

Afterglow Projection: 複合現実感におけるピコプロジェクタを用いた 実環境に残存する仮想情報投影手法

赤星 俊平^{1,a)} 松下 光範¹

概要: プロジェクタを用いて実環境に仮想情報を直接的に投影することで、複合現実感を実現するプロジェクション型 MR が存在する。これらに対してピコプロジェクタを用いた操作手法が提案されているが、投影範囲に制限があり、一時的な提示に止まっている。本稿では、ピコプロジェクタの投影と同じものを、環境に設置した別のプロジェクタから投影することで残存させる。これにより、実環境に対して複数の仮想情報を同時に提示し続けることを実現する。

Afterglow Projection: Virtual information projection method remaining in real environment using pico projector in mixed reality

SHUMPEI AKAHOSHI^{1,a)} MITSUNORI MATSUSHITA¹

Abstract: There is a projection-based MR that projects virtual information to the real environment using a projector. As an operation method, a system using a pico projector has been proposed. However, limitation of the projection range and temporary presentation can be cited as problems. In this paper, the same projector as the pico projector is projected from another projector installed in the environment. By using this system, since virtual information remains, it is possible to continue to superimpose a plurality of virtual information simultaneously on the real environment.

1. はじめに

現実には存在しない表現や体験を可能にする表現として、人工現実感と呼ばれる概念が研究されている。特に近年、我々が存在する現実世界に対してコンピュータ上で作り出された仮想世界を融合する複合現実感と呼ばれる概念が注目されている。複合現実感とは現実だけではあり得ないような体験を創出することが可能であり、立体映像を用いたオフィスでの遠隔会議のような実用的なものから、現実に対してキャラクターが現れるゲームのようなエンタテインメントまで、幅広い分野に対して活用が取り組まれている^{*1*2}。

現在の複合現実感の主な手法では Microsoft 社の



図 1 システムのイメージ

¹ 関西大学大学院 総合情報学研究科

^{a)} k854371@kansai-u.ac.jp

^{*1} <https://meleap.com/> (2018/07/14 確認)

^{*2} <http://www.dreamnews.jp/press/0000168089/> (2018/07/14 確認)

HoloLens^{*3}や、Magic Leap 社の Magic Leap One^{*4}を始

^{*3} <https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us> (2018/07/01 確認)

^{*4} <https://www.magicleap.com/> (2018/07/01 確認)

めとした HMD 端末,あるいは Google 社の Tango^{*5}のようなタブレット端末を用いる。これらの手法では,ユーザが各自の端末で個別に仮想情報を視認することが基本であり,複数人での利用を実現する場合は各ユーザの端末を同期するための複雑な処理や高い性能が必要となる。

これらに対して,プロジェクタを用いることで仮想情報を実世界へ直接的に融合するプロジェクション型 MR が存在する [1], [2]。プロジェクション型 MR では HMD などの端末を通さずに仮想情報を視認することが可能であり,複数人での体験を容易にするほか,実環境の色味や形状に沿った仮想情報の重畳を実現している。これまでプロジェクション型 MR ではユーザが仮想情報を操作するためにタブレットを用いた操作 [3] や深度センサを用いた操作 [4],ピコプロジェクタを用いた操作 [5] など様々な手法が提案されてきた。特に,ピコプロジェクタを用いた手法では,ユーザが自ら投影を行い,実環境の任意の位置に対して情報を容易に重畳することが可能である。

しかし,ピコプロジェクタは投影範囲が狭く,輝度も低いため一度に提示可能な情報の量や,情報を配置可能な環境に制限がある。この問題に対して本研究では,ピコプロジェクタを用いて投影した仮想情報を,実環境に設置した他のプロジェクタを用いて置き換える「Afterglow Projection」を実装することで,持続性の向上を実現する。

2. 関連研究

これまで,ピコプロジェクタを用いて実環境へ情報を投影する取り組みは多数行われてきた。

操作デバイスにピコプロジェクタを用いる研究として, Yoshida らの Twinkle[6] では,実環境に応じて仮想情報の投影を行うゲームインタフェースを実現している。把持したピコプロジェクタから仮想のキャラクタを投影し,投影面の情報をカメラで認識することによって,実環境の図柄に応じたアニメーションやエフェクトの変化を実現している。Arvind らの Lumen^{*6}では,実環境に応じた仮想情報の付与や,仮想インタフェースによる機能拡張を実現している。ピコプロジェクタに搭載された深度センサで認識した映像をサーバ上で処理することによって物体検出を行い,その結果に応じて物体の名前や,操作可能なデバイスであれば操作するための仮想インタフェースを投影する。それらに触れることで,オーディオの音量操作や照明の輝度操作を実現している。Karl らの HideOut[7] では,複数のユーザが可視光と不可視光の同時投影とそれらの認識が可能なプロジェクタ・カメラを各自用いる。不可視光によってマーカを投影することで各自の投影情報の位置を認識しつつ,可視光によってカーソルやアイコンを提示する。これらを用いることで,複数人での協調作業やゲームの体

