

研究終了報告書

「視覚拡張に向けた高度な知覚情報提示を行う映像重畳技術基盤の構築」

研究期間：2017年12月～2021年3月

(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

研究者：伊藤 勇太

1. 研究のねらい（公開項目）

申請者は「計算機によって人の知覚を拡張する」というビジョンのもと、「視覚拡張」(Vision Augmentation)に関する研究を行っている。視覚拡張は拡張現実感(AR)技術を応用した、人の視覚を計算機によって補助・補完・補強する技術であり、人間拡張において視覚に注目した分野といえる。申請者は、視覚拡張システムが将来に普及することで、社会生活において誰もが高度な視覚機能を保持できる、スマート「知覚」社会が実現できると考える。視覚拡張実現には次の大課題がある：

- ① 人の視覚に応じた映像刺激が計算できる
- ② 当該映像刺激を正しく視野に再現できる

これまで申請者は特に①に注力し、視覚機能支援を行う画像処理手法を提案してきた。一方で②を実現するには、個人毎に調整された映像提示が必要なことから光学シースルー頭部搭載ディスプレイ (OST-HMD) を使用するのが適している。OST-HMD は、VR 向けの HMD とは異なり、視界を遮らずにユーザが知覚する見かけの世界を上書きする。OST-HMD には AR を用いた多数の応用が期待され、例えば教育・製造業・外科手術の支援が既に研究されている。特に'16年には Epson BT-300, Microsoft HoloLens 等、廉価な民生品が登場し、HMD 大衆化の機運が高まっている。

申請者は前述の①に関する研究を進める中で、②を担保できる映像提示の必要性を痛感した。例えば、視覚ボケ低減の視覚拡張システム（業績7、図4）は原理検証を行い、見掛けの視力が改善することを数値実験で示した一方で、奥行き・色再現性・光学遮蔽といった知覚情報の再現が出来なければ、実用には望めないことを示し、OST-HMD における高度な映像提示技術の必要性を提起した。

これらを受け、本提案では下記を含む研究を行う。

- ・ 空間光変調による視覚変調
- ・ 空間光変調による OST-HMD による高度な映像刺激提示
- ・ 視覚拡張による視覚ボケ低減・色補間手法の高精度化
- ・ 視覚拡張向け IoT 環境データ可視化技術

2. 研究成果

(1) 概要

研究のねらいで述べた「視覚の拡張」を軸として、主に以下の3テーマに分かれた研究を実施してきた。

研究テーマ A 空間光変調による視覚拡張コンセプト：「視覚変調技術」

研究テーマ B 高度な映像刺激に基づく視覚拡張手法の高機能化

研究テーマ C 映像提示基盤による IoT 情報可視化の視覚拡張応用

テーマ A に関しては、AR に向けたシースルーディスプレイ技術において、空間光変調を軸として、プログラマブルなメガネや、光の色減算による既存の加算式 OST-HMD と真逆のシースルーディスプレイ、OST-HMD の光の遮蔽問題に関する新しいシステムの提案、を行ってきた。

テーマ B ではこうした基盤となるシースルー映像投影・環境光制御をもとに、人の視界を補助する技術としてコンセプト実証の研究を進めた。例としては、色覚異常を補助するスマートメガネシステムや、視界の風景が霞む際に光学的な加減算で自然に先鋭化する（光学的 deahze）システムがあげられる。

テーマ C では人と AR の知覚に注目し、拡張現実感の新しいコンセプトを模索した。例えば、自立動作するドローンに AR 映像を組み合わせ、人に対する印象を変化させる DroneCamo システムを開発した。また、超音波アレーによる遠距離力覚提示を応用し、現実世界の力学的挙動を改変させるコンセプトを模索した。コンセプト実証としてテーブル上を飛ぶピンポン玉にリアルタイムに干渉し、軌跡を変化させる Hopping-Ping を実現した（さきがけ同期の東大牧野先生、山川先生と共同）

以上のように、各テーマともに、様々な新しい技術を模索し、新しい研究コンセプトを継続的に提案し続けることができた。客観的にも合計で 11 本の原著論文につながり、また、国内・国際共同研究に広がるなど、さきがけとしての意義を十分に満たせたと考えている。

