



運之掌上：リアルとバーチャル間で対戦可能な マルチモーダル MR インタラクション

The One Danced in the Palm: MR Interaction between Real and Virtual World.

野村 柁貴¹⁾, 森崎慶人¹⁾, 脇田 航¹⁾

Masaki NOMURA, Keito MORISAKI, and Wataru WAKITA

1) 広島市立大学 (〒731-3194 広島県広島市安佐南区大塚三丁目 4 番 1 号, nomura@ics.info.hiroshima-cu.ac.jp)

概要：近年，HMD を装着せずとも VR 体験者とともに VR 体験を行えたり，リアルからバーチャルへと干渉できたりといった，リアルとバーチャル間でインタラクションできるようなシステムの研究がいくつかなされてきている．リアルとバーチャル間でインタラクションできることによって，VR 体験などで生じる待機列で待っている人や HMD の使用に抵抗がある人でも一緒に VR 体験を楽しむことができるかと期待される．しかしながら，リアルとバーチャル間でユーザ同士インタラクション可能な従来研究は視覚と聴覚を用いたものが大半であり，力覚などのほかの感覚を用いた事例についてはあまり報告されていない．そこで我々は，リアル側のユーザの入力に応じてバーチャル側のユーザに前庭感覚・体性感覚を呈示可能な対戦型 MR コンテンツを提案する．

キーワード：複合現実感，モーションプラットフォーム，マルチモーダルインタラクション

1. はじめに

近年，人工現実感 (VR) 技術はますます発展しており，VR を活用した体験施設なども増えてきている．このような VR 体験の場では，待機列ができることによって体験者以外には待ち時間が発生し，時間を持て余している人や，3D の映像に対して酔いやすぐ HMD の装着に抵抗がある人など，VR 体験に参加したくてもできない人が存在する．近年では，HMD を装着して VR 体験をする人 (バーチャル側) に加えて，HMD 非装着者である観覧者 (リアル側) の人もコンテンツの一部として参加できるような，リアルとバーチャル間でインタラクション可能なシステムの研究がなされてきている．青木らはリアル側のユーザとバーチャル側のバーチャルクリーチャ AI との間で，リアル側とバーチャル側に共通して存在する物体をインタフェースとして，リアルとバーチャル間でインタラクションできるシステムを提案している[1]．このシステムでは，バーチャルクリーチャがバーチャル側の物体を押すと，同期しているリアル側の物体も同時に動くことによって，リアル側のユーザに力覚を呈示することができ，リアル側からも同様にバーチャル側へ干渉することができる．しかしながら，このシステムは VR 体験者と観覧者のインタラクションではない．

一方で，Furukawa らは HMD 装着者の頭部の動きに連

動するように頭部型ロボットを制御することによって，VR 体験者と観覧者がインタラクション可能なシステムを提案している[2]．このシステムでは，ロボットの目に当たる部分を手で覆うと，VR 体験者の視界がふさがれたり，水中ゴーグルをつけてあげると，水中での視界がクリアになるような演出がなされたりする．また，Toda らはリアル側のウェブカメラ付きモニタとバーチャル側のモニタオブジェクトを介してリアルとバーチャル間でインタラクションできるシステムを提案している[3]．このシステムでは，リアルとバーチャルに存在しているモニタをインタフェースとしてお互いの様子を見聞きすることができる．さらに，リアル側のモニタにはレーザーレンジファインダが装着されており，リアル側のモニタに向けて物を投げると，モニタを通じて投げ込まれる物に対応したオブジェクトをバーチャル側に投げ込むことができる．また，Gugenheimer らはプロジェクションマッピングによって観覧者がバーチャル側の様子を見ることができ，さらに，HMD を装着していない体験者は VIVE コントローラに装着されたバーチャル側の様子が見れる小型モニタによって，バーチャル側のユーザと同じ空間でインタラクションできるシステムを提案している[4]．このシステムでは，VIVE コントローラが剣となるように棒状のものを装着して互いに剣を交えることができ，リアルとバーチャル間で

インタラクティブすることができる。

しかしながら、これらのシステムのように従来研究では視覚と聴覚を用いたリアルとバーチャル間でインタラクティブするものが大半であり、力覚などのほかの感覚を用いた事例についてはあまり報告されていない。

そこで我々は、視覚、聴覚だけでなく前庭感覚や体性感覚なども考慮して、VR 体験者と観覧者がインタラクティブ可能なマルチモーダル MR システムを提案する。具体的には、観覧者の掌の傾きに応じて、モーションプラットフォーム[4]を制御することによって前庭感覚・体性感覚を VR 体験者に提示する。さらに、VR 体験者にはモーションプラットフォームの傾きよりも誇張された傾きをバーチャル掌によって視覚的に提示する。VR 体験者はバーチャル掌（モーションプラットフォーム）の傾きとは逆方向の姿勢を取ることで滑り落ちないように耐えることができ、観覧者（リアル側）と VR 体験者（バーチャル側）の間で対戦可能な新感覚ゲームコンテンツを作成する。

