



VR における開扉時の視触覚を用いた リダイレクション手法の提案

A Proposal for Visuo-haptic Redirection Technique While Opening Doors in Virtual Reality

星川結海, 藤田和之, 高嶋和毅, 北村喜文

Yukai HOSHIKAWA, Kazuyuki FUJITA, Kazuki TAKASHIMA, and Yoshifumi KITAMURA

東北大学 電気通信研究所 (〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2-1-1, yukai.hoshikawa.r4@dc.tohoku.ac.jp)

概要: 本研究では VR での開扉動作に着目し, 開扉時のユーザとドアの間の視触覚的な整合性を保ちながら, VR 空間内の開扉角度を増減させることにより, 開扉後のユーザの進行方向を操作するリダイレクション手法を提案する. この手法により, 開扉動作のリアリティを損ねずに, 限られた範囲内での進行方向操作を実現できると期待される. 本稿では, 本手法を実現するためのアルゴリズム及び物理プロップの設計と実装について述べる.

キーワード: ルームスケール VR, リダイレクション, 開扉動作, 視触覚間相互作用

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の高性能化や低価格化により, バーチャルリアリティ (VR) 体験は, 単なる娯楽を超えて様々な目的に使用されるようになってきている. なかでも, ルームスケール VR は, ユーザが物理空間内を自由に歩いて移動できる没入型の体験である. また, ユーザの歩行を伴う移動方法は, コントローラを用いる方法と比べて空間認識能力や臨場感の点で優れている [1, 2] 一方で, バーチャル環境 (VE) を移動できる範囲は, 物理空間の大きさの制約を受ける. この制約を解消するため, ユーザの移動量や回転量を VR 空間内で操作して提示する手法が多数検討されている. 有望なアプローチの 1 つである Redirected Walking (RDW) [3] は, 歩行中に HMD からの視覚情報を気づかれぬ範囲で徐々にずらすことで, ユーザの移動距離や移動方向を連続的に操作する手法 (本論文では連続的なリダイレクション手法と呼ぶ) である. しかし, 操作に気づかれずに VE を直進し続けるには半径 22m 以上のスペースが必要という報告もあり [4], 一般的な室内空間で用いるには十分でない.

これに対して, 特定の条件やユーザの動作をトリガとして断続的にユーザの進行方向を操作する手法 (本論文では断続的なリダイレクション手法と呼ぶ) も数多く検討されている. 代表的なリセット [5] と呼ばれる手法では, ユーザがプレイエリアの境界に近づいた際にユーザに回転するように促し, その際の回転量を操作することにより進行方向を変える. この手法は, RDW に比べて小さな物理空間内でも適用できる一方で, VR 体験を一時的に中断する必要がある. この点を解消する方法として, VR 空間内の特定のインタラクションに連動させて回転操作を適用する手法もいくつか検討されている. 具体的には, ユーザの注意を引きつ

けるオブジェクト (ディストラクタ) への注視動作 [6] や, VR 体験のシナリオに沿った特定の対象 (アトラクタ) とのインタラクションに連動させる例 [7] などがある. これらの手法は, ユーザに気づかれにくく, 映像酔いを引き起こしにくい点において有望であり, 本研究もこれらに刺激を受けている. ただし, 対象とするオブジェクトは, ユーザに無視されない, かつ, コンテキスト上不自然にならないように適切にデザインする必要がある.

一方で, VR 体験における物理的フィードバックの提示は, 没入感を強化する有力な要素の 1 つであり [8], VR 分野における大きな研究対象となっている. 物理的フィードバックを RDW (連続的なリダイレクション) に組み合わせることを試みる例 [9, 10], もあり, 壁やテーブルなどの物理プロップに触れながら歩行することで, 通常の RDW に比べて曲率や回転操作を知覚されにくくできることが報告されている. しかし, これらの手法を適用するためには広範囲にわたるプロップの設置を必要とし, 利用場面が限定される. また, 先に述べた断続的なリダイレクション手法に物理的フィードバックを適用した例はこれまでにない. VR 体験中の特定のインタラクション中に物理的フィードバックを組み合わせることで, 限られた物理空間内で, より気づかれにくい進行方向操作を実現できる可能性がある.

