

RGB-D センサを用いた没入型ヘッドマウント ディスプレイにおける違和感の少ない仮想空間との インタラクション手法の提案

中迫 弘子^{1,a)} 三嶋 道弘¹ 川崎 洋¹

概要: 近年, 様々な Head Mounted Display (HMD) が開発され, 仮想空間 (Virtual Reality:VR) の体験がより身近になっている. VR の体験で利用される HMD の特長として, 視野を完全に覆い, 目の前のディスプレイから映像を提示することによって自分がその映像の中に入り込んだような没入感が得られることが挙げられる. その一方で, 視野を完全に覆ってしまうために, ユーザが実際に行っている動作が, 目前に表示されている動作と異なってしまい, それがユーザに違和感を生じさせ, 結果として没入感を損なわせることが起こりうる. そこで本研究では, Head Mounted Display (HMD) における仮想空間内において, ユーザとの親和性の高いインタラクションを実現する手法を提案する. 具体的には, RGB-D センサを HMD に設置して, 実世界の様子を取得し, それを HMD 内の仮想空間内に映し出されている映像に重畳して表示するシステムを開発した. 特に, 没入感を損なわずに, VR 内においてユーザとの親和性の高いインタラクションを実現するために, 手に着目し, 手を直接用いたインタフェースおよび, 手でコントローラを操作する間接的なインタフェースの 2 つを実装した. 実験では, 既存のシステムとの比較を行い, 提案手法の有効性を確認した.

1. はじめに

近年, コンピュータグラフィクス技術, コンピュータビジョン技術の向上や様々なヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display:HMD) が開発されていることにより, 多くの人が HMD を用いて拡張現実 (Augmented Reality:AR) や仮想現実 (Virtual Reality:VR) を気軽に体験することが可能となっている. AR とは周囲を取り巻く現実環境にコンピュータによって作り出された情報を付加・削除・強調・減衰させることで, ユーザから見た現実世界を拡張する技術である. 一方で, VR とはコンピュータによって作り出された世界である人工環境 (サイバースペース) をユーザに現実として知覚させる技術である.

AR システムは一般に, 例えばオプティカルシースルー型 HMD などに代表されるデバイスを用いて, 現実世界が直接見えている状態で利用する技術のため, その中に重畳する仮想物体に現実感を付与すること等が課題となるが, 現実感自体が問題となることは無い. 一方で, VR システムは通常, ユーザには人工的に再構築された仮想空間のみ

が提示されるため, ユーザに現実感を与えること自体が課題となる. さらに, VR システムにおいて, 仮想空間に対する深い現実感の付与に成功すると, ユーザは深い没入感を得ることができ, これが VR システムの特徴とも言える. 没入感とはユーザが仮想空間に入り込んだ感覚の度合いを示すものとも言え, 没入感が高くなればなるほど仮想空間の現実感が高まり, ユーザは自分自身が仮想空間に入り込んでいると感じようになる.

VR で一般に用いられる没入型 HMD ではユーザの視野を完全に覆うようにしてディスプレイを配置し, 広い視野角を実現しているため, ディスプレイに映像を提示することによって没入感が得られやすくなっている. その一方で, 視野を完全に覆ってしまうことから, ユーザが実際に行っている動作と VR 内で表示されている動作が異なってしまふことがあり, そこから違和感が生じるため, 没入感を損なわせる問題がある. 例えば, システムのコントローラを操作しようとして目の前に手を突き出しても, VR 内では何も表示されないため, ユーザは強い違和感を感じるようになる. また, 周辺環境が見えないために, VR 内には存在しない, 机やモニタ等の障害物にユーザ自身の体が当たってしまい, 操作に支障が出てしまふばかりか危険を伴うこともある. このような問題解決のために, VR 内に

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻
: Department of Information and Biomedical Engineering,
Kagoshima University

^{a)} sc111044@ibe.kagoshima-u.ac.jp

コントローラを表示するためのソリューションが幾つか提案されているものの、特殊なコントローラを用いるものが主流であり [1][2]、さらにユーザ自身の手は表示されないため違和感が生じやすいと考えられる。

