

ルームスケールVRにおけるロボットキャンバスを用いた 筆記作業時のリダイレクション

根本 健伍^{1,a)} 小川 郡平^{2,b)} 藤田 和之^{2,c)} 高嶋 和毅^{1,d)}

概要:本研究では、ルームスケールVRにおいて、ロボットキャンバスを用いた、ユーザの歩行を伴う筆記動作中の曲率リダイレクション（歩行感覚操作）手法を提案する。ロボットキャンバスはユーザの正面に配置され、ユーザはペン先の触覚を得ながら筆記作業をすることができる。筆記が進むにつれ、ロボットキャンバスはユーザに追従するが、ユーザには気づかれぬ曲率で曲がって移動する。これにより、ユーザは現実世界では弧を描く歩行でありながらもVR内では直線上のバーチャルキャンバス上で筆記作業を続けることができる。本発表では、歩行と筆記を組み合わせたリダイレクションの仕組みと、曲率ゲインの効果や許容閾値などを含む基礎的な特性を実演する。

1. はじめに

ルームスケールVR（Virtual Reality）とは、頭部搭載型ディスプレイ（HMD）を装着したユーザが、トラッキング可能な部屋を自由に移動し、自身の身体運動を通じてVRコンテンツと直接的に関わることが可能なVR技術である。高い没入感が得られる一方で、ユーザが移動可能な範囲は実空間の部屋のサイズに制限される課題がある。この課題を解決する手法として、ユーザの身体動作に対してVR空間内の移動量や方向を意図的に変化させるVRリダイレクション技術 [1][8][9] が提案されている。リダイレクションは、並進ゲイン・回転ゲイン・曲率ゲインの3種類のゲインを用いることで、ユーザの歩行距離や進路を知覚されない範囲で変化させることが可能である。ここでのゲインは、リダイレクション技術を用いたユーザの歩行距離や方向の操作を示す尺度をさす。これら3種類のゲインは知覚限界が存在し、現実的に使用可能なゲインはまだ小さいという課題があった。

ゲインの知覚限界を拡大する一つの方法として、触覚・物理プロップを用いてリダイレクション効果を高める研究が注目されている [2][3][4][6][7][10]。なかでも、Unlimited Corridor [2] では、半円状の壁を手で触れながら歩行することで、VRリダイレクションの知覚限界を大きく上回る曲率

ゲインが許容されることを示した。また、Slide Redirection [6] では、回転式ハンドレールによる摩擦感覚を提示することで、並進方向のゲイン拡大にも有効であることが報告されている。さらに、RedirectedDoors+ [3] では、動的に生成されるドアプロップを利用して回転ゲインを適用し、進行方向を断続的に操作し続ける仕組みを4×4mの空間で実現している。これらの研究より、触覚を介したリダイレクションは視覚操作による手法よりも大きなリダイレクション効果を得られることが広く示されている。しかし、いずれの研究も歩行タスクに限定されており、筆記など、歩行を伴いながら繊細に身体を使うアクティビティ中にこれらの歩行誘導が可能かどうか明らかになっていない。特に、ホワイトボードや黒板を用いた筆記のように、歩行を伴う筆記体験は日常的であり、こうした状況におけるリダイレクションの成立可能性を検討する必要がある。なお、筆記中のリダイレクションは近年開発され [5]、筆記面の拡張は実現できたが、ルームスケールの筆記体験での検証には至っていない。

そこで本研究では、ルームスケールVR内の基本的な活動である筆記中の歩行進路操作を実現するために、ロボットキャンバスによる曲率リダイレクションシステムを提案する。本システムは、VR空間内での筆記作業を想定しており、ユーザがVR内のキャンバスやホワイトボードに近づくと、ロボットキャンバスがユーザに近づき、ユーザはペン先の触覚を得ながら適切な姿勢で筆記作業をすることができる。筆記中には、図1のように、曲率ゲインによるリダイレクションを適用し、ユーザは実空間で円弧上を歩行しているにもかかわらず、VR空間では平面上のキャン

