

HoloJection: 頭部装着型リアルタイム 立体投影デバイス

吉田匠吾^{1,a)} 謝浩然¹ 宮田一乗¹

概要: 近年、拡張現実や複合現実などの技術が発達しているものの、仮想モデルと現実世界の自然な合成は依然として挑戦的な課題である。この課題に対し、本研究ではプロジェクタによる歪画像のリアルタイム投影技術を提案する。提案技術により、AR システムで多用されるディスプレイを介することなく、リアルタイムに立体感を知覚させる映像を表示することができる。提案手法は、VR システムを用いたルームスケーリング、投影映像のブレ補正によるスムーズな映像の提示、トラッカーによるメッシュ生成を用いた仮想空間と実空間のオブジェクトの位置合わせの3段階の処理で構成する。また、プロジェクタやトラッカーをウェアラブルデバイス化することで、様々な方向や角度からの投影や移動が可能である。提案システムにより、スマートフォンやARグラスのようなディスプレイを介さず、仮想オブジェクトの実在感をユーザに与えることを可能にする。仮想オブジェクトの実在感が向上することにより、癒しや介護の分野に活用することや、新しいエンターテインメントの提供などが期待できる。

キーワード: 拡張現実, プロジェクションマッピング, 立体投影, CG キャラクタ, インタラクション

HoloJection: Real-time Head-mounted 3D Projection Device

SHOGO YOSHIDA^{1,a)} HAORAN XIE¹
KAZUNORI MIYATA¹

Abstract: Recently, although Augmented Reality(AR) and Mixed-Reality(MR) technologies have been well developed, properly placing a virtual model in the real world is still a challenging task. In this paper, we introduce a real-time projection technology based on projecting the distorted image. Instead of normally using a display as other AR systems, we project the designated scene with the sense of three-dimensionality in real-time. Our method consists of three stages, the room scaling process which is being used in traditional VR system, the blur correction process for the projected images and the calibration process of virtual and real space using dynamic mesh generation. Moreover, we make our projectors and the trackers wearable that they can be projected and moved from various directions and angles. The proposed system makes it possible to give the user the sense of reality of a virtual model without using any display such as the smartphone or the AR glasses. By improving the sense of reality of virtual objects, it can be used in the fields of healing and nursing care and providing new entertainment.

Keywords: Augmented Reality, Projection Mapping, 3D Projection, CG Character, Interaction

1. はじめに

拡張現実 (Augmented Reality: 以下, AR) や仮想現実 (Virtual Reality: 以下, VR) の提示は, CG とのインタラクションだけでなく味覚の変化[1]や触覚との連携[2]など, 様々なデバイスを用いて, 多岐の分野で発展を遂げている。また, Apple 社が提供する ARKIT 3 のように, 平面検知のみならず人体トラッキングやオクルージョンなど高度な AR 情報の提示が, スマートフォンで手軽に実現できるようになった[3]。このように, AR や VR は私たちにとって身近な技術であり, 今後我々の生活に多大な恩恵をもたらすと考えられる。

近年, コンピュータグラフィックスおよびヒューマンコン

ピュータインタラクションの分野において, ホログラムを用いた製品の開発や研究が行われている。例えば, CG キャラクタと生活することをコンセプトとした「GateBox」という製品がある[4]。婚姻届けも存在し, 実空間に CG キャラクタを溶け込ませようと試みる先駆者ともいえる。しかし CG キャラクタは製品内でしか表示されないため, そばににいるという感覚を満足に味わうことはできない。また, HMD (Head Mounted Display), AR グラスの開発や, Holyski による仮想オブジェクトを実空間に高度に重畳する研究[5]が行われている。加えて, AR や VR だけでなく複合現実 (Mixed Reality: 以下, MR) の研究も行われている。Lang による, 仮想エージェントを現実空間の適切な場所に配置する研究[6]は, 仮想エージェントの不自然な配置を, HoloLens で取得した RGB-D データを元に, 適切に補正し, 表示している。しかし, いずれも映像とユーザの間には物理的なディスプレイが存在する。そのため, ユーザの視力

¹ 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology
a) s1810204@jaist.ac.jp

の個人差にかかわらず仮想オブジェクトがはっきりと視認できてしまうことや、ディスプレイのサイズによる視野の制限などから、仮想オブジェクトの存在感が薄れてしまうという課題が残されている。