そこで本研究では, 断続的なリダイレクションを適用させる VE 内でのインタラクションとして, 開扉動作に着目する. 開扉動作は, 空間的な移動に用いられる日常的な動作であり, VE 内でもドアは自然に配置でき, ユーザに無視されないようにデザインすることが可能である. 加えて, 開扉動作では, ユーザがヒンジを中心にドアを回転運動させるため, このドアの回転と視覚の回転量操作を混同させられる可能性があり, リダイレクションとの相性が良いと考

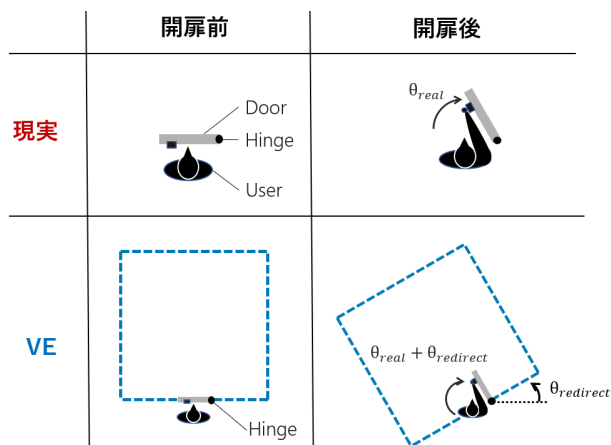


図 1: 開扉前後での VE 操作概念図

えられる。これらを踏まえ、本研究では、開扉動作を利用した視触覚による断続的なリダイレクション手法を提案する。図 1 に提案手法の動作イメージを示す。この手法では、ユーザが VE 内のドアを開ける際の開扉角度に応じて、ユーザとドアを除いた VE 全体を特定の倍率（ゲイン）でヒンジを中心に回転させる。加えて、開扉時には実際のドアノブと同様に動作する物理プロップを用いて、ユーザに物理的フィードバックを提示する。これらにより、ユーザが見ているドアの位置と触れているドアの位置を一致させた（視触覚的な整合性を保った）まま VE 内の開扉回転量が操作されるため、開扉後のユーザの進行方向を操作可能であると考えられる。この手法は、既存の RDW などの連続的なリダイレクション手法との併用も可能であり、VE 内に配置されているドアを利用して VR 体験の流れを阻害せずに適用できる。本稿では、この手法のアルゴリズム、およびプロトタイプの実装について述べる。

2. 提案手法

2.1 概要

本研究では、開扉動作に連動させた視触覚リダイレクション手法を提案する。開扉動作は我々の日常生活の中で頻繁に行われる動作の 1 つであり、ゲーム等の VR 体験においても一般的である。このため、VE 内でドアを用いた場合、ユーザに教示することなく自然にドアノブに触れさせられると考えられ、これは物理的フィードバックを与える上で都合が良い。また、押し引きするタイプのドアは、ヒンジを中心とした回転運動を伴うため、この回転とリダイレクションによる回転操作を混同させられる可能性がある。さらに、ディストラクタを使った手法と異なり、開扉動作はユーザに無視されないように設計しやすく、またドアの位置からユーザの進行方向が予測しやすいことから、リダイレクション操作の方向を決定しやすいという応用上の利点もあると考えられる。

以上を踏まえ、本手法では、VE 内のユーザによる開扉の角度に応じて、ユーザとドアを除いた VE 全体を特定の倍

率（ゲイン）でヒンジを中心に回転させる。加えて、ユーザは開扉時にドアノブ型の物理プロップを握ることで、物理的フィードバックが提示される。物理プロップの位置を VE 内と整合させることで、ユーザから見たドアの視触覚的な整合性が保たれたまま、VE 内の開扉回転量を操作でき、結果的にユーザの進行方向を変えることができると期待される。以下では、この手法のより詳細なアルゴリズムと実装について述べる。

2.2 設計

本手法では、ユーザに気づかれにくく、なおかつ主観的な違和感の少ない視覚操作を行うことを目指す。これを実現するため、以下の 2 つの方針に沿って手法を設計する。

1. ドアの回転と VE の回転を同軸で連動させること
2. ユーザから見たドアの視触覚的な整合性を保つこと

1 つ目の方針を定めた理由は、ドアの回転と VE の回転が混同され、気付かれにくくなる可能性があると考えたためである。2 つ目の方針を定めた理由は、リダイレクション中の視触覚的な整合性が保たれることで視覚と前庭感覚の間のずれが抑えられるように知覚される可能性 [9] があり、その結果、視覚操作が気付かれにくくなり、映像酔いや不快感を抑えられる可能性があると考えたためである。さらに、2 つ目の方針のメリットとして、バーチャル物体の位置に対応した物理的フィードバックが得られることで、より没入感が高まる効果 [8] も期待できる。