そこで本研究では、VR 内への没入感を強めるためにはユーザ自身の身体性、特にユーザの手の動きが重要であると考え、VR とユーザとの間において違和感の少ないインタラクションを実現する手法を提案する。具体的には、RGB-D センサを用いて実世界の様子を取得し、HMD に映し出している映像にユーザ自身の手を表示することで、仮想空間と現実世界との違和感を少なくするシステムを開発した。その際、VR 内のオブジェクトを、ユーザ自身の手で直接操作できる、VR システムとユーザとの親和性の高いインタラクション・システムを実装した。加えて、コントローラやキーボードなどを手と同時に表示し、それらデバイスの操作を通して VR 内のオブジェクトを操作することで、間接的なインタラクションを実現するシステムもあわせて実装した。いずれにおいても、ユーザの身体的な操作を直接視覚を通して確認できるため、VR 内のオブジェクトの操作等を没入感を損なわずに実現できる。

実験では、実際にシステムを構築し、既存のインタラクションシステムと比較することで本手法の有効性を検証した。その結果、手が見えないコントローラを用いる既存手法に対して、本手法は、主観評価においては同等の没入感が得られること、さらに客観評価においては提案手法の方が優れていることが確認できた。

2. 関連研究

現在、HMD は VR を体験する上で欠かせない存在となっている。技術の進歩により、没入感の高い HMD は開発されているが、未だ解決されていない問題がある。まず、完全に実世界と同じ感覚を再現することが出来ていないため、VR を体験している時に視覚と脳の感覚のズレから起こる VR 酔いを引き起こしてしまうユーザも多く存在することが挙げられる。LaViola らの研究によると、VR 酔いの症状には、頭痛、不快感、胃部の違和感、吐き気、嘔吐、顔面蒼白、発汗、倦怠感、眠気、方向感覚障害及び無気力無関心があるとされている [3]。VR 酔いの発生要因として、HMD へ提示する映像の描画が遅延してしまうということが挙げられる。2.1 ではこの描画遅延問題について述べる。また、VR 内でのインタラクションと実世界でのインタラクションの違いで違和感が生じ、没入感が低下してしまう問題もある。例えば、HMD に提示されている映像を見ながらコントローラで操作をする場合、ボタンの位置が分からず思うような操作が出来なかったり、ボタンの位置を確認するために中断しヘッドセットを外して確認をしたりすることが挙げられる。2.2 ではその問題に対する様々なソリューション例について述べる。

2.1 描画遅延問題

VR 酔いの発生要因として、HMD へ提示する映像の描画が遅延してしまうということが挙げられる。描画遅延のメカニズムは、HMD から受け取る視点位置や姿勢の情報を元にその視点に合った映像を描画し、HMD に提示するという流れが繰り返されることから、時間経過と共にズレが大きくなるためとされている。早川らの研究では、あらかじめ用意されたレンダリング結果によって便宜上のモデルを提示することで描画する際に発生する時差を少なく見せかけ、なおかつリアルタイムに時間遅れを計測し最適な事後補償を行うシステムが提案されている [4]。

2.2 インタラクションの問題

VR 内でのインタラクションと実世界でのインタラクションの違いで違和感が生じ、没入感が低下してしまう問題に対して様々なソリューション例がある。まず、没入型 HMD の例として Oculus Rift と HTC Vive の場合について述べる。Oculus Rift については Oculus touch、HTC Vive についても専用のコントローラが付属されている。それぞれ両手で操作できるように 2 つコントローラがあり、ヘッドセットと同様のセンサーを内蔵することで位置トラッキングを可能にしている。また、VR 内でのシームレスなインタラクションを実現するために仮想の手やコントローラを表示させ、実世界の動きを VR 内に表現している。トラッキング性能も高く、自由に腕や手を動かして操作出来る一方、実世界の周辺環境が見えないため、操作中に机や壁など実世界の障害物に衝突してしまう可能性が高く、これらを利用する際はあらかじめスペースを用意する必要がある。

