



バーチャル障害物を用いた Redirected Walking 手法の検討

松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾ 廣瀬通孝¹⁾

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, matsumoto, narumi, kuzuoka@hirose@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 広大なバーチャル空間を限られた大きさの実空間で実際に歩き回ることを可能にする Redirected walking と呼ばれる方法論が提唱されている。Redirected walking 手法の多くはユーザに知覚されない範囲内でユーザの移動方向および移動量を変化させることを試みているが、実際はリセットと呼ばれる強制的な操作が必要とされユーザ体験を損ねていた。本稿ではあえてバーチャル空間上に障害物を提示しユーザが障害物を回避する際に知覚されない操作を行うことでリセットを回避する手法を提案する。

キーワード: 障害物回避, リダイレクション, ロコモーション

1. はじめに

限られた実空間で広大な VR 空間を歩行可能にする *Redirected walking (RDW)* と呼ばれる方法論が提唱されている。RDW では実際のユーザの動きとわずかに異なる映像をヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通して提示することで、実空間と VR 空間での移動方向や移動量を変化させており、代表的な手法として並進移動量・回転量・曲率操作が挙げられる [1]。しかし、これらの手法は視覚と体性感覚の間で矛盾を生じさせるため、ユーザに知覚されない操作量は一定の範囲にとどまる。したがって、これらの操作を用いてもユーザが歩行可能な範囲を超える場合は、リセットと呼ばれる操作を行うことでユーザの移動方向を歩行可能な範囲の中心へ向ける必要がある。代表的なリセットとして 2:1-Turn と呼ばれる手法がある。この手法は、ユーザに VR 空間で 360 度回転するように指示する一方で、実空間での回転量は 180 度となるように回転量操作を行うことで、進行方向を歩行可能な範囲の中央へと戻すことを可能にする。しかし、こうしたリセットは VR 体験を中断させる上、しばしば回転量操作の閾値を超える操作を行うため著しく没入感を低下させることが知られており、可能な限りを用いることを避けるべきだとされている。

一方、曲率操作の派生手法として曲げ操作が提案されている [2]。曲げ操作は実空間上で曲線状の経路を歩くユーザに VR 空間で異なる曲率の曲線状の経路を提示する手法であり、曲げ操作の閾値は曲率操作の閾値よりも高いことが報告されている。

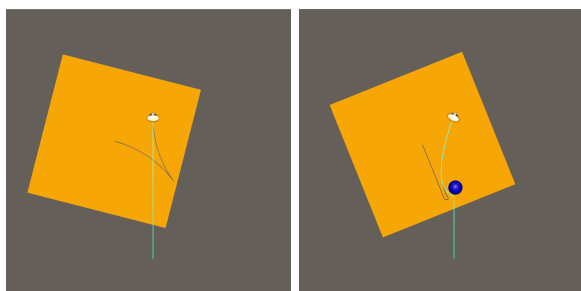
本研究では、VR 空間に障害物を提示することで VR 空間上でのユーザの歩行経路を湾曲させた上で曲げ操作を適用することで、リセットを伴わない RDW を可能にする手法を提案する。また、シミュレーションを用いて提案手法の有効性を検証する。

2. 障害物回避行動を用いたリダイレクション

実環境において静止物体および静止した人に対する回避行動について行われた研究では、進行方向に障害物がある場合ゆるやかな方向変換によって回避行動がなされることを報告している [3]。したがって障害物に対する回避行動の際に湾曲して歩行するユーザに対して曲げ操作を適用することで、ユーザの進行方向を歩行可能な空間の中心へと誘導することが可能だと考えられる。先行研究から、静止物体に対する回避行動開始地点から障害物までの平均距離は 3.4 m であった一方、回避幅は記述するに値しないほどわずかだったとしている [3]。また、静止した人物に対する回避行動開始地点から障害物までの平均距離および回避幅は人の向きによって異なる値が報告されているが、いずれの条件においても歩行経路の湾曲はわずかであり、曲げ操作を適用する利点は見られない [3]。また、運動障害物に対する回避行動においても、ユーザは運動障害物の進行方向から交差点を予測して回避行動をとるため、静止障害物と同様に歩行経路の湾曲量はわずかなものととどまることが考えられる。

一方、バーチャル空間では物体を任意のタイミングで生成することができたため、障害物をユーザ近傍に生成することによってユーザの歩行経路をより湾曲させることが可能であると考えられる。したがって、本研究では障害物を生成する手法を用いることとする。障害物が突如出現することにより没入感が低下することを避けるため、実運用にあたってはバーチャル障害物としてシャペロン境界を想起させるオブジェクトを用いることを想定している。バーチャル障害物を生成するタイミングはユーザが歩行可能な範囲の境界から逸脱する可能性が生じたときとする。具体的には、ユーザが歩行可能な範囲の境界から 1 m の地点に到達したときに、進行方向の 1 m 先に半径 1 m の円柱状のバーチャル障害物を表示する。