2. システム概要

本システムの概要を図 1 に示す。リアル側のユーザは VR 体験をしているバーチャル側のユーザの悲鳴や姿勢などの VR 体験中の反応を見ながらプレイすることができる。リアル側のユーザは VIVE Tracker を使用して、自分の掌の傾きを Unreal Engine 4 に入力すると、ゲーム内のバーチャル掌とモーションプラットフォームを同時に傾かせることができる。

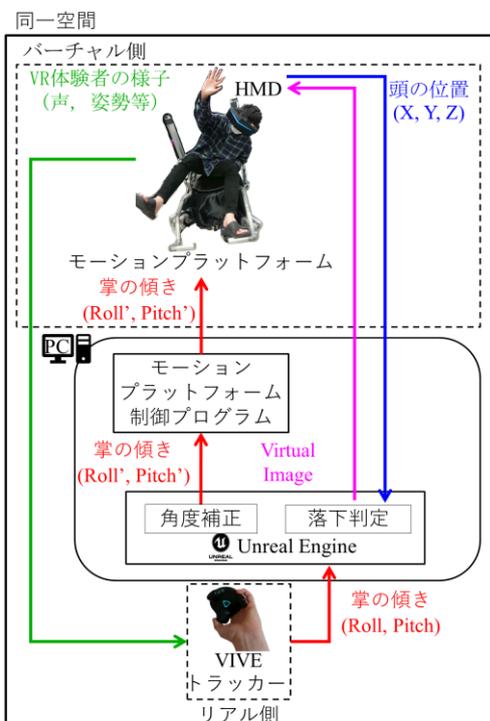


図 1：システム概要

バーチャル掌の傾きはモーションプラットフォームの傾きよりも誇張した傾きになるようにゲーム内で補正される。そのため、バーチャル側のユーザはモーションプラ

ットフォームによる前庭感覚の呈示に加えて、バーチャル掌の上にいる様子と誇張された傾きを HMD から視覚的に呈示され、より傾きを感じてもらう。また、バーチャル側のユーザはバーチャル掌の上から滑り落ちないようにするために、バーチャル掌（モーションプラットフォーム）の傾きとは逆方向に自身の上半身を傾かせることで滑り落ちないようにすることができる。このように、落とそうとする側（リアル側）と落とされないように耐える側（バーチャル側）として対戦することができる。

2.1 アルゴリズム

作成するゲームコンテンツではリアル側のユーザの入力に応じてバーチャル掌とモーションプラットフォームを回転させる処理が必要となる。また、バーチャル側のユーザの上半身の傾きを入力として滑り落ちるのを防ぐ処理が必要となる。

2.1.1 バーチャル掌とモーションプラットフォーム

作成するゲームコンテンツには、リアル側のユーザの掌、バーチャル掌、モーションプラットフォームの3種類の傾きが存在する。リアル側のユーザの掌の傾きは VIVE Tracker を使用しているため、 $\pm 90^\circ$ の範囲の値を取得できる。バーチャル掌はバーチャル側のユーザにモーションプラットフォームの傾きよりも誇張した傾きを視覚的に提示して、より傾きを感じてもらうことと、バーチャル側のユーザがすぐに滑り落ちてしまわないことの2点を考慮して $\pm 45^\circ$ の範囲で傾くようにする。使用するモーションプラットフォームは $\pm 25^\circ$ の可動範囲で傾けることができるが、本ゲームコンテンツでは安全のために $\pm 15^\circ$ の範囲で傾かせる。これらの傾きの可動範囲はすべて異なっており、それぞれの可動範囲で回転させるためには、入力と出力で異なる可動範囲の比率に従った値を入力値にかけて出力する必要がある。バーチャル掌を回転させる場合、リアル側のユーザの掌の角度 (R_r, P_r) の入力に対して、出力すべきバーチャル掌の傾きの角度 (R_v, P_v) は、入力元が $\pm 90^\circ$ 、出力先が $\pm 45^\circ$ の可動範囲であるため、以下の式のようになる。

$$\begin{pmatrix} R_v \\ P_v \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} R_r \\ P_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

モーションプラットフォームを回転させる場合、バーチャル掌の傾きの角度 (R_v, P_v) の入力に対して、出力すべきモーションプラットフォームの傾きの角度 (R_m, P_m) は、入力元が $\pm 45^\circ$ 、出力先が $\pm 15^\circ$ の可動範囲であるから、以下の式のようになる。

