



# 体験者同士のインタラクションを考慮した リダイレクテッドウォーキング手法の構築

李昌<sup>1)</sup>, 松本啓吾<sup>1)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>, 葛岡英明<sup>1)</sup>

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {c.li, matsumoto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 実空間よりも広大なバーチャル空間を歩行することを可能にするリダイレクテッドウォーキング (RDW) を応用し, 複数人が同じ実空間内で互いの衝突を回避しながら広大なバーチャル空間での活動を行うことが可能になりつつある. 一方で, RDW 適用下での体験者同士のインタラクションに関する研究は限られている. 本研究ではこれを可能にする手法として, 引力・斥力ポテンシャルを導入してユーザ同士がインタラクション可能な位置姿勢まで各ユーザを誘導する手法を提案した. 実験を行った結果, 目標位置へのある程度の誘導は確認できたものの, 姿勢誘導と Reset 操作の多用に課題が残る, 更なる手法の改善が必要であることが明らかになった.

**キーワード:** リダイレクテッドウォーキング, インタラクション, 多人数, CSCW

## 1. はじめに

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ており, これらを高める手法の 1 つとして移動に実際の歩行を取り入れる試みがなされてきた. しかし, 現実の歩行動作をそのままバーチャル空間に取り入れると移動可能なバーチャル空間の広さが現実空間の広さの制約を受けるため, 計算資源が許す限り広大な空間を生成できる VR の利点を十分に活かさない. この矛盾を解決する手法としてリダイレクテッドウォーキング (Redirected Walking: RDW) が提案されている [1]. RDW は空間知覚における視覚の優位性を利用し, ユーザが気づかない範囲でユーザの位置姿勢をずらした映像を提示することで, 実空間よりも広いバーチャル空間を歩行していると知覚させる手法である.

提案当初, RDW は単一ユーザがバーチャル空間を使用する前提の手法であった. 他方, 昨今では VR Chat<sup>1)</sup> や Horizon<sup>2)</sup> などのソーシャル VR の登場により, 複数人での VR 体験の機会が増加し, 複数人で利用可能な RDW 手法が求められている. 現状では複数人が共通の現実空間およびバーチャル空間に共存する手法は提案されているが, そのほとんどがユーザ同士が接触を行わない前提をとっており, ユーザ間で接触する, ものの受け渡しをする, 一緒にものを運ぶ等, ユーザ同士が接触を伴うインタラクションを行う手法の研究は非常に限られている. そこで本研究では, RDW 適用下でユーザ同士のインタラクションを可能にする新たな RDW アルゴリズムを提案・検証する.

## 2. 関連研究

RDW は 2001 年に Razzaque ら [1] により提唱された手法である. RDW の基本操作として, Steinicke ら [2] が「並進移

動量操作」「回転量操作」「曲率操作」の 3 手法を, Langbehn ら [3] が「曲げ操作」を提案しており, これら 4 手法が現在の RDW の基本操作となっている. RDW では没入感を下げる原因となる現実空間での衝突を低減するため, 先述の基本操作を用いて現実空間にてユーザを一定の目標位置に誘導する. ユーザを目標位置に誘導する手法として Razzaque ら [4] が提案した, 現実空間の中心に誘導する “Steer-to-Center(S2C)”, 予め決められた軌道に沿って歩行する “Steer-to-Orbit(S2O)”, 予め設定された複数のターゲットに選択的に誘導する “Steer-to-Multiple Targets(S2MT)” といった手法の他に, Lee ら [5] が機械学習を用いた “Steer-to-Optimal-Target(S2OT)” という手法を提案している.

マルチユーザでの RDW 手法については, Bachmann ら [6] が提案した人工ポテンシャル場 (Artificial Potential Field: APF) を用いた衝突回避を取り入れた “APF-RDW” という手法 (詳細は後述) や, Lee ら [7] が提案した “Multiuser-Steer-to-Optimal-Target (MS2OT)” という S2OT を拡張した手法などが存在する. これらの手法はユーザ同士の衝突回避のみを考慮したものであり, ユーザ同士のインタラクションは考慮されていない.