新型コロナウイルス感染症の影響を受け 6 ヶ月間研究期間を延長し、テーマ A に関してヴァーチャル映像のリアリズムを向上させる研究を実施した。具体的には光学シースルーAR においてリアルな相互影を再現する手法、網膜投影ディスプレイにおいて目の焦点に応じて被写界深度を再現する手法があげられる。また、こうしたリアルなARを OST-HMD で実現する研究のサーベイ論文を海外の共同研究者らと執筆した。

(2) 詳細

研究テーマ A 空間光変調による視覚拡張コンセプト:「視覚変調技術」

■位相空間光変調を用いた新しいディスプレイの提案(2019--)

位相空間光変調(phase-only modulation, P-SLM)を用いたプログラマブルメガネシステムを提案した。成果は国際論文誌に採択された。

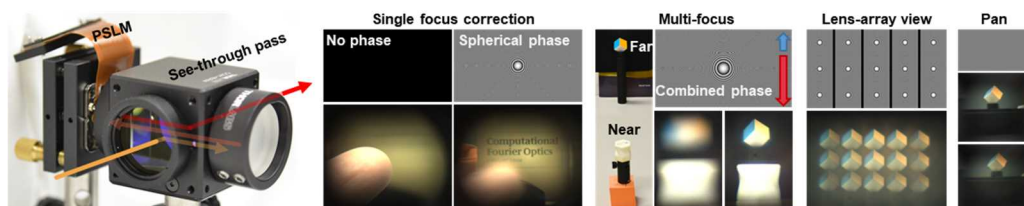


図:位相変調に基づくプログラマブルメガネ

更に空間光変調を応用した、既存のシースルーディスプレイとは真逆のコンセプトの OST-HMD を製作した。P-SLM による減算型光学シースルーディスプレイの原理を提唱し、試作機においてその評価を行った。成果は国際論文誌に採択された。また、JST のサポートにより国内特許出願済み。

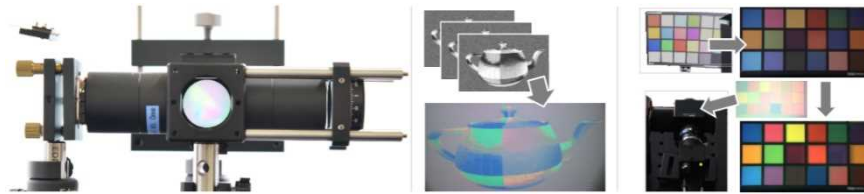


図:P-SLM による光減算型の光学シースルーディスプレイの試作

更に、この研究を発展させ、コントラストも表現でき、色の再現度が高い新しいシースルー光減算方式のディスプレイコンセプト提案を行った。成果は国際論文誌に採択された。



図:色再現性とコントラストが大幅に改善した光減算ディスプレイ(ティーポットとマスクパターンがヴァーチャルな映像)

■ 光学シースルーディスプレイ向けの可変焦点距離を実現した光学遮蔽(2017—2019)

高度な映像刺激を実現するため、OST-HMD における映像を光学遮蔽する技術を探求した。

光学系がコンパクトにできない問題をハードとソフトウェアによる画像処理により解決した光学遮蔽システムの論文や、

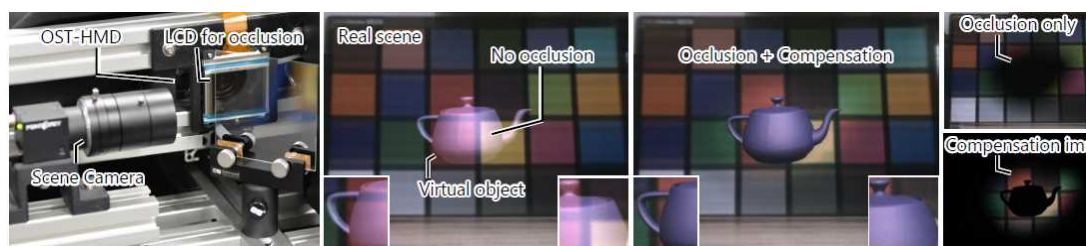


図:提案した光学遮蔽技術を組み込んだ光学シースルーHMD のデモ。

この方法から発展した、異なる焦点距離で光学遮蔽マスクを生成することで高度な映像刺激を実現する新規の光学遮蔽技術を実現した。



図:提案した光学遮蔽技術を組み込んだ光学シースルーHMD のデモ

どちらの結果も成果は国際論文誌に採択された。また、後者においてはJSTのサポートにより国内特許出願及び国際出願を行った。

■コロナ延長後の成果:光学シースルーディスプレイによる相互影の再現(2021—)