これらの課題に対し、本論文では頭部にプロジェクタとトラッカーを装着してリアルタイム立体投影を行う HoloJection システムを提案する(図 1)。投影面となる机に仮想オブジェクトや CG キャラクタの歪像を投影し、様々なインタラクションを行う。本システムを用いることで、ユーザの視点に応じて投影された映像の歪み方が変化し、ユーザから見て常に立体的な映像を提示できる。また、物理的な画面を介さず実空間と調和した仮想オブジェクトを実空間に投影することで、ディスプレイを用いるよりもユーザはより自然な仮想オブジェクトとのインタラクションを行うことができる。加えて、従来の手法では問題となる仮想オブジェクトに対する視認性の個人差や、視野の制限を受けないことから、実空間への CG オブジェクトのより自然な重畳をユーザに提示できる。なお、使用するトラッカーは空間計測用と頭部追跡用の 2 つの HTC Vive コントローラを用いる。

本提案の貢献は以下のとおりである：

- ・簡易なリアルタイム立体投影手法
- ・仮想と実空間のオブジェクト位置合わせ
- ・提案システムを用いたインタラクションの評価

2. 関連研究

プロジェクションマッピング プロジェクションマッピングには、移動する投影対象に合わせて映像が追従する動的プロジェクションマッピングと、固定された投影対象に映像を投影する静的プロジェクションマッピングがある。特に前者において、様々な研究が行われている。Miyashitaらは、マーカレスおよびモデルレスで追跡した物体にテクスチャを張り付ける動的プロジェクションマッピングシステムを提案した[7]。また、BalloonFAB[8]では、プロジェクタを用いた大規模デジタルファブリケーションシステムを提案している。プロジェクタの投影距離に応じて投影内容のサイズが変化してしまう問題を、モデルの分割および階層ごとのキャリブレーションにより解決した。他にも、地形解析のために粘土を用いたタンジブルインターフェースとデジタル表現を組み合わせる Illuminating clay[9]や、人の顔にテクスチャを投影し、表情の付加やメイクアップを動的に行う Makeup Lamps[10]などの研究が行われている。しかし、これらはプロジェクタを固定しているため投影範囲に制限があり、より広範囲の投影を行う場合は複数台のプロジェクタが必要となる。

プロジェクタを頭部に装着し、物理環境に合った 3 次元

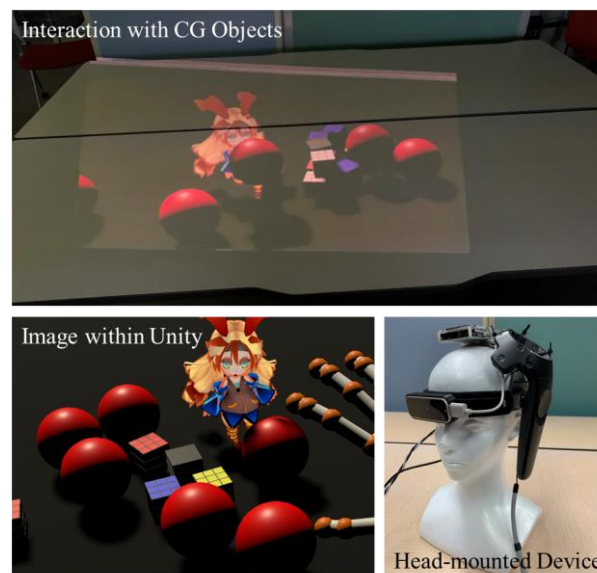


図 1 HoloJection:頭部装着型リアルタイム
立体投影デバイス

仮想空間をレンダリングし、仮想オブジェクトを投影する研究がある[11]。しかし、仮想オブジェクトとのインタラクションはなく、また投影映像の評価も行われていない。

立体投影システム 深度センサや特殊なディスプレイを活用して、ユーザに立体映像を提示する研究が行われている。高崎らは、運動視差に着目し頭の位置に応じて投影内容の表示を変化させるシステムを提案した[12]。LeapMotion を用いたインタラクションも可能で、特殊なディスプレイに表示された仮想オブジェクトの操作ができる。しかし、投影内容の表示は自身の目の前にあるディスプレイでのみであり、投影範囲や自身の移動範囲に制限がある。また、机上や壁面への表示といった実空間への干渉は考慮していない。

