

令和 6 年 5 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19788

研究課題名（和文）ARディスプレイのトレードオフ解消に向けた分散型ビーミングディスプレイの提案

研究課題名（英文）A Proposal for Distributed Beaming Displays to Resolve Trade-offs in AR Displays

研究代表者

伊藤 勇太（Itoh, Yuta）

東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・特任准教授

研究者番号：10781362

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、AR実現のためのBeamingDisplay（BD）技術に焦点を当て、ステアラブルプロジェクトラを使用し受光メガネへの映像投影の遅延を最小限に抑える技術と、プロジェクトラとメガネ間の精密な空間校正システムを開発した。成果には、AR映像の表示遅延を133マイクロ秒に抑える技術や2台のステアラブルプロジェクトラによる分散投影システムが含まれ、複数の国際会議論文発表とIEEE TVCGへの論文掲載を行い、AR技術進展に貢献している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によるBeamingDisplay（BD）技術の開発は、拡張現実（AR）における軽いARメガネの実現や、映像投影の遅延を極めて小さくすることで、よりリアルタイムで精密なインタラクションを実現しています。この技術は、教育、医療、エンターテインメントなど多岐にわたる分野での応用が期待され、AR技術の実用化と普及に大きく貢献する可能性を持っています。また、国際会議での発表や学術誌への掲載を通じて、科学技術の進歩にも寄与しています。

研究成果の概要（英文）：This research focuses on the development of BeamingDisplay (BD) technology for augmented reality (AR), utilizing steerable projectors to minimize the delay in projecting images onto receiving glasses and creating a precise spatial calibration system between the projectors and glasses. The outcomes include a technology that reduces the display delay of AR images to 133 microseconds and a distributed projection system using two steerable projectors. The findings have been presented at multiple international conferences and published in the IEEE TVCG journal, contributing to the advancement of AR technology.

研究分野：拡張現実感

キーワード：拡張現実感 Augmented Reality HMD Beaming Displays プロジェクトラ AR トラッキング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1968年にIvan Sutherland博士が史上初のOST-NED、The Sword of Damocles を提案してから半世紀以上が経った。VR技術の普及に伴い、ARディスプレイにも再び商業的研究開発の波が到来しているものの、現状のOST-NEDには課題も多く、スマートフォンのように、誰もが日常的に使用するデバイスにはなっていない。何故なら既存の**OST-NEDの設計**は描写性能や電力、着け心地といった、**相反する指標のトレードオフ**によって**がんじがらめ**に陥っているからである。

このトレードオフは**メガネ側**で何もかもやろうと欲張るから

こそ起こる。例えば3D映画館では、光学エンジンが環境にあり、ユーザーは3Dメガネをかけるだけで3D映像を提示できる。しかしARにおいてはユーザーが空間を自由に動きながら3D映像をどこでも受光できる必要がある。そこで発想を変え、空間に分散した高精細・狭投影領域のプロジェクタ群からそれを受ける受

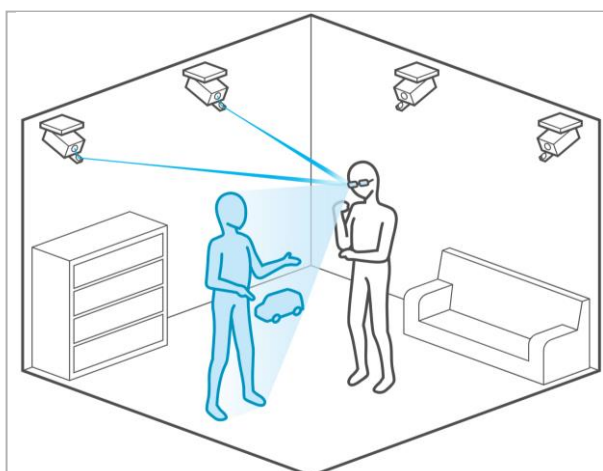


図 1: Distributed Beaming Display(DBD)のコンセプト。狭角度・高精細なステアリング・プロジェクタ群による時空間多重投影により、ユーザは超軽量の受光メガネをつけるだけで、空間のどこにいても長時間高精細な3D映像を快適に見ることができる。

光メガネに映像を投影し続ける協働投影システムであるDBDのアイディアに至った。

2. 研究の目的

環境に分散させた協働型ステアリング・プロジェクタ(SP)群から映像を時空間多重化して**受光メガネに投影**することで高精細な拡張現実感 (AR) 映像を生成する**Distributed Beaming Display (DBD)**を提案する(図1)。

既存の光学シースルーメガネ(OST-NED)は、処理能力と使用者への負担や熱

既存のAR“メガネ” | ▼ライトエンジンが内蔵

簡易型	ベルトパック型	All-in-one型
		
<ul style="list-style-type: none"> × 低機能&低画質 × 電池が持たない × 熱的接触 	<ul style="list-style-type: none"> × 頭に負担 × 電池が持たない × 配線が危険 	<ul style="list-style-type: none"> × 更に頭に負担 × 電池が持たない × 熱的接触