他に VR 内でのシームレスなインタラクションを実現するためのデバイスとして、Leap Motion Controller がある [5]。Leap Motion Controller は赤外線センサーを搭載しており、机に置いて使用することで手の位置や指の動きをトラッキングし、PC の操作を直感的に操作できるように作られたデバイスである。特に指の動きのトラッキングの性能が高く、コントローラ無しで VR 内でのシームレスなインタラクションも実現している。このデバイスも上記 2 つのデバイスと同様ユーザの手の動きを VR 内に再現する、という目的で使われており、周辺環境は見えないため、実世界の障害物に手が当たってしまった際に VR 内と実世界とのインタラクションの違いが生じ没入感が低下してしまう可能性がある。

また、Ban らの研究では、実際の動作と HMD に提示する映像のタイミングにズレを発生させ、映像の一部を処理することで、実際には存在していない VR 内のオブジェクトをあたかも触っているかのような錯覚をさせるシステムを提案している [6]。例えば、HMD を装着し、マーカーの前でつまむ動作を行うと親指と人差し指が触れた瞬間に

ディスプレイに提示されている球をつまんでいるユーザの指が映る。VR 内のオブジェクトである球とカメラを通して見るユーザの手の映像是シームレスにつながっているため、まるで空中に浮かんでいる球を実際につまんでいるような錯覚を味わうことができる。

以上のように、VR と実世界との違和感の少ないインタラクションを実現するためにはユーザ自身の手を VR 内でどう扱うか、ということが重要であることが分かる。そこで、本研究では、RGB-D センサを用いることで、周辺の実世界の様子を適宜映し出し、且つコントローラを使用せずユーザ自身の手による VR 内でのインタラクションの実現を目指す。

3. 提案手法

3.1 システムの概要

本研究では、VR とユーザとの間において違和感の少ないインタラクションの実現を目的としている。具体的には、RGB-D センサを用いて HMD のユーザの周辺の実世界の様子を取得し、その取得データを HMD に提示している VR 内に表示することで、VR とユーザ間のインタラクションを実現する。提案するシステムの概略図を図 1 に示す。HMD の上に RGB-D センサを取り付けることでユーザの視線方向の 3 次元データを取得し、そのデータを HMD に提示している VR 空間内に表示する。この時、HMD 内のディスプレイに表示される手が、裸眼で見た時と一致するように位置合わせを行う。本システムで使用した HMD は Oculus Rift, RGB-D センサは Intel Realsense SR300[7] である。Realsense SR300 を使用した理由としては Kinect よりもサイズが小さく軽量であり (図 3) HMD の上に設置しても負担が少ないことだけではなく、近距離の Depth データ取得にも対応していることから、没入感を損なわずユーザの周辺環境のデータを取得することに適しているためである (表 1)。

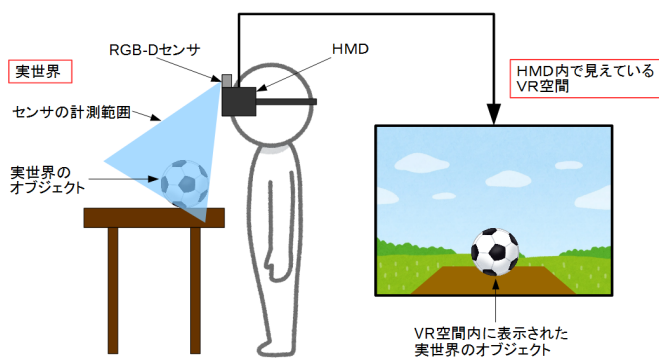


図 1 システムの概略図

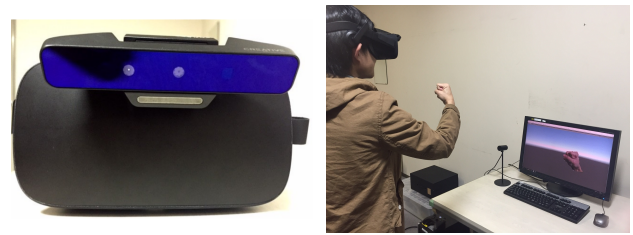


図 2 実際に作成したシステム



図 3 Realsense と kinect の比較：大きさ

表 1 Realsense と kinect の比較：検出可能距離

	Kinect v1	kinect v2	Realsense SR300
検出可能距離 [m]	0.8~4.0	0.5~8.0	0.2~1.5
角度 (水平)[度]	57	70	73
角度 (垂直)[度]	43	60	59