OptiSpace[13]は、深度カメラで部屋の形状やユーザの視点を取得し、机や椅子、壁の傾きに応じて、ユーザの視点に立体映像を投影する。また机や壁などの視認性、照度を考慮した投影、さらにユーザの視点の位置をクラスタ化することで、投影されるコンテンツの視認性を向上している。しかし投影方向は一方のみであり、部屋全体への投影には対応していない。また、投影内容やシステムに対するユーザビリティの評価を行っていない。

3. 提案手法

本研究では、ユーザの頭部にトラッカーとプロジェクタを取り付けることで常にユーザに立体映像を提示するシステムを提案する。システムのフレームワークは、1) 仮想空間と実空間の位置合わせ、投影面として使用する実空間の机と仮想空間内の机の位置およびサイズの一致、2) 実空間

で行う仮想オブジェクトと CG キャラクタとのインタラクションである。前者では、インタラクションを行う実空間のスペースと、システムが動作する仮想空間内のスペースの位置合わせを行う。さらに位置合わせが行われた空間内で、仮想空間内における実空間の机の位置と同じ場所に、仮想机となるメッシュを生成する。後者では、ユーザ自身の手を用いて、仮想オブジェクトと CG キャラクタとのインタラクションを行う。例えば、仮想オブジェクトを手で押す、つまむといった動作や、頭部の動きによる CG キャラクタの操作、CG キャラクタとのキャッチボールなどである。提案手法を用いて、ユーザの動きに応じて常に立体映像を投影することで、ユーザへ仮想オブジェクトと CG キャラクタの実在感の提示を目指す。

技術設計 仮想空間と実空間の位置合わせ、および仮想の机となるメッシュ生成は空間計測用のトラッカーを用いて行った。また、仮想空間内に設置できる仮想カメラと頭部追跡用トラッカーの座標を合わせることで、仮想空間内の様子を頭部のプロジェクタの投影によって視認することができる。その際、ユーザの微細な動きを検知することで仮想カメラにブレが生じ、投影映像の乱れを招いていたが、Lerp 減衰を用いることでブレのない滑らかなカメラ移動を実現した。そのため、投影される映像の視認性が向上している。投影された仮想オブジェクトとのインタラクションには、ハンドトラッキング可能な深度センサを使用する。

4. システムの実装

本研究では、リアルタイム立体投影を用いたインタラクションとして、仮想オブジェクトの操作や CG キャラクタとのキャッチボールを行う。インタラクションには LeapMotion を使用し、映像はユーザの正面および左右に配置された机に投影する。作業環境の構築には、デスクトップ PC (Intel i7 - 8700 CPU 3.20GHz, RAM32GB, GeForce GTX 1070 8GB)、レーザープロジェクタ (KSY ピコプロジェクタ HD301D1) およびトラッカーとして HTC Vive コントローラ、プロジェクタへの給電用としてモバイルバッテリーを使用する。LeapMotion やトラッカーから取得したデータは、Unity を使用して処理を行い、コンテンツ制作を行った。システム構成を図 2 に示す。

4.1 ルームスケーリングおよび投影面位置合わせ

HTC 社の HTC Vive および SteamVR を用いて仮想空間と実空間の位置合わせを行うルームスケーリングを実行する。使用可能な部屋のスペースはおおよそ 3m×4m であり、その範囲内で 2m×3m の仮想フィールドを形成した。

投影面となる机と仮想空間内の仮想デスクのサイズおよび位置合わせには、空間計測用のトラッカーを用いる。ま

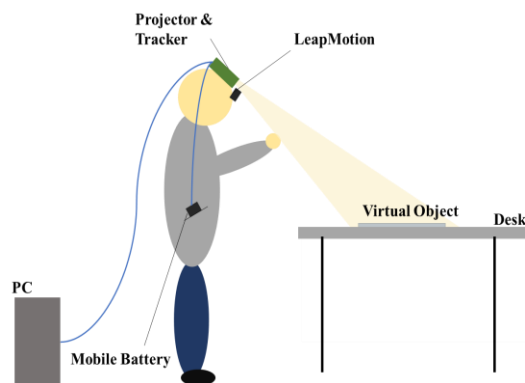


図2 システム構成



図3 トラッカーを用いて机の角の座標を取得。
残りの角の座標も同様に取得。

ずルームスケーリングされた実空間内に投影面となる机を配置する。次に、机の四つ角に順次トラッカーをかざし、都度その位置の座標を取得する(図3)。取得した座標を元に、仮想空間内でメッシュ生成を行う。また、メッシュ生成と同時に、衝突検知機能を付与することにより、生成したメッシュ上を CG キャラクタが自由に歩きまわられるようになる。この一連の準備により、仮想オブジェクトや CG キャラクタが配置可能な仮想机のサイズおよび位置を、実空間の机に合わせることが可能となる。

