

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K17929

研究課題名（和文）リダイレクテッドウォーキング適用下のユーザ同士の物理的インタラクションの実現

研究課題名（英文）Physical Interaction Between Users While Redirected Walking

研究代表者

松本 啓吾（Matsumoto, Keigo）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号：20909527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、リダイレクテッドウォーキング(RDW)を適用した複数のユーザ同士の物理的なインタラクションを実現するリダイレクテッドインタラクション(RDI)手法を明らかにすることである。この実現のため、RDW適用下のユーザ同士の位置・姿勢関係を保存するベクトルポテンシャルを用いたRDI手法の開発を行った。

さらに、RDI手法単体では困難なユーザと動的な物体間のインタラクションについて、台車型ロボットを用いることで、RDI下において任意の場所に任意の形状の物体を提示するシステムを構築し、動的な物体に対するRDIの効果ユーザスタディを通して検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的独自性と創造性はRDW適用下でのユーザ同士の物理的インタラクションを実現する点にある。従来はユーザ同士の衝突回避アルゴリズムの開発が中心だった複数人RDW研究において、ユーザ同士の物理的インタラクションを実現するRDW手法であるリダイレクテッドインタラクションの提案・開発・評価を行い、従来は困難であったRDW適用下での共同作業や共同学習を可能にする点において本研究の創造性は高い。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to elucidate a Redirected Interaction (RDI) method that enables physical interaction among multiple users by applying Redirected Walking (RDW). To achieve this, we developed an RDI method using vector potentials to preserve the position and orientation relationships between users under RDW. Furthermore, regarding interactions between users and dynamic objects, which are challenging with the RDI method alone, we constructed a system that presents objects of arbitrary shapes at arbitrary locations under RDI using automated guided vehicles. The effectiveness of RDI for dynamic objects was verified through user studies.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：Redirected Walking ユーザ間インタラクション ハプティックインタラクション

1. 研究開始当初の背景

バーチャルリアリティ（VR）では没入感や臨場感が重要視され、その向上のために身体性を取り入れた手法が数多く提案されてきた。こうした手法の一つに実空間とバーチャル空間でのユーザの位置と姿勢を一対一対応させることでバーチャル空間での自然な歩行を可能にする **Natural Walking (NW)** がある。しかし、この手法では実空間よりも大きなバーチャル空間を実際に歩行することは不可能である。

自然な歩行感覚と狭小な実空間での広大なバーチャル空間の歩行の両立のため、**Razzaque** ら (2001) は **リダイレクテッドウォーキング**

(**Redirected Walking; RDW**)を提案した。RDWとは、実空間とバーチャル空間でのユーザの位置と姿勢の対応関係を知覚されない範囲で操作することで、実際には狭小な実空間を歩行するユーザに広大なバーチャル空間を歩行する知覚を生じさせる手法である。RDWの代表的な手法では、ヘッドマウントディスプレイ(**Head-mounted display; HMD**)を装着して歩行するユーザに、実際の歩行とはわずかに異なる移動方向および移動量のバーチャル空間の映像を提示することで、ユーザに映像に沿った歩行運動を行っていると感じさせ、歩行方向や歩行量を操作する。

他方、VR技術の民主化に伴い、教育や訓練、医療、エンタテインメント等の分野においてVRでの共同作業 (**Saffo et al., 2021**) や共同学習 (**Greenwald et al., 2017**) などへの期待が急速に高まっている。RDWの分野でも、同一の実空間とバーチャル空間を共有する複数のユーザに対してRDWを適用する「複数人RDW」についての研究が行われている (**Dong et al., 2019, Dong et al., 2021, Bachmann et al., 2019, Azmandian et al., 2017**)。RDW適用下では、実空間とバーチャル空間とでユーザの位置と姿勢の相対的關係が異なるため、他のユーザとバーチャル空間では接近しているが実空間では離れているといった状況や、バーチャル空間では離れているが実空間では接近しているといった状況が生じる (図1)。従来の複数人RDWに関する研究では、他のユーザとの衝突を回避する手法が開発されてきた。しかし、こうした手法では共同作業や共同学習などで必要となるユーザ同士の物理的インタラクション(物体の受け渡し、共同把持、身体接触など)を行うことはできない。この問題に対して、本研究ではRDW適用下においてユーザ同士の物理的インタラクションを実現する「リダイレクテッドインタラクション」の開発に取り組むこととした。