¹ 芝浦工業大学 システム理工学部

² 東北大学 電気通信研究所

a) bp22092@shibaura-it.ac.jp

b) kumpei.ogawa.r5@dc.tohoku.ac.jp

c) k-fujita@riec.tohoku.ac.jp

d) takashim@shibaura-it.ac.jp

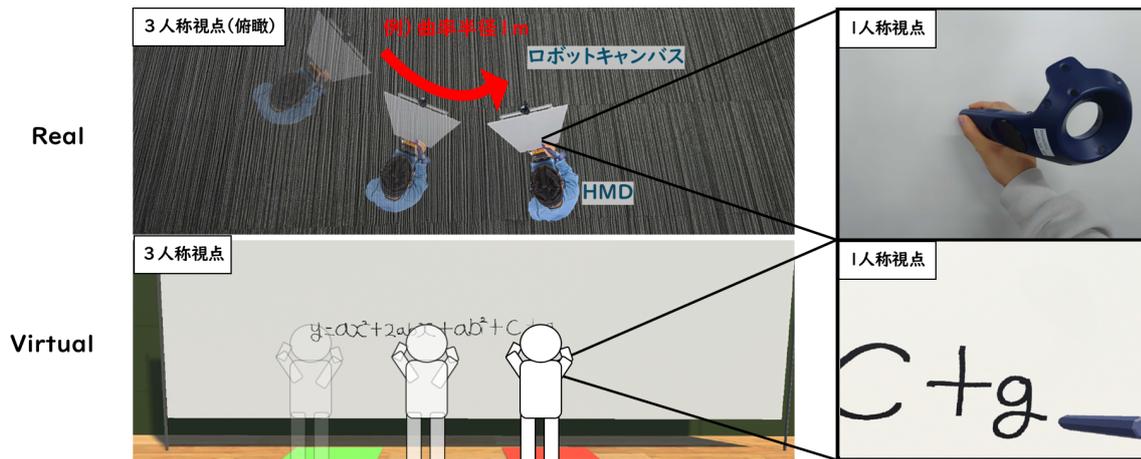


図 1 ロボットキャンバスを用いた曲率リダイレクション中のユーザの歩行と筆記。(上図) 現実世界でのユーザの歩行と筆記, (下図) バーチャル世界でのユーザ視点移動と文字入力

バスに向かって文字や図形を書いている体験を得られるようにする。本研究で筆記動作を取り上げた理由として、筆記中は視線がキャンバスに固定されやすく、身体の向きの変化に注意が向きにくいいため、曲率ゲインが比較的知覚されにくいと考えたからである。本デモ発表では、参加者に初期プロトタイプを体験してもらい、新たな視触覚連携による曲率リダイレクションの可能性を議論する。

2. VR 筆記中リダイレクションシステム

2.1 ロボットキャンバス

本研究で使用するロボットキャンバスのプロトタイプを図 2 に示す。ロボットキャンバスは、全方位移動ロボット、モーショントラッカー、バッテリー、およびキャンバス部から構成される。キャンバス部は、本体のキャンバスとそれを支持するアルミフレームから成り、その土台にメタルラックを使用している。全方位移動ロボットには、4 輪駆動の小型メカナムホイールロボット (Nexus Robot 製 4WD 100mm Mecanum Wheel Robot) を採用し、キャンバスを駆動させるために使用している。ロボットにはマイクロコンピュータ (ESP32) と通信デバイスを搭載し、Windows PC から Bluetooth 通信によりワイヤレス制御を行っている。モーショントラッカーには VIVE Tracker を使用し、ロボットの位置・姿勢をリアルタイムで取得している。これらの機器は、ポータブル電源ステーション (SmartTap PowerArQ, 100V/2A) によって駆動する。ロボットキャンバスの全長は 1.68m であり、キャンバス部は 0.74~1.68m の高さに配置されている。横幅は 0.63m と一般的なホワイトボードの筆記領域の一部を再現できる。図 2 では身長 170cm 程度のユーザを想定しており、胸部付近に筆記面が位置する設計である。デバイス重量は約 15kg であり、キャンバス面は 7N までの力に耐えることができる。