ユーザの回避行動をシミュレーションするにあたって距離ポテンシャル法を用いた。距離ポテンシャル法では目標



曲率操作

障害物回避操作

図 1: 曲率操作と障害物回避操作の歩行経路。オレンジ色は歩行可能な実空間の範囲 (10m 四方) を、水色線と黒線はそれぞれ VR 空間上と実空間上の歩行経路を示しており、青点は VR 空間上のバーチャル障害物、白色オブジェクトはユーザを表している。

点からは引力、障害物からは斥力を受けるポテンシャル場を計算する。今回は目標点からの引力については距離に拘らず一定とし、障害物から受ける斥力についてのみ距離に反比例することとした。

静止障害物に対する回避行動では、障害物に接触しない範囲の旋回半径で障害物を回避した後、徐々に目標へと歩行経路の修正をおこなう。生成した障害物に対しても同様の回避操作を行うと仮定し、ユーザの進行方向を歩行可能な空間の中心へと誘導するため、障害物を回避する際に 1 を超える曲げゲインを適用し歩行経路の曲率半径を減少させ、目標へと歩行経路を修正する際に 1 未満の曲げゲインを適用することで歩行経路の曲率半径を増加させた。障害物を回避する際に定期要する曲げゲイン g_B は、VR 空間での曲率半径を r として $g_B = 3.22r^{0.207}[-]$ とした。この値は回転量ゲインおよび曲げゲインの閾値を曲率半径に対して累乗近似したものである [1, 2]。また、目標へと歩行経路を修正する際に適用する曲げゲイン g_B は、 $g_B = 0.23[-]$ とした。この値は、実空間での曲率半径 6.25 m 以上に対する曲げゲインの閾値である [2]。

曲率操作と提案手法である障害物回避操作とで、実空間の範囲を超える距離を直進したときの実空間および VR 空間上の歩行経路を図 1 に示す。曲率操作では実空間の境界付近でリセットを行っているのに対して、障害物回避操作ではリセットを伴わずに実空間の中央付近へとユーザを誘導している。

3. シミュレーション実験

提案手法の有効性を検証するため、Redirected Walking Toolkit (RDWT) [4] を基にシミュレーション環境を構築した。歩行可能な範囲は 10 m 四方とし、ユーザが同空間の端から 0.5 m 以内に接近するとリセットを行うこととした。歩行経路として RDWT で用いられている Exploration small (Small), Exploration large (Large), Office, Longwalk を用いた。また、ベースラインとして正方形の歩行可能な空間においてリセット操作の回数を最小化できることが知

表 1: リセット回数

	Small	Large	Office	Longwalk
障害物回避操作	27	6	14	0
S2C	109	100	93	72

表 2: 障害物回避操作回数

	Small	Large	Office	Longwalk
障害物回避操作	28	76	102	116

られているヒューリスティック手法 Steer-to-Center (S2C) を用いることにした [4]。評価指標として、各歩行経路について 1000 m 歩行した際のリセット回数と障害物回避回数を集計した。表 1 にリセット回数を、表 2 に障害物回避回数を示す。いずれの歩行経路においても障害物回避操作ではリセット回数が大幅に減少している。一方で、障害物回避操作回数は目標点間の距離の増大に伴って増加する傾向が見られた。

4. むすび

本研究ではバーチャル障害物に対するユーザの回避行動を用いた Redirected walking の新たな手法を提案した。本手法では、VR 空間上の進行方向 1 m 先に表示された直径 1 m の円型の障害物に対してユーザが回避行動を行う際に曲げ操作を適用することで進行方向を変化させ、歩行可能な実空間の中央へとユーザを誘導することを可能にしている。シミュレーションから、ユーザ体験の低下につながるリセットを大幅に軽減できることがわかった。一方、提案手法は VR 空間上に障害物を表示する必要があるためユーザ体験の低下につながる可能性が考えられる。今後はユーザスタディを通して今回得られたシミュレーション結果の再現性やユーザ体験に及ぼす影響について検証を行う。

参考文献

- [1] Steinicke et al.: Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 16, No. 1, pp. 17–27, 2010.
- [2] Langbehn et al.: Bending the Curve: Sensitivity to Bending of Curved Paths and Application in Room-Scale VR, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 23, No. 4, pp. 1349–1358, 2017.
- [3] 建部謙治, 中島一: 静止した障害物に対する単独歩行者の回避行動: 歩行者の回避行動に関する研究 (I), 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 418, pp. 51–57, 1990.
- [4] Azmandian et al.: The redirected walking toolkit: a unified development platform for exploring large virtual environments, 2016 IEEE 2nd Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR), pp. 9–14, 2017.