ユーザインタラクション可能なマルチユーザでの RDW 手法に関しては, Min ら [8] が二次計画法を用いてバーチャル空間と現実空間での 2 人のユーザの相対的な位置姿勢関係を一致させることでユーザ間インタラクションを可能にする手法を提案している. しかし, この手法では 3 人以上でのユーザインタラクションや現実, バーチャル空間双方における障害物の存在が考慮されておらず, これらの要素も考慮できるより汎用的な手法の開発が求められている.

<sup>1)</sup><https://hello.vrchat.com>

<sup>2)</sup><https://www.oculus.com/horizon-worlds>

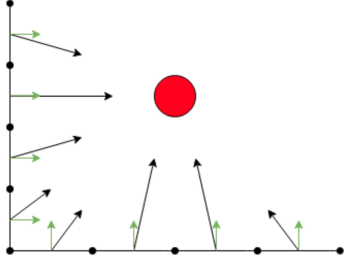


図 1: 境界セグメント. 赤点はユーザ, 黒矢印はベクトル  $w_i$ , 緑矢印はベクトル  $n$  を示す [9].

### 3. 提案手法

本研究では APF-RDW を基に, 目標位置, 姿勢に応じた引力を示すポテンシャルを加えることにより, 必要に応じてインタラクション可能な位置関係にユーザを誘導することが可能な新たな RDW アルゴリズムを提案する.

#### 3.1 APF-RDW

提案手法の基となる APF-RDW[6, 9] を概説する.

##### 3.1.1 Redirection

まずユーザの歩行方向の誘導について説明する. この手法ではベクトル  $t$  を用いて歩行中のユーザを左右どちらに誘導するかを決定する.  $t$  は VR 体験に用いる現実空間の境界セグメント  $i$  によるベクトル  $w_i$ , 他のユーザ  $j$  によるベクトル  $u_j$  を用いて以下の式の通りに表される. 現実空間の境界は図 1 のように決められた長さのセグメントにより分割されている.

$$t = \sum_{i=0}^n w_i + \sum_{j=0}^{m-1} u_j \quad (1)$$

$n$  は現実空間の境界セグメントの数,  $m$  は現実空間に存在するユーザの数である.

ベクトル  $d_i$  を, ユーザの位置ベクトル  $p$ , セグメントまたは他ユーザの位置ベクトル  $c_i$  を用いて以下のように決定する.

$$d_i = p - c_i \quad (2)$$

変数  $\kappa$  を, ユーザおよび他ユーザの方向ベクトルと, ユーザと他ユーザを通る直線が成す角度  $\theta_1, \theta_2$  を用いて以下のように定義する (図 2a).

$$\kappa = \text{clamp}\left(\frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2}, 0, 1\right) \quad (3)$$

このとき,  $w_i$  と  $u_j$  はベクトル  $d_i$  を用いて以下の式のように定義される. なお  $n$  はセグメントに対して垂直な単位ベクトルのうち体験に使用する現実空間の方向を向くものである (図 1).

$$w_i = \begin{cases} CL_i \frac{d_i}{\|d_i\|} \frac{1}{\|d_i\|^\lambda} & \text{if } n \cdot \frac{d_i}{\|d_i\|} > 0 \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_j = \kappa \frac{d_j}{\|d_j\|} \frac{1}{\|d_j\|^\gamma} \quad (5)$$

$C, L_i, \lambda, \gamma$  は定数であり,  $C$  は scaling factor,  $L_i$  はセグメントの長さ,  $\lambda, \gamma$  はポテンシャルの減衰比率を表す.

以上の式を用いて求めたベクトル  $t$  の向きがユーザの方向に対して左であれば左へ, 右であれば右へ誘導される.

続いて回転量操作について説明する.  $movingRate$  および  $headRate$  をユーザの速度  $v$  とある速度  $V$  の関係によって以下のように定義する.

$$movingRate = \begin{cases} 360 \left(\frac{v}{2\pi r}\right) & \text{if } v > V \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

$$headRate = \begin{cases} \Psi(aRS) & \text{if } v < V \\ 0 & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

$r$  は曲率操作における曲率半径を表す定数,  $\Psi$  は現実空間でのユーザの回転角,  $aRS$  はユーザの回転方向に応じた scaling factor である.

ユーザに最も近いセグメントとユーザとの距離を  $m$  とし,  $movingRate'$  を以下のように定義する.

$$\begin{cases} (1-t) movingRate + t(M) & \text{if } m < r \\ movingRate & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

$$t = 1 - \frac{m}{r} \quad (9)$$

ただし  $M$  は定数である. また  $movingRate'$ ,  $headRate$  はそれぞれ  $maxMoveRate$ ,  $maxHeadRate$  を上限とする.

