

立体メディア技術の研究開発動向

掛谷英紀^{†1}, 陶山史朗^{†2}, 高木康博^{†3}, 堤 公孝^{†4}

1. まえがき

2022年度より、映像情報メディア学会の立体映像技術研究会は、立体音響関連技術をスコープに含め、立体メディア技術研究会として新たなスタートを切った。本稿では立体映像および立体音響を含む3次元メディア技術研究全般の最新動向について紹介する。(掛谷)

2. 空中像

空中像に関しては、コロナ禍においては非接触性などに注目され、最近の研究が盛んになってきている。

最初に、再帰性反射材とハーフミラーを用いて、実像を空中に浮遊できるAIRR(Aerial Imaging by Retro-Reflection)に対して、精力的な研究展開がなされている。まずは、空中像に重ねて背景を見えるようにすることが検討されており¹⁾、視線一致など多くの応用への展開が期待される。次に、コロナ禍における非接触の空中ボタンのために、センサとの組み合わせ²⁾³⁾の検討など、間近な応用への提案がなされている。また、カメラによる監視が不適切な場面を想定したシングルピクセルイメージングによるジェスチャ認識⁴⁾などの面白い提案もなされている。さらに、解像度の評価は2D像では確立しているが、空中像では確立していないため、これに関する研究も加速されている。標準化においても重要になると考えられる空中像の評価方法とともに、その解像度を向上させる方法に対しても興味深い提案がなされている^{5)~7)}。

空中像の別な形態として、円弧状の線刻群への単一照明の照射で、空中3D像を提示できるアーク3D表示に関して、応用まで見通した研究が行われるようになってきた。まずは、空中3D像の数m以上の飛び出しを実現すること

を目指すとともに、そのぼけ幅を低減できる方法が提案されている⁸⁾。また、これまで、書き換えが困難であったアーク3D表示を、簡単に書換え可能とでき、動画までも狙える新たな方式も提案されて来ており⁹⁾、今後の大画面・遠距離表示に向け、さらなる研究が期待される。

次に、一風変わった3D表示に対する試みとして、「脳内補完」に代表される技術が、新たに提案されてきている¹⁰⁾。これは、特に空中像/3D像の場合に、光学的には問題ない像が人にはそう見えないということ¹¹⁾を改善し、逆に光学的に不完全な像を、人に違和感なく見せることを目指す。

まず、3D像を遠方に光学的に形成したとしても、眼前に実物がある場合にはそれに邪魔されて奥に感じられない現象を、アーク3D表示と運動視差を利用して改善させる方法が提案されている¹²⁾。次に、飛び出している3D像の奥行きが不安定なことに対しては、手を伸ばすだけで、不安定性が大きく改善されることを明らかにしている¹³⁾。

また、脳内誤解を積極的に利用する方式も提案されている。まずは、二つの視点からの顔画像を分割/合成して表示し、その割合を変えるだけで顔の向きを自由に表現できる方法¹⁴⁾や、人の奥行きの脳内補完能力を積極的に利用するセキュリティの高い表示方式も提案されている¹⁵⁾。

このように、空中像に関しては、いろいろな側面からの研究が積極的に行われてきており、今後の応用展開なども含めて、大いに期待される場所である。(陶山)

3. 高精細裸眼立体表示

これまで、裸眼立体ディスプレイはパララックスバリアやレンチキュラレンズを用いたものが主流であった。これらの手法は空間解像度を分割して複数視点の映像を提示するため、各視点で観察される画像の空間解像度が低下するという問題があった。この問題を解消する技術として、時分割によって複数視点画像を提示する手法が最近提案されている。

時分割により裸眼立体表示を実現する方法の一つに、時分割パララックスバリア方式がある。この方式では、パララックスバリアのスリット位置を高速に切り替え、それと同期して複数視点画像を入り合いに混ぜた提示像も切り替

†1 筑波大学

†2 宇都宮大学

†3 東京農工大学

†4 NTT

"The Trend of Three Dimensional Image Technology" by Hideki Kakeya (University of Tsukuba, Ibaraki), Shiro Suyama (Utsunomiya University, Tochigi), Yasuhiro Takaki (Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo) and Kimitaka Tsutsumi (NTT Corporation, Tokyo)