4.2 仮想カメラの設定

ユーザの視点から見て、歪みのない立体映像を投影するためには、仮想カメラの焦点距離や視野角を設定する必要がある。そのため、仮想カメラのセンササイズを 35mm、また人間の目に最も近いとされる焦点距離 50mm (35mm 換算) [14]を設定し、視野角を 26.99 度とした。

ユーザの微細な動作を感知してしまうことによる仮想カメラのブレは、Lerp 減衰を用いて低減する。Lerp (Linear Interpolation : 線形補間) とは、点 A、B の二点間を滑らかに移動させる関数であり、二点間の数値を近似的に求める

補完を行う。この点 A, B をそれぞれ仮想カメラの初期位置, トラッカーの移動後の位置に置き換え, その距離を補完し仮想カメラを移動させる。そうすることで仮想カメラは常に頭部追跡用トラッカーに追従するが, 非常に小さい値の座標移動までは検知しないため, ユーザの微細な動作を感知することによる投影映像のブレはなくなる。

4.3 頭部装着型デバイス

投影に使用するプロジェクタおよび頭部の座標取得のためのトラッカーを取り付ける, 重量約 550g の頭部装着型デバイスを制作した。小型プロジェクタとトラッカーを, ベルクロテープおよび結束バンドを用いてヘッドストラップに取り付ける。また, ヘッドストラップに LeapMotion を取り付けるためのホルダーを, 3D プリンタを用いて制作する。小型プロジェクタへの電源供給には, モバイルバッテリーを用いる。

トラッカーでリアルタイムに取得したユーザの頭部の座標情報を Unity の仮想カメラに反映させることにより (図 4b), 視線と同じ方向の仮想空間内の映像を取得することができる (図 4a)。また, トラッカーは頭部の傾きも検知するため, プロジェクタの傾きに応じて投影内容が傾くことはない。例えば, プロジェクタの傾きが床と並行であるとき (図 5a), 投影内容が傾くことはなく, プロジェクタを約 45 度傾けた際も (図 5b), プロジェクタの傾きが床と並行である場合と同様に投影内容が傾くことはない。

5. システムの評価実験

本システムの評価実験は, システムを活用した仮想オブジェクトおよび CG キャラクタとのインタラクションを行った。実験に参加した被験者は, 7 名である。実験後, 提案システムを用いた投影の立体感や構築したデバイスを用いたインタラクションの快適さ, 仮想オブジェクトの操作や CG キャラクタとのキャッチボールといったインタラクションの楽しさ, ユーザビリティの評価を行うため, アンケート調査を行った。以下は, 調査項目である。

1. 投影内容は立体的に見えたか
2. 投影内容とのインタラクションは快適か
3. 投影内容とのインタラクションは楽しかったか
4. 投影内容がその場に実在するような感覚はあるか
5. CG キャラクタの操作は容易か
6. 本システムに満足できたか

