

立体映像技術の研究開発動向

陶山 史朗^{†1}, 小池 崇文^{†2}, 掛谷 英紀^{†3}, 氏家 弘裕^{†4}

1. まえがき

最近になり、3D表示関連において、幾つかの新しい概念が出てきており、立体映像技術関連が新たな段階に入りつつあるように感じている。本稿では、新しい概念を含むライトフィールド、空中像、Near-eyeなどの基盤技術、これを展開する応用技術、および3D映像を扱う上での注意点である生体影響などについて紹介する。

(陶山)

2. ライトフィールドディスプレイカメラ

まず、ライトフィールド(LF)という用語を見かける機会が増えてきた。しかしながら、ホログラムと同様に、必ずしも正しいとは言えない使い方が増えてきている。

LFは、Faradayのアイデアを語源とし、3次元空間中の光線を、位置と方向の5次元(種々の条件によっては4次元)のパラメータで記述する概念である。したがって、LFディスプレイカメラとは、この4~5次元の情報を取得・再生できるものを表す。サンプリング周期等に関する基準はないため、どこからLFディスプレイ・カメラと呼ぶのかに関して、厳密に基準を設けるのは難しいが、空中像であったり、2視差の裸眼立体視であったりしても、LFの表現が使われていることがあるので注意が必要である。

LFディスプレイは実用化も始まりつつある。回折格子を用いた光線方向制御の研究をしていたDavid FattalらのLeia社が、4×4視点のLFを表示するタブレット端末のLume Padを2020年10月から販売を開始した¹⁾。ディスプレイは10.8インチ、プロセッサはSnapdragon 845、オペレーティングシステムはAndroidを搭載している。執筆時点で実機が確認できていないため、詳細は不明であるが、Leia社からは多数の特許が出願されており、デバイスの構

造はある程度予想ができる。裸眼3Dディスプレイでビジネス的に成功した例はほとんどないので、大いに期待したい。

LFディスプレイにおいても機械学習が用いられる例が出てきている。テンソルディスプレイ(積層型、レイヤ型とも呼ぶ)では、LFを複数の2D画像レイヤに分解する必要があるが、名古屋大のMaruyamaらによって、CNN(Convolutional Neural Network)を用いた分解を行うことで、従来手法よりも、PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)やSSIM(Structural SIMilarity)が向上することが示された²⁾。

LFカメラに関しては、この2年で大きく進歩があった。ただし、新しい光学系の提案というよりは、本分野においても、機械学習の利用が増えたことによるものが多い。

LFカメラは、カメラアレイ型とレンズアレイ型の2種類に大きく分けられる。カメラアレイ型は、その名の通りカメラを複数台並べるか、1台のカメラを移動させて撮影する方式である。レンズアレイ型は、さらに、Plenoptic Camera, Focused Plenoptic Cameraの二つに分けられるが、Focused Plenoptic Cameraを発展させたものとして、複数焦点のレンズから構成されるMulti-Focused Plenoptic Cameraがある。藤田らは、Multi-Focused Plenoptic Cameraにおいて、レンズアレイ内の各レンズに対応する画像の部分画像を表すパッチの大きさであるパッチサイズの推定手法と、異なる焦点距離の画像の統合方法の両方を改善することで、多視点画像の生成を従来よりも高品質化する手法を提案している³⁾。

続いて、カメラアレイ型に分類される研究をいくつか挙げる。スマートフォンを用いて複数視点で撮影するだけで、LFを生成する手法がMildenhallらにより提案されている⁴⁾。LFでは、Plenoptic Samplingにより、シーンの奥行き範囲によってナイキストレートが求まるが、深層学習を用いることにより、非周期で、かつ、4000倍以上少ない画像から、ナイキストレートでのサンプリングと同程度の画質をもつ画像生成ができるようになった。

2年前の報告⁵⁾でも紹介した、GoogleのOverbeckらが提案している16台のGo Proカメラを鉛直方向に円弧状に並べて回転させてLFを取得する技術⁶⁾⁷⁾は静止画の自由視点であった。Googleの同研究グループのBroxtonらは、46台