える。これにより残像効果で空間解像度が高い裸眼立体像を観察者に提示することができる^{16)~19)}。また、観察者の観察位置が移動した場合も、顔の位置をトラッキングし、それに応じてスリット位置を動かすことにより、立体視を維持することも可能である。

この方式の欠点として、バリアもアクティブに切り替える必要があるため、画像提示用とバリア用の2枚の液晶パネルが必要なことが挙げられる。したがって、提示像の輝度を維持するためにはバックライトの輝度を上げる必要がある。消費電力が大きくなるという問題があった。この問題を解消するため、バリア用に120 Hzで駆動するモノクロパネルを導入する手法が提案されている²⁰⁾。これにより、カラーパネルを2枚使う場合に比べて消費電力を大幅に低減することができる。

さらに消費電力を低減する方法として、アクティブスリットをLEDライトバーとレンチキュラレンズの組み合わせで実現する方法も提案されている²¹⁾。この方法では、スリット位置のみを発光させるため、液晶パネルを用いた光の減算処理によりパララックスバリアを構成するよりもさらに大幅に消費電力を低減できる。クロストークを低減させる方法として、LEDライトバーの発光時間を制限する方法も提案されている²²⁾。

パララックスバリアを用いる場合、ヘッドトラッキングを導入しても、観察者が自由に動く場合、適切な立体視が維持できる観察者の数は1名に限定されていた。この問題を解決するため、観察者の位置の間隔に応じて時分割数を変え、視域の幅を変更することで同時に2人に適切な立体像提示を維持し続ける手法も提案されている²³⁾。

高解像度な裸眼立体表示を実現するもう一つの方法として時分割指向性バックライトを用いる手法がある。観察者が自由に動いても立体視を維持する手段として、ドットマトリックスバックライトとレンズアレイを組み合わせた指向性バックライトを利用する方法がある²⁴⁾。

この方法では、レンズアレイの前に高リフレッシュレートでの表示が可能な液晶パネルを配置し、液晶画面に右目用画像を表示されているときに右目とレンズ中心を結ぶ直線上のバックライトを点灯し、左目用画像を表示されているときに右目とレンズ中心を結ぶ直線上のバックライトを点灯する。この二つの状態を交互に拘束に切り替えることで、観察者は液晶パネルと同じ空間解像度を有する立体像を裸眼で観察することができる。観察者の位置が移動するのに合わせて、点灯するバックライト位置を変更することによって、観察者が自由に移動しても立体視を維持することができる。

この指向性バックライトを用いる場合、レンズアレイのレンズ中心付近を通る光とレンズ端部を通る光で輝度に差が生じ、輝度ムラにより画質が低下する問題がある。その問題を解消する方法として、レンズアレイを横方向に位相

ずれさせながら配置し、指向性拡散板で垂直方向に光を混ぜることで、輝度の一樣化と左右両眼への光の指向性維持を両立させていた²⁵⁾。しかしながら、この方法では光の利用効率が低下する、観察者が頭を傾けたときに立体視を維持できないなどの問題があった。

この問題を解決する手法として、入り合い構造をもつフレネルレンズを用いて隣り合う要素レンズの光を混ぜる手法が提案されている²⁶⁾。この方法を用いると拡散板なしに輝度の一樣化が可能となり、光の利用効率の向上、観察者が頭を傾けたときに立体視を維持、装置の薄型化などのメリットが得られている。

この方式においてレンズアレイを傾けると、横方向の視域が拡大し、同時に2人の観察者が横に並んで立体視を行うことができる。このとき、240 Hzのリフレッシュレートで4時分割表示を行い、観察者1の右目用画像・左目用画像、観察者2の右目用画像・左目用画像を順に表示すると、2人の観察者がそれぞれの視点に固有の立体像を同時に観察することができる²⁷⁾。

3次元空間において2人で共同作業を行う場合、それぞれの観察者が固有の位置からの立体像を観察できないと、両者が3次元位置の正確な把握をできず、共同作業は成立しない。2人の観察者が同時に高解像度の3次元空間を共有しながら作業できる空間の実現は、今後さまざまな作業シミュレーションなどへの応用可能性を有している。（掛谷）