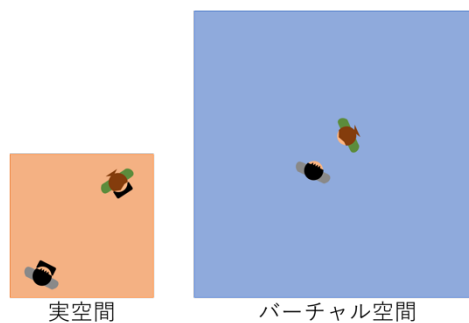


図1 RDW適用下のユーザ同士の物理的インタラクションにおける課題。バーチャル空間ではユーザ同士は接近しているにもかかわらず実空間ではお互いに離れているため物理的インタラクションを行うことができない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、限られた実空間での広大なバーチャル空間の歩行を可能にするRDWと共同作業などのユーザ間のインタラクションの両立を実現することである。そのために先述した問いに対応する以下の3つの研究項目を立てた。

(1) RDW適用下のユーザ同士の物理的インタラクションを可能とするRDWアルゴリズムの開発

(2) ユーザ同士の物理的インタラクション機会の有無に応じて、ユーザ同士の衝突を回避する従来の多人数RDWアルゴリズムと提案手法であるユーザ同士の物理的インタラクションを可

能にする RDW アルゴリズムとを動的に選択する手法の開発

(3) RDW アルゴリズムを変更する際に生じるユーザ間の相対的な位置・姿勢のずれを調整するためのユーザの位置・姿勢誘導手法の開発

3. 研究の方法

(1) ユーザ同士の物理的インタラクションを可能にする RDW アルゴリズム

(1-1) ユーザ間で対称な物理的インタラクションを可能にする RDW アルゴリズム

ユーザの位置・姿勢を実空間とバーチャル空間とで一対一に対応付ける、あるいは、ユーザ間で同一の RDW 操作を適用することでユーザ同士の物理的インタラクションが可能になることが考えられる。こうした RDW アルゴリズムと従来手法の RDW アルゴリズムとをシミュレーション環境を用いてユーザ同士の物理的インタラクションが成功した割合を比較することで検証する。シミュレーション環境で有効性を確認した後、ユーザスタディを通して物理的インタラクションが成功した割合と物理的インタラクション体験の質の評価を行う。

(1-2) ユーザ間で非対称な物理的インタラクションを可能にする RDW アルゴリズム

バーチャル空間においてはユーザの動作は必ずしも一致する必要はなく非対称な物理的インタラクションが可能である。こうした状況ではユーザ間で異なる RDW 操作を適用してもユーザ同士の物理的インタラクションが可能になることが考えられる。こうした RDW アルゴリズムと従来手法の RDW アルゴリズムとをシミュレーション環境を用いてユーザ同士の物理的インタラクションが成功した割合を比較することで検証する。シミュレーション環境で有効性を確認した後、ユーザスタディを通して物理的インタラクションが成功した割合と物理的インタラクション体験の質的調査を行う。

(2) 物理的インタラクションの機会の有無に応じた RDW アルゴリズムの動的な選択

(2-1) 物理的インタラクションの機会の有無に応じた RDW アルゴリズムの動的な選択

事前にユーザが体験するシナリオが定まっている VR 体験では、物理的インタラクションの機会を事前に予測することが用意である。一方で、シナリオが事前に定まっていない VR 体験では、ユーザの挙動やバーチャル環境に応じて物理的インタラクションの機会を予測する必要がある。物理的インタラクションの機会を予測する手法として、ユーザ同士が接近する動作やユーザ同士のコミュニケーションといったユーザの挙動や共同作業を誘発するバーチャルオブジェクトやギミックといったバーチャル環境のアフォーダンスを用いることが考えられる。物理的インタラクションの機会の有無の予測についてはユーザスタディを行い検証する。

(2-2) RDW アルゴリズムを動的に切り替える際のユーザの位置・姿勢誘導手法

RDW アルゴリズムを切り替えて NW やユーザ間で同一の RDW 操作を適用するためには、ユーザの位置・姿勢を誘導する必要がある。このユーザの位置・姿勢の誘導については応募者らが開発した「補正領域」手法を拡張することで対応する。

4. 研究成果

(1) ユーザ同士の物理的インタラクションを可能にする RDW アルゴリズム

RDW 適用下のユーザ同士の位置姿勢関係を保存する RDW 手法であるリダイレクテッドインタラクションの開発を行った。とともに、ユーザ同士の物理的インタラクションの機会や衝突の可能性を予測しユーザの歩行経路を誘導する手法の検討と実装を行った。リダイレクテッドインタラクションの開発では、先行研究において提案されていたスカラーポテンシャル場を用いた

RDW 手法(図 2 左)をベクトルポテンシャルを用いて拡張する(図 2 右)ことでユーザの位置だけではなく向きについても制御することを試みた。また、複数人のインタラクションを考慮したリセット操作を新たに提案することで、他ユーザや境界セグメントとの衝突を回避する効果を強めることを試みた。

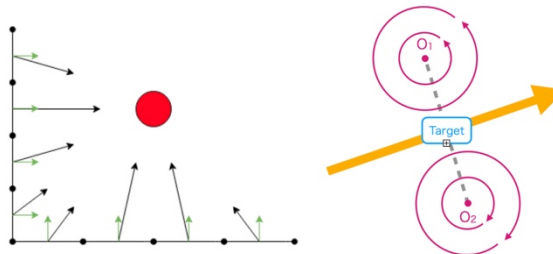


図 2 左)スカラーポテンシャル場を用いた RDW 手法の概念図. 右)ベクトルポテンシャル場を用いた RDI 手法の概念図. ベクトル場を用いることにより, ユーザは黄色の矢印で示されたターゲット方向に姿勢が誘導される.