以上を用いて時間  $\Delta t$  における redirection によるユーザの回転量は以下の式で決定される.  $baseRate$  は定数である.

$$\max(baseRate, movingRate', headRate) \Delta t \quad (10)$$

##### 3.1.2 Reset 操作

RDW 操作によりユーザの進行方向を変更しても現実空間の境界や他ユーザとの衝突を避けられない場合がある. その場合はユーザに警告を表示して動作を停止させた上で, Reset という手順をとった後に VR 体験を再開する. Bachmann らは Reset 手法としてバーチャル空間上でユーザを  $360^\circ$  回転させる手法を用いており, その間現実空間ではユーザは以下の回転ゲインに従い回転している. なお Reset による回転中に回転方向が変化するのを防ぐため, Reset 中はベクトル  $t$  は更新されない.

$$resetRotationGain = \left| \frac{360 - |rotateAngle|}{rotateAngle} \right| \quad (11)$$

Reset 手法に関しては本研究でも同様の手法を用いる.

### 3.2 提案手法による目標点への誘導手法

#### 3.2.1 Redirection

図のように, 目標点に引力ポテンシャルを, 目標方向とは反対方向からの目標点への進入を防ぐために目標点から目標方向へ進んだ点に斥力ポテンシャルを配置することを考える (図 2c).

目標位置を示すベクトルを  $q$ , 目標方向を示す単位ベクトルを  $r$  とする. このとき, ベクトル  $g_a, g_b$  を以下のように定義する.

$$g_a = p - q \quad (12)$$

$$g_b = p - (q + r) \quad (13)$$

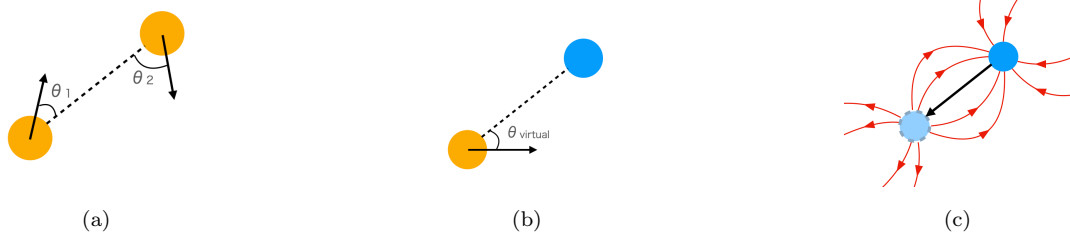


図 2: (a): 現実空間でのユーザおよび  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  の関係. (b): バーチャル空間でのユーザと目標点および  $\theta_{virtual}$  との関係. (c): 現実空間での目標位置姿勢および引力ポテンシャル, 斥力ポテンシャルの関係.

バーチャル空間上でユーザがターゲットに向かっている場合のみ目標点に対する RDW を行うようにするため, 以下のような  $k_v$  をベクトル  $target$  の計算に含める (図 2b) .

$$k_{virtual} = clamp(\cos \theta_{virtual}, 0, 1) \quad (14)$$

これらを用いてベクトル  $target$  を以下のように定義する.

$$target = k_v \left( \frac{g_b}{\|g_b\|} \frac{1}{\|g_b\|^2} - x \frac{g_a}{\|g_a\|} \frac{1}{\|g_a\|^2} \right) \quad (15)$$

ただし,  $x$  は定数であり,  $x > 1$  である. 引力ポテンシャルを  $x$  倍するのは, 位置ベクトル  $g_b$  から  $r$  方向に伸びる線分上の任意の点で斥力が引力に勝ってしまい目標点への到達が不可能となる状況为了避免のためである. ベクトル  $target$  を加味したベクトル  $t$  は以下の形に置き換えられる.

$$t = \sum_{i=0}^n w_i + \sum_{j=0}^m u_j + target \quad (16)$$

APF-RDW では回転量操作, 曲率操作のみが行われるが, 本研究では目標点への到達可能性を高めるために並進移動量操作も行う. バーチャル空間上での目標点とユーザの距離を  $d_v$ , 現実空間上での目標点とユーザの距離を  $d_r$  としたとき, 並進ゲイン  $g_t$  は以下のように決定される.  $d_v$  は経路探索アルゴリズムにより求められる. また  $g_{tmin}$ ,  $g_{tmax}$  は並進ゲインの最小値・最大値を表す定数である.