^{†1} 徳島大学

^{†2} 法政大学

^{†3} 筑波大学

^{†4} 独立行政法人産業技術総合研究所

"The Trend of Three Dimensional Image Technology" by Shiro Suyama (Tokushima University, Tokushima), Takafumi Koike (Hosei University, Tokyo), Hideki Kakeya (University of Tsukuba, Ibaraki) and Hiroyasu Ujiie (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Ibaraki)

のビデオカメラを球面上に配置したカメラアレイで撮影し、機械学習を用いた補間を行うことで、動画対応を実現している^{8) 9)}。

機械学習を活用した例としては、Mildenhallらが、全結合のディープニューラルネットワークを用いることで、LFを入力とし、ボリューム密度とRGB画像を出力する手法を提案している¹⁰⁾。出力結果に対して、ボリュームレンダリングを行うことで、任意視点の画像を生成できる。

機械学習が増えてきた一方で、LFに固有の画像特徴量も提案されている。SIFT特徴量をLFに拡張したLiFF (Light Field Feature) が、Dansereauらにより提案されている¹¹⁾。従来手法に比べて、精度、速度ともに改善が見られ、SfM (Structure from Motion) などのアプリケーションに効果が発揮される。

最後に、ホログラフィの研究動向についても簡単に触れたい。Jangらは、レンズとレンズアレイ、フォトポリマーを導入組み合わせたPupil-Shifting HOE (PSHOE) を導入することで、視域を広げたNear-Eye型のホログラフィックディスプレイを提案している¹²⁾。

CGHにも機械学習を導入が始まっており、大阪大学のHorisakiらはディープラーニングを用いたCGH (Computer Generated Hologram) を提案している¹³⁾。Pengらは、HoloNetと呼ばれるディープニューラルネットワークを導入し、さらに最適化を加えることで、2Dではあるが高画質のリアルタイムフルカラーホログラムを実現している¹⁴⁾。

このように、LFとホログラムの垣根も少しずつ埋まってきているようである。われわれ、研究者は両方の研究動向を追っていくことが必要な時代になってきたようである。(小池)

3. 空中ディスプレイ

空中ディスプレイとして、何もない空間に、2D像や3D像を問わずに、像を浮かべることができれば、いろいろな応用が期待できる。そのため、近年、その研究開発が活発化してきている。

透過型空中虚像ディスプレイは、ハーフミラーなどを用いて、虚像を例えばステージ上に提示させるものであり、空中虚像とステージ上の実物との擬似インタラクションが可能である¹⁵⁾。特に、等身大の大規模なシステムでは、観察者から見て、擬似インタラクションなどにより、迫力と臨場感や実在感を大きく助長することが可能となっている。今後、ステージ上の実物と空中虚像とのインタラクションを適切に行うための技術が必要とされると考える。

擬似的な空中実像の一つとして、アーク3D表示方式¹⁶⁾は、スムーズで連続的な運動視差を原理的に有し、単眼奥行き知覚と滑らかな動きを実現できることが明らかになっており¹⁷⁾、またピント調節もほぼ満足できる¹⁸⁾。したがって、光学の実像と同様に立体視の生理的要因を満足でき、これに近い立体知覚像を得られると考える。このアーク

3D表示では、数メートル級で大きく飛び出させることも可能であり、観察位置の制限も緩和されている。また、最近では、動画化にも新たな方法が提案されており、複数の3D像に変化可能なことが原理検証されてきている¹⁹⁾。

光学の実像をもたらす再帰反射型は、入射方向と同一方向に出射光が戻るという再帰性反射を利用した空中実像ディスプレイである。コーナークューブアレイの一面をなくした方式として、前川らの提案²⁰⁾に端を発し、現在ではいろいろな方式が研究されている²¹⁾。また、山本らにより、再帰性反射材とハーフミラーを用いた方式も提案されている²²⁾。これらは、光学的には、装置に対して反対側にある物体の幾何光学的な空中結像が行える方式である。解像度を高くするのが困難な面を有するが、光学距離を短くできるため、表示範囲と観察範囲を大幅に広くとれる特徴を有している。また、奥行きを持った物体や3D表示装置を裏側に配置すれば、3D像を空中に結像させることも可能となる特徴を有する。また、これらを用いて、人以外の生物への空中像の効果についても研究が進められており、メダカでは空中像に追従する行動が観測されている²³⁾。

