

令和 5 年 5 月 21 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04152

研究課題名（和文）映像演出効果を高めるステルスプロジェクション方式の基盤構築

研究課題名（英文）Research on stealth projection method to enhance image production effects

研究代表者

橋本 直己（Hashimoto, Naoki）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：70345354

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実像光源によって作り出される立体的な光を、再帰透過光学系を用いて、動く投影対象の表面上に結像させることで、投影装置を隠蔽した状態で映像演出を実現するステルス投影手法の基盤構築と評価を行った。

具体的には、複数の実像光源生成装置を試作し、ステルス投影への適応性を評価した。また、前面投影と背面投影を組み合わせることで、ステルス投影の自己遮蔽を解消した。さらに、物体の位置姿勢をマーカレスで推定するための2眼方式による輪郭ベース物体追跡手法を実現した。そのほかに、投影対象の非剛体への拡張や、両眼視差立体視によって、投影対象の形状に依存しない映像表現を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プロジェクタを隠蔽することにより、プロジェクションマッピングの演出効果を大幅に高めることができた。これにより、プロジェクションマッピング特有の、現実の物体が映像によって変化する不思議な体験を、より強く伝えることが可能になった。また、包み込むように光を再結像させる再帰透過光学系の効果により、投影対象を直接接触して操作するインタラクションにおいて、影の発生を大幅に抑えることができた。これは、プロジェクションマッピングされた物体を、人が把持して操作する可能性を大きく切り開いたといえる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we constructed and evaluated the basis for a stealth projection method that realizes image production while concealing the projection device by forming three-dimensional light produced by a real image light source on the surface of a moving projection target using retro-transmissive optics.

Specifically, we fabricated several real image light source generators and evaluated their adaptability to stealth projection. In addition, by combining front projection and rear projection, the self-shielding of stealth projection was eliminated. Furthermore, we realized a contour-based object tracking method using a binocular method for marker-less estimation of object position and posture. In addition, the extension of the projection target to non-rigid objects and binocular parallax stereopsis have realized image expression independent of the shape of the projection target.

研究分野：プロジェクタ応用

キーワード：映像投影 プロジェクションマッピング ステルス投影 再帰透過光学系 実像光源 輪郭ベース物体追跡 体積走査型ディスプレイ

### 1. 研究開始当初の背景

近年、映像演出技術が社会に浸透し、プロジェクションマッピングという形で多様な応用展開を見せている。これは映像投影によって実物体の見た目を変化させるという、2000年台以降に台頭した表現手法であるが、イベントにおける演出や娯楽施設におけるアトラクションに始まり、設計製造における作業補助、教育やトレーニングにおける効果向上等、多岐にわたっている。プロジェクションマッピングは、元来、空間型拡張現実感 (Spatial Augmented Reality : SAR) 技術の1つに分類され、研究されてきた。そのため、映像と現実を違和感なく融合させ、計算機内の情報を、高い説得力を持って人々に伝達する機能に長けている。プロジェクションマッピングによる演出は新鮮かつ刺激的であり、多くの人々を魅了する表現として、社会に受け入れられる結果となった。

しかし、動く物や人を対象とした次世代のプロジェクションマッピングは、我々自身が利用する表現ツールとして十分な実用性を備えているとはいえない。その理由は、進化する投影方式自体の存在感が、映像と現実を融合させるという本来の効果を損なっているからであると考えられる。投影装置を隠す事は、映像演出における常識といえる。しかし、映像演出の限界を押し広げようとする先端研究では、投影装置は複雑かつ大規模化が避けられず、対象を取り囲んで自身の存在を隠すことなく主張している。これは、映像演出があたかも現実の事象であるかのように錯覚させるプロジェクションマッピング本来の趣旨に背く構成でもある。