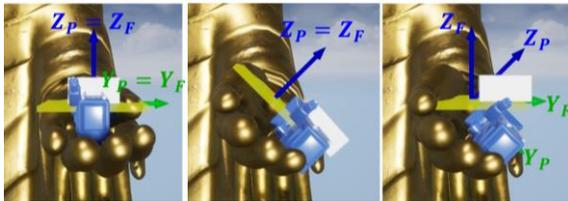
$$\begin{pmatrix} R_m \\ P_m \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} R_v \\ P_v \end{pmatrix} \quad (2)$$

式(1)により、リアル側のユーザの掌の傾きをバーチャル掌の傾きとして常に適応すると、リアル側のユーザの掌が急激に傾く場合がある。バーチャル掌が急激に傾い

てしまうことによって、バーチャル側のユーザがVR酔いを引き起こしたり、上半身の傾く速度を掌の傾く速度に合わせることが困難であるため、バーチャル掌の角速度に上限を設定する。

2.1.2 滑り落ちないように耐える処理

バーチャル側のユーザがバーチャル掌 $P(X_P, Y_P, Z_P)$ の上を滑る状況を作る際に、バーチャル掌のオブジェクトとバーチャル側のユーザのアバターオブジェクトを用いると、滑るのではなく転がってしまうことが考えられるため、本研究では図2(a)のようにバーチャル掌上を平面の床オブジェクト $F(X_F, Y_F, Z_F)$ 、バーチャル側のユーザを直方体オブジェクトとして簡略化する。バーチャル掌が傾くと、図2(b)のように直方体オブジェクトはそのまま滑り落ちていってしまう。バーチャル側のユーザが滑り落ちないようにするためには、直方体オブジェクトと床オブジェクトの間に発生する摩擦を増加させることで、滑り落ちている最中に自然と止まるようにすることが考えられる。しかしながら、我々が調べた限りではUnreal Engine 4.24.3において摩擦を決定するゲーム内パラメータを動的に変化させることができず、質量の違いによる摩擦の変化も確認できなかった。そのため、床オブジェクトをバーチャル掌上の平面とするのではなく、バーチャル側のユーザの上半身の傾きをもとに床オブジェクトを回転させ、図2(b)から図2(c)の状態になるようにすることで直方体オブジェクトが滑り落ちないように耐える処理を実装する。



(a) 初期状態 (b) 滑り落ちている状態 (c) 耐えている状態

図2: バーチャル掌の状態

上半身が傾くと同時に人間の頭部も移動するので、モーションプラットフォームの座席位置を基準としてトラッキングされたHMDの座標から上半身の傾きを求める。HMDのトラッキングによって得られた座標を (x_h, y_h, z_h) 、上半身の傾きを (R_u, P_u) として、上半身の傾きを求めるための式を以下に示す。

$$\begin{pmatrix} R_u \\ P_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan^{-1} \frac{y_h}{z_h} \\ \tan^{-1} \frac{x_h}{z_h} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式(3)で求めたバーチャル側のユーザの上半身の傾き (R_u, P_u) の範囲はモーションプラットフォームの傾きの可動範囲と同じ $\pm 15^\circ$ であると考えられる。床オブジェクトの傾きも可動範囲はバーチャル掌と同じく $\pm 45^\circ$ とすると、床オブジェクトの傾き (R_f, P_f) は以下の式で求まる。

$$\begin{pmatrix} R_f \\ P_f \end{pmatrix} = 3 \begin{pmatrix} R_u \\ P_u \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(4)により、バーチャル側のユーザの上半身の傾きをもとに床オブジェクトが傾く。そして、床オブジェクトがバーチャル掌と逆方向に傾き水平に戻ろうとすることで直方体オブジェクトが滑り落ちるのを防ぐことができる。ただし、直方体オブジェクトがバーチャル掌の傾いている方向のみに滑り落ちていくようにするため、図3(c)のようにバーチャル掌の傾きより逆方向に傾かないように平行な状態を保つようにする。加えて、床オブジェクトの傾く角度の範囲は平行状態からバーチャル掌の傾きまでとなるように制限することによって、図2(a)の状態でもバーチャル側のユーザが傾いた場合に滑り落ちてしまうことを防ぐ。また、床オブジェクトが急激に傾くことによって、直方体オブジェクトが上空に打ちあげられてしまう可能性があるため、床オブジェクトの角速度に上限を設定する。

