

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22882

研究課題名(和文)光学シースルー型映像提示装置における減光機序に依拠しない影表現

研究課題名(英文)Representing virtual shadows without dimming mechanism for optical see-through type displays

研究代表者

柴田 史久 (Shibata, Fumihisa)

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：80314425

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)：本研究の目的は、光学シースルー(OST)型映像提示装置において仮想物体の影(キャストシャドウ)を提示する技術の実現である。OST方式ではその原理上、現実の光景の光を減衰させないと実現できないキャストシャドウを表現することが難しい。そこで本研究では、人間の明るさ知覚特性を利用して仮想物体の影を表現する手法を提案した。さらにOST型の映像提示装置において、仮想の透明物体を如何にして表現するかという新たな課題に取り組んだ。本研究で得られた知見の応用先として、自動車のヘッドアップディスプレイでの情報提示を想定し、周辺車両によって生じる不可視領域を、隠消現実感技術を用いて可視化する取り組みも行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

OST方式における従来のキャストシャドウの表現手法は入射光量が減衰する、装置が複雑化する、電力消費が増大するなどの課題を抱えていた。一方、本研究の提案手法は、光を加算することによって光量が減衰したかのように知覚させるという逆転の発想に基づく意欲的な試みであり、これによってキャストシャドウを表現できれば、仮想物体の位置を正確に示すこと可能となる。位置・姿勢推定精度の低さに起因する仮想物体位置の不正確さを感じにくくさせることや、キャストシャドウの色を変色させて仮想物体の透明感を表現するなど、様々なAR/MR応用分野において活用可能な技術へと展開でき社会的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to present virtual shadows on a real surface for optical see-through (OST) head-mounted displays. Due to the principle of the OST method, it is difficult to express virtual shadows that cannot be realized without devices which selectively reduce or intercept the light rays from the real scene. Therefore, we proposed a method to express the shadow of a virtual object by using the human brightness perception characteristic. The virtual shadows are based on the simultaneous brightness-contrast illusion in which a central region surrounded by a lighter one is perceived as darker than one without such a lighter region. Furthermore, we tackled a new issue of how to express virtual transparent objects for OST-type devices. In addition, as an application to ITS field, we assumed the presentation of information on the head-up display of a vehicle and tried to visualize the hidden area generated by the surrounding vehicles by using diminished reality technique.

研究分野：複合現実感, モバイルコンピューティング

キーワード：光学シースルー 複合現実感 影表現 錯覚 透明物体

### 1. 研究開始当初の背景

現実世界を仮想データで増強する拡張現実感 (Augmented Reality; AR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) が、人工現実感 (Virtual Reality; VR) を超える新たな情報提示法として注目されていた。その技術は、一般にも徐々に使われるようになってきたが、その多くはラフな位置姿勢情報に基づき文字・図形を単純に重畳したものに過ぎず、それゆえ産業界からは、もっと高精細な CG 映像を正確に融合できる AR/MR 技術を求める声が急増していた。

AR/MR を実現する方式は、カメラで取得した画像と CG 映像を計算機でリアルタイムに融合し表示するビデオシースルー (Video See-Through; VST) 方式と、ハーフミラーなどの半透明の映像提示装置に CG 映像を描画し、現実と仮想を光学的に融合する光学シースルー (Optical See-Through; OST) 方式がある。VST 方式がカメラの画角などに起因して視野が狭くなるのに対し、OST 方式では現実と仮想を光学的に融合しているため、視野が広くとれるという利点がある。特に、自動車分野では、ウインドシールドに情報を表示する OST 方式のヘッドアップディスプレイ (Head Up Display; HUD) への期待が高まっており、AR/MR 分野の応用先として大きな可能性を秘めている。