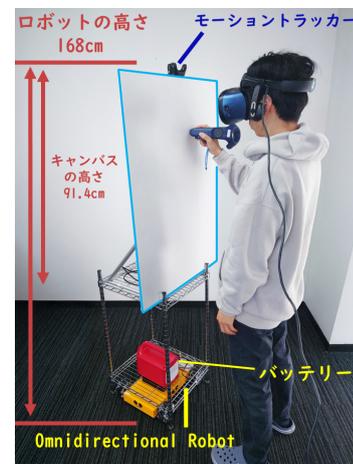


図 2 ロボットキャンバスのプロトタイプ

2.2 リダイレクションアルゴリズム

本システムでは、筆記動作中に連続的な歩行誘導を行うため、ユーザの進行方向および経路の両方を操作する曲率リダイレクションを使用している (図 1)。曲率リダイレクションは VR ユーザの移動量に応じて頭部の位置を基準に映像を回転する。それにより、現実での歩行経路を変更することができる。ここでの回転量は曲率半径に基づいて決定され、この曲率半径が ∞ 、すなわち直線るとき、等倍の回転 (操作なし) となり曲率半径が 10m のとき、半径 10m の弧を描きながら歩行するように映像が回転する。

本研究で使用予定の曲率半径の数値は、既存研究で判明したハプティックなしの知覚閾値、曲率半径 22m[1] から、ハプティックありの曲率半径 2.5m[2] の範囲を参考にし、その中からユーザが違和感を覚えにくいとされている曲率ゲインを体験できるデモ環境を構築した。

2.3 ロボットキャンバス制御

ロボットの安全性を確保するため、本システムでは協働ロボットに関する産業規格 ISO TS 15066:2016 に基づき、

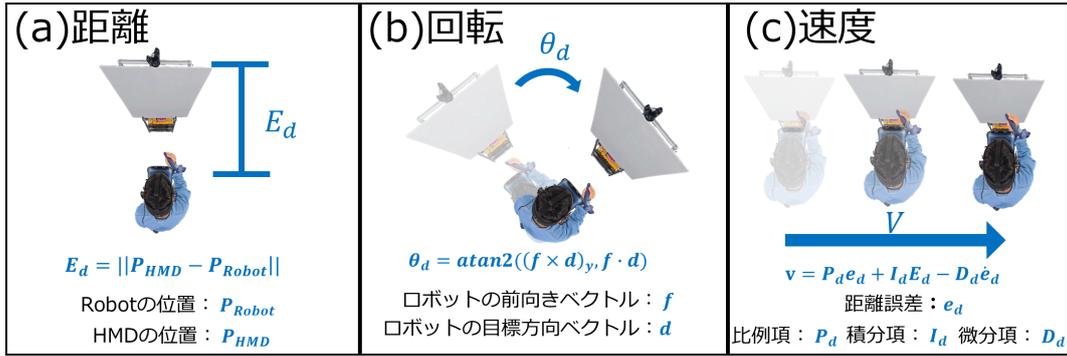


図3 ロボットキャンバスの動作

ロボットの最大移動速度を 0.4 m/s 以下に設定している。また、フィードバック制御により、ユーザとの接触は一定の距離を保ちながら動作するため安全性に配慮ができています。