なお項目 1~4 は, 仮想オブジェクトおよびキャラクタそれぞれの評価を行っている。

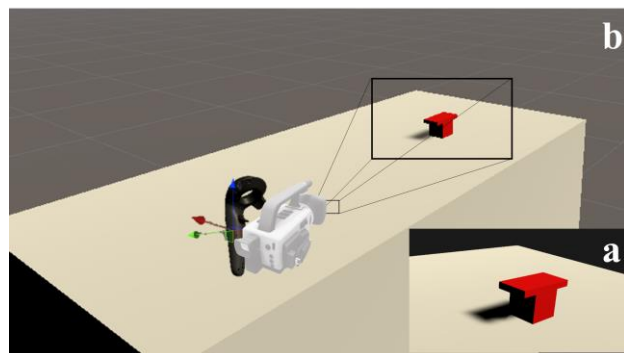


図 4 (a)仮想カメラの映像
(b)トラッカーのモデルと座標が同期された仮想カメラ

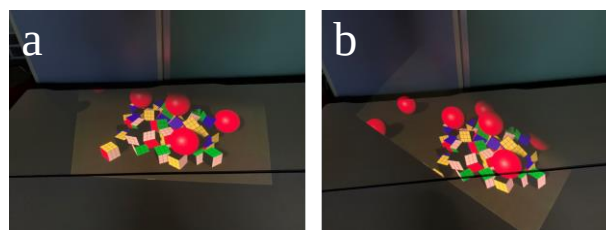


図 5 プロジェクタを床と並行にした場合(a)と約 45 度傾けた場合(b)。投影内容が傾く様子はない。

実験手順 操作するオブジェクトは, 一辺 5cm の立方体および直径 12cm の球体とした。オブジェクトとのインタラクションでは, ユーザが自身の手での押し引きや掴みの動作を行い, その様子を観察する。CG キャラクタとのインタラクションでは, ユーザが投影面に向け投げた仮想のボールを, CG キャラクタに追いかけてボールを投げ返してもらう。先行研究[15]を参考に, 頭部の動きで CG キャラクタを操作する。まず, CG キャラクタの初期位置を投影範囲の中心とし, 仮想空間内の CG キャラクタの位置と実空間の位置を同期させる。これにより, 頭部の動きによりプロジェクタの投影範囲が移動しても CG キャラクタは実空間の同じ位置に表示され続ける。次に, CG キャラクタが投影範囲の中心から一定以上離れた場合, CG キャラクタは投影範囲の中心に戻ろうと移動する。これを CG キャラクタの操作とする。また投影する CG キャラクタは, プロジェクタの投影範囲と視認性を考慮し, 身長約 30cm の 2 頭身キャラクタとする。仮想オブジェクトおよび CG キャラクタとのインタラクションの様子を図 6 に示す。

6. 結果

評価実験から, 提案システムやインタラクションの有用性を確かめることができた。また, 被験者の行動や投影内容に対する反応も確認することができた。

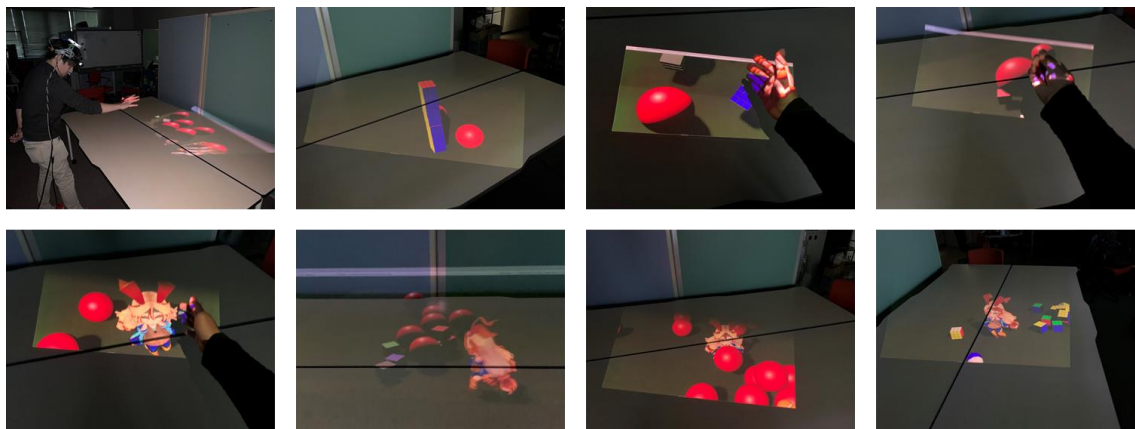


図6 仮想オブジェクトとのインタラクション(上部)とCGキャラクターとのインタラクション(下部).
仮想オブジェクトを押す、つまむなどの動作や、CGキャラクターとのキャッチボールを行う。

6.1 実験結果と考察

評価結果を、図7に示す。図中の項目1～6は、5章に記述した各評価項目に対応している。評価の結果、投影内容の立体感やインタラクションの楽しさ、ユーザビリティは高評価であることが確かめられた。項目1については、すべての被験者が投影内容に対して立体感があると回答した。また、インタラクションの快適さや楽しさ、投影内容の実在感、CGキャラクターが高評価であることが確かめられた。CGキャラクターの操作性や本システムの満足度も高評価であることから、本システムの立体投影システムのユーザビリティが高いことも確かめられた。一方で、仮想オブジェクトとのインタラクションに対する快適性、楽しさ、実在感において、低評価とする回答があった。実際に被験者が仮想オブジェクトをつかもうとした際、距離感がつかめず仮想オブジェクトをつかめない様子を見せたが、その状況が快適性、楽しさの低評価に関係していると考えられる。また、立体感が高評価であるにも関わらず実在感の項目に低評価の回答があることから、立体感が実在感に寄与するとは限らないことが示唆された。これは、人間の目が双眼であるため、平面に投影された映像から仮想オブジェクトの距離感やサイズ感を認識しづらいことが一因であると考えられる。また、投影された仮想オブジェクトの視認性が実物体と同程度でないため、仮想オブジェクトのシェーディングやテクスチャのシミュレートを実施することで、実在感の向上につながると考えられる。