このように空中像は大変魅力的ではあるが、その奥行き感・飛び出し感に関しては、不安定があることが報告されている²⁴⁾。実際にデモンストレーションなどにおいて、飛び出し感が得られるまでに時間が必要な方も散見されている。日常生活においても、例えば、金属の凹面に映った画像が空中に飛び出していると即座に感じとれる方は少ないと思われる。これを防ぐためには空中実像の近くに実物を配置すればよいことが経験的には知られているが、その原因は明らかになっていない。今後、空中ディスプレイを世の中に広めていく上では、この不安定性のメカニズムについても明らかにしていく必要があると考える。(陶山)

4. Near-Eye Display

目の近くで映像を提示するデバイスはNear-Eye Displayと呼ばれる。その先駆けはヘッドマウントディスプレイ(HMD)である。HMDの場合、両眼に別々の画像を提示できるので、立体視は容易に実現される。一方、最近はスマートグラスと呼ばれる、シースルーで拡張現実感を提示するタイプのNear-Eye Displayが注目されている。こちらは、両眼ではなく単眼にしか映像を提示しないタイプのものもあり、その場合は立体視をさせることができない。

研究レベルで最近注目されているのは、Near-Eye Displayでライトフィールド(以下、LF)(光線再生)提示を実現することである。最近LFという表現が定着したが、稠密なLFはもともと日本で超多眼表示と呼ばれていた技術のことである^{25) 26)}。単眼の瞳孔に複数の光線を入射すると、目の焦点調節を刺激することができる。これによって、提示像の奥行きに応じた自然な焦点調節を再現することができる。

従来、この技術は主に据え置き型の立体ディスプレイへの応用が試みられてきた^{27) 28)}。最近では、これをNear-Eye Displayに応用する試みが始まっている。UenoらはSLMを用いた高速な時分割によって、目の焦点調節を刺激するNear-Eye Displayを提案している²⁹⁾。この方式は、栗原らによってフルカラー化も実現されている³⁰⁾。

また、Near-Eye DisplayでのLF提示を安価に実現する方法として、Watanabeらは通常の液晶パネルで時分割と色分割を組み合わせることで、目の周辺に光線再生を行う技術を提案している³¹⁾。今後、こうした技術がHMDやスマートグラスなどのNear-Eye Displayに応用されることが期待される。

(掛谷)

5. 3D応用

これまで3D表示が最も普及した分野は映画であるが、今後3Dディスプレイの普及が期待される応用分野として、医療手術等の作業シミュレータ、および自動車やロボット等の運転・操作支援が挙げられる。2Dディスプレイが与える奥行き感は大まかな前後関係に留まり、正確な奥行き位置の情報は与えられない。ディスプレイの観察者が映像をもとに物理的な作業を行う場合、正確な奥行き知覚の欠如は作業効率を著しく低下させる。

これまでも、上述の分野における立体ディスプレイの導入は試みられているが、その多くは眼鏡式立体ディスプレイである。その理由として、現在市販の裸眼立体ディスプレイの解像度が、眼鏡式立体ディスプレイに比べて低いことが挙げられる。一方、眼鏡式立体ディスプレイには、共同作業間で互いにアイコンタクトがとりにくいこと、眼鏡の煩わしさなどの欠点があり、特に自動車運転支援の場合、視界を暗くする立体眼鏡を運転者に装着させるわけにはいかない。そのため、眼鏡式立体ディスプレイと同等の画質を裸眼立体ディスプレイで実現することへの期待は大きい。