光学シースルーARにおいて、現実感を高める映像提示として、光学遮蔽ディスプレイにより現実世界の物体とヴァーチャルな物体の影を相互に再現する研究を行った。ARのトップ国際会議 IEEE ISMAR2021 のカンファレンスフルペーパーとして採択された。

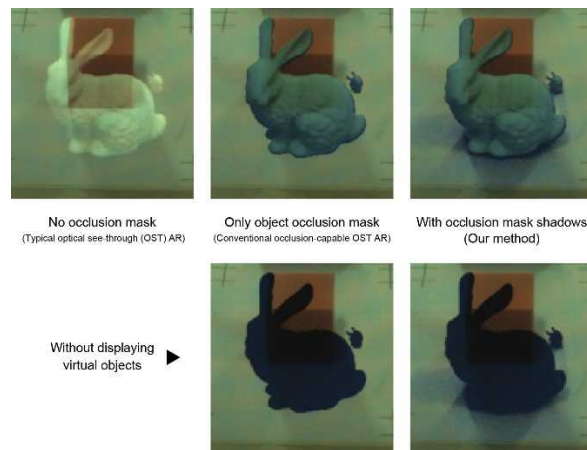


図:BlendingShadow: 光学遮蔽可能な OST-HMD システムにおいて、ソフトシャドウを再現した(右図)。

■コロナ延長後の成果:被写界深度を再現した網膜投影ディスプレイ(2021—)

光学シースルーARにおいて、網膜投影ディスプレイでリアルな奥行きを再現するシステムを開発した。ARのトップ国際会議 IEEE ISMAR2021 のポスターペーパーとして採択された。

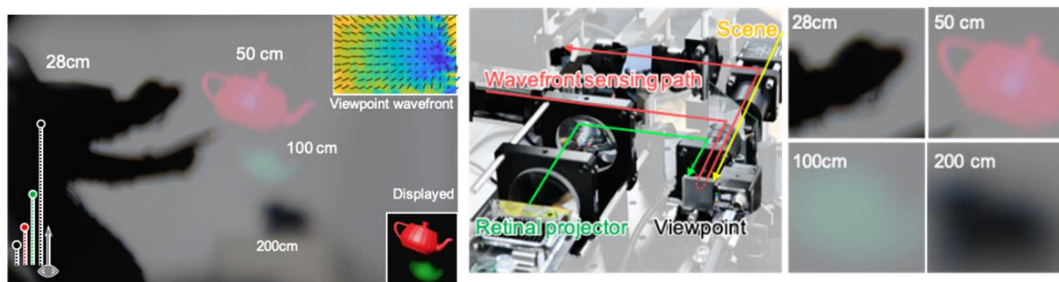


図:Focus-aware Retinal Projection 網膜投影ディスプレイにおいて、目の焦点奥行きにおいて被写界深度を再現したレンダリングを行うことにより、映像の奥行きを再現する。黒が実物体で、赤と緑のティーポットがCG。

■コロナ延長後の成果:OST-HMDのサーベイ論文(2021—)

これまでのOST-HMDにおけるリアルな映像提示に関して、調査論文(36ページ。参考文献数182本)を執筆し、ACM Computing Surveyに採択された。なお、これは国際共著論文

である。

研究テーマ B 高度な映像刺激に基づく視覚拡張手法の高機能化

■ 光学シースルーディスプレイによる色覚の補助(2018—)

本研究は国際強化支援でも共同研究をしたオタゴ大のグループとともに行った。色覚異常のタイプに応じて、同軸のシーンカメラから取得したカラー画像を適切に色変調し、ユーザの視界に重畳することで、ユーザの色弁別性や模擬タスクの成績を改善することができた。CHI2018にて Honourable mention award を受賞。



図： ChromaGlasses, 2018.色覚を補助する映像を視界に重畳する。

■ 光学シースルーの光加減算による視覚処理(2020—)

光学シースルーディスプレイとテーマ1で開発した光学遮蔽技術を組み合わせると視界の光の加減算ができる。これにより、(霧や大気による)霞んだ風景を先鋭化する技術を開発した。