3.2 RGB-D センサでのデータ取得

Realsense には赤外線カメラ、Full HD カラーカメラ、赤外線プロジェクタと、2つのカメラと1つのプロジェクターが搭載されている。Realsense によるデータ取得の仕組みとしては、赤外線で作られた構造化パターンを赤外線プロジェクタから高速に照射し、そのパターンを赤外線カメラで撮影しデコードすることによって、対象物の 3 次元形状や距離を検出できるようになっている。そうして得られた 3 次元点群からメッシュを作成し、カラーカメラで取得したカラー画像から得られたテクスチャをメッシュにテクスチャマップし、これを HMD 内に表示する。取得したデータを HMD 内に表示した例を図 4 に示す。



図 4 取得データ例

3.3 キャリブレーションおよび重畳処理

得られた実世界を HMD 内に表示する際、実際に見た様子と同じように表示される必要があり、そのためのキャリブレーションを行う。本システムでは、今回、取得した 3 次元データと仮想空間とのキャリブレーションは手動による位置合わせで実現している。位置合わせの概略図を図 5 に示す。具体的には、ユーザに手を伸ばしてもらい、センサーと手の距離を測り、VR 内に表示される位置が一致するように、HMD 内における手の描画位置を調節した。また、ユーザごとに腕の長さが異なるため、適宜取得するデータの Depth 閾値の調節も行った。

こうして位置合わせされた RGB-D センサから得られた 3 次元データは、Unity エンジンを用いて VR 空間と重畳される。Unity では、VR 内設定されるグローバル座標系は固定であるのに対して、表示される手の 3 次元データは HMD 座標系で表されるため、その 2 つの座標を対応させて描画を行う必要がある。この時に、デプスに基づく隠面消去などを行い、さらにユーザの違和感を軽減する。

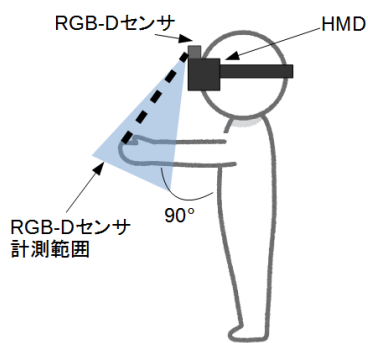


図 5 キャリブ図

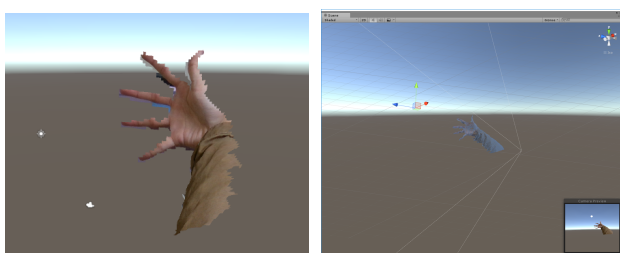


図 6 手の表示

4. 実験

4.1 概要

本研究で作成したシステムの目的は、VR とユーザとの間において違和感の少ないインタラクションの実現することである。この目的を実現するために、本研究ではユーザの身体性、すなわち、実世界での体の動きと VR 内での体の動きが同じように作用することが重要であると考えた。そこで、これを検証するため、実際にシステムを構築し、