$$g_t = clamp\left(\frac{d_r - d_v}{d_v}, g_{tmin}, g_{tmax}\right) \quad (17)$$

### 3.2.2 Reset 操作

境界や他ユーザとの衝突に加え, ユーザが歩行するたびに現実空間における歩行のシミュレーションを行い, redirection のみで目標点に到達できないと判断され, かつ現実空間での目標点との距離がバーチャル空間での目標点との距離を上回った場合に一度のみ reset を行う. reset 時の回転ゲインは境界や他ユーザと衝突する場合と同じである.

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 実験目的

現実空間においてユーザを任意の位置姿勢に誘導可能であれば任意の位置でユーザ同士のインタラクションが可能であるという仮定の元, 以下を検証する.

1. 提案手法において目標位置姿勢への誘導の有無とその精度を確認する.

表 1: 手法に使用するパラメータ

Constant	Value	Constant	Value
$C$	0.00897	$L_i$	1 m
$\gamma$	3.091	$\lambda$	2.656
$V$	0.1 m/sec	$r$	7.5 m
$aRS(\text{delate})$	1.3	$aRS(\text{compress})$	0.85
$x$	1.2	$maxMoveRate$	15°/sec
$maxHeadRate$	30°/sec	$M$	15°/sec
$baseRate$	1.5°/sec	$g_{tmin}$	0.86
$g_{tmax}$	1.26		

2. 1 が達成された場合, Reset 操作間の歩行距離を調査し RDW の没入感が損なわれていないか確認する.

### 4.2 実験システム

実験システムの構築には Unity<sup>3</sup> 2019.4.8f1, および OpenRDW Toolkit<sup>4</sup>を使用した.

### 4.3 実験条件

現実空間を 20m × 20m の正方形とし, 2 人のユーザによる RDW のシミュレーションを行った. 歩行経路については,  $n + 1$  番目の目標点を  $n$  番目の目標点から 20m 離れた位置に, 方向と目標姿勢をランダムとして配置する方式で, 目標点が 50 個のものを 10 種類生成した. これらの経路を使用して目標位置姿勢に向かう歩行タスクを行い, 本研究における提案手法と OpenRDW Toolkit に含まれる S2C および Messinger ら [9] による APF-RDW 手法について比較を行った. 使用するパラメータは提案手法については表 1 の通りに設定し, S2C および APF-RDW については先行研究での設定に従った.

### 4.4 評価指標

1 回のシミュレーションにおいて, バーチャル空間で目標点に到達した際の現実空間での (a) 目標位置との距離の平均値, (b) 目標姿勢との角度の二乗誤差の平均値, および (c) Reset 操作間の平均歩行距離を評価指標とする.

### 4.5 結果

結果を図 3, 表 2 に示す.  $t$  検定を補正込みで行った結果, S2C・APF-RDW に対して目標位置と距離の平均値および Reset 操作間の平均歩行距離に関しては提案手法で有意に小さくなっていたが, 目標姿勢との角度の二乗誤差の平均値に関しては有意差は認められなかった.

<sup>3</sup><https://unity.com>

<sup>4</sup><https://github.com/yaoling1997/OpenRDW>

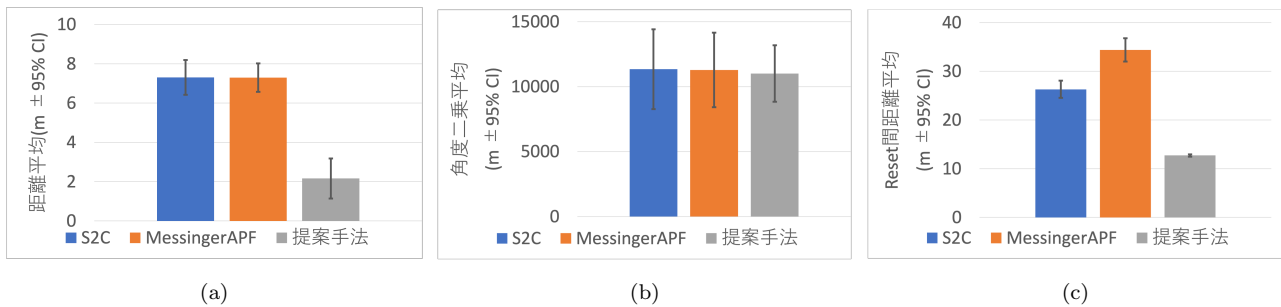


図 3: (a): 目標位置との距離の平均値. (b): 目標姿勢との角度の二乗誤差との平均値. (c): Reset 操作間の平均歩行距離.