仮想オブジェクトをつかむという動作について、実験の様子から、被験者は静的な仮想オブジェクトよりもCGキャラクターが投げる動的な仮想オブジェクトを失敗することなくつかめていた。動的であることで被験者は仮想オブジェクトとの距離感が把握できた可能性があることが考えられ、またそのことがCGキャラクターとのインタラクションの楽しさに起因すると考えられる。

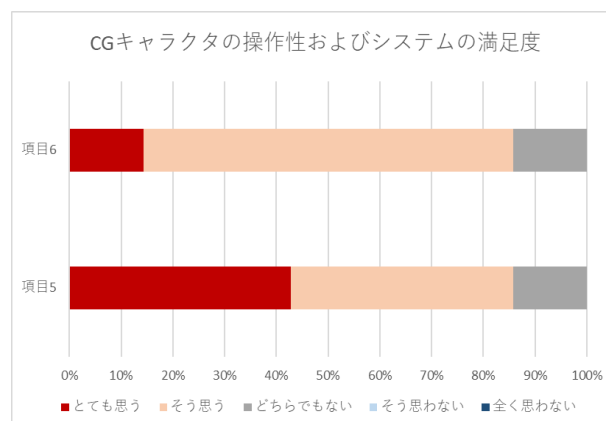
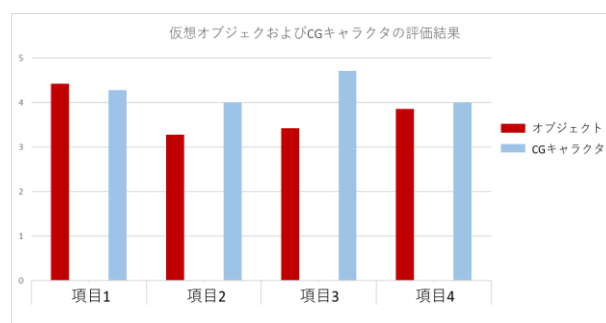


図7 仮想オブジェクト、CGキャラクター
および本システムに対する評価

6.2 システムの活用例

提案手法を用いることで、お化け屋敷での新しい驚かせ方や博物館の案内人、テーマパークでのアトラクション等、新しいエンターテインメントの提供が期待できる。また、本システムをポケモンGOのような位置情報ARゲームに応用することで、実際にキャラクターと冒険をしているような感覚を提供することができ、よりエンターテインメント性を高めることができる。加えて、松本らの人形型玩具を用いた研究[16]や乳原らの寂しさ解消ロボットの研究[17]から、寂しさやストレスの解消、癒しといったセラピーの分野にも応用が可能である。

7. まとめおよび今後の課題

本論文では、頭部に装着した小型プロジェクタとトラッカーを用いた映像投影システム、Holojection システムを開発した。仮想空間内に配置される仮想カメラと、実空間のトラッカーの位置が反映された仮想オブジェクトを同期させ、仮想カメラに映る映像を実空間のプロジェクタから投影することにより、リアルタイムでの立体投影を実現した。また、ユーザの微細な動きを検知してしまうことを起因とするトラッカーの位置ブレによる投影映像のブレを、Lerp 減衰を用いて解決した。さらに、投影面として使用する長方形の実空間の机と仮想空間内に配置する長方形の仮想機の位置およびサイズの位置合わせを、追加したトラッカーを用いて実現した。評価実験では、本システムに対し多くの被験者が高評価を示した。本システムのユーザビリティやインタラクションの楽しさ、投影内容の立体感を確かめることができた。また、CG キャラクタとのインタラクションにて、被験者が CG キャラクタに対し撫でや「かわいい」との発言を行うなど、愛でる様子が見受けられた。そのため、投影内容やインタラクションがユーザに癒しを与えていることが示唆された。これらのことから、簡易なリアルタイム立体投影システムを用いた、仮想オブジェクトおよび CG キャラクタとのインタラクションの有用性が確かめられた。また、トラッカーを用いた仮想空間と実空間のオブジェクトの位置合わせを実現することにより、ユーザの移動や頭部の動作に応じた歪像画を投影することができた。