4. ライトフィールド・ホログラム

ライトフィールドディスプレイを用いた顔表示の研究が進められている。今後のコミュニケーション技術では、人の気持ちを伝えることができる技術が求められると考える。そのため、ロボットによる顔表情の表示、車輪付きディスプレイでの顔表示、顔型スクリーンへのプロジェクションマッピングなどが行われているが、ライトフィールドディスプレイを用いると低コスト、省スペース、かつリアルな顔表示が可能になる。ただし、顔に触ることや、自ら移動することはできない。顔表示に特化したライトフィールドディスプレイの開発や²⁸⁾、その効果について主観評価実験が行われている^{29) 30)}。

全周立体表示を複数のライトフィールドディスプレイを用いて実現する方法が提案された³¹⁾。全周立体表示の実現方法としては、古くは数百台のディスプレイを用いる方法が用いられていた。最近では、高速プロジェクタと回転走査光学系の組み合わせを用いる方法や、超高精細ディスプレイと組み合わせレンズを並べた特殊なレンズアレイを用いる方法が利用されている。これらに対して、ライトフィールドディスプレイを用いると数台のディスプレイを円周上に並べることで全周立体表示が実現でき、また、ディスプレイを傾けることで通常のレンズアレイの利用が可能になる。ディスプレイの台数が少ないことから、従来

のプロジェクタアレイ方式のように過度に電子的な画像補正に依存して画質劣化を引き起こすことなく、機械的な位置合わせと最低限の画像処理でキャリブレーション可能であることが示されている³²⁾。

視覚疲労を低減させる立体表示方式として擬似超多眼表示の研究が行われている³³⁾。従来の超多眼表示では、小さな視点間隔で、それぞれの視点位置から見た視差をもつ画像を表示していた。これらの視差画像は視差が小さく、画像変化は視点位置に応じた平行移動が支配的であることに着目し、ひとつの視差画像を空間的にシフトすることで超多眼表示の視差画像群を近似的に作り出すものである。もともとの擬似超多眼表示では、画像を2次元的にシフトしていたが、これを1次元として水平方向や垂直方向としても視覚疲労を低減させる効果があることが示されている。これらの画像シフトには機械的な方法が利用されているが、120 Hzのディスプレイを用いて水平方向あるいは垂直方向に電子的に画像をシフトする方法が提案されている^{34) 35)}。また、メガネ式の立体表示の視覚疲労の低減方法として、被写界深度を拡大するレンズを用いた方法についても研究が行われている³⁶⁾。これは、主に内視鏡手術やHMD用に開発されていて、メガネは必要であるが高解像度な立体表示に適用できる技術である。

電子的なホログラム表示の問題点である狭い視域を拡大する方法としてMEMS空間光変調器をパルス光照明する方法が提案されている³⁷⁾。これは、MEMS空間光変調器の高速性を利用して時分割法で視域を拡大する。MEMS空間光変調器が十分に高速動作することを利用して、カラー化も時分割法で実現する方法が提案されている³⁸⁾。(高木)

5. 立体音響

立体メディア技術研究会における音響関連技術の報告では、ユーザインタラクションに組み込む音響技術³⁹⁾や、立体音響で用いられる手法を映像処理技術に適用する取り組み⁴⁰⁾など、立体映像やその応用領域と音響処理技術の関係を意識した報告が多く行われている。

廣橋らは、複数のスピーカからなる直線状スピーカアレイを制御する波面合成技術⁴¹⁾により、スピーカよりもユーザ側に飛び出す仮想音源を生成し、さらに手の動きに応じて仮想音源の位置を制御するインタラクティブなシステムを実装し、既存のサラウンドシステムとの比較評価を行っている³⁹⁾。波面合成技術は、多数のスピーカを直線状や円状に等間隔に配置して制御することにより、スピーカで囲まれた受聴領域内に任意の音場を再現する技術である。立体音響を実現する技術として一般的に用いられるサラウンドシステムと比較すると、波面合成技術には多数のスピーカが必要となるデメリットがあるものの、受聴者の耳まで飛び出す仮想音源や、一部のエリアにのみ音を呈示するエリア再生といった、サラウンドでは実現困難な特殊な音