図 2: 既存の OST-NED の問題点。いずれの方式も長時間の利用には不向き。皮膚の熱障害リスク [LiKamWa2014] 等の長期的安全性も未だ十分に考慮されていない。

的リスク、電源といった**トレードオフ**があり長時間使用できない（図2）

そこで本提案では**狭投影画角かつ高解像度の可変焦点プロジェクタ群**から**無電源の受光メガネ**にAR映像を投影し、この**トレードオフ問題を根本的に解決**するOST-NEDを実現する。

3. 研究の方法

現在我々は**小さく高精細な映像を遠距離に投影できるSP**と、**投影光を高画角の視点映像に変換するBird-bath光学系受光メガネ**、によるBeaming Displayの原理検証を行っている（図3上）。SPは光源、空間光変調素子、高精度ステアリングミラー、可変焦点液晶レンズ、同軸カメラから成るProjector-Cameraシステムで、**狭い投影画角に高精細な映像を投影**できる。このSPは受光メガネ（図3中上）の位置を検出し投影方向を制御することで、ユーザの視界にAR映像を提示できる（図3下）。現状のシステムでは、SPが1台のため、映像を投影可能な範囲が限られ、また単眼にしか映像が投影できない。

そこで本研究では、**多数のSPの同期分散制御**により投影映像の**時空間多重化**を図る（図4）。**時間・空間分解能を自由に制御**できるため、**映像のステレオ化、多人数同時投影、高輝度（高階調）化、高画質化、高フレームレート化、視野中心描写**といった機能を**動的に切り替えられる**OST-NEDが実現できる。

4. 研究成果

本研究提案では、ステアラブルプロジェクタによる受光メガネへの映像投影を用いた拡張現実感（AR）ディスプレイ、Beaming Display（BD）の分散化による映像の時空間多重化を目指している。

初年度には下記の成果が生まれた：

■ステアラブルプロジェクタの遅延低減。BDにおいてプロジェクタから受光メガネへの映像投影遅延は提示するAR映像の位置ずれに直結す



図3：原理検証のための、SP1台と受光メガネにおけるBeaming Displayの原理検証。（上）光学系模式図。（中上）試作中のパッシブな眼鏡部（重量122g）。（中下）撮影セットアップ。（下）目の位置から見たAR映像（テキストが表示されている）。原理上SPを増やすことで、提示できる映像の時空間解像度を高められる。



図4：SPの分散制御による多重化の効果。原理的には、AR映像の時空間解像度を任意に増やしたり広画角・高輝度化等ができる。

るため可能な限り小さい方が望ましい。この遅延を低減するには、プロジェクタのステアリングと受光メガネの位置トラッキングの制御ループをうまく設計することが肝要である。今年度はステアリングミラーと位置センシング素子による同軸光学系によるステアラブルプロジェクタを構築し、アナログ制御による低遅延ステアリングプロジェクションの原理検証を行った。

第二年度には下記の成果が生まれた：

■ステアラブルプロジェクタの遅延低減：BDにおいてプロジェクタから受光メガネへの映像投影遅延は提示するAR映像の位置ずれに直結するため、可能な限り小さい方が望ましい。この遅延を低減するには、プロジェクタのステアリングと受光メガネの位置トラッキングの制御ループをうまく設計することが肝要である。今年度は、昨年度から継続しているステアリングミラーと位置センシング素子による同軸光学系によるステアラブルプロジェクタにおいて、近赤外の光源を併用し、アナログ制御により遅延を133マイクロ秒に抑えたステアリングプロジェクションの原理検証を行い、国際会議への論文投稿を行い採択された（図5）。

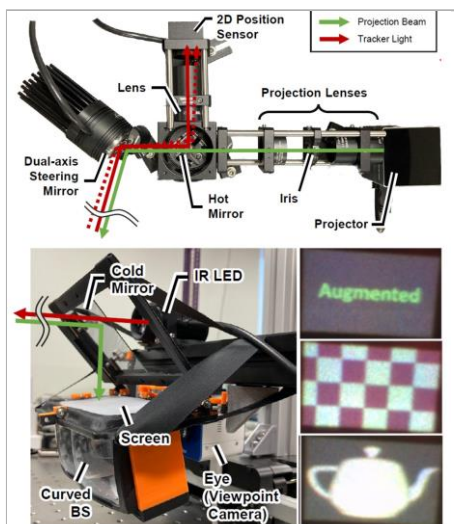


図5: トラッキングと投影遅延を133マイクロ秒に抑えた Beaming Display。

■ステアラブルプロジェクタと受光メガネの空間校正システムの設計：複数のステアラブルプロジェクタによるBDシステムを実現するためには、投影部と受光部の6自由度(6DoF)姿勢の空間校正が必須である。つまり、複数のステアラブルプロジェクタやメガネが同じ三次元座標系でどのような姿勢にあるかをシステムが追跡できなければいけない。昨年度の研究から継続し、空間校正問題を解いたうえで、今年度は2台のステアラブルプロジェクタとOutside-inトラッキングシステムを組み合わせた分散型システムの構築を行った。成果をまとめ、国際会議への論文投稿を行った。