験を実現している。これらのピコプロジェクタを用いた研究では,実環境に応じた仮想情報の重畳を実現しているが,仮想情報の視認は投影を行なっている間のみに限られる。加えて,仮想情報を提示することが可能な投影範囲も,ピコプロジェクター一台の狭い画角内のみに限られる。そこで本研究では,ユーザが持つプロジェクタとは別途,据え置きプロジェクタを実環境内に配置し,ピコプロジェクタと据え置きプロジェクタを随時切り替えることで仮想情報を残存させることで,これらの問題点を解決する。

複数台のプロジェクタによって情報を多重化する研究として,水野らの研究 [8] では,物体に光を当てて生成された実影と,深度センサを用いて認識した人物を元に CG で生成された仮想影を重ね合わせることで,実影が変形したり複製したりする表現を作り出している。この研究では,プロジェクタの光による実影を用いる特性上,ユーザを挟み込むようにプロジェクタ,深度センサ,投影面を設置し,ユーザがそれらを意識して体験する必要がある。本研究では,天吊りにしたプロジェクタと対角線上に設置したトラッキングシステムによって広い体験範囲を実現する。白井らの秘映プロジェクタでは [9],赤外線光を投影するプロジェクタと可視光を投影するプロジェクタからそれぞれ映像を多重に投影している。ユーザは赤外光を視認可能な端末を用いることで,必要に応じて情報を切り替えて視認することが可能である。本研究では可視光のプロジェクタ同士で仮想情報の切り替えを行うため,特殊な端末を通すことなく仮想情報の視認を可能にする。

3. デザイン指針

実環境においてユーザが円滑に仮想情報を扱うために,本システムが満たすべき要件を以下のものとする。

- (1) 任意の位置と大きさとで仮想情報を重畳できる
- (2) ユーザが任意の仮想情報を選択できる
- (3) 重畳した仮想情報を実環境に残存させられる
- (4) 重畳した仮想情報を操作できる

まず,(1)を実現するために,ピコプロジェクタを用いる。ユーザはピコプロジェクタを操作デバイスとして把持することで,現実空間に対して自由に仮想情報の投影が可能である。投影面とプロジェクタの距離に応じて画角が広がるプロジェクタの特性を利用し,仮想情報の大きさを素早く変更することを可能にする。加えて,投影面の形状に沿って画像が投影されるプロジェクタの特性を利用し,ユーザが視認しやすい角度で仮想情報を重畳することを可能にする。

(2)を実現するために,物理ボタンとスマートフォンを用いる。予めシステムに登録した複数種の画像や動画などの仮想情報の中から物理ボタンによって任意のものを選択し,投影することで任意の情報を選択することを可能にする。

*5 <https://get.google.com/intl/ja/tango/> (2018/07/01 確認)

*6 <http://arvindsanjeev.com/lumen.html> (2018/07/01 確認)

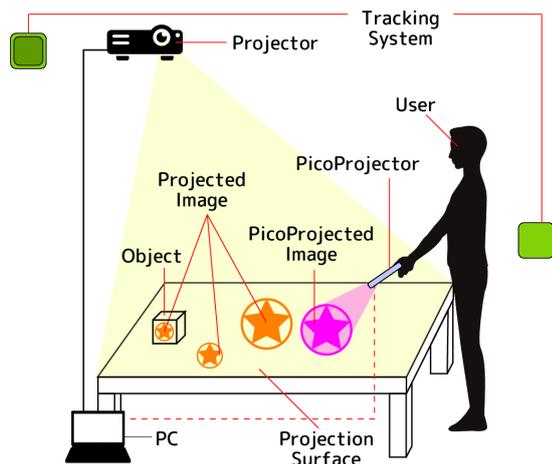


図 2 システム構成図

(3) を実現するために、ピコプロジェクタよりも画角が広く輝度が高い据え置きプロジェクタを用いる。ユーザが自身の投影している仮想情報をその場に固定して閲覧したい、または複数の仮想情報を同時に閲覧したい場合、ボタンを押したタイミングで仮想情報を投影するプロジェクタをピコプロジェクタから据え置きプロジェクタにすり替えることで仮想情報をその場に残存させることを可能にする。ピコプロジェクタで投影している仮想情報と同じ位置・形状の仮想情報を生成し、据え置きプロジェクタから全く同じように投影することで実現する。