### 2. 研究の目的

本研究では、プロジェクションマッピング等の映像投影に必要なプロジェクタを視覚的に除去することで、演出効果を最大限に高める映像提示手法の実現を目的とした。そのために、プロジェクタの存在を認識させずに、対象物体の全周囲を包み込むような映像提示を可能とするステルス投影方式 (図1) を特徴とする。対象の3次元形状を近似した実像として投影映像を構築し、空中立体像投影技術に応用した光学素子を挟んで、対象物体の全周囲に結像させて提示するための基盤技術確立を目指した。実像光源及び投影装置は光学素子の裏側に配置され、対象を投影装置で取り囲むことなく全周囲への映像提示を実現する。

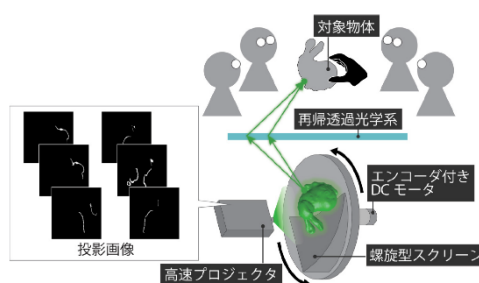


図1：ステルス投影方式の概要 (螺旋型スクリーンを用いた体積走査型ディスプレイを光源とした例)

### 3. 研究の方法

(1) 見えないプロジェクタによる投影を実現するための核となるアイデアは、投影対象と同一の形状を備えた実像光源を、再帰透過光学系を用いて投影対象表面に結像させることにある。そこでまず、光源となる実像光源を実現するために、体積走査型ディスプレイに着目してその実現性の検討を行った。また、ライトフィールド技術を用いた実現についても試作と検討を行った。

(2) ステルス投影方式においても、光源が遮蔽されることで影が生じる場合が発生する。そこで、対象物体の透過性を利用して、対象の全体に映像投影を実現する方式について検討を行った。

(3) 投影対象となる物体の位置姿勢を、その見た目を変化させてしまうマーカや装着型センサなどを用いずに、高速かつ高精度に推定するための手法を、カメラから得られる輪郭情報のみで位置姿勢を推定する手法を2眼方式に拡張することで頑健に実現した。

(4) ステルス投影によって実現されるプロジェクションマッピングの表現力を向上させるために、両眼視差を用いた立体視と、衣服などに代表される非剛体への投影を実現した。

### 4. 研究成果

(1) 実像光源を生成するために、回転する螺旋型スクリーンを用いた体積走査型ディスプレイを実現した。螺旋型スクリーンは、回転することで全ての領域を走査することが可能であり、この螺旋面の位置に同期して、高速プロジェクタで映像投影することで、投影対象と同一の形状を有した実像光源を実現することができる。試作した装置の外観を図2に示す。試作装置を用いた場合と、通常のディスプレ

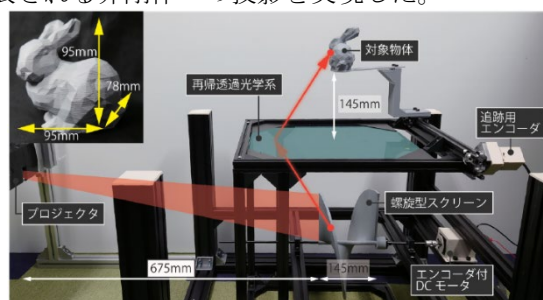


図2：螺旋型スクリーンを用いた体積走査型ディスプレイの試作機

イを用いた平面形状な光源を用いた場合とを比較した結果(図4)、提案手法ではより鮮明な映像を物体表面に結像できることを確認した。また、対象を動かした状態で、それに追従させて映像を投影することも可能であり、動的プロジェクションマッピングへの応用可能性を示すことができた(図3)。

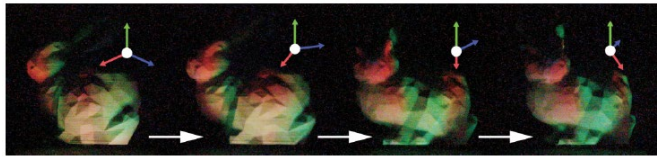


図3:螺旋型スクリーンを用いた投影結果(対象を回転させたときの動的投影)