2.1.3 バーチャル掌上のユーザの位置と姿勢の補正

直方体オブジェクトはバーチャル側のユーザがバーチャル掌上で滑り落ちるといった状況を作り出す役割を果たしているが、図2(c)のような直方体オブジェクトの位置では、バーチャル側のユーザがバーチャル掌上の上にいるとはいえない状況となっている。バーチャル側のユーザがバーチャル掌上で滑り落ちているような移動をするためには、図2のカメラオブジェクトのように、バーチャル掌の傾きに沿って平行に移動する必要がある。そこで、直方体オブジェクトと接する床オブジェクトの面の中心を原点としたローカル座標系 F と、この座標系 F をバーチャル掌と同じ傾きになるように回転させたときの座標系 P について考える。座標系 F で移動している直方体オブジェクトの位置を (x_r, y_r, z_r) としたとき、バーチャル側のユーザの位置(カメラオブジェクト)として座標系 P 上の位置 (x_u, y_u, z_u) を以下の式で決定する。

$$\begin{pmatrix} x_u \\ y_u \\ z_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

また、バーチャル掌上におけるユーザの視線の位置は、式(5)で求められた位置を原点として、トラッキングされているHMDの位置情報をもとにUnreal Engineによって決定される。

直方体オブジェクトが床オブジェクトの端に到達して落ちる場合、バーチャル側のユーザの位置は式(5)より $z_u = 0$ となるため落下せずにバーチャル掌の傾きと平行に移動することになってしまい、バーチャル掌の上から落下することができない。そのため、直方体オブジェクトが床オブジェクトの端に到達し落下する場合、式(5)による計算をやめ、物理シミュレーションによってバーチャル側のユーザを自由落下させることでバーチャル掌の上から落下できるようにする。

3. 実装結果

以上のようなシステム構成をもとに作成したゲームコンテンツのリアル側とバーチャル側の様子を図 3 に示す。



(a) 何もしない状態



(b) 滑り落ちないように耐えている状態



(c) 滑り落ちている状態

図 3：実装結果

本ゲームコンテンツは図 3(a)の状態から始まり、リアル側のユーザが掌を傾けていない場合は、モーションプラットフォームとバーチャル掌も傾かず、バーチャル側のユーザは滑り落ちることはない。また、図 3(b), (c) のように、リアル側のユーザが掌を傾けると、モーションプラットフォームとバーチャル掌が傾く。バーチャル掌（モーションプラットフォーム）が傾いている場合、バーチャル側のユーザは図 3(b) のように自身の体をバーチャル掌の傾きとは逆方向に傾けることで滑り落ちるのを防ぐことができるが、バーチャル掌（モーションプラットフォーム）の傾きと同じ方向に傾いたままだった場合、図 3(c) のように滑り落ちていってしまう。

バーチャル掌は筆者の主観的に違和感がない角速度、誇張した傾きとして暫定的に決定したため、人によっては違和感を覚え、酔いにつながってしまうことが考えられる。そのため、多くの人にとって最適となるような角速度と角度のパラメータを調べる必要がある。また、バーチャル掌が傾く角速度に上限を設定することで、直方体オブジェクトが著しく飛び跳ねることを抑制することはできたが、直方体オブジェクトがわずかに浮いてしまい、小刻みに跳ねてしまう問題があるため、バーチャル掌の角速度を適切に決定する必要がある。

4. むすび

本論文では視覚、聴覚のみでなく前庭感覚・体性感覚を用いてリアル側とバーチャル側のユーザ間でインタラクションできるマルチモーダル MR システムを提案し、このシステムの概念実証としてバーチャル側のユーザがリアル側のユーザの掌の上で転がされているような体験ができる対戦型ゲームコンテンツを作成した。今後は、ゲームコンテンツ内の環境音の追加、高所にいるような感覚を呈示するために扇風機を用いた風の実装、バーチャル掌の最適な角度や角速度に応じたモーションプラットフォームの制御、ゲームコンテンツとして楽しいかどうか、没入感はあるかどうかの評価を行っていきたいと考えている。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP19H04158 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Aoki, K. Asano, R. Ayukawa, H. Ichikawa, Y. Iio, T. Kawase, T. Kuriyama, I. Matsumura, T. Matsushita, H. Mitake, T. Toyama, S. Hasegawa, and M. Sato, “Kobito: virtual brownies,” In ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies, pp. #11, 2005.
- [2] T. Furukawa, D. Yamamoto, M. Sugawa, R. Peiris, and K. Minamizawa, “TeleSight: enabling asymmetric collaboration in VR between HMD user and Non-HMD users,” In ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, pp. 1–2, 2019.
- [3] K. Toda and S. Hayashi, “Möbiusschleife: Beyond the Bounds of a Closed-Loop VR System,” In VRCAI '19, pp. 1–2, 2019.
- [4] J. Gugenheimer, E. Stemasov, J. Frommel, and E. Rukzio, “ShareVR: Enabling Co-Located Experiences for Virtual Reality between HMD and Non-HMD Users,” In Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.4021–4033, 2017.
- [5] W. Wakita, T. Takano, and T. Hadama, “A low-cost motion platform with balance board,” In VRST '18, pp. 1–2, 2018.