しかしながら、OST 方式ではその原理上、光を加算することしかできないため、現実の光景の光を減衰させないといけないキャストシャドウを表現することは不可能である。そのため、従来研究では、外光を減衰させる液晶シャッタや LCOS などの仕組みを組み合わせる手法が検討されていた。しかしながら、これらの手法では、追加の減光装置が必要になる点や装置が存在することでそもそもの入射光量が減衰してしまうなどの課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、複合現実型情報提示を実現するための一方式である OST 型映像提示装置において仮想物体の影 (キャストシャドウ) を提示する技術の実現である。OST 型映像提示の基本的な仕組みは、ハーフミラー等の半透明の映像提示装置上に計算機によって描かれた仮想物体を結像させることにより、現実の光景と仮想物体を網膜上で融合してみせるというものである (図 1)。OST 方式ではその原理上、光を加算することしかできないため、現実の光景の光を減衰させないといけないキャストシャドウを表現することは不可能である。そのため、従来研究では、外光を減衰させる液晶シャッタや LCOS などの仕組みを組み合わせる手法が検討されている。しかしながら、これらの手法では、追加の減光装置が必要になる点や装置が存在することでそもそもの入射光量が減衰してしまうなどの課題がある。そこで本研究課題では、OST 型の映像提示装置において減光機序に依らずにキャストシャドウを提示する新たな手法の確立に挑戦することとした。

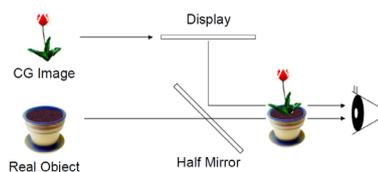


図 1 OST 方式の仕組み

### 3. 研究の方法

本研究課題では、減光機序を用いずにキャストシャドウを知覚させる方法として錯視を利用する。基本アイデアを図 2 に示す。基本アイデアの要諦は、キャストシャドウを作り出したい領域の周辺の明度を上げ、明度対比によってキャストシャドウを知覚させるというものである。こ

	(a)非表示状態	(b)仮想物体のみ	(c)周辺の明度増加	(d)グラデーション
OST で表示する CG 画像				
重畳表示像				

図 2 減光機序を用いたキャストシャドウ表現法の基本アイデア

ここでは、OST 型映像提示装置を通して現実世界に存在するチェッカーボードを見ているという想定で提案手法の概要を説明する。通常、CG が何も表示されていない状態 (図 2(a)) では、OST には何も表示されていない。ここに、CG による球状物体を表示すると図 2(b)に示すように仮想物体が浮き上がって見えてしまう。そこで、図 2(c)に示すように、仮想物体のキャストシャドウを知覚させたい領域の周辺領域の明度を上げる。結果、明度対比の錯覚によって、仮想物体のキャストシャドウが知覚される。しかしながら、単純に周辺領域全体の明度を上げると同図の下 (重畳表示像) のように明度を上げた部分が目立つという問題が発生するため、色の変化が小さい色は同じ色だと錯覚する人間の視覚特性を利用し、図 2(d)に示すように周辺領域にグラデーションを施すことでこの問題に対処する。

周辺領域の明度を上げる際に、単純に赤緑青の三原色を均等に増加させると対象領域の色味が変化してしまう。そのため、対象領域のテクスチャを取得し、それにあわせて仮想物体画像を生成することで色についても考慮にいった手法の確立を目標とする。具体的には、カメラ等を使って対象領域をセンシングし、そこから得られる三次元形状および色のデータに基づいて明度を調整した CG 画像を描画する処理の実現を目指す。

#### 4. 研究成果

本研究によって得られた成果を列挙する。

##### (1) 明るさ知覚特性を利用した仮想物体の影の表現手法

まずは前述の基本アイデアに基づいてキャストシャドウを生成する処理を実装し、OST 方式の頭部装着型ディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) を用いて実験した。木目調やチェッカーボードなど何種類かの平面の背景を対象に、錯覚を利用してキャストシャドウを知覚させる試みを行った。図 3 に OST-HMD におけるキャストシャドウの生成結果を示す。上段がチェッカーボードを背景とした場合、下段が木目調の平面を背景とした場合である。OST-HMD では、仮想物体 (緑色の球) のみを描画した場合、半透明の球が描画されるだけであり、背景と球の距離感がつかみにくいものとなる。そこで、本研究で提案する手法によって、仮想物体によって生じる影の周辺領域の明度を、背景と同じ見た目のテクスチャを描画することで上昇させ、明度対比の効果によってあたかも仮想の球に影があるかのように見せている。しかし、単に影の周辺領域の明度を上昇させただけでは、明度上昇に利用するテクスチャの周辺の境界が目立つ結果となるため、平面を描画する際に、周辺に行くにつれ明度が下がるようなグラデーション処理を施すことで、境界が目立つ問題を解消する。このような一連の処理を Shadow Inducer と呼ぶ。図 3(b)に示したものが Shadow Inducer によって OST-HMD 上に表示される仮想物体であり、これが(a)に示した現実の背景と混ざること(c)に示す仮想物体を重畳した光景が生成される。