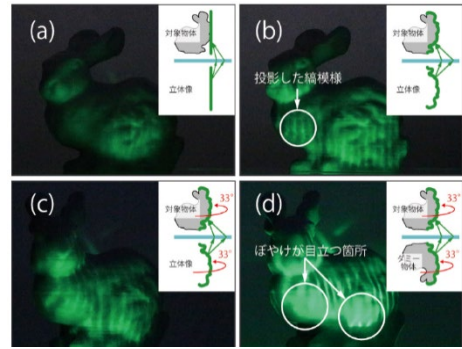


図4:螺旋型スクリーンを用いた投影結果(平面光源との比較)

螺旋型スクリーンへの投影には高速プロジェクタを利用したが、この性能及び入手性が問題になると予想された。そこで、より導入のしやすく、高速な制御が可能なLED素子を利用した体積走査ディスプレイを実現し、これを用いたステルス投影の検討も行った。市販されている安価なストリップLEDを立体的なアレイ状に配置して回転させることで、体積走査型ディスプレイを実現した(図5)。安価な素材で構築可能な上、投影した結果についても螺旋型スクリーンを用いたものと同様であることが確認できた。

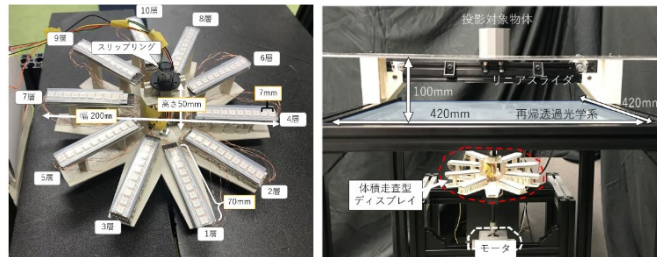


図5:回転型ストリップLEDアレイを用いた実像光源生成装置の試作機

さらに、体積走査型スクリーンでは、発光部分を回転させることが一般的であり、これまでの本研究における試作でもその方式を用いてきた。しかし、比較的大きなものを回転させることが本方式の普及の妨げになると考え、回転を必要としない方式が必要であると考えた。そこで、レンズアレイを用いたライトフィールドディスプレイを構築し、これによって生成されるライトフィールドを、投影対象の形状に合わせて投影するライトフィールドプロジェクタを提案し、試作と評価を行った(図6)。

図6上に示すように、通常の平面ディスプレイとレンズアレイのみで光源部が実現でき、回転機構を必要としないため、システムの小型化を実現することができた。また、投影品質に関しても、図6下に示すように、近接する物体や、把持しようとする手によって影が生じることもなく、良好な投影が実現できることを確認した。

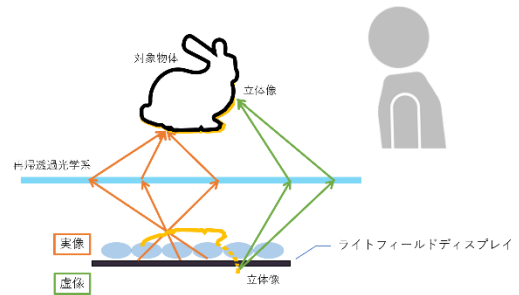


図6:ライトフィールドプロジェクタを用いたステルス投影の概要(上)と投影結果(下)

(2) ステルス投影は、見えないプロジェクタから投影を実現する手法であり、再帰透過光学系を用いることから、他者からの影の影響を大幅に低減することができる。その一方で、自己遮蔽による影は避けられず、プロジェクタの反対側は常に暗い状態となってしまう場合が多い。