場を作ることができる強みがある。このような強みに着目し、ライブ⁴²⁾や演劇⁴³⁾、体験イベント⁴⁴⁾といった多数の観客を動員可能なユースケースに活用することで、観客がこれまでに体験したことのない高い臨場感の音響体験を創出するといった取り組みが行われ、エンターテインメントを主要なターゲットとした製品化も行われている⁴⁵⁾。廣橋らの研究では、仮想音源の位置を動的に変更するため、チャンネル毎に適用するフィルタを定期的に更新する必要があるが、フィルタ更新のタイミングで生じる再生音に不連続性が生じる。この課題に対し、チャンネルごとに適用するフィルタを、演算量の少ない全域通過フィルタ⁴⁶⁾で実装してクリアし、スムーズな音像の移動と高音質を両立した点も音響信号処理の研究室らしい工夫であったと言える。

研究会では、音響信号処理で用いられる手法を自由視点映像の生成に活用した事例についても報告がなされている⁴⁰⁾。自由視点映像生成は、被写体を囲む形で配置した複数カメラの画像からカメラがない位置で撮影された画像を生成するタスクである。一方、音響信号処理では、球体の表面に複数マイクを埋め込んだ球体マイクアレイを制御することで所望の指向特性(方向毎の音の強弱のパターン)を実現する。このタスクは、マイクがない方向で観測されるはずの信号を、観測信号から予測する点において自由視点映像生成と共通する部分がある。そこで、球体マイクアレイの指向性制御⁴⁷⁾と同様に、観測された複数の画像から波数毎に求めた球面調和展開級数で被写体を表現することで、任意の方向から観測した画像を生成する試みが行われている⁴⁸⁾。しかし、球面調和級数展開を球面調和関数行列の逆行列で代用する当該手法では、限られた数の学習用画像から高品質な画像を生成することは難しく、生成される画像には、学習用画像をアルファブレンディングしたようなノイズが観測される結果となっている。この既存手法に対し、球面調和関数を入力として当該関数に対応する方向から観測される画像を出力する多層ニューラルネットを球面調和展開級数の代わりに学習することで画質を改善する手法が報告されている⁴⁰⁾。(堤)

6. そのほか

立体メディア技術の研究には、ハードウェア開発のほかに、ソフトウェア開発、ヒューマンファクタの評価など、種々の研究がある。これまでに挙げた以外のハード研究で注目すべきものとして、表示面を多層に重ねるレイヤ型ディスプレイの研究^{49) 50)}、任意の奥行きに焦点合わせができるホログラフィックプロジェクタの研究⁵¹⁾、マルチプロジェクタを用いたARディスプレイの研究⁵²⁾などがある。画像生成・補正などのソフトウェアの分野では、ディープラーニングの利用が盛んになっている⁵³⁾。そのほか、VR空間提示に関する心理的評価の研究も多く行われている^{54) 55)}。(掛谷)

7. むすび

新型コロナウイルスのパンデミックにより、テレワークが普及しており、この働き方のスタイルはパンデミック後も継続すると予想される。遠隔で作業をする機会が増えれば、映像や音声などのメディア技術にもより大きな進化を社会から期待されると考えられる。立体映像、立体音響などの立体メディア技術はその期待に応えるための重要なパーツの一つになりうる。ここで紹介した技術の中から、今後そうした役割を担うものが出てくることを期待したい。(掛谷)
(2023年10月21日受付)