ドアの回転と VE の回転を同軸で連動させる際に、ユーザから見たドアの視触覚的な整合性を保つためには、ユーザとドアの間の相対的な位置関係を保つ必要がある。そのため本手法では、ユーザとドアの位置は現実と VE との間で一致させ、それ以外の VE 全体を回転操作するという方法を採用した。また、VE を回転操作する方向やその量に関する尺度として、新たに「ドア回転ゲイン」という尺度を導入する。加えて、開扉動作時の視触覚的な整合性を保ちながら物理的フィードバックを提示するために、実際のドアと同様の軌跡で動作するドアノブ型の物理プロップを作製し、これを用いた開扉インタラクション手法を設計・実装する。以下では、この定義や詳細な実装について述べる。

2.3 視覚操作アルゴリズム

本手法による視覚操作量を表現する尺度として、「ドア回転ゲイン」を新たに定義する。ドア回転ゲイン g_d は、現実世界での開扉角度と VE 内での開扉角度の比を指し、以下の式 1 で表される。

$$g_d = \frac{\theta_{\text{virtual}}}{\theta_{\text{real}}} = \frac{\theta_{\text{real}} + \theta_{\text{redirect}}}{\theta_{\text{real}}} \quad (1)$$

ここで、 θ_{real} は現実空間での開扉角度、 θ_{virtual} は VE 内での開扉角度である。 θ_{redirect} は $\theta_{\text{virtual}} - \theta_{\text{real}}$ で表され、これは視覚操作により VE が回転する角度に等しい。

図 1 に、視覚操作前後の現実空間および VE の変化を上面図で示す。以降では簡単のため、ドアのヒンジ部分はユーザから見てドアの右側にあるものとして統一する。本手法で

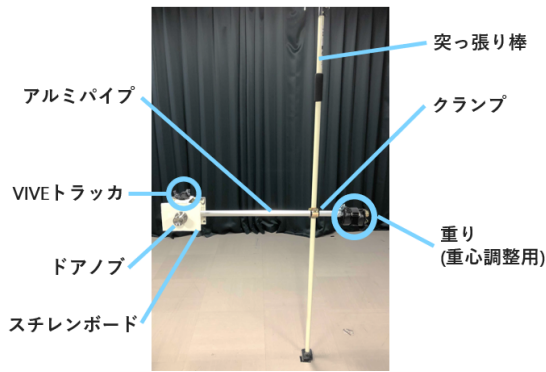


図 2: ドアプロップの概観



手袋 + VIVE トラッカ バーチャルハンド

図 3: バーチャルハンド用手袋と実際に表示されたバーチャルハンド

は, g_d を操作することで, VE 内での開扉角度は現実空間の開扉角度の g_d 倍に増幅/減衰される. この際, ユーザとドアの間の位置関係に矛盾が生じないように進行方向を変えるため, 実際にはドアの回転角度を増幅/減衰させるわけではなく, ユーザとドア以外の VE 全体をヒンジ中心に $-\theta_{redirect}$ だけ回転させる (これにより, ユーザの開扉角度は実質的に g_d 倍に増幅/減衰される). したがって, ユーザが θ_{real} の開扉角度でドアを開け終わった際には, ユーザの進行方向は $-\theta_{redirect}$ だけずれていると想定される. なお, この考え方はドアを押して開ける場合, 引いて開ける場合いずれにも適用可能であると考えられる.

例えば, 現実空間でユーザがドアを押して 60 度開けた場合, $g_d = 1.0$ であれば VE 内での開扉角度は現実と同じ 60 度となるが, $g_d = 1.5$ の場合, VE がドアの回転と反対向きに 30 度回転し, 結果的に VE 内の開扉角度は 90 度となり, その際ユーザの現実での進行方向は 30 度左に曲がると想定される. 逆に, $g_d = 0.5$ の場合, VE はドアの回転と同じ向きに 30 度回転し, 結果的に VE 内の開扉角度は 30 度となりユーザの現実での進行方向は 30 度右に曲がると想定される. 一方ドアを引く場合, 押す場合とドアの回転方向が反対向きとなり, VE の回転方向も反対向きとなるため, ユーザの現実での進行方向は逆向きに曲がると想定される.