このような処理によって、人間がキャストシャドウをどのように知覚するかを確認するために実験を実施した。図 4 に実験環境と実験の説明に使用した図、および実験中に参加者が視認する視界を示す。実験の参加者は 23 名 (20 代男性 21 名, 20 代女性 2 名) で、視力は正常である。参加者は、図 4(c)中の赤点で示した位置の明度を 100 と仮定した場合に、X (緑点)、および Y (青点) で示した位置の明度が評価させ、知覚した明度を入力させた。

X と Y の位置は、仮想物体が描画されていない場所に相当するため、実際の明度で考えた場

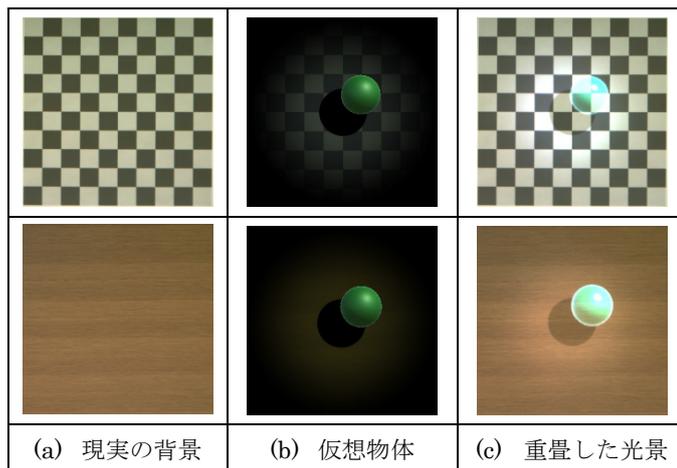


図 3 OST-HMD によるキャストシャドウの生成結果

図 3 に OST-HMD におけるキャストシャドウの生成結果を示す。上段がチェッカーボードを背景とした場合、下段が木目調の平面を背景とした場合である。OST-HMD では、仮想物体 (緑色の球) のみを描画した場合、半透明の球が描画されるだけであり、背景と球の距離感がつかみにくいものとなる。そこで、本研究で提案する手法によって、仮想物体によって生じる影の周辺領域の明度を、背景と同じ見た目のテクスチャを描画することで上昇させ、明度対比の効果によってあたかも仮想の球に影があるかのように見せている。しかし、単に影の周辺領域の明度を上昇させただけでは、明度上昇に利用するテクスチャの周辺の境界が目立つ結果となるため、平面を描画する際に、周辺に行くにつれ明度が下がるようなグラデーション処理を施すことで、境界が目立つ問題を解消する。このような一連の処理を Shadow Inducer と呼ぶ。図 3(b)に示したものが Shadow Inducer によって OST-HMD 上に表示される仮想物体であり、これが(a)に示した現実の背景と混ざること(c)に示す仮想物体を重畳した光景が生成される。

このような処理によって、人間がキャストシャドウをどのように知覚するかを確認するために実験を実施した。図 4 に実験環境と実験の説明に使用した図、および実験中に参加者が視認する視界を示す。実験の参加者は 23 名 (20 代男性 21 名, 20 代女性 2 名) で、視力は正常である。参加者は、図 4(c)中の赤点で示した位置の明度を 100 と仮定した場合に、X (緑点)、および Y (青点) で示した位置の明度が評価させ、知覚した明度を入力させた。