表 2: 結果

	S2C	MessengerAPF	提案手法
(a)	7.30 ± 0.89	7.30 ± 0.72	2.16 ± 1.02
(b)	11345 ± 3068	11289 ± 2867	11013 ± 2172
(c)	26.29 ± 1.78	34.38 ± 2.40	12.71 ± 0.24

## 5. 考察

目標位置に関しては、比較手法よりも高い誘導効果は見られたが、距離平均が 2m 強とインタラクションを行うには精度が不十分な結果となった。誤差が起こった主な原因として Reset 操作後の誘導が不十分なことが挙げられる。Reset 操作後のユーザの進行方向に他ユーザが位置していた場合に互いのポテンシャルによりユーザが目標位置から遠ざかってしまうなどの要因を考慮し、誘導の精度を高める必要がある。今後の方針として Reset 操作後のユーザには優先的に目標位置に誘導するなどの対策が考えられる。目標姿勢に関しては誘導のない手法と有意差がなく、誘導ができているとは言い難い。ポテンシャルによる誘導に対して回転・曲率ゲインの制約が大きいことが原因と考えられる。また提案手法では目標位置への誘導に伴い Reset 操作の回数が増えてしまうことが判明した。ユーザの VR 体験の質の向上のため、Reset 操作の回数は可能な限り抑えるのが望ましい。これらの解決案として効率的な経路探索や回転・曲率ゲインの閾値操作などを今後研究を通して模索していく。

## 6. おわりに

現状の RDW ではユーザ間インタラクションに限られるという課題に対し、本研究ではそのようなインタラクションを実現する手法として APF-RDW を拡張し、現実空間での目標位置姿勢に対して引力・斥力ポテンシャルを導入した手法を提案した。バーチャル空間での目標位置到達時の現実空間における目標位置との距離平均値、目標姿勢との二乗誤差の平均値、Reset 操作間の平均歩行距離を評価指標としてシミュレーション実験を行った結果、現実空間での誘導効果は見られたものの、ユーザ間インタラクションの実現のためには効果が不十分であることが確認できた。今後は手法を改善し、ユーザ間インタラクションを取り入れた RDW を実現し遠隔協調作業等へ応用することを目指す。

謝辞 本研究の一部は科研費 基盤研究 (B)(19H04149, 22H03628), 若手研究 (22K17929), 研究活動スタート支援 (21K21307) の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] S. Razzaque, et al. "Redirected walking." In Proceedings of EUROGRAPHICS, 9, 105-106, 2001.
- [2] F. Steinicke, et al. "Taxonomy and Implementation of Redirection Techniques for Ubiquitous Passive Haptic Feedback," 2008 International Conference on Cyberworlds, 217-223, 2008.
- [3] E. Langbehn, et al. "Bending the Curve: Sensitivity to Bending of Curved Paths and Application in Room-Scale VR," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 23 (4), 1389-1398, 2017.
- [4] S. Razzaque. "Redirected Walking". PhD thesis, University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, 2005. AAI3190299.
- [5] D. -Y. Lee, et al. "Real-time Optimal Planning for Redirected Walking Using Deep Q-Learning," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 63-71, 2019.
- [6] E. R. Bachmann, et al. "Multi-User Redirected Walking and Resetting Using Artificial Potential Fields," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 25(5), 2022-2031, 2019.
- [7] D. Lee, et al. "Optimal Planning for Redirected Walking Based on Reinforcement Learning in Multi-user Environment with Irregularly Shaped Physical Space," 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 155-163, 2020.
- [8] D. Min, et al. "Shaking Hands in Virtual Space: Recovery in Redirected Walking for Direct Interaction between Two Users," 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 164-173, 2020.
- [9] J. Messenger, et al. "Effects of Tracking Area Shape and Size on Artificial Potential Field Redirected Walking," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 72-80, 2019.