2.4 開扉インタラクションの設計

前節で述べた視覚操作アルゴリズムでは VE での開扉量を増幅/減衰させるため, VE でのドアを十分に開くために必要な現実での開扉量もまた増大/減少する. したがって, 開扉動作時の物理的フィードバックを提示することを考えた場合, 一般的な蝶番を用いたドアでは可動範囲が足りない



図 4: 開扉インタラクションの様子

可能性があり, ドアプロップを新たに設計する必要がある. ドアプロップの実装の要件としては, ユーザの手に触れるドアノブ部分が現実のドアと同じ軌跡を描く動きをしながら 360 度無制限に回転できること, およびこの回転角度がトラッキング可能であることを設定した. また, ドアノブ以外のプロップは極力排除し, 低コストで作成することを目指した.

図 2 に, 実際に作製したドアプロップを示す. ドアプロップは, 突っ張り棒を床と天井で固定することによってドア枠などを必要とせずドアの軸を安定させている. また, 突っ張り棒とアルミパイプを直交クランプで連結することで, アルミパイプの先端に固定されたドアノブが突っ張り棒を軸として 360 度無制限に回転することを可能にしている. アルミパイプとドアノブの連結には 3D プリント製のジョイントを作製して用いた. ドア板の部分には, ユーザの手が触れる可能性が高いと考えられる高さ 17 cm × 幅 20 cm の範囲にのみスチレンボードを張ることで重量を抑えている. また, 重心調整用として 2kg の重りをアルミパイプのドアノブと反対側の先端に取り付けている. ドアノブの上部には, VIVE トラッカを設置することでドアの開扉角度を取得できるようにしている. このプロップを利用することで実際にドアノブを握る感覚と開扉時の力覚を感じた状態で VR 内のドアを開けることができると見込まれる.

加えて, ドアノブとの視触覚インタラクションを実現するため, ドアノブを握るユーザの手 (右手とする) をリアルタイムに VE 内に表示させた. 具体的には, ユーザは VIVE トラッカを付けた手袋を着用し, システムが手の位置を取得してバーチャルハンドを VE 内に表示した (図 3). なお, 手の形は取得しておらず, バーチャルハンドの形は常に一定とした. 実際にこのドアプロップを使用して VE 内のドアを動かしている際の開扉前と開扉後の様子を図 4 に示す.

VE内のドアノブの位置に対応した現実のドアノブを握り、押すことでドアを開けることができる。

3. おわりに

本研究では、開扉時のユーザとドアの間の視触覚的な整合性を保ちながら、VR空間内の開扉角度を増減させることにより、開扉後のユーザの進行方向を操作する手法を提案し、本手法の実現アルゴリズム及び物理プロップの設計と実装について述べた。今後は、本手法の有用性を評価するためにユーザスタディを行い、ゲインの大小や物理プロップの有無がユーザの検知閾や許容性、さらに映像酔いや臨場感に与える影響を調査する予定である。

参考文献

- [1] Martin Usoh, Kevin Arthur, Mary C. Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater, and Frederick P. Brooks. Walking >Walking-in-Place >Flying, in Virtual Environments. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 359–364, 1999.
- [2] Sarah S. Chance, Florence Gaunet, Andrew C. Beall, and Jack M. Loomis. Locomotion mode affects the updating of objects encountered during travel: The contribution of vestibular and proprioceptive inputs to path integration. *Presence*, Vol. 7, No. 2, pp. 168–178, 1998.
- [3] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C Whitton. Redirected Walking. In *Proceedings of Eurographics*, pp. 289–294, 2001.
- [4] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 1, pp. 17–27, 2010.
- [5] Betsy Williams, Gayathri Narasimham, Bjoern Rump, Timothy P. McNamara, Thomas H. Carr, John Rieser, and Bobby Bodenheimer. Exploring large virtual environments with an hmd when physical space is limited. In *Proceedings of the 4th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, pp. 41–48, 2007.
- [6] Tabitha C. Peck, Henry Fuchs, and Mary C. Whitton. Evaluation of reorientation techniques and distractors for walking in large virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 15, No. 3, pp. 383–394, 2009.
- [7] Misha Sra, Xuhai Xu, Aske Mottelson, and Pattie Maes. Vmotion: Designing a seamless walking experience in vr. In *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference*, pp. 59–70, 2018.
- [8] Farahnaz Ahmed, Joseph D. Cohen, Katherine S. Binder, and Claude L. Fennema. Influence of tactile feedback and presence on egocentric distance perception in virtual environments. In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp. 195–202, 2010.
- [9] Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Curvature manipulation techniques in redirection using haptic cues. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 105–108, 2016.
- [10] Keigo Matsumoto, Takeru Hashimoto, Junya Mizutani, Hibiki Yonahara, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Magic table: Deformable props using visuo haptic redirection. In *SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies*, pp. 1–2, 2017.