X と Y の位置は、仮想物体が描画されていない場所に相当するため、実際の明度で考えた場

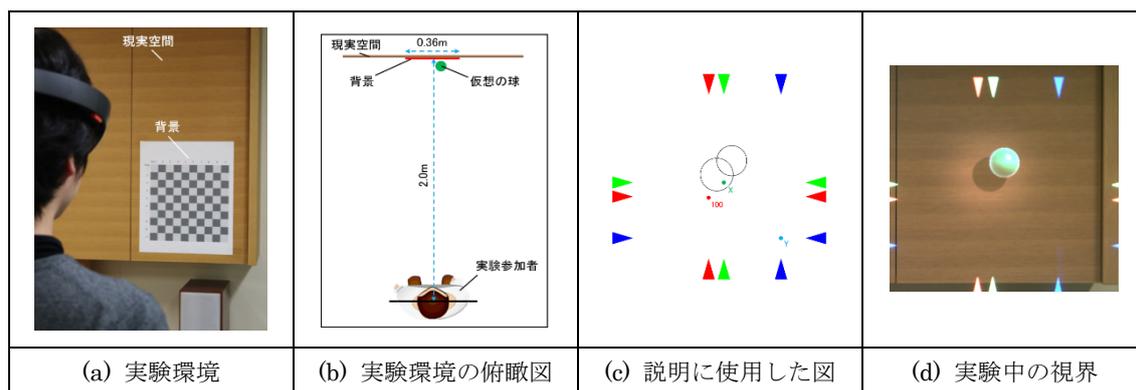


図 4 実験環境と説明に使用した図および実験中の視界

合は同じ値となる。しかし、実験の結果、すべての条件において知覚された明度は、影である X の値が、影ではない Y の値よりも暗いという結果が得られた。特に木目調の背景の場合、参加者によって知覚された Y の値が基準の 100 に近いという結果が得られており、明度を上昇させた領域と処理を行っていない領域との明度に差がないということを意味している。

## (2) 知覚特性を利用した影とコースティクスの表現手法

項目(1)の研究を進める中で、元々CGが半透明に表示されるOST方式において、仮想の透明物体を如何にして表示するのかという新たな問題を発見し、これについても本研究課題の一環として取り組んだ。図3(c)や図4(d)からわかるように、OST方式において、液晶やLiquid Crystal on Silicon (LCOS)などの空間位相変調器 (Spatial Light Modulator; SLM) が搭載されていない場合は、実世界からの光を遮断もしくは減衰することができず、すべての仮想物体は半透明に知覚される。仮想物体の描画のために、複数の光学的性質をシミュレートしなければならない物体として、ガラスや水、ダイヤモンドなどの透明物体が挙げられる。こうした透明物体で生じる主な光学現象は、表面での反射 (拡散反射と鏡面反射)、透過像を含む影、物体を通して見える背景像の歪みである。AR/MRにおいても、実時間性を担保するために適度に近似しながら、こうした光学現象をできるだけ多く正確にシミュレートすれば、写実性の高い透明物体を提示できると考えられる。SLMを備えていないOST-HMDは機構上、これらの光学現象をすべて再現することが困難である。再現が難しい光学現象の例はまず、透明物体が落とす透過像を含む影である。OST-HMD上で影を表現するには光が遮蔽された領域の輝度を減衰させる必要があるためである。もう1つの例が、物体を通して見える背景像の歪みである。光線 (Ray tracing) をシミュレートすることによって写実的な像を計算できるが、それを提示する際に、直接見える部分から来る光線を遮断する必要があるためである。こうした描画が幾何光学的に正確にできないため、SLMを持たないOST-HMDにおいて、透明物体を写実性高く提示することについてはあまり議論されてこなかった。そこで、SLMを持たないOST-HMDにおいて、錯視を利用して疑似的に透明物体の影を表現し、付加することでより複数の光学現象を再現し、写実性の高い透明物体を表現する手法を提案した。具体的には、物体表面は環境マップなどの既存の手法を用いて再現し、透明物体の影は、計算した明暗パターン (コースティクス; caustics) を、知覚特性を利用し表現することで、複数の光学現象が再現された写実性の高い透明物体を描画した。影の表現には前述のShadow Inducerを利用している。図5に提案手法を用いて表現した透明物体を、図6に影と明暗パターンを生成する手順を示す。