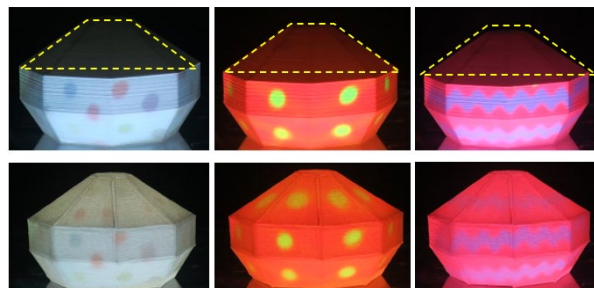
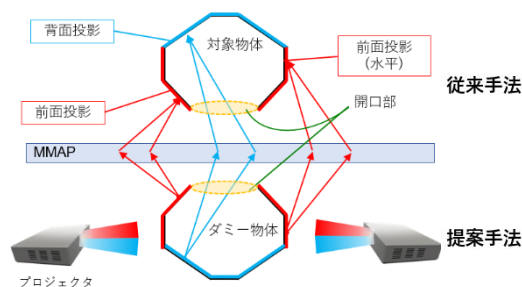


図7:前面投影と背面投影を組み合わせた物体全体へのステルス投影方式(左)と投影結果(右)

そこで、投影対象を構成する物体を3Dプリンタで造形する際に薄く成形することで、前面投影と背面投影を両立し、自己遮蔽が生じる部分に対しては、物体内部を通る光を用いて結像させる方式を採用した(図7)。

図7右の投影結果より、光源が下にあるため、従来手法では対象の上側は自己遮蔽されてしまい、再帰透過光学系による結像も角度的に困難となる領域となる。そのような状況においても、提案手法では、物体の上側も含めて良好な投影を実現できることが確認できた。

(3) ステルス投影では、把持された投影対象の時々刻々と変化する位置姿勢に対して投影を実現する、動的プロジェクションマッピングを想定している。そのため、プロジェクションマッピングに適した、センサやマーカを使わない、いわゆる“マーカレス”な位置姿勢追跡手法が必要となる。そこで本研究では、これまで開発を進めてきた、単眼カメラのみを使って3次元物体の位置姿勢を推定する手法を拡張し、2つのカメラを用いて2眼化するすることで、把持操作に対してより頑健な位置姿勢追跡が可能な手法を実現した(図8)。

把持操作を前提としたときに、投影対象を観察するカメラに対する手による遮蔽が問題となる。我々が用いている輪郭ベースの追跡手法は、対象物体の輪郭が手がかりとなるため、これが大幅に遮蔽されることで、追跡精度が著しく低下してしまう。

そこで、カメラを2つに増やし、異なる方向から観察することで、捉えられる輪郭の総量を増やすと共に、手と輪郭の誤対応を最小限に抑えられるようなアルゴリズムを実装した。具体的には、手の輪郭と物体の輪郭の類似性が高く、誤対応が生じている可能性の高い対応関係を積極的に対象外と判定していく戦略を採用した。これは、カメラを増やしたことによって取得可能な輪郭が大幅に増加したため採用できた戦略であり、カメラの2眼化の特徴を活かした手法であるといえる。

2眼化した手法によって物体をマーカレスで追跡し、その結果に基づいて動的プロジェクションマッピングを行った結果を図8(下)に示す。この図にあるように、両手で対象の輪郭の最大50%程度が隠されるように把持した場合でも、安定した位置姿勢追跡が可能であることが確認できた。また、実行速度も十分に高速であり、1秒間に200回以上の推定が可能であった。

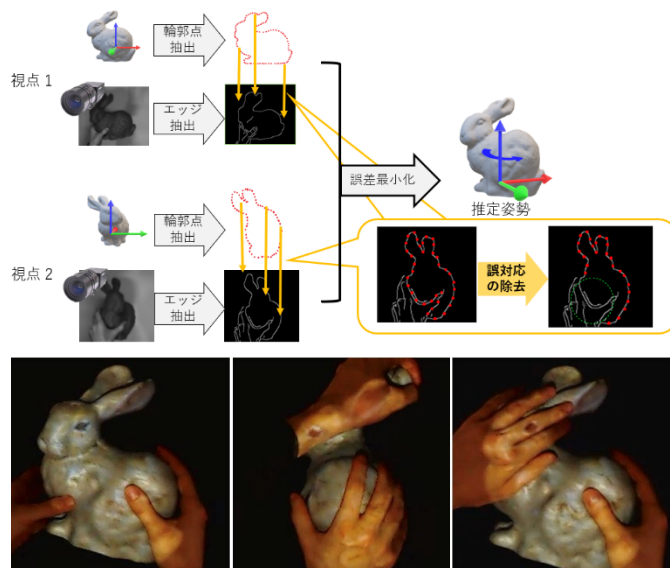


図8：2眼カメラを用いたマーカレスな物体追跡アルゴリズム(上)と手による激しい遮蔽が生じている状況に置ける追跡結果(下)