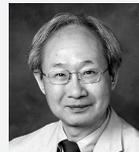
〔文 献〕

- 1) D. Nishimura, K. Chiba, K. Matsushita, K. Fujii, M. Yasugi, T. Miyashita, K. Sawada and H. Yamamoto: "Outdoor Aerial Signage with Optical See-Through AIRR", Proc. 3DSA 2021, S9-8 (2021)
- 2) I. Saji, Y. Miyai, Y. Kashiwara, A. Hayashi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Realization of Interactive Aerial Buttons Using a Combination of Arc3D Display and 3D Sensors", Proc. IDW '21, 28, pp.298-301, FMCp1-8L (2021)
- 3) K. Ashimine, H. Shigetaka, T. Fujiyoshi, H. Yamamoto: "Development of Capacitive Sensor for Aerial Interface", Proc. IDW'21, 28, pp.1019-1022, INP7/FMC4-3 (2021)
- 4) H. Takatsuka, M. Yasugi, N. Mukojima, S. Suyama, H. Yamamoto: "Gesture Classification of Single-Pixel-Imaging Reconstruction by Using Deep Learning", Proc. IDW'21, 28, pp.1053-1056, AIS7/VHF6-3L (2021)
- 5) K. Fujii, H. Yamamoto: "Aerial-Imaging Steganography with AIRR by Use of Transparent Objects as Decoding-Keys", Proc. IDW'21, 28, pp.235-238, FMC3/INP6-4 (2021)
- 6) H. Guo, K. Fujii, M. Yasugi, H. Yamamoto: "Resolution Evaluation of Aerial Image Formed with AIRR by Use of Two Transparent Spheres", Proc. IDW'21, 28, pp.1011-1014, INP7/FMC4-1 (2021)
- 7) K. Takiyama, H. Guo, M. Yasugi, S. Suyama, H. Yamamoto: "Factors Affecting the Modulation Transfer Function (MTF) in Polarized Aerial Imaging by Retro-Reflection (p-AIRR)", Proc. IDW'21, 28, pp.272-275, FMC8-4L (2021)
- 8) Yuki Sato, Ikuya Saji, Shiro Suyama, Hirotsugu Yamamoto: "The blur width of the bright spot can be reduced by increasing the observation distance in the front projection of the arc 3D display", Proc. DHIP 2021, p.22 (2021)
- 9) H. Taguchi, H. Mizushina, K. Yamamoto and S. Suyama: "Fresnel Arc 3D display for rewriting 3D image with high-pixel-density arrangement and automatic arc-scratch generation", Proc. IDW '21, 28, pp.889-892 (2021)
- 10) S. Suyama, H. Yamamoto, H. Mizushina: "3D Image and Real Object Have Differences? -Enhancing or Fooling Image Reconstruction in Brain-", Proc. IDW'21, 28, pp.460-463, 3D6-2 (2021)
- 11) H. Mizushina, K. Yamamoto and S. Suyama: "Unstable depth perception of aerial images in crossed mirror array can be controlled by changing fixation distance", IEEE Transactions on Industry Applications, 58, 5, 6793-6800 (2022)
- 12) T. Yasui, Kisa Nakano, H. Mizushina, S. Suyama and K. Yamamoto: "Improvement on sticking depth issue of 3D image by Arc 3D display with moving head or moving Arc 3D display", Proc. 3DSA2021, pp.25-26 (2021)
- 13) N. Kiyose, K. Yamamoto, H. Mizushina and S. Suyama: "Reduction of Perceived Depth Instability in Aerial Image by Using Hand or Tools to Aerial Image Position", Proc. IDW '21, 28, pp.482-485 (2021)
- 14) Y. Nakagawa, H. Mizushina, S. Suyama and K. Yamamoto: "Pseudo gaze direction change for 2D communications by spatial blending and boundary blending of luminance of 2D face images with different gaze directions", Proc. IDW '21, 28, pp.486-489 (2021)
- 15) K. Fujikawa, H. Mizushina, K. Yamamoto and S. Suyama: "Advanced Secure Display Using DFD Display with Fuzzy Perceived Depth Images and Dummy Information", Proc. IDW '21, 28, pp.464-467 (2021)