医療分野への応用で最も重要になるのが提示映像の空間解像度である。裸眼立体視の実現方法として歴史のあるレンチキュラレンズ方式やパララックスバリア方式では、提示画像の解像度はディスプレイパネルの解像度よりも低下することが知られている。最近では、ディスプレイパネルの解像度をフルに生かせる裸眼立体ディスプレイとして、時分割式の指向性バックライトを用いる方式が注目を集めている^{32)~34)}。しかしながら、これらの手法は充分広い視域を確保するに至っていなかった。

最近、自由な観察位置を有するフルハイビジョンの裸眼立体ディスプレイを実現する手段として、二つの方式が提案されている。一つは、凸レンズアレイを用いた時分割指向性バックライト方式^{35)~37)}で、もう一つは時分割パララックスバリア方式^{38) 39)}である。これら的高精細裸眼立体ディスプレイを肝臓手術シミュレータに応用したところ、

2次元表示よりも高い評価が得られている⁴⁰⁾。

一方、HUDの3D表示化も最近盛んに行われている。従来のHUD (Head-Up Display) は、凹面鏡を使って虚像が遠くに結ばれる光学系を用いている。遠くの虚像面に情報を提示することで、運転手は前方の景色から視線を大きく動かす必要がなくなる。この虚像を3D化する方法として、従来のパララックスバリアを応用する方法が研究されている⁴¹⁾。最近では、アクティブバリアを活用してコントラストを向上させる研究も行われている⁴²⁾。

しかしながら、虚像を作るためには一定の奥行きを有する光学系が必要である。小さな虚像面を生成する装置ならばダッシュボードに埋め込むことは可能であるが、ウインドシールド全体に虚像を表示することは難しい。そのため、ナビゲーション情報や危険喚起情報をウインドシールド全体にAR (Augmented Reality) 表示したいというニーズを満たすことは難しい。

最近では、LF表示⁴³⁾や単純な視点追従型の二眼立体表示⁴⁴⁾を用いて、虚像光学系なしに遠方へ像を提示する試みも行われており、これが成功するとウインドシールドディスプレイの実用化が見えてくると期待される。

(掛谷)

6. 立体映像と生体影響

HMDが一般市場に出回り始めてから数年が経過し、バーチャルリアリティ (VR) 技術のさまざまな分野での利用が具体的に進み始めている。そのため、HMDの利用により生じ得る生体影響への配慮の必要性がさらに高まっていると言える。HMDによる好ましくない生体影響については、いわゆる乗り物酔いと同様に動揺病の一つとも考えられるVR酔いが知られているが、実際には症状の類似する立体映像による視覚疲労の影響もVR酔いに複合的に含まれているのではないかと考えられる。

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、立体映像に関する人間工学に関する規格化が進められてきた。このうち2015年5月に発行された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⁴⁵⁾は、ISOと欧州標準化委員会 (CEN) との間で結ばれたウィーン協定により欧州規格⁴⁶⁾ともなっているが、ISOにおける5年ごとの規格の定期見直しが行われる予定である。また、HMDでの酔いを含む映像酔いについては、関連する文献情報を整理した技術報告書⁴⁷⁾と人間工学的指針⁴⁸⁾の国際規格化審議が進められ、それぞれ2020年3月頃に発行予定である。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⁴⁹⁾、VR酔い軽減⁵⁰⁾、装着特性の三つの規格化審議や検討が、開始されている。

立体映像による生体影響の基盤研究についても継続的に
行われており、国際誌に掲載された主な論文では、眼球運
動と生体影響との関係に関するものが複数見られた。例え
ば、2D映像や3D映像観察時の眼球運動等の計測指標間の関
係性を構造方程式モデリング (Structural Equation
Modeling: SEM) により解析することで、視覚疲労にかかわ
る症状と眼球運動計測指標との関係を報告したもの⁵¹⁾、
HMDを用いた30分間のVRゲームの前後で調節および輻輳
機能の計測から、調節応答の増加と輻輳変化の減少を報告
したもの⁵²⁾、また、立体(3D)映像での映像酔いに関して、
主観評価、心電図、眼球運動を同時計測することで、映像
中の特定箇所を注視し続けることで酔いが減少することを
報告したもの⁵³⁾などである。この他、2D映像、アナグリフ
式3D映像、時分割式3D映像を用いて計60分間の作業を行
い、作業パフォーマンスに加えて視覚疲労を計測した結果、
いずれの映像でも利用時間とともに視覚疲労の主観的スコ
アが増加すること⁵⁴⁾、2D映像と3D(立体)映像の各1時間の
観察前後でのfMRI計測の結果から大脳基底核の視覚疲労へ
の関与が示唆されること⁵⁵⁾などが報告されている。