(4) ステルス投影の技術が確立されるのに合わせて、投影対象物体の拡充と表現の拡張を試みた。まず、投影対象の拡充としては、模様付の非剛体物体への投影を試みた。これは、衣服を着た人へのプロジェクションマッピングを想定して行われた。非剛体物体の形状取得は依然として困難であるため、これは既存のモーションキャプチャを用いたマーカベースで実現した。その上で、非剛体が有している模様を打ち消しながら、任意の映像を投影するための技術、その中でも特に、投影装置や観測装置、計算機が潜在的に有している処理遅延時間に向き合っ、これを低減させることでの高速化を検討した。時系列予測に適したLSTMモデルを利用した機械学習によって対象の動きを予測し、遅延を低減した光学的補正処理を実現した。また、投影対象の形状に束縛された投影を改善するために、両眼視差立体視を組み合わせた投影対象の変形処理も試みた。これは、投影対象に鏡面性の高い塗装を施すことで、直線偏光を用いた受動的ステレオ法で実現した(図9)。しかし、ユーザの操作によって時々刻々と位置姿勢を変える投影対象において、一定の反射率を維持することが困難であったため、光学的補正技術によってこれを解消し、安定した立体視を実現した(図10)。これにより、投影対象の形状に依存しないプロジェクションマッピングの可能性を示すことができた。