最後に、(4) を実現するために、仮想情報を貼り付けることが可能な実物体としてタンジブルオブジェクトを用いる。(3) で投影する仮想情報を残存させる際に、タンジブルオブジェクトに対して投影を行うと仮想情報を貼り付けられるようにする。その後、ユーザがタンジブルオブジェクトを直接手に取って操作する。位置と角度を常時トラッキングすることで重畳した仮想情報の操作を実現する。

4. 実装

4.1 ハードウェア構成

本システムのハードウェアは、トラッキングシステム、ピコプロジェクタ、据え置きプロジェクタ、タンジブルオブジェクトによって構成される。システム構成図を図 2 に示す。

まずトラッキングシステムとして、HTC Vive^{*7}の Light-house を用いている。赤外光の照射と認識を行うベースステーションを対角線上に配置することで、後述する Vive コントローラや Vive トラッカーの位置や角度を検出している。

据え置きプロジェクタには BenQ の MW632ST と BenQ MP512 を使用している。本システムでは据え置きプロジェクタの画角によって体験範囲が決定されるため、据え置き

*7 <https://www.vive.com/jp/> (2018/07/14 確認)

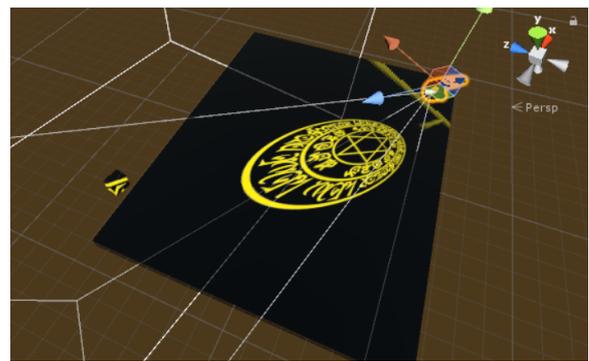


図 3 仮想上に再現された実環境

プロジェクタの設置位置と投影面の距離が離れていなくても通常のプロジェクタよりも広範囲に投影することが容易な短焦点プロジェクタを用いた。後述するタンジブルオブジェクトの特性上、真上から投影することが必要なため、体験範囲の頭上に設置しつつ投影光を鏡によって反射することで投影角度を変更している。投影面として用いる実環境は主に机や壁などの平面に対して行なっている。

ピコプロジェクタには Canon の C-10W と Bacio Japan の SmartBeamLaser を使用している。これらに対して HTC Vive の周辺機器である Vive コントローラとスマートフォンを 3D プリンタで作成した治具を用いて結合している。スマートフォンには Sony の Xperia XZs を用いている。これらにより、ピコプロジェクタの位置と角度の認識と、投影する仮想情報を選択するためのインターフェースの表示を行っている。本システムではピコプロジェクタはユーザが把持するため、負荷が少なくなるよう小型で軽量なものを使用した。加えて、仮想情報を重畳する位置やサイズを変更する際に、ピコプロジェクタの投影方向と距離をリアルタイムに変更するため、その度にピントを合わせる必要がないレーザープロジェクタであること、仮想情報を送る PC と離れた位置でも体験できるようワイヤレスでの接続が可能であることを条件として選定した。また、仮想情報を重畳する位置を決定する際の物理ボタンとして Vive コントローラの物理トリガーを利用している。

タンジブルオブジェクトには HTC Vive の周辺機器である Vive トラッカーを実物体に対して装着することで位置と角度を認識し、投影した仮想情報を実物体に追従させることを実現している。これらを物理的に移動させることで、仮想情報を残存させた後でも移動可能にしている。

4.2 ソフトウェア構成

据え置きプロジェクタとピコプロジェクタの投影を制御するためのシステムは Unity (ver.2017.2.1f1)^{*8}を用いて実装している。Unity で作られた仮想空間上で、投影面として用いる実環境の形状や、使用するピコプロジェクタの

*8 <http://japan.unity3d.com/> (2018/07/14 確認)