客観評価 2 種類、主観評価 1 種類の実証実験を行った。

まず客観評価については、実世界での体の動きが直接 VR 内で作用する直接的インタラクション、実世界でのコントローラの操作によって VR 内のオブジェクトに何らかの作用を加える間接的インタラクションの 2 種類について、一定のタスクを課し、そのスコアによる検証を行った。主観評価については、同様の操作を通して、被験者が感じた没入感を、5 段階に分けて評価させた。

被験者は 20 代の男性 18 名、女性 1 名である。評価をするにあたり、本システムと比較する既存システムとして HTC Vive を用いた。VR の構築および提示には統合開発環境である Unity[8] を使用した。Unity で作成した実験用の VR アプリケーションを PC 上で実行し HMD に提示、被験者は立った状態で HMD を装着し提示された映像に基づいて課されたタスクを行い、その結果を評価した。

4.2 客観評価—直接的インタラクション

この目的のため、エアホッケーゲームを作成し、直接的インタラクションの効果の検証を行った。直接的インタラクションとは実世界での体の動きが直接 VR 内で作用することであるため、実験内容としては、向かってくるパック (図中の黄色いオブジェクト) を打ち返し、敵側の壁に当てることでユーザに加点、敵にユーザ側の壁にパックを当てられると敵の加点するシステムを用いて、制限時間内でコンピュータを相手にスコアを競わせた。図 7, 8 は実験風景、図 9, 10 は作成したゲームの画面例である。本システムを用いた場合では、ユーザの手と実際に握っているオブジェクトを表示し、コントローラの代わりとしている。Vive の場合では、コントローラの座標に黒の仮想物体を表示している。実験に際しては、本システムと Vive との条件を揃えるために、Vive には本システムと同程度の時間遅延を加えた。さらに、倍の時間遅延を加えた場合も実験した。被験者 19 人に、それぞれ 2 回ずつ合計 114 回の試行を行った。



図 7 本システム



図 8 Vive

結果を図 11 に示す。縦軸はユーザの得点率であり、青のバーは被験者の平均の得点率を示している。本システムと Vive で本システムと同程度の遅延を加えた場合にて有意差が見られた ($p < 0.01$) 図 11 より、本システムと Vive で本システムと同程度の遅延を加えた場合、本システムと

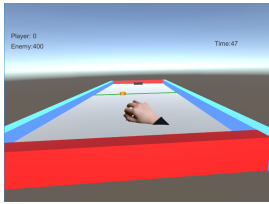


図 9 本システム

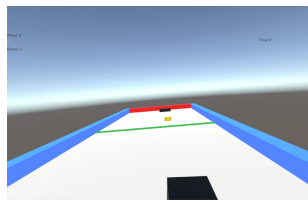


図 10 Vive



図 12 本システム



図 13 Vive

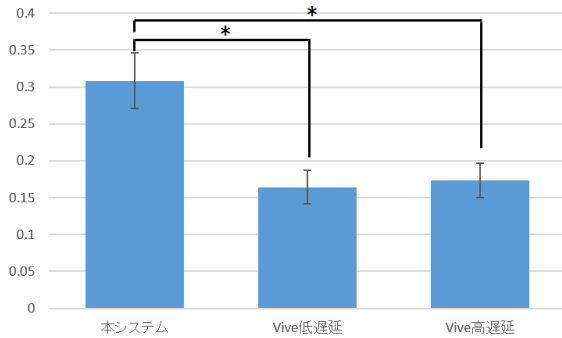


図 11 直接的インタラクション

倍の遅延を加えた場合には本システムの方が得点率が高いことが示された。

4.3 客観評価—間接的インタラクション

次に、コントローラのボタン操作によりオブジェクトを消去するゲームを作成し、間接的インタラクションの効果の検証を行った。間接的インタラクションとは実世界でのコントローラの操作によって、VR内のオブジェクトに何らかの作用を加える操作を指す。このような間接的インタラクションは、実際のシステムにおいて現状最も一般的である。実験内容は、VR内に表示されているオブジェクトに描かれているコマンド通りにボタンを押すことでオブジェクトを消去していき、全てのオブジェクトを消去するまでの時間を計測するものである。図 12, 13 は実験風景を、図 14, 15 に、作成したゲームの画面例を示す。本システムを用いた場合には、被験者に実際にコントローラを握ってもらい、実験を行った。Viveの場合では、仮想のコントローラをVR内の目の前に表示し、被験者はViveコントローラを用いて仮想のコントローラを操作した。被験者19人に本システム、Viveコントローラを用いた場合を1回ずつ、合計38回の試行を行った。本実験においてはViveコントローラに時間遅延は加えていない。