図： Dehaze Glasses。光学シースルーな映像加減算により視界のコントラストを先鋭化する

研究テーマ C 映像提示基盤による IoT 情報可視化の視覚拡張応用

■ 拡張現実感を用いたドローンが人に与える快適性の制御(2019—)

本研究では、将来 IoT ロボット(自律ロボット技術が社会に普及した際に問題になるであろう、人と IoT ロボットのソーシャルな関係性に注目する。例えば宅配ドローンが世の中にあふれたとき、人とドローンはあくまでソーシャルなコンテキストで同じ場に居るだけで、互いは干渉する必要はないが、人の視界には入ってしまう。視覚的にドローンへ AR 映像を重畳することで、人がそれらを不快に思わず生活できるのではないかと、この研究では AR 表示によって人がドローンに対してどう感じ方が変わるかを検証した。

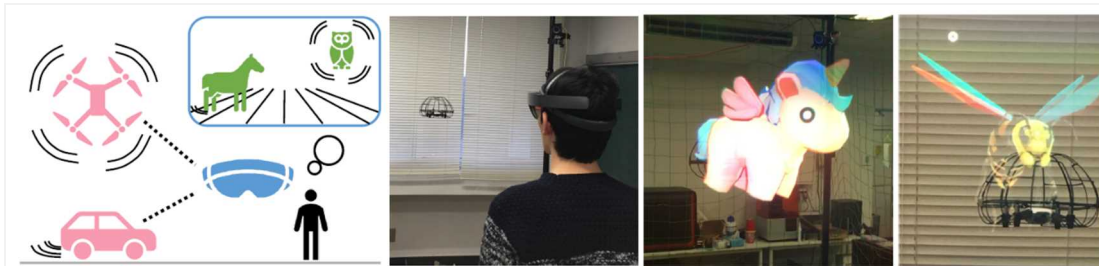
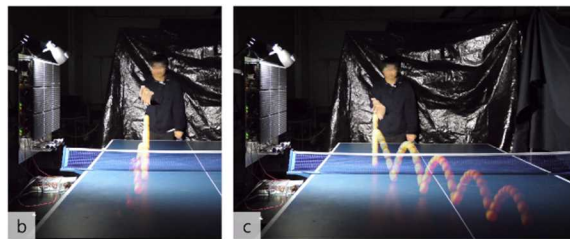


図:OST-HMD 装着者にはドローンに映像が重畳されて見える。左から、コンセプト図、ドローンと人、ドローン上に3Dモデルが表示されている(ユニコーンとハチ)。

■拡張現実感を用いたドローンが人に与える快適性の制御(2019ー)

さきがけ1期生同期の牧野先生・山川先生とともに、超音波力覚提示により、ピンポン玉の軌跡に実時間で干渉し現実の物理挙動を計算によって書き換えるシステム、Hopping Pong を提案した。あたかもボールが非現実的な挙動をしたような体験を与えることができる。これは計算により現実世界の知覚を拡張していると考えることができ、まさに私が描いているビジョンの一例である。



図：超音波力覚提示により飛んでいる卓球玉の動作をリアルタイムに変えている。

3. 今後の展開

「存在と場の拡張」 ～50年後の技術革命を見据えて～

向こう5年の研究の大まかな流れとして、私は人の視覚と環境の光線場に働きかけることで、人の現実世界の認識を自在に書き換える技術を探求したいと考えている。

この数十年、情報技術は社会を驚くべき勢いで変容させてきた。例えばIoT技術によって情報世界での計算が現実世界の状態に影響を与え、また人々は生身の隣人よりもむしろSNSにいる「誰か」に共感を求めるようになった。今や多くの現実の事柄が集約・抽象化された情報として認識・制御され、物質世界と情報世界の境界はますます霧散しつつある。

奇しくも今年2020年は人類史に残る年となった。現生人類から50万年を経て社会性動物として進化し続けた我々が初めて、物理的に隔絶されたまま社会生活を維持する、という困難に直面している。幸いにも、情報技術の助けを借りて社会は驚嘆すべき速度で適応し、予断は許さないながら「新しい日常」に移行し始めている。

一方で、今回の事態は人類の適応力の限界をつまびらかにしたようにも見える。オンラインのコミュニケーションでは様々な問題が顕在化し、人々が翻弄された。人類の適応力は情報技術の進化に追いついていないようである。過去40年の情報技術の進化速