提案した手法の有効性を確認するために実験を実施した。本実験で提示する仮想物体は、ガラス球とダイヤモンドとし、影が落とされる実物体 (床面) は、木製の机 (木目調) とチェッカーボードとした。OST-HMDで表示する画像はUnityでCG/HLSLを用いて計算した。本実験では、仮想物体の中心を原点として、Unityで設定可能な光の明るさを15に設定した点光源を物体から1.73mの距離、高さ1mの前方右斜め上に配置した。環境マッピングのテクスチャは、Kodak PIXPRO SP360を用い、仮想物体の中心位置で取得した。各透明物体の影の明暗パターンは、BlenderのCycles Renderにより、パストレーシングしてシミュレートした。Blenderでの仮想物体の大きさや位置はUnityで作成した環境と同等に設定した。各物体の屈折率は、ガラス球はソーダ石灰ガラスの屈折率1.51、ダイヤモンドの屈折率は2.42に設定した。OST-HMDとしてMicrosoft HoloLensを使用し、投影面の木製の机とチェッカーボードは鏡面反射が生じにくいものを採用した。実験の結果、提案手法で表現した透明物体は、反射のみを表現した透明物体より写実的に表現できていることが分かった。しかしながら、明暗パターン (コースティクス) のみを表現した場合と提案手法の間では有意な差は得られなかった。また、提案手法の効果が投影面と物体に依存することも分かった。具体的には、投影面としては、チェッカーボードに比べて木製の机における効果が大きく、透明物体においては、ダイヤモンドに比べてガラス球を対象とした場合の効果が大きいことが判明した。

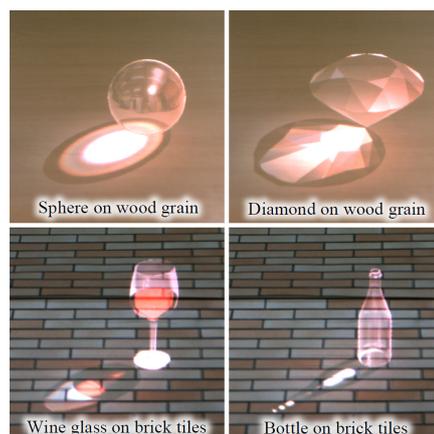


図5 提案手法による透明物体

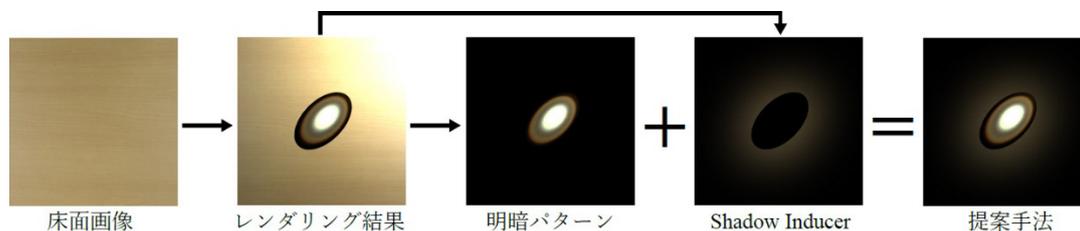


図6 影と明暗パターン (コースティクス) の生成手順

### (3) 両眼運動による視覚効果を再現した透明物体表現法

項目(2)の延長線上の研究として、正確な奥行き提示が困難な OST-HMD において、透明物体が持つ視覚効果を再現する手法を検討した。実物の透明物体は、表面像、反射像、屈折像などの奥行き異なる複数の像から成る。そのため、注視する像に応じて輻輳と調節による視覚効果が発生し、網膜に映し出される透明物体の像は変化する。しかし、既存の OST-HMD では、計算コストの問題から、リアルタイムで正確な各像のズレを表現できず、また、輻輳調節矛盾の問題から、奥行きに応じた各像のボケを表現することができない。そこで、透明物体の各像のズレとボケをそれぞれ疑似的に再現する視覚効果の表現手法について検討した。