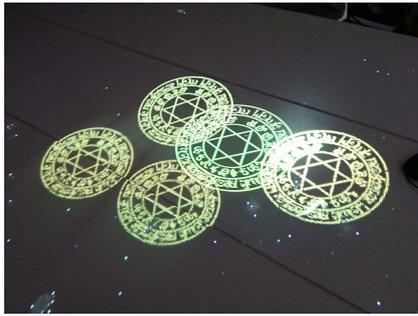


図 4 投影の残存

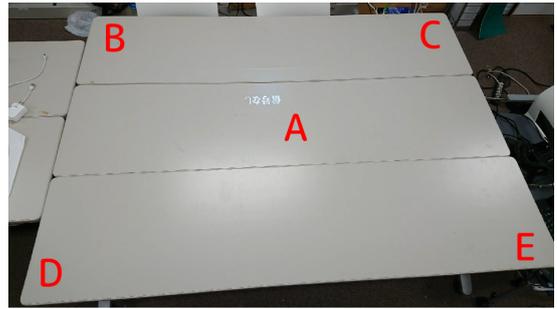


図 7 投影した箇所

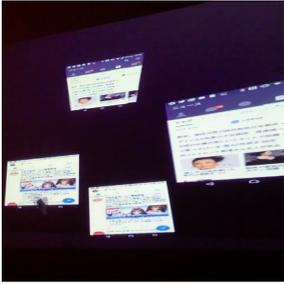


図 5 画像情報の提示

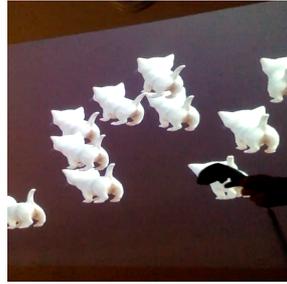


図 6 三次元情報の提示

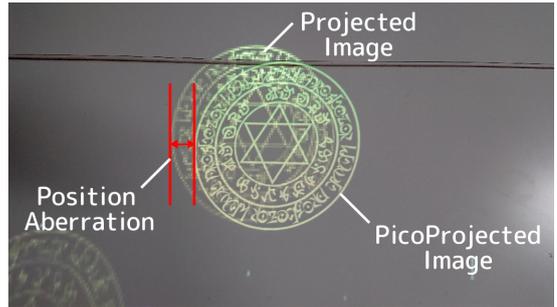


図 8 精度の検証

投影画角，投影する仮想情報を再現する（図 3 参照）．再現した仮想上のピコプロジェクタに対して，Lighthouse を用いて認識した実環境上のピコプロジェクタの位置と角度を反映することで，実環境上で投影されている仮想情報と同じ位置と形状を持った仮想情報を生成する．それらを据え置きプロジェクタから投影することで，実環境上でユーザがピコプロジェクタから投影している仮想情報を複製し，その場に残存させることを可能にする（図 4 参照）．据え置きプロジェクタの設置角度や，投影範囲と実環境のサイズの差によって生じる投影の歪みやズレに対しては，起動時に射影変換を用いてキャリブレーションすることで補正している．また，スマートフォンに表示する仮想情報を選択するためのインターフェースは Unity (ver.2017.2.1f1) を用いており，ネットワークライブラリである Photon Unity Networking^{*9} を用いてスマートフォンと PC の通信を行っている．

5. アプリケーション

本システムの応用例として，画像，動画，3DCG を投影可能なアプリケーションを実装した．ピコプロジェクタに装着されたスマートフォンに画像や動画などの投影可能な仮想情報の一覧が表示され，ユーザが選択したものが投影される．スマートフォンのスクリーンショットの重畳による画面メモの提示や，動画を投影することによる複数動画の同時視聴，実物体へのエフェクトやアノテーションの付与，または CG オブジェクトを表示することによる三次元情報の提示も可能である（図 5，6）．

*9 <https://www.photonengine.com/ja/PUN> (2018/07/19 確認)

6. 実験

6.1 実験 1：精度実験

本手法では，ピコプロジェクタから投影した情報と同じ位置に同じ形状の情報が据え置きプロジェクタから投影されることが望ましい．しかし，ピコプロジェクタの位置と角度の認識精度により，双方の投影にズレが生じる場合がある．本実験では，投影面の中央，四隅の計 5 箇所（図 7 参照）に対して投影を行ない，ピコプロジェクタから投影した画像の輪郭と，据え置きプロジェクタから投影された画像の輪郭の距離を測ることで，投影のズレを計測した（図 8 参照）．本実験の結果を表 1 に示す．