シミュレーション実験からは提案手法であるベクトルポテンシャル場を用いた

RDI 手法によって, 同一物理・バーチャル空間を探索するユーザのターゲットに対する位置誤差(図 4)および姿勢誤差(表 1)が, 従来手法であるスカラーポテンシャル場と比べて減少することが示された。

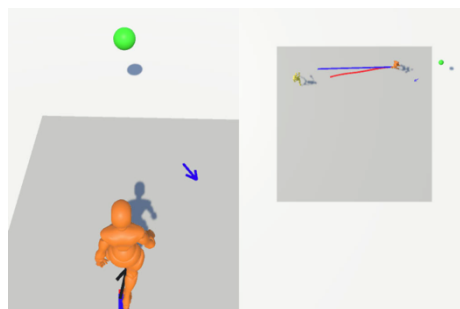


図 3 シミュレーション実験環境

また, 2名のユーザが物理的なオブジェクトを受け渡すという物理的インタラクションを行う条件下で行ったユーザスタディ(図 5)からは, 提案手法であるベクトルポテンシャル場を用いた RDI 手法を用い

ることで, 従来手法であるスカラーポテンシャル場を用いた RDW 手法と比べて, オブジェクトの受け渡しの失敗回数や位置誤差は有意に減少したものの, 姿勢誤差については有意差がみられなかった。

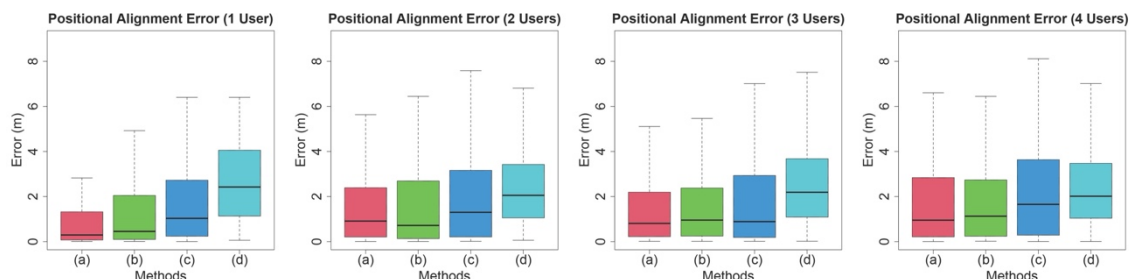


図 4 シミュレーション環境におけるユーザとターゲットの位置誤差. 条件(a), (b), (c)は提案手法であるベクトルポテンシャル場を用いた RDI 手法, 条件(d)は従来手法であるスカラーポテンシャル場(条件 d).

表 1 シミュレーション環境におけるユーザとターゲットの姿勢誤差. 条件(a), (b), (c)は提案手法であるベクトルポテンシャル場を用いた RDI 手法, 条件(d)は従来手法であるスカラーポテンシャル場(条件 d).

	1 User	2 Users	3Users	4 Users	
Avg. Angular Alignment Error (ang)	(1a)	35.40	43.18	49.31	50.73
	(1b)	41.74	40.99	51.08	52.98
	(1c)	44.07	52.07	45.26	58.24
	(1d)	103.80	89.31	91.43	92.15
Circular SD of Angular Alignment Error	(1a)	0.74	0.88	0.89	0.91
	(1b)	0.88	0.89	0.97	0.98
	(1c)	0.99	0.95	0.93	0.95
	(1d)	0.92	1.03	0.89	0.95

(2) 物理的インタラクションの機会の有無に応じた RDW アルゴリズムの動的な選択

ユーザ同士やバーチャル環境の位置姿勢関係に応じて物理的インタラクションやユーザと壁などの障害物、ユーザ同士の衝突の機会を予測し、リセット操作（ユーザの向きを強制的に変更する操作）を行うべきタイミングを定期的に予測するリセットシミュレーションを提案した（図6）. リセットシミュレーションでは、進行方向上にある複数箇所を中間地点として抽出し、中間地点から目標地点まで経路探索を行う。得られた経路について、RDI 手法を適用し、事前に定めたりセット操作の上限回数に達するまで目標地点に到達できるか否かの判定を行う。目標地点に到達できると判定された経路のうち、最もリセット操作の回数が少なくなるような経路を選択した。