提案手法を用いて透明物体の視覚効果を再現した結果を図 7 に示す。上段は実物の透明物体の結果、中段は既存手法で表現した結果、下段は本手法を用いて表現した結果である。仮想透明物体の結果画像（図 7 中段と下段）に関しては、OST-HMD のディスプレイ越しに撮影した複数の画像を露光合成し取得している。評価実験においては、仮想透明物体を視覚効果の有無で比較させ、提案手法は仮想透明物体の表現力向上に寄与することが確認された。特に、ズレの効果はボケの効果より表現力に大きく影響することが分かった。

### (4) 隠消現実感に基づく周辺車両の半隠消表示法

本研究開始当初に想定した応用先として、自動車のウインドシールドに情報を表示する OST 方式のヘッドアップディスプレイ (Head Up Display; HUD) がある。そこで、隠消現実感技術 (Diminished Reality; DR) を利用した安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法についても取り組みを進めた。

具体的には、自車両での半隠消表示を実現する上で必要な不可視領域を観測したカメラや LiDAR のセンサ情報を、5G 通信を介して車車間で送受信する手法や、どのような半隠消表示が運転支援として適切かを検討する研究を実施した。



図 7 異なるコンディションにおける透明物体の視覚効果. 上段: 実物. 中段: 既存手法 (環境マップ + フレネル効果). 下段: 提案手法.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Kimura Yuto, Kimura Asako, Shibata Fumihisa	4. 巻 11
2. 論文標題 Representing Virtual Transparent Objects on Optical See-Through Head-Mounted Displays Based on Human Vision	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 495 ~ 495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app11020495	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 Ikeda Sei, Kimura Yuto, Manabe Shinnosuke, Kimura Asako, Shibata Fumihisa	4. 巻 91
2. 論文標題 Shadow induction on optical see-through head-mounted displays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers & Graphics	6. 最初と最後の頁 141 ~ 152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cag.2020.07.003	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 平松黎, 若林優, 佐々木俊希, 木村朝子, 柴田史久
2. 発表標題 安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法(3) - 5G 環境下における性能評価実験 -
3. 学会等名 マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOM2021) シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤重秀斗, 若林優, 松室美紀, 木村朝子, 柴田史久
2. 発表標題 安全運転支援のための周辺車両の半隠消表示法(4) ~ 半隠消表示法の拡張と評価 ~
3. 学会等名 電子情報通信学会 ITS研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村勇斗, 木村朝子, 柴田史久
2. 発表標題 ビデオ透過型HMDにおける視覚特性に基づく透明物体表現法
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村勇斗, 木村朝子, 柴田史久
2. 発表標題 視覚特性に基づく光学透過型HMDでの透明物体表現法
3. 学会等名 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Kimura, Shinnosuke Manabe, Asako Kimura, Fumihisa Shibata
2. 発表標題 Representing Virtual Transparent Objects on OST-HMDs Considering Accommodation and Vergence
3. 学会等名 27th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinnosuke Manabe, Sei Ikeda, Asako Kimura, Fumihisa Shibata
2. 発表標題 Shadow Inducers: Inconspicuous highlights for casting virtual shadows on OST-HMDs
3. 学会等名 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kimura Yuto, Shinnosuke Manabe, Sei Ikeda, Asako Kimura, Fumihisa Shibata
2. 発表標題 Can transparent virtual objects be represented realistically on OST-HMDs?
3. 学会等名 26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (IEEE VR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村勇斗, 真鍋慎之介, 池田聖, 木村朝子, 柴田史久
2. 発表標題 光学透過型ヘッドマウントディスプレイにおける仮想影を利用した透明物体の写実的表現
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

立命館大学 情報理工学部 柴田研究室ホームページ <a href="http://www.rm2c.ise.ritsumeai.ac.jp/mclab/">http://www.rm2c.ise.ritsumeai.ac.jp/mclab/</a>
---

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	木村 朝子  (Kimura Asako)  (20324832)	立命館大学・情報理工学部・教授    (34315)	

6. 研究組織（つづき）

	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	田村 秀行  (Tamura Hideyuki)  (10367998)	立命館大学・総合科学技術研究機構・教授    (34315)	

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