今後の課題として、さらに複雑なインタラクションの実現や、さらに多くの被験者による本システムの評価などがあげられる。また、本システムは段差をまたぐ投影は考慮しておらず、投影内容のサイズの不一致を招いてしまう。この問題を解決することで、凹凸の面への投影を行っても、立体感のある歪みない映像が投影可能である。さらに、本システムは HTC Vive を使用しているが、深度センサを用いてリアルタイムに実空間を計測することで室外でのインタラクションが可能になるなど、投影範囲の拡大が期待できる。

参考文献

- [1] “虫物の多い料理店(2017)” .
<http://ivrc.net/archive/the-restaurant-of-many-orders-insect-dishes2017/>, (参照 2019-12-12).
- [2] Mohamed Khamis, Nora Schuster, Ceenu George, Max Pfeiffer, ElectroCutscenes: Realistic Haptic Feedback in Cutscenes of Virtual Reality Games Using Electric Muscle Stimulation, VRST '19 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology Article No. 13, November 2019
- [3] “Apple Developer” .
<https://developer.apple.com/jp/augmented-reality/arkit/>, (参照 2019-12-12).

- [4] “GateBox” . <https://www.gatebox.ai/>, (参照 2019-12-12).
- [5] Aleksander Holynski, Johannes Kopf (2011), Fast Depth Densification for Occlusion-Aware Augmented Reality, ACM Transactions on Graphics, Vol. 37, No. 6, Article 194. Publication date: November 2018.
- [6] Yining Lang, Wei Liang, Lap-Fai Yu, Virtual Agent Positioning Driven by Scene Semantics in Mixed Reality, IEEE VR, Publication date: March 2019.
- [7] L. Miyashita and M. Ishikawa, “Midas projection: markerless and modelless dynamic projection mapping for material representation”, ACM Trans. Graph., vol. 31, no. 6, 2018.
- [8] H. Xie, Y. Peng, N. Chen, D. Xie, C. Chang, K. Miyata, “BalloonFAB: Digital Fabrication of Large-Scale Balloon Art”, ACM CHI Conference on Human Factors in Computing System (CHI 2019), Late Breaking Work, Glasgow, 2019.05.
- [9] C. R. Ben Piper and H. Ishii, “Illuminating clay: a 3-d tangible interface for landscape analysis”, Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2002, pp. 355–362.
- [10] Amit H. Bermanno, Markus Billeter, Daisuke Iwai, Anselm Grundhöfer, Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection, Published in Comput. Graph, Pages 311–323
- [11] Shunichi Kasahara, HeadLight: Egocentric Visual Augmentation by Wearable Wide Projector, SIGGRAPH '18 Emerging Technologies, August 12–16, 2018, Vancouver, BC, Canada
- [12] 高崎 真由美, 水野 慎士, 空中への運動視差立体視 CG 映像の投影と手による直接的なインタラクションの提案, 情報処理学会 インタラクション 2019, pp.669–673
- [13] Andreas Fender, Philipp Herholz, Marc Alexa, Jörg Müller, OptiSpace: Automated Placement of Interactive 3D Projection Mapping Content, CHI 2018, April 2018, Paper No. 269
- [14] “肉眼で見たとおりに撮れるレンズの焦点距離” .
<http://cccpcamera.stars.ne.jp/RussianCamera/TOPICS/Mitaturi/HyoujunnLenz.htm>, (参照 2019-12-12).
- [15] Raphael Anderegg, LOIC Ciccone, Robert W. Sumner, “PuppetPhone: Puppeteering Virtual Characters Using a Smartphone”, Vol. 1, No. 1, Article . Publication date: September 2018. MIG '18 Proceedings of the 11th Annual International Conference on Motion, Interaction, and Games
- [16] 松本 斉子, 平井 葉子, 往住 彰文, 共存的人工物としての人形型玩具, 認知科学, Vol. 10 No. 3 pp.385–400 (2003)
- [17] 乳原 梓, 上田 博唯, 寂しさ解消ロボットの提案, エンターテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2013), pp.36–40