度を見れば、この先の更なる発展も想像に難しくなく、しかして**人類と情報技術の溝**はますます大きくなっていく。果たしてこの先 50 年で情報技術はどのように私たちの社会を変えていくのだろうか。

アイザック・アシモフは寄稿”Social Science Fiction” (1953)にて「1880 年に自動車というものを予見することは容易くとも、交通渋滞の予見は困難である」と述べた¹。現在からの外挿的な技術未来予測では**真に備えるべき社会問題**を予見することは難しいという、未来を描く SF 小説大家の金言であり、イノベーションにはそれが導く社会の有り様が付随することも示唆している。では 50 年先どころか 1 年先の見通しすら不透明な社会情勢の今、科学者である我々はどのような社会を予見し、目指していけばよいのだろうか。

道具と人、という観点から人類の歴史を振り返ると、石器で獲物を狩り、衣服で肌を守り、農工具で生産能力を拡大し、自動車で人の移動力を拡張し、というように、過去の人類は「**物理的な道具で身体能力を拡張する**」ことで発展してきた。一方で、情報革命の時代といわれる現代、電話や電子メールで人の情報伝達を加速し、電子カレンダーで人の記憶力を補い、検索エンジンによって瞬時に必要な知識情報を引き出すことで、「**情報技術によって知能や情報伝達能力を拡張**」している。情報技術は、これまでの物理的側面の強いハードウェア優勢な技術と異なり、ソフトウェアの長所を引き継いでいる。つまり、生身では不可能なことが可能になるだけでなく、**身体機能の優劣や差異に影響されず**、老若男女を問わず万人が恩恵を受けることができる。

こうした技術進化の潮流を受け、私が辿り着いた考えは、「**存在と場の拡張**」という技術的進化である (図 1)。例えば、VR アバター技術は、身体は言うに及ばず、自身の見た目や年齢、声といったあらゆる個の要素を上書きし、**自己という存在自体を変換・拡張**することができる。AR 技術を使えば、自身が知覚する現実世界の情報を上書きし、あたかも **世界が変化したような刺激を提示**できる。存在と場の拡張技術が発展した社会では、**人々は今以上にあらゆる物質的・人間的制約から解放され**、自身の価値観に従って、主体的に生きることが容易になるだろう。

これら XR 技術は、**世界が物質的な束縛から離れて、知覚によって規定される存在に昇華しつつある**、ということを示唆している。つまり、人々にとって価値のあることは**人や物事の形質や物理的な特性に限定されず、それらが持つ知性や情動的価値に重きが置かれる**ようになる。

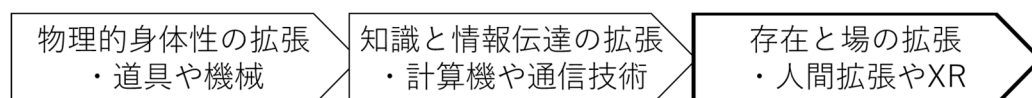


図 1：これまでの人類の技術的進化とこれから

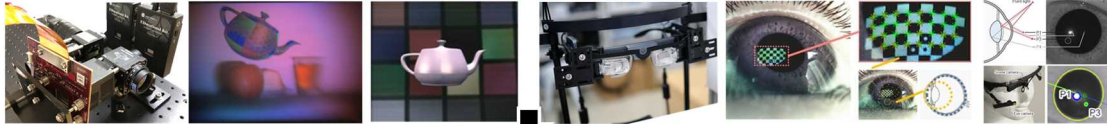
¹ "It is easy to predict an automobile in 1880; it is very hard to predict a traffic problem"