現在のHMD製品のさまざまな応用分野への適用により、
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。こうした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求められている。(氏家)

7. むすび

自然な3D映像は大変魅力的であり、この実現を目指し
て新たな概念が導入されつつある。しかし、2D映像に比
べて、三つも次元を上げる必要があること、および2D映
像では問題にならない大きな生体影響が行く手を阻んでお
り、乗り越えなければならない障壁は決して低いとは言え
ない。ただ、現在でも次々と新たな基盤の概念が創成され
ていること、およびVR/ARをはじめとする3D映像を希求
する応用面からのラブコールがあることを考えると、今後
の展開に期待が持てると思われる。(陶山)

(2020年10月12日受付)

〔文 献〕

- 1) Lume Pad, <https://www.leiainc.com/products/lume-pad/> (2020)
- 2) K. Maruyama, et al.: "Comparison of Layer Operations and Optimization Methods for Light Field Display", IEEE Access, **8**, pp.38767-38775 (2020)
- 3) 藤田ほか: "Multi-Focused Plenoptic Cameraからの高品質な多視点画像生成", 画像電子学会誌, **48**, 2, pp.281-289 (2019)
- 4) B. Mildenhall et al.: "Local light field fusion: practical view synthesis with prescriptive sampling guidelines", ACM Trans. Graph. **38**, 4, Article 29 (2019)
- 5) 堀越ほか: "立体映像技術の研究開発動向", 映情学誌, **73**, 1, pp.90-95 (2019)
- 6) R. Overbeck et al.: "The making of welcome to light fields VR", ACM SIGGRAPH 2018 Talks (2018)
- 7) R. Overbeck et al.: "A system for acquiring, processing and rendering panoramic light field stills for virtual reality", ACM Trans. Graph. **37**, 6, Article 197 (2018)
- 8) M. Broxton et al.: "A Low Cost Multi-Camera Array for Panoramic Light Field Video Capture", SIGGRAPH Asia 2019 Posters (2019)
- 9) M. Broxton et al.: "Immersive light field video with a layered mesh representation", ACM Trans. Graph. **39**, 4, Article 86 (2020)
- 10) B. Mildenhall et al.: "NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis", ECCV 2020 (2020)
- 11) D. Dansereau et al.: "LiFF: Light Field Features in Scale and Depth", CVPR 2019, pp.8034-8043 (2019)
- 12) C. Jang et al.: "Holographic near-eye display with expanded eye-box", ACM Trans. Graph. **37**, 6, Article 195 (2018)
- 13) R. Horisaki et al.: "Deep-learning-generated holography", Appl. Opt. **57**, 3859-3863 (2018)
- 14) Y. Peng et al.: "Neural Holography with Camera-in-the-loop Training", ACM SIGGRAPH Asia 2020 (2020)
- 15) H. Takada, S. Uchida, M. Imoto and K. Ogawa, Proc. of IBC2016 Conference on IBC Future Zone and the IBC Technical Papers, 15 (2016) / M. Makiguchi, T. Kawakami, M. Sasai and H. Takada, Proc. of SID2017 (2017)
- 16) S. Suyama, H. Mizushima and H. Yamamoto: "Theoretical and Experimental Perceived Depths in Arc 3D Display and Its On/Off Switching Using Liquid-Crystal Active Devices", Proc. IEEE IAS 2019, 2019-ILDC-0674 (2019)