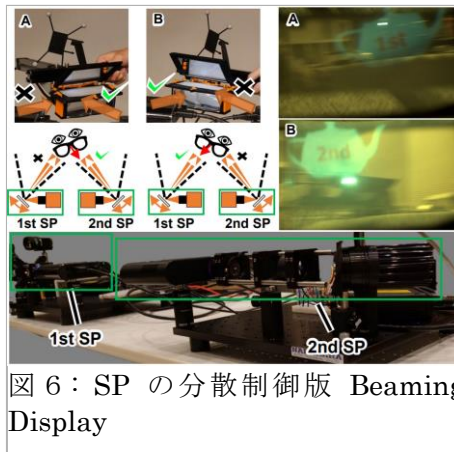


図6: SPの分散制御版 Beaming Display

補助事業の目的をより精緻に達成する研究実施のため期間延長した最終年度では、下記の成果が生まれた：

■ステアラブルプロジェクタと受光メガネの空間校正システムの設計： 昨年度の研究から継続し、2台のステアラブルプロジェクタとOutside-inトラッキングシステムを組み合わせた分散型システムの改良を行った。前年度の分散型システムにおいて問題が残った光学系の校正や設計を更新し、トラッキング精度の向上を達成し、成果は査読付きトップ国際論文誌（IEEE TVCG）に掲載された（図6）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Aksit Kaan, Itoh Yuta, Kaminokado Takumi	4. 巻 12019
2. 論文標題 Beaming displays: towards displayless augmented reality near-eye displays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AI and Optical Data Sciences III, Vol. 12019, pp. 34-37 (an invited conference paper presented at Photonics West)	6. 最初と最後の頁 34--37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2610285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kaneko Mayu, Hiroi Yuichi, Itoh Yuta	4. 巻 n.a.
2. 論文標題 Focus-Aware Retinal Projection-based Near-Eye Display	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE ISMAR 2021, Bari, Italy, Oct. 4-8, 2021	6. 最初と最後の頁 207--208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISMAR-Adjunct54149.2021.00049	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Aksit Kaan, Itoh Yuta, Kaminokado Takumi	4. 巻 12019
2. 論文標題 Beaming displays: towards displayless augmented reality near-eye displays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings Volume 12019, AI and Optical Data Sciences III; 1201905 (2022)SPIE OPTO, 2022, San Francisco, California, United States	6. 最初と最後の頁 4pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2610285	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hiroi Yuichi, Watanabe Akira, Mikawa Yuri, Itoh Yuta	4. 巻 29
2. 論文標題 Low-Latency Beaming Display: Implementation of Wearable, 133 μ s Motion-to-Photon Latency Near-Eye Display	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 4761 ~ 4771
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2023.3320212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tochimoto Takumi、Hiroi Yuichi、Itoh Yuta	4. 巻 -
2. 論文標題 Dual Beaming Display for Extended Head Orientation and Projection Volume	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)	6. 最初と最後の頁 377 ~ 378
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISMAR-Adjunct60411.2023.00081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Hiroto、Tochimoto Takumi、Hiroi Yuichi、Itoh Yuta	4. 巻 30
2. 論文標題 Towards Co-Operative Beaming Displays: Dual Steering Projectors for Extended Projection Volume and Head Orientation Range	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	6. 最初と最後の頁 2309 ~ 2318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVCG.2024.3372118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

{学会発表} 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Aksit Kaan、Itoh Yuta、Kaminokado Takumi
2. 発表標題 Beaming displays: towards displayless augmented reality near-eye displays
3. 学会等名 AI and Optical Data Sciences III, Vol. 12019, pp. 34-37 (an invited conference paper presented at Photonics West) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kaan Aksit, Yuta Itoh, Takumi Kaminokado
2. 発表標題 Beaming displays: towards displayless augmented reality near-eye displays
3. 学会等名 SPIE OPTO (SPIE Photonics West) 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroi Yuichi
2. 発表標題 Low-Latency Beaming Display: Implementation of Wearable, 133 μ s Motion-to-Photon Latency Near-Eye Display
3. 学会等名 IEEE ISMAR 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Itoh Yuta
2. 発表標題 Dual Beaming Display for Extended Head Orientation and Projection Volume
3. 学会等名 IEEE ISMAR 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aoki Hiroto
2. 発表標題 Towards Co-Operative Beaming Displays: Dual Steering Projectors for Extended Projection Volume and Head Orientation Range
3. 学会等名 IEEE VR 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	University College London			