21, 4, pp.481-490（2015）
29）Itoh et al.: "Light-Field Correction for Spatial Calibration of Optical See-Through Head-Mounted Displays", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 21, 4, pp.471-480（2015）
30）Orlosky et al.: "ModulAR: Eye-Controlled Vision Augmentations for Head Mounted Displays", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 21, 11, pp.1259-1268（2015）
31）Itoh et al.: "Laplacian Vision: Augmenting Motion Prediction via Optical See-Through Head-Mounted Displays", Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016（AH'16）（2016）
32）ISO/DIS 9241-333: "Stereoscopic displays using glasses"（Sep. 2016）
33）ISO 9241-392:2015: "Ergonomic recommendations for the reduction of visual fatigue from stereoscopic images"（May 2015）
34）K. Takahashi: "The actual conditions of a production site for VR contents against VIMS", VIMS2015, Tokyo, JP（2015）
35）W.J. Tam: "Research on visual comfort and stereoscopic 3D video", VIMS2015, Tokyo, JP（2015）
36）A.J. A. Lubeck, J.E. Bos, J.F. Stins: "Equally moved and No.really sick from viewing 2D and 3D motion stimuli on a TV screen", VIMS2015, Tokyo, JP（2015）
37）K. Sasaki, M. Yoshizawa, N. Sugita, M. Abe: "Relationship between Visual Fatigue and Vertical Parallax Amount", VIMS2015, Tokyo, JP（2015）
38）H. Mizushina, H. Ando: "Individual difference in comfort range of stereoscopic screen disparity and its relationship with visual function", VIMS2015, Tokyo, JP（2015）
39）H. Ujike, H. Watanabe: "Effects of relative disparity and its range on s3D visual comfortability", VIMS2015, Tokyo, JP（2015）

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．

福嶋　慶繁（ふくしま　のりしげ）　2004年，名古屋大学工学部電気電子情報工学科卒業，2006年，同大学大学院工学研究科電子情報システム専攻博士課程前期課程修了．2009年，同大学大学院工学研究科電子情報システム専攻博士課程後期課程修了．同年，名古屋工業大学大学院工学研究科助教，2015年より，同大学大学院工学研究科准教授．主に画像信号処理，3次元映像処理，並列処理の研究に従事．博士（工学）．正会員．

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．2007年，同大学准教授．2001年～2002年，ワシントン大学HITLAB客員研究員を兼務．博士（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．