- 17) S. Suyama, H. Yamamoto, Proceedings of Three-Dimensional Imaging, Visualization and Display 2015, 9495, 949507 (2015)
- 18) T. Yamakawa, H. Takada, M. Date, T. Kojima, I. Morita, Y. Honda and M. Miyao, Proc. of International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction. Access to Interaction, 285-296 (2015)
- 19) K. Seko, H. Mizushima and S. Suyama: "A New 3D Image Switching Method in Arc 3D Display by Selecting Desired Arcs in Arc Array by Projectors with Different Illumination Angles for Changing Depths", IDW '19, 26, 730-733 (2019)
- 20) S. Maekawa, K. Nitta and O. Matoba, Proc. of Three-Dimensional TV, Video and Display V, 6392, 63920E (2006)
- 21) H. Yamamoto, H. Bando, R. Kujime and S. Suyama, Proc. of Stereoscopic Displays and Applications XXIII, 8288, 828820 (2012)
- 22) H. Yamamoto, Y. Tomiyama and S. Suyama, Optics Express, **22**, 22, 26919-26924 (2014)
- 23) H. Yamamoto, E. Abe, M. Yasugi, E. Watanabe, H. Takeuchi: "Aquatic information display and its applications for behavioral biology experiments", Proc. SPIE Defence + Commercial Sensing, 10997, 1099707 (2019)
- 24) K. Yamamoto, H. Mizushima and S. Suyama: "Perceived Depth Instability Difference of Aerial Image in CMA (Crossed Mirror Array) by Changing Fixation Point of Eyes", IDW '19, 26, pp.179-182 (2019)
- 25) 梶木, 吉川, 本田: "超多眼領域の立体表示における単眼視差の効果", 3次元画像コンファレンス1997, pp.166-171 (1997)
- 26) Y. Kajiki, H. Yoshikawa and T. Honda: "Hologram-like video images by 45-view stereoscopic display", Proc. SPIE 3012, pp.154-166 (1997)
- 27) Y. Takaki: "Thin-type natural three-dimensional display with 72 directional images", Proc. SPIE 5664, pp.56-63 (2005)
- 28) Y. Takaki and N. Nago: "Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display", Opt. Express **18**, 9, pp.8824-8835 (2010)
- 29) T. Ueno and Y. Takaki: "Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict", Optics Express, **26**, 23, pp.30703-30715 (2018)
- 30) 栗原遥樹, 上野高明, 長浜佑樹, 高木康博: "超多眼ヘッドマウントディスプレイの時分割カラー化", 映情学冬季大 (2019)
- 31) Y. Watanabe and H. Kakeya: "A super-multiview display with horizontal and vertical parallax by time division and color multiplexing", SID Digest of Technical Papers, **51** (2020)
- 32) J.C. Schultz, et al.: "Full resolution autostereoscopic 3D display for mobile applications", SID 09 Digest, pp.127-130 (2009)