フィードバック制御は、ロボットと HMD との直線距離 E_d (図 3(a)) を計算することで、ロボットがユーザとの間に一定の距離を保つよう制御している。また、現実でのユーザの回転に応じてキャンバスの面が回転することによって、ユーザの移動方向に対してキャンバス部が常に垂直となるようにしている(図 3(b))。移動時のロボットの速度 V は、筆記時の歩行に対応するように、HMD の移動に応じて PID 制御を行い滑らかに加速するように設計した(図 3(c))。こうすることで正面位置を維持することができ、視覚的な筆記対象・手先の運動方向・触覚的接触面の整合性が保たれ、筆記中でもリダイレクションに気づきにくい状況を作り出す。

2.4 デモアプリケーション

ロボットキャンバスの有用性を確認するため、VR 筆記アプリケーションを開発した。アプリケーションでは、ユーザがコントローラーを VR キャンバスに接触させた位置に応じてテキストを更新し、文字や図形を描画できる。キャンバスのテキストを更新する方式にすることで、デジタルペイントに近い滑らかな表現が可能となる。そのため、自然で違和感の少ない筆記体験を提供できる。

本アプリケーションでは、歩行距離は 3m 程度の範囲で曲率半径 2.5 m から 22 m までの曲率ゲインを想定しているこれは、会議や講義などで使われているホワイトボードのサイズと同等のサイズとなっている。現在のシステムでは一方方向の筆記体験ができるようなデモ構成にしている。

本システムではデモとして文字を書くタスクを中心に構成しているが、筆記アプリケーション自体は文字以外の描画にも対応可能である。たとえば図形描画やグラフの作成、講義・プレゼンテーションで使用される板書、さらにはイラスト制作など、より広い応用が想定される。今後は、これら多様な筆記・描画タスクに対して本システムがどのよ

うに機能するかを検討していく。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 (25K03160) の支援による。

参考文献

- [1] 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, 2009.
- [2] Keigo Matumoto, Takuji Narumi, Yuki Ban, Yohei Yanase, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose, Unlimited Corridor: A Visuo-haptic Redirection System, ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, No.18, pages. 1-9, 2019.
- [3] Yukai Hoshikawa, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Morten Fjeld, and Yoshifumi Kitamura, Redirected-Door+: Door-Opening Redirection with Dynamic Haptics in Room-Scale VR, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.30, No5, 2024.
- [4] Tetsushi Ikeda, Kazuyuki Fujita, Kumpei Ogawa, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, LoopBot: Representing Continuous Haptics of Grounded Objects in Room-scale VR, ACM Symposium on User Interface Software and Technology, No.135, pages 1-10, 2024.
- [5] Kumpei Ogawa, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, Redirected Drawing: Expanding the Perceived Canvas Size in VR, IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces, pages 494-504, 2025.
- [6] Yuto Ohasi, Keigo Matumoto, Yutaro Hirao, Monica Perusquía-Hernández, Nobuchika Sakata, Hideaki Uchiyama, Kiyoshi Kiyokawa, Slide Redirection: A Walker-Type Device for Enhancing Redirected Walking through Friction Sensation of a Rotating Handrail, Augmented Humans International Conference, Pages 105-114, 2025.
- [7] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, Andrew D. Wilson, Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences, CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Pages 1968-1979, 2016.
- [8] Timofey Grechkin, Jerald Thomas, Mahdi Azmandian, Mark Bolas, Evan Suma, Revisiting Detection Thresholds for Redirected Walking: Combining Translation and Curvature Gains, ACM Symposium on Applied Perception, Pages 113-120, 2016.
- [9] Michael Rietzler, Jan Gugenheimer, Teresa Hirzle, Mar-

tin Deubzer, Eike Langbehn, Enrico Rukzio, Rethinking Redirected Walking: On the Use of Curvature Gains Beyond Perceptual Limitations and Revisiting Bending Gains, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Pages 115-122, 2018.

- [10] Keigo Matsumoto, Takeru Hashimoto, Junya Mizutani, Hibiki Yonahara, Ryohei Nagao, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, Magic Table: Deformable Props Using Visuo Haptic Redirection, SIGGRAPH Asia 2017 Emerging Technologies, Article No. 9, Pages 1-2, 2017.