- 16) Q. Zhang and H. Kakeya: "An autostereoscopic display system with four viewpoints in full resolution using active anaglyph parallax barrier", Proc. SPIE 8648, 86481R.1-10 (2013)
- 17) Q. Zhang and H. Kakeya: "Time-division multiplexing parallax barrier based on primary colors", Proc. SPIE 9011, 90111F (2014)
- 18) Q. Zhang and H. Kakeya: "A high quality autostereoscopic system based on time-division quadruplexing parallax barrier", IEICE Trans. Electron., E97-C, 11, pp.1074-1080 (2014)
- 19) Q. Zhang and Kakeya, H.: "Time-division quadruplexing parallax barrier employing RGB slits", Journal of Display Technology, 12, 6, pp.626-631 (2016)
- 20) 田岡佑基, 掛谷英紀: "モノクロパネルをスリットに用いた時分割パララックス式裸眼立体表示", 映情学技報, 46, 31 (2022)
- 21) M. Mitomi and H. Kakeya: "Reduction of Power Consumption for Autostereoscopic Display Based on Time-Division Multiplexing Parallax Barrier", Optics Continuum, 1, 2, pp.227-237 (2022)
- 22) 三富準斗, 掛谷英紀: "低消費電力型時分割パララックスバリア式裸眼立ディスプレイのクロストークレベル低減", 映情学技報, 46, 9 (2022)
- 23) B. Yang and H. Kakeya: "Autostereoscopic for two observers by adaptive fractional time-division multiplexing parallax barrier", ITE Trans. on MTA, 9, 2, pp.136-142 (2021)
- 24) S. Ishizuka, T. Mukai and H. Kakeya: "Viewing zone of an autostereoscopic display with a directional backlight using a convex lens array", Journal of Electronic Imaging, 23, 1, pp.011002.1-6 (2014)
- 25) S. Ishizuka, T. Mukai and H. Kakeya: "Multi-Phase Convex Lens Array for Directional Backlights to Improve Luminance Distribution of Autostereoscopic Display", IEICE Trans. Electron., E98-C, 11, pp.1023-1027 (2015)
- 26) G. Borjigin and H. Kakeya: "A backlight system using a novel interleaved Fresnel lens array that attains a uniform luminance and two-dimensional directional light control", Optics Letters, 47, 2, pp.301-304 (2022)
- 27) 暁日瑪蓋, 掛谷英紀: "二人が固有視点の立体像を観察できる時分割高精細裸眼立体表示とその評価", 映情学技報, 46, 31 (2022)
- 28) K. Fukano, T. Kudo, T. Yura and Y. Takaki: "Light field display with near virtual-image mode", Opt. Express, 30, 6, 8409-8424 (2022)
- 29) 深野弘一郎, 清水美里, 工藤隆朗, 由良俊樹, 松尾靖彦, 高木康博: "顔の表情の等倍ライトフィールド表示が人に与える印象の主観評価", 立体映像技術研究会 (オンライン) (Oct. 2021)
- 30) 深野弘一郎, 清水美里, 工藤隆朗, 由良俊樹, 松尾靖彦, 高木康博: "ライトフィールドディスプレイを用いた表情表示における解像度の影響", 立体メディア技術研究会 (オンライン) (Mar. 2022)
- 31) Y. Momono, K. Yamamoto, Y. Yokote, A. Sato and Y. Takaki: "Light field Mirage using multiple flat-panel light field displays", Opt. Express, 29, 7, 10406-10423 (2021)
- 32) 山本昂哉, 桃井芳晴, 横手恵紘, 佐藤敦, 高木康博: "複数のライトフィールドディスプレイを用いた全周立体ディスプレイの表示システムの調整方法", 立体メディア技術研究会 (オンライン) (Mar. 2022)
- 33) T. Ueno and Y. Takaki: "Approximated super multi-view head-mounted display to reduce visual fatigue", Opt. Express, 28, 9, 14134-14150 (2020)
- 34) 荻久保敦哉, 栗原遥樹, 高木康博: "2視点による疑似超多眼表示を用いたヘッドマウントディスプレイ", 立体メディア技術研究会 (オンライン) (Oct. 2021)
- 35) 荻久保敦哉, 高木康博: "2視点疑似超多眼ヘッドマウントディスプレイにおけるaccommodation-invariant範囲の評価", 立体メディア技術研究会 (オンライン) (Mar. 2022)
- 36) 高津琴美, 宮島泰史, 加藤一壽, 高木康博: "立体視の視覚疲労を低減する非球面位相板の軸外結像特性の測定", 立体メディア技術研究会 (オンライン) (Mar. 2022)
- 37) Y. Takekawa, Y. Takashima and Y. Takaki: "Holographic display