図5 ユーザスタディ環境

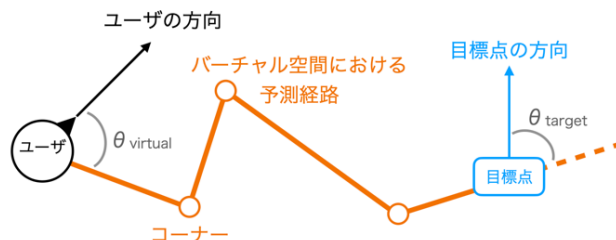


図6 リセットシミュレーション. 白丸で示された中間点において経路探索を行い、得られた経路について RDI 手法を適用することで最もリセット操作の回数が少なくなるような経路を選択する。

(3) 台車型ロボットを用いたユーザと動的なオブジェクト間における RDI 手法の開発と評価

(1) (2)において提案した RDI 手法がユーザの主観的な体験に及ぼす影響を検証するため、台車型ロボットを用いて物理オブジェクトの位置・姿勢を変化させた環境下において RDI 手法を適用した際のユーザの主観的な体験について評価を行った。

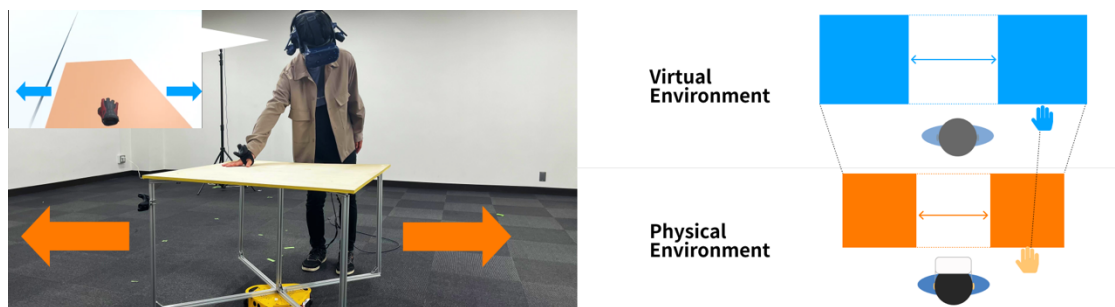


図7 台車型ロボットを用いた動的なオブジェクトとユーザ間における RDI 手法

図7のように台車型ロボットによってテーブル状の物体が運動する条件と、静止した条件とで RDI 手法によって操作される物体の大きさや速度、ユーザ自身の移動量の変化に対してユーザが抱く主観的な体験を心理物理学実験によって評価した。実験結果からは、物体の大きさに対する検出閾値(DT)は数値的に増加した(優位傾向)一方で、ユーザ自身の移動量に対する DT に有意な違いは見られなかった。この結果から、物理的にインタラクションを行う物体が動いているときは、ユーザ自身に対しては物体が静止しているときと同様の RDI 効果が期待できる一方で、物体の形状や大きさに対する操作については、静止しているときよりも、大きな操作量を適用できる可能性が示唆された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1 . 発表者名 Gaku Fukui, Takuto Nakamura, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka
2 . 発表標題 Effects of Wearing Knee-tightening Devices and Presenting Shear Forces to the Knee on Redirected Walking
3 . 学会等名 Augmented Humans International Conference 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2022年 ~ 2023年

1 . 発表者名 Amane Yamaguchi, Sotaro Yokoi, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi
2 . 発表標題 TableMorph: Haptic Experience with Movable Tables and Redirection
3 . 学会等名 SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2023年 ~ 2024年

1 . 発表者名 Reigo Ban, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi
2 . 発表標題 Hitchhiking Hands: Remote Interaction by Switching Multiple Hand Avatars with Gaze
3 . 学会等名 SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2023年 ~ 2024年

1 . 発表者名 Maki Ogawa, Keigo Matsumoto, Kazuma Aoyama, Takuji Narumi
2 . 発表標題 Expansion of Detection Thresholds for Hand Redirection using Noisy Tendon Electrical Stimulation
3 . 学会等名 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (国際学会)
4 . 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 Kiyu Tanaka, Takuto Nakamura, Keigo Matsumoto, Hideaki Kuzuoka
2. 発表標題 Effect of Hanger Reflex on Detection Thresholds for Hand Redirection during Forearm Rotation
3. 学会等名 ACM Symposium on Applied Perception 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Keigo Matsumoto https://keigomatsumoto.net/ 葛岡・鳴海研究室 https://www.cyber.t.u-tokyo.ac.jp/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------