



旋回量操作型リダイレクション手法の検討

Study on turning manipulation type redirection method

水谷純也¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾, 廣瀬通孝¹⁾

Junya Mizutani, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, Hideaki Kuzuoka, and Michitaka Hirose

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, {mizutani, matsumoto, narumi, kuzuoka, hirose}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 自然な歩行感覚を提示しながら, 限られた実空間で広大なバーチャル空間を歩き回ることを可能にする, リダイレクションという手法が提案されている. しかし現在提案されている操作ゲインでは, 回転量を操作する際に立ち止まらなると歩行経路にずれが生じてしまう. そこで本研究では, 歩行経路を統制しながら, 立ち止まらずに旋回する際の旋回量を操作する旋回ゲインを提案し, その閾値を検証する.

キーワード: リダイレクテッドウォーキング, 自然な歩行, 旋回ゲイン

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) の分野においても, 歩行は自然な移動手段である. 実空間とバーチャル空間の移動量を一対一に対応づけることで, 高い没入感が得られる [1]. しかしこの手法では, 広大なバーチャル空間を歩き回るために, 同じく広大な実空間が必要になる. この問題に対し, リダイレクションという手法が提案されている [2]. 実空間とバーチャル空間のマッピングを変えることで, 高い没入感を保ったまま, 狭い実空間内で広大なバーチャル空間を歩き回ることができる. このリダイレクションにおける視点操作ゲインとして, 主に並進移動ゲイン・回転ゲイン・曲率ゲインの 3 つがあげられる [3].

バーチャル空間を歩き回るコンテンツや, 建物内の廊下を歩く VR での避難訓練では, ユーザは通路の角を曲がるなど, 何回も旋回することがある. このような VR 体験において, 実空間での歩行経路をあらかじめ決められたように統制するのは重要である. 歩行経路を統制することで, 実物体とのインタラクションによって没入感を向上させたり, 多人数 VR で他者との衝突を防いだりすることができる. 従来のリダイレクションでは, バーチャル空間の旋回量を操作する際, ユーザの歩行に合わせて回転ゲインや曲率ゲインを動的に適用していた. しかし, 曲率ゲインによってユーザの向きを変えるには, 大きな弧を歩く必要がある. また回転ゲインは, 立ち止まって回転している時の回転量に適用されるものであるが, 立ち止まって回転するのは日常の歩行において不自然であり, 没入感を損なう可能性がある [4]. ユーザが立ち止まらずに旋回する際に回転ゲインが適用されることもあるが, この場合, ユーザの位置に合わせて視点操作の回転軸が移動するため, 歩行経路がずれてしまう. そのため, 既存のリダイレクション手法では, 自然に旋回

しながら, 歩行経路のずれなく旋回量を操作するのは困難である.

本研究では, リダイレクションにおける新たなゲインである旋回ゲインを提案する. 従来の回転ゲインのように立ち止まって回転せずとも, 歩行経路のずれなく旋回量を操作することができる. そして, その旋回ゲインにおけるユーザの弁別閾について調査した.

2. 提案手法

本研究では, 立ち止まらずに旋回する際の, 実空間の旋回量に対するバーチャル空間の旋回量の倍率である, 旋回ゲイン g_{TN} を提案する. 旋回ゲインはユーザの方向を変えようという点で回転ゲインと似ている. しかし, 回転ゲインはユーザが立ち止まった際の回転量を操作するものであるのに対し, 旋回ゲインではユーザが移動しながら方向を変えることができる. 旋回ゲインは次のように定義される.

$$g_{TN} := \frac{\theta_{virtual}}{\theta_{real}} \quad (1)$$

$$r = const \quad (2)$$

図 1 に示すように, θ_{real} は歩行経路の円弧の中心を回転軸として実空間で旋回した時の回転量であり, $\theta_{virtual}$ はバーチャル空間で旋回した時の