研究提案：存在と場の拡張にむけた光線場変調による人の現実世界認識の拡張

テーマA: 現実と遜色ない拡張現実光線場の再現

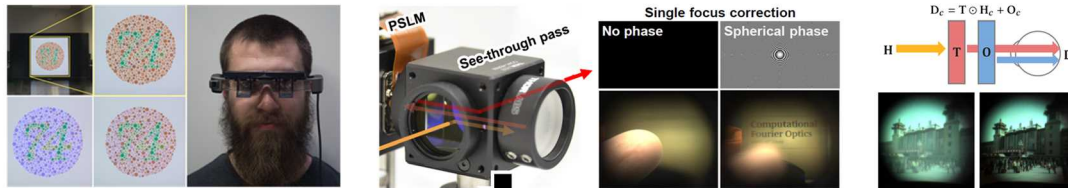
接眼光学系と空間光変調により、映像と環境の光線場のリアリティを高める

人が知覚する光線場を理解し、光線場再現にフィードバックする



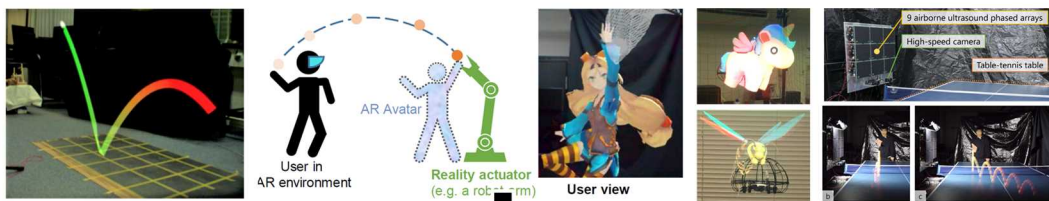
テーマB: 空間光変調による知覚操作

空間光変調により人の視覚を変調し、新たな機能や支援を実現する



テーマC: ヴァーチャルと物質空間の相互作用による現実世界の認識の拡張

現実世界の場の計測・計算的物理制御。光線場による知覚変調。これにより人の世界認識を変容する



人々の現実世界の認識が自在に変化する、新しい価値観の実現 = 存在と場の拡張

図 2：今後の研究展開が目指すビジョンと、その研究テーマ。

さきがけ研究を通じて私はこれまで、「**計算機によって人間の知覚を賢く支援する**」というビジョンを掲げ、**AR 技術**を応用した**視覚能力の拡張**に関する研究に従事してきた。この研究では、視界への映像の提示によって人の視覚を支援すること、例えば目の調光や視力、色覚といった機能の補助・補正ができることを示してきた。**人の視覚を書き換えることは、人の現実世界に対する認識を書き換えることに他ならない**。仮に人類が備えるべき次の技術的進化が、**存在と場の拡張技術**にあるとすれば、自己と世界の認識に働きかける技術を突き進め、**その功罪を先んじて明らかにすること**で、人々を「**渋滞が生まれない社会**」に導くことができるのではないかと。

4. 自己評価（公開項目）

■ 研究目的の達成状況、研究の進め方（研究実施体制及び研究費執行状況）

図らずもさきがけの開始と現所属で自身の研究室を立ち上げたタイミングが重なり、研究実施体制を整えるうえで望外の実施体制を整えることができた。こうした研究費の面でのサポートが充実していることは腰を据えた研究に必須であると感じた。

また、何と云ってもさきがけの人的充実さに恵まれた点も挙げたい。さきがけの採用システムにもれず、本さきがけでも同期やまた期をまたいだ年齢の近い、多様な分野の研究者たちとの定期的な交流の機会が得られた。これらは何よりも貴重な体験であったと思う。

最終年度はコロナ禍により思うような交流・実施が難しい面もあったが、それでもこうし

た恵まれた支援の下、十全な研究実施を達成できたと感じている。

■研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

こうした、質的・人的交流のおかげで、直接・間接的に様々な研究テーマが生まれたと感じており、自身も複数の共同研究者と、科学的意義の高い想像もしていなかった先駆的・創造的な共同研究や、今も継続する研究協力体制を築くことができた。またさきがけの枠組みに支えられ、特許提案2件も実現し JST 主催の技術説明会で産業界に講演を行えた。

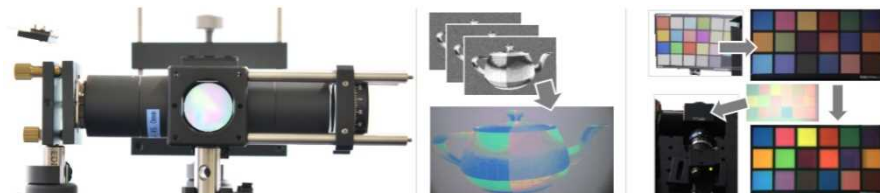
加えて、国際強化支援といった追加予算の機会に恵まれたことで、国際的な共同研究ネットワークを拡充することができ、このネットワークで招聘した現在も継続している。残念ながら採択はされなかったが、国際研究ファンド等にも海外共同研究者らと積極的に応募した。また、さきがけ領域の研究者同士でより大きな枠組みでの研究提案を行い、採択に結び付いてもおり、今後よりインパクトのある研究ができると期待している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