結果を図 16 に示す。縦軸は全てのオブジェクトを消去するまでの経過時間であり、青のバーは被験者の平均の経過時間を示している。本システムとViveでの操作において有意差が見られた ($p < 0.05$)。この結果より、本システムの方が経過時間が短い、つまり、より早く操作を終えたことが示された。

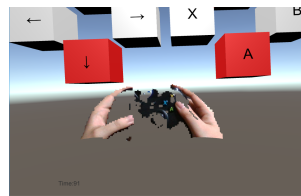


図 14 本システム

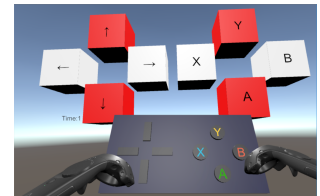


図 15 Vive

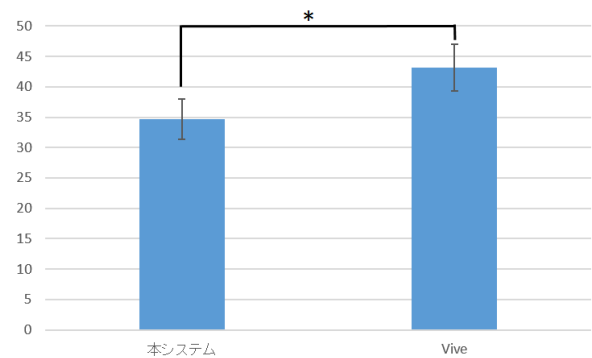


図 16 間接的インタラクション

4.4 主観評価—没入感

主観評価として没入感の評価を行った。具体的には、被験者が直接的インタラクションでの実験時に感じた没入感を5段階で評価させた。手順は直接的インタラクションの実験の前にHMDに図 17のような全周画像を表示し、全周画像を見た後に直接的インタラクションの実験を行い、それぞれの手法の試行が終わるごとにその手法での実験時に感じた没入感の評価をさせた。評価方法としては、全周画像を見ている状態を基準である3、基準より没入感が低く感じた場合には1または2を、基準より没入感が高く感じた場合には4または5とした。

結果を図 18 に示す。図中の赤線は基準を示している。本システムとViveで本システムと同程度の遅延を加えた場合、Viveで本システムと同程度の遅延を加えた場合とViveで倍の遅延を加えた場合にて有意差が見られた ($p < 0.01$)。この結果より、本システムとViveで本システムと同程度の遅延を加えた場合ではユーザが感じる没入感はほぼ変わらず、倍の遅延を加えた場合のみ没入感が下がることが示された。これは、HMDにおける画像表示に遅延が起きると、没入感が減じられることと同様のことが、インタラクションにおいても起きていることが示唆されたと考えられる。



図 17 使用した全周画像

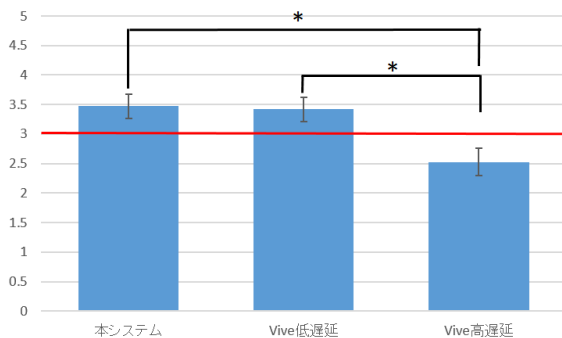


図 18 没入感の評価

5. 考察

客観評価について、実世界での体の動きが直接 VR 内で作用する直接的インタラクション、実世界での操作によって VR 内のオブジェクトに何らかの作用を加える間接的インタラクション、どちらの検証でも得点率や操作時間において既存手法よりも本システムの方が優れていることが確認された。特に、間接的インタラクションについて有意差が出た要因としては既存手法ではコントローラを持ち、それを動かして操作をしていたが本システムでは握っている実物体を確認しながら直接指先で操作をしたため、ユーザの動作範囲が異なっていたことが考えられる。