- having a wide viewing zone using a MEMS SLM without pixel pitch reduction", Opt. Express, 28, 5, 7392-7407 (2020)
- 38) 首藤玲, 高木康博: "パルス変調MEMS空間光変調器を用いたホログラフィックディスプレイのカラー化", 立体メディア技術研究会(オンライン) (Mar. 2022)
- 39) 廣橋ほか: "手の平の位置に追従する焦点音源による定位感と楽しさについて", 映情学技報, 46, 9, pp.49-52 (2022)
- 40) 堤: "球面調和級数展開を用いた多視点映像生成におけるニューラルネットワークを用いた画質改善", 映情学技報, 46, 9, pp.109-112 (2022)
- 41) S. Spors et al.: "Physical and perceptual properties of focused virtual sources in wave field synthesis", Audio Engineering Society Convention 127 (2009)
- 42) Y. Mitsufuji et al.: "Creating a Highly-Realistic "Acoustic Vessel Odyssey" Using Sound field Synthesis with 576 Loudspeakers", Paper EB1-8 (July 2018)
- 43) "客席まで飛び出す音響を実現する波面合成音響技術", NTT技術ジャーナル, 10 (2018)
- 44) "ゴルフボール×超高臨場感通信技術Kirari", NTT技術ジャーナル, 12 (2021)
- 45) Sony PCL Inc.: "Sonic Surf VR", <https://www.sonyplc.jp/works/00034.html>
- 46) T.I. Laakso et al.: "Splitting the unit delay [FIR/all pass filters design]", in IEEE Signal Processing Magazine, 13, 1, pp.30-60 (Jan. 1996)
- 47) 羽田: "空間フーリエ変換を用いたアレイ信号処理", 日本音響学会誌, 74, 2, pp.74-82 (2018)
- 48) 堤: "複数視点画像の球面調和級数展開を用いた多視点映像生成", 映情学冬季大 (2021)
- 49) 佐藤千幸, 松浦孝太郎, 都竹千尋, 高橋桂太, 藤井俊彰: "レイヤ型ディスプレイによる複数シーンの同時立体表示の検討", 3次元画像コンファレンス2022 (2022)
- 50) 松岡恒希, 佐藤千幸, 都竹千尋, 高橋桂太, 藤井俊彰: "SHWセンサによる動的光線空間の撮影およびレイヤ型ディスプレイによる3次元表示", 3次元画像コンファレンス2022 (2022)
- 51) 森口嘉軌, 小田好洗, 内田十内, 成島佑華, 鈴木康平, 高田直樹: "再帰反射とホログラフィックプロジェクトを用いた三次元空中表示の検討", 映情学技報, 45, 33 (2021)
- 52) 佐藤成, 圓道知博: "複数人が同時に観察可能なAR3Dディスプレイ", 映情学技報, 46, 31 (2022)
- 53) 長尾拓実, 宮崎大介: "畳み込みニューラルネットワークでの超解像を用いた2面コーナリフレクタアレイによる空中像のボケの補正", 映情学技報, 46, 31 (2022)
- 54) 市川直樹, 田部田晋, 棚橋重仁: "Yaw回転運動刺激によって誘発された映像酔いの重症度による酔いの回復過程の検討", 映情学技報, 46, 9 (2022)
- 55) 吉田泰一郎, 棚橋重仁: "視覚刺激の傾き情報が走行姿勢の安定性に与える影響", 映情学技報, 46, 9 (2022)



掛谷 英紀 1993年, 東京大学理学部生物化学科卒業。1998年, 東京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。1998年~2001年, 通信総合研究所(現・情報通信研究機構)勤務を経て, 2001年, 筑波大学機能工学系講師。現在, 同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, パイオインフォマティクスの研究に従事。博士(工学), 正会員。



陶山 史朗 2006年, 京都大学大学院情報学研究所修士課程修了。同年, NTT入社。2020年, 電気通信大学情報理工学研究所博士課程修了。現在, NTT人間情報研究所所属。音声符号化, 空間音響再生などの研究に従事。博士(工学), 正会員。



高木 康博 1986年, 早稲田大学理工学部応用物理学科卒業。1988年, 同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, 東京農工大学大学院准教授。2014年, 同大学大学院教授。立体表示, ホログラフイーの研究に従事。博士(工学), 正会員。



堤 公孝 2006年, 京都大学大学院情報学研究所修士課程修了。同年, NTT入社。2020年, 電気通信大学情報理工学研究所博士課程修了。現在, NTT人間情報研究所所属。音声符号化, 空間音響再生などの研究に従事。博士(工学), 正会員。