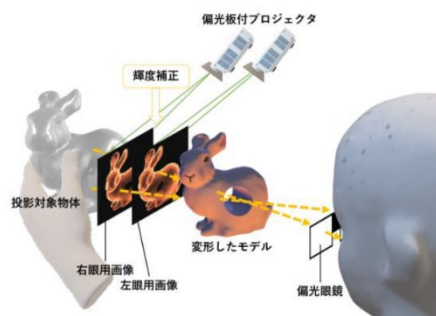


図9：ステルス投影での立体表現



図10：立体表現用の試作装置

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 清川 真純, 橋本 直己	4. 巻 Vol. 75, No. 6
2. 論文標題 体積走査型ディスプレイによる立体像と再帰透過光学系を用いたプロジェクションマッピングの提案	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 831-837
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/itej.75.831	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 室伏 皓太, 橋本 直己	4. 巻 Vol. 24, No. 4
2. 論文標題 複数の立体ディスプレイの組み合わせによる立体空中像の視域拡大	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本バーチャルリアリティ学会論文誌	6. 最初と最後の頁 432-438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18974/tvrsj.25.4_432	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Naoki Hashimoto, Kazuma Yoshimura	4. 巻 1
2. 論文標題 Radiometric compensation for non-rigid surfaces by continuously estimating inter-pixel correspondence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Visual Computer	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00371-019-01790-8	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 室伏 皓太, 橋本 直己	4. 巻 74
2. 論文標題 視差を再現した立体空中像の奥行き知覚への影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 222~225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/itej.74.222	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 奥田 慎一, 橋本 直己	4. 巻 Vol. 76, No. 4
2. 論文標題 回転型ストリップLEDアレイを用いた体積走査型ディスプレイによるプロジェクションマッピング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会誌	6. 最初と最後の頁 540 ~ 543
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3169/itej.76.540	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計23件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Taichi Watanabe, Naoki Hashimoto
2. 発表標題 Light-field Projection for Tangible Projection Mapping
3. 学会等名 SIGGRAPH2021 Posters (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Saito, Naoki Hashimoto
2. 発表標題 Pose Estimation Using Object Contour and Projection Distortion for Dynamic Projection Mapping
3. 学会等名 IWAIT 2022 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Halvorson, Takumi Saito, Naoki Hashimoto
2. 発表標題 Robust Tangible Projection Mapping with Multi-View Contour-Based Object Tracking
3. 学会等名 IEEE VR 2022 VRW (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤和人, 橋本直己
2. 発表標題 プロジェクタを用いた追跡投影による簡易型HMDの周辺視野拡張
3. 学会等名 映像情報メディア学会 メディア工学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 椎名真梨, 橋本直己
2. 発表標題 裸眼立体視可能な透明ディスプレイの検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会 メディア工学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥田慎一, 橋本直己
2. 発表標題 LED光源を用いた体積走査型ディスプレイによるプロジェクションマッピング
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田祥子, 橋本直己
2. 発表標題 ゲームエンジンを用いたインタラクティブなプロジェクションマッピングシステムについての検討
3. 学会等名 電子情報通信学会・バーチャルエクスペリエンス・バーチャル環境基礎研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoki Hashimoto, Kota Murofushi
2. 発表標題 Wide Viewing Angle 3D Aerial Display Using Micro-Mirror Array Plates and Aerially-Coupled 3D Light Sources
3. 学会等名 ACM SIGGRAPH2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masumi Kiyokawa, Naoki Hashimoto
2. 発表標題 Dynamic Projection Mapping with 3D Images Using Volumetric Display
3. 学会等名 IEEE VR 2001 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ハルバーソン悠太, 橋本直己
2. 発表標題 Dynamic Projection Mappingのための2視点からの輪郭を用いた物体追跡の精度向上に関する検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会 創立70周年記念大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥田慎一, 橋本直己
2. 発表標題 ステルス投影のためのLEDアレイを用いた回転型ボリューム3Dディスプレイの検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会 創立70周年記念大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 齋藤匠, 橋本直己
2. 発表標題 輪郭と投影歪みを用いたロバストな位置姿勢推定手法の検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会 メディア工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡辺大智, 橋本直己
2. 発表標題 ライトフィールド投影によるプロジェクションマッピングの検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会 メディア工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masumi Kiyokawa, Shinichi Okuda, Naoki Hashimoto
2. 発表標題 Stealth Projection: Visually Removing Projectors from Dynamic Projection Mapping
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥田慎一, 橋本直己
2. 発表標題 前面投影と背面投影の組み合わせによるステルス投影の広域化
3. 学会等名 映像情報メディア学会 メディア工学研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 清川真純, 橋本直己
2. 発表標題 ステルスプロジェクションにおける投影物体との同期機構に関する検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会冬季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mari Shiina, Naoki Hashimoto
2. 発表標題 Stereoscopic Transparent Display Visible with Naked Eye
3. 学会等名 SIGGRAPH2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤和人, 橋本直己
2. 発表標題 映像投影を用いた広視野HMDにおける周辺映像の遅延補償の検討
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田祥子, 橋本直己
2. 発表標題 把持操作可能な動的プロジェクションマッピングにおける対象物体と提示情報の形状認識に関する検討
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤匠, 橋本直己
2. 発表標題 動的プロジェクションマッピングのための2視点からの輪郭を用いた物体追跡の精度評価
3. 学会等名 映像情報メディア学会 2022年年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉村一真, 橋本直己
2. 発表標題 深層学習による動き予測を用いた動く非剛体面に対する光学的補正の検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会冬期大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuma Yoshimura, Naoki Hahsimoto
2. 発表標題 A Study on Radiometric Compensation for Moving Non-rigid Surfaces Using Motion Prediction
3. 学会等名 IWAIT2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山岸祥大, 橋本直己
2. 発表標題 両眼立体視を組み合わせた動的プロジェクションマッピングの検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会 メディア工学研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 表示システム、表示方法、処理装置およびプログラム	発明者 橋本直己、斎藤和人	権利者 電気通信大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-132452	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	佐藤 美恵  (Sato Mie)  (00344903)	宇都宮大学・工学部・教授    (12201)	

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
---------	---------