6.2 実験 2：評価実験

実験 1 で検証した投影のズレがユーザに与える影響について調査するために，情報学部 11 名に対して，実験 1 と同様の 5 箇所（図 7 参照）に対して投影を行なってもらい，アンケートを行った．また，輪郭が明確な画像はズレが目で見えやすく，ズレを大きく感じやすいと仮定し，複雑な形状かつ輪郭のぼやけた画像や，輪郭を常に変化させることで輪郭を感じにくくした動画の比較を行った．投影する仮想情報は「画像 A：輪郭が明確な画像」「画像 B：輪郭が曖昧な画像」「動画 A：輪郭が明確な動画」「動画 B：輪郭が曖昧な動画」の 4 種類とし，A，B，C，D の順に仮想情報を切り替えた（図 9，10，11，12 参照）．アンケート項目は画像 A，B，動画 A，B の投影に対してそれぞれ 5 段階での評価と自由記述でのコメントを依頼した．アンケート項目は「画像（動画）を，自分が想定した位置に配置す

表 1 位置ごとの投影のズレ (cm)

	位置 A	位置 B	位置 C	位置 D	位置 E
投影のズレ	1.2	3.4	3.6	6.1	5.8

表 2 アンケートの結果

	画像 A	画像 B	動画 A	動画 B
位置	2.7	3.1	3.3	3.5
大きさ	3	2.8	3.1	2.9

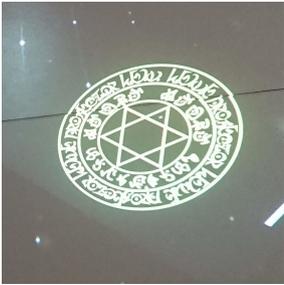


図 9 画像 A: 輪郭が明確な画像 図 10 画像 B: 輪郭が曖昧な画像



図 11 動画 A: 輪郭が明確な動画 図 12 動画 B: 輪郭が曖昧な動画

ることができた。」「画像（動画）を、自分が想定した大き
きで配置することができた。」とし、4 種類の投影情報に対
して評価を依頼した。

本実験の結果を表 2 に示す。数値は 5 段階評価の平均で
ある。

6.3 考察

精度実験について、中央に位置する A に対しては 1.2
cm と、ほぼズレのない投影が可能であることが確認した
が、四隅である B, C, D, E については、3.2 cm 6.8 cm
と、大きなズレが生じることを確認した。これは据え置き
プロジェクタの位置が投影面に対して斜めに位置していた
ことや、実環境の投影面と仮想上で再現された投影面の位
置やサイズに多少のズレがあったこと、起動時に行うキャ
リブレーションの細かいズレなど複数の要因が重なり、端
に向かうにつれてズレが大きくなっていったことが考えら
れる。

評価実験について、位置のズレに関しては、輪郭が明確
な画像 A よりも輪郭を曖昧にした画像 B が、輪郭が固定
の動画 A よりも動画で輪郭に変化を与え続けた動画 B の
方が数値が高くなる傾向が見られ、ある程度効果があるよ

うに考えられる。しかし、自由記述欄にて画像 A に対し
て「初回なので難しかった」動画 D に対して「慣れてきた
」というコメントが見られたことから、投影する順が後
ろの仮想情報の方が、投影する操作の感覚を把握してしま
い、種類に関わらず数値が高くなっていることが考えられ
る。大きさのズレに関しては、画像 A, B, 動画 A, B の
それぞれに大きな差はなく、輪郭の曖昧さや変化は投影し
た仮想情報の大きさの印象に影響が少ないことが示唆され
た。主な要因として、ピコプロジェクタの投影範囲を一ま
とまりとして捉えているため仮想情報の種類に関わらず大
きさを感じていることが考えられる。

7. 議論と展望

本システムでは、壁や机などの平面を投影面として用い
たが、より広く実環境に対して仮想情報を残すためには、
複雑な形状の面に対しても投影できることが望ましい。そ
のため、文献 [1] のように Kinect などの深度センサを用い
て実環境の形状を計測し、投影面として反映することで複
雑な面を持った実環境に対しても投影が可能になると考え
られる。また、現状は据え置きプロジェクタを一台のみと
しているが、より広い範囲の実環境に対して投影を行うこ
とや、タンジブルオブジェクトのような立体的な実物体の
全面に対して多角的に投影を行うことを実現するために、
台数を増やすことも検討する。本稿ではピコプロジェクタ
と据え置きプロジェクタは同じ画像を投影していたが、台
数を増やす際には、それぞれのプロジェクタの輝度や解像
度に合わせて、画像の解像度や色味を変化させることで投
影時の違和感を軽減することも検討する。