- 33) A. Travis, et al: "Backlight for viewsequential autostereo 3D", SID 10 Digest, pp.215-217 (2010)
- 34) A. Hayashi, et al: "A 23-in. full-panel-resolution autostereoscopic LCD with a novel directional backlight system", Journal of the Society for Information Display, 18, pp.507-512 (2010)
- 35) T. Mukai and H. Kakeya: "Enhancement of viewing angle with homogenized brightness for autostereoscopic display with lens-based directional backlight", Proc. SPIE 9391, pp.93911A.1-8 (2015)
- 36) G. Borjigin and H. Kakeya: "An autostereoscopic display with time-multiplexed directional backlight using a curved lens array", Proc. IDW '19, pp.91-94 (2019)
- 37) G. Borjigin and H. Kakeya: "An autostereoscopic display with time-multiplexed directional backlight using a decentered lens array", Proc. Digital Holography and 3D Imaging 2019, W2A.2 (2019)
- 38) H. Kakeya, A. Hayashishita and M. Ominami: "Autostereoscopic display based on time-multiplexed parallax barrier with adaptive time-division", Journal of the Society for Information Display, Vol.26, Issue 10, pp.595-601 (2018)
- 39) H. Kakeya, K. Okada and H. Takahashi: "Time-division quadruplexing parallax barrier with subpixel-based slit control", ITE Trans. on MTA, 6, 3, pp.237-246 (2018)
- 40) H. Kakeya, A. Yoshida, Y. Oshiro and N. Ohkohchi: "A liver surgery simulator using full HD autostereoscopic displays", ITE Trans. on MTA, 6, 1, pp.11-17 (2018)
- 41) T. Matsumoto, et al: "Glassless 3D Head-Up Display Using Parallax Barrier with the Eye-Tracking Image Correction", SID 18 Digest (2018)
- 42) A.Sato, K. Kusafuka and H. Kakeya: "Increase of contrast in 3D HUD using an active parallax barrier", SID Digest of Technical Papers, 51 (2020)
- 43) Y. Takaki: "Super Multi-View 3D Head-Up Display", Proc. IDW (2018)
- 44) H. Kakeya and D. Yan: "Evaluation on the readability of autostereoscopic head-up displays", Proc. 3DSA (2018)
- 45) ISO 9241-392:2015: "Ergonomic recommendations for the reduction of visual fatigue from stereoscopic images", (May 2015)
- 46) EN ISO 9241-392:2017: "Ergonomic recommendations for the reduction of visual fatigue from stereoscopic images", (2017Mar.)
- 47) ISO TR 9241-393: "Structured literature review of visually induced motion sickness during watching electronic images of human-system interaction", (Mar. 2020)
- 48) ISO 9241-394: "Ergonomic requirements for reducing undesirable biomedical effects of visually induced motion sickness during watching electronic images", (Apr. 2020)
- 49) ISO/WD 9241-381: "Requirements for optical characteristics of head-mounted displays related to human-system interaction", (Mar. 2020)
- 50) ISO/WD 9241-382: "General requirements for reducing undesirable biomedical effects during visual interactive tasks using head-mounted displays", (June 2020)
- 51) C.J. Lin, Y.T. Prasetyo, R. Widyaningrum: "Eye movement measures for predicting eye gaze accuracy and symptoms in 2D and 3D displays", Displays, 60, 1-8 (2019)
- 52) Z. Mohamed Elias, U.M. Batumalai, A.N. H. Azmi: "Virtual reality games on accommodation and convergence", Applied Ergonomics, 81, 102879 (2019)
- 53) S. Wibirama, H.A. Nugroho, K. Hamamoto: "Depth gaze and ECG based frequency dynamics during motion sickness in stereoscopic 3D movie", Entertainment Computing, 26, 117-127 (2018)
- 54) C.J. Chao, Y.J. Yau, C.H. Lin, W.Y. Feng: "Effects of display technologies on operation performances and visual fatigue", Displays, 57, 34-46 (2019)
- 55) C. Chen, J. Wang, X. Lu, Y. Liu, X. Chen: "Assessment of 3DTV-related fatigue with resting-state fMRI", Signal Processing: Image Communication, 64, 99-106 (2018)



陶山 史朗 1981年、九州大学工学研究科修士課程修了。同年、NTT入社。液晶ディスプレイ関連技術の研究開発に従事。1990年、九州大学において博士号を取得。2007年より、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部教授。3D表示システム関連（DFD表示、アーク3D表示、液晶アクティブデバイス、立体知覚、脳内補完システム等）の研究に従事。正会員。



小池 崇文 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。コンピュータシミュレーションディスプレイ/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。



掛谷 英紀 1993年、東京大学理学部生物化学科卒業。1998年、同大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了。通信総合研究所(現、(国研)情報通信研究機構)研究員を経て、現在、筑波大学システム情報系准教授。3次元ディスプレイ、機械学習などの研究に従事。博士(工学)。正会員。



氏家 弘裕 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、(独)産業技術総合研究所人間情報インタラクション研究部門行動情報デザイン研究グループ上級主任研究員。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、映像の生体安全性やヘッドマウントディスプレイの人間工学に関する国際標準化と研究開発に携わる。正会員。