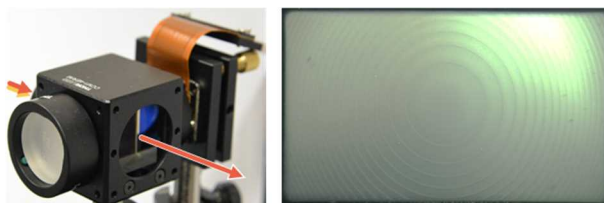
研究期間累積件数: 11 件

1. Y. Itoh, Tobias Langlotz, Daisuke Iwai, Kiyoshi Kiyokawa, Toshiyuki Amano, “Light Attenuation Display: Subtractive See-Through Near-Eye Display via Spatial Color Filtering,” (Best Journal Paper Nominee 受賞) IEEE TVCG, (Presented at IEEE Virtual Reality (VR) 2019), vol. 25, num. 5, pp. 1951 - 1960, 2019. (引用数 7, 採択率 23.2%,) 2019 年発表、査読有り、表貢献度 80%



- ・光の色減算を用いた、今までの光学シースルー (OST-) HMD とは真逆の特性をもつ OST-HMD
- ・背景光から色の引き算で映像を生成するため、全く新しい視覚拡張応用が期待される

2. Yuta Itoh, Tobias Langlotz, Stefanie Zollmann, Daisuke Iwai, Kiyokawa Kiyoshi, Toshiyuki Amano, “Computational Phase-Modulated Eyeglasses,” IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (TVCG), Early Access, 11pages, 2019. (引用数 1) 2019 年発表、査読有り、貢献度 90%



- ・プログラミングが可能な 自由形状液晶レンズ を提案した。

・一人称視点カメラと組み合わせ視力に応じてレンズを最適化するスマート眼鏡を提案した

3. Takumi Kaminokado, Yuichi Hiroi, **Yuta Itoh**, “StainedView: Variable-Intensity Light-Attenuation Display with Cascaded Spatial Color Filtering for Improved Color Fidelity,” (Best Journal Paper Nominee 受賞) IEEE TVCG, (Presented at IEEE ISMAR 2020), vol. 26, num. 12, pp. 3576 - 3586, 2020. (引用数 0, 採択率 5.57)
2020年発表、査読有り、表貢献度 33.3%



・1での成果である、光の色減算を用いた、今までの光学シースルー (OST-) HMD とは真逆の特性をもつ OST-HMD に関して、空間光変調器を多重化することを可能にし、より色域の広いシステムを提案した。

(2)特許出願

研究期間累積件数:2件

| | | |
|---|-------|---|
| 1 | 発明者 | 伊藤 勇太、トビアス ラングロツツ |
| | 発明の名称 | ディスプレイ装置 |
| | 出願人 | 東京工業大学 |
| | 出願日 | 2019年3月19日 |
| | 出願番号 | 特願 2019-050959 |
| | 概要 | 原著論文: Light Attenuation Display: Subtractive See-Through Near-Eye Display via Spatial Color Filtering の特許化 |
| 2 | 発明者 | 伊藤勇太、浜崎巧 |
| | 発明の名称 | 光学式シースルー型ディスプレイ |
| | 出願人 | 東京工業大学 |
| | 出願日 | 2019年3月19日 |
| | 出願番号 | 特願 2019-050960 |
| | 概要 | 原著論: Varifocal Occlusion for Optical See-Through Head-Mounted Displays using a Slide Occlusion Mask の特許化 https://jstore.jst.go.jp/nationalPatentDetail.html?pat_id=37773 |

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【受賞等】

- 2019.03 **Best Journal Paper Nominee**, IEEE VR 2019
- 2018.04 **Best Paper Honourable Mention Award**, CHI 2018

【国際招待講演】

- Yuta Itoh**, [VCNZ 2019, Keynote](#), “Vision Augmentation: How see-through displays

could overwrite our visual world via computation?", Dunedin, New Zealand, Dec. 3, 2019.