本稿で実装したタンジブルオブジェクトは、操作したい
対象の実物体一つ一つに Vive トラッカーを装着する必要
がある。今後は OpenCV や Vuforia などの画像認識手法
を用いて位置や角度を検出することで、より多量な実物体
をタンジブルオブジェクトとして扱うことが可能になると
考えられる。その場合、画像認識を用いた検出と Vive ト
ラッカーを用いた検出では精度に差が生じることが考えら
れるため、必要な操作を実現するにおいて最適な手法を検
証する必要がある。

最後に、本稿で用いたピコプロジェクタは Vive コント
ローラに対して実際に投影可能なピコプロジェクタを装着
することで実装しているが、実際には仮想上で映像が生成

できているためピコプロジェクタを用いることなく据え置きプロジェクタのみで仮想情報を投影することも可能である。そのため、現状の活用法ではピコプロジェクタを装着する意義が薄い。今後は実際のピコプロジェクタの投影に対して、据え置きプロジェクタからの投影を重畳して融合させることで新たな情報が得られるなど、プロジェクタ同士を連携することを意識した活用方法を検討する。また、今回実装したピコプロジェクタの形状は Vive コントローラの形状に従って持ち手として常に把持する必要があるが、タンジブルオブジェクトと同様、Vive トラッカーを使用することで小型軽量化や、ユーザの腕に装着可能なウェアラブルデバイスとして実装することが可能になると考えられる。その際には、コントローラを把持する操作と腕に装着するハンズフリーな操作の間に生じる操作性の差なども考慮する。

8. おわりに

本研究では、ピコプロジェクタを用いたプロジェクション型 MR に対して、投影範囲や持続性を向上させることを目指した。本稿では、複数台のプロジェクタを用いてピコプロジェクタの投影を複製し置き換えることで、画像や動画をその場に残したり、物理オブジェクトに貼り付けて操作することを実現した。今後は複数台のプロジェクタ同士の投影のズレの解消や、壁やテーブルなどの一面ではなく、空間全体にプロジェクタを配置することによる更に広い範囲への投影も検討する。

参考文献

- [1] Jones, B., Sodhi, R., Murdock, M., Mehra, R., Benko, H., Wilson, A., Ofek, E., MacIntyre, B., Raghuvanshi, N. and Shapira, L.: RoomAlive: magical experiences enabled by scalable, adaptive projector-camera units, *UIST '14 Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 637–644 (2014).
- [2] Mine, M., Rose, D., Yang, B., van Baar, J. and Grundhöfer, A.: Projection-Based Augmented Reality in Disney Theme Parks, *IEEE Computer* 45, 7, Vol. 45(7), pp. 32–40 (2012).
- [3] 小笠 航, 片寄晴弘: TPPM(Take Part in Projection Mapping): タブレット端末を用いた多人数参加型プロジェクションマッピングアプリケーション, エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2014 論文集, pp. 77–79 (2014).
- [4] 大島登志一, 川口 駿, 田中友麻, 田中千遥: MR Coral Sea - フィジカル MR ディスプレイによる多感覚的な複合現実型アクアリウム, インタラクション 2015 論文集, pp. 778–782 (2015).
- [5] Willis, K. D., Poupyrev, I., Hudson, S. E. and Mahler, M.: SideBySide: ad-hoc multi-user interaction with handheld projectors., *UIST '11 Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 431–440 (2011).
- [6] Yoshida, T., Hirobe, Y., Nii, H., Kawakami, N. and Tachi, S.: Twinkle: Interacting with physical surfaces using handheld projector, *Proceedings of the Virtual Reality Conference*, pp. 87–90 (2010).
- [7] Willis, K. D. D., Shiratori, T. and Mahler, M.: HideOut: Mobile Projector Interaction with Tangible Objects and Surfaces, *TEI'11 Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, pp. 331–338 (2013).
- [8] 水野慎士, 岩崎妃呂子, 近藤桃子, 伊藤 玲, 杉浦沙弥, 大葉有香: 実物影シミュレーションと 2 台のプロジェクタによるインタラクティブシャドウ, インタラクション 2016 論文集, pp. 937–942 (2016).
- [9] 白井良成, 松下光範, 大黒 毅: 秘映プロジェクタ: 不可視情報による実環境の拡張, *WISS2003*, pp. 115–122 (2003).