主観評価について、本システムと Vive で本システムと同程度の遅延を加えた場合ではユーザが感じる没入感はほぼ変わらず、倍の遅延を加えた場合のみ没入感が下がることが示された要因としては、時間遅延の差がある。つまり、没入感を低下させる要因としては時間遅延が大きく関わっていることが考えられる。また、被験者による没入感の評価の際、基準の没入感と比べてどう感じて評価を行ったのかインタビュー調査も行った。調査の結果、周りの実世界ではなく自分が保持しているコントローラだけが映っている状態を没入感が高い、という被験者や自分の手や保持している実物体が VR 内に表示されていることで没入感が高いという被験者など、それぞれの被験者が考える没入感の度合いの定義の違いが示された。本研究での検証実験では没入感を 3 を基準とした 5 段階で評価してもらうことしかし

ていなかったため、評価基準が曖昧になってしまっていることが考えられる。したがって、没入感の評価基準を明確に定めることで、より信頼性のあるデータを取得することができると推測される。

6. まとめと今後の課題

HMD で VR を体験する際、実世界での体の動きと VR 内での体の動きがずれてしまうことで違和感が発生し、VR 内での没入感が低下してしまうという問題がある。それに対し、本研究では RGB-D センサを用いて実世界の様子を取得し、HMD に表示されている VR 内に反映させることで、VR とユーザとの違和感の少ないインタラクションを実現する手法を提案した。具体的には、没入感を損なわないためには実世界での体の動きと VR 内での体の動きが同じように作用することが重要と考え、RGB-D センサを用いて実世界のユーザの手やユーザが手にしている実物体の 3 次元データをリアルタイムに取得し HMD に映し出している VR 内に表示するシステムを開発した。

実験では、検証のため本システムと VR 内で手が見えないコントローラである既存手法の HTC Vive を比較対象とし、客観評価のために実世界での体の動きが直接 VR 内で作用する直接的インタラクション、実世界での操作によって VR 内のオブジェクトに何らかの作用を加える間接的インタラクション、主観評価のために直接的インタラクションの実験を行っている際の没入感の評価を行った。実験の結果、主観評価においては両手法で同等の没入感が得られること、さらに客観評価においては本システムの方が優れていることが確認できた。

今後の課題として、現在手動で行っているキャリブレーションを自動で行えるように改善し、RGB-D センサから取得した 3 次元データの復元精度の向上や、オクルージョンが発生した場合での補間を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] Oculus: Oculus Rift, <https://www.oculus.com/>.
- [2] HTC: HTC Vive, <https://www.vive.com/jp/>.
- [3] LaViola Jr, J. J.: A discussion of cybersickness in virtual environments, *ACM SIGCHI Bulletin*, Vol. 32, No. 1, pp. 47-56 (2000).
- [4] 早川雄一郎, 木島竜吾: Head Mounted Display 向けリアルタイム時間遅れ計測に基づく事後補償, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 1, pp. 47-54 (2014).
- [5] LeapMotion: Leap Motion Controller, <https://www.leapmotion.com/?lang=jp>.
- [6] Ban, Y., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Air haptics: displaying feeling of contact with AR object using visuo-haptic interaction, *ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*, ACM, p. 5 (2015).
- [7] Intel: Realsense SR300, <http://click.intel.com/intelrealsense-developer-kit-featuring-sr300.html>.
- [8] UnityTechnologies: Unity, <http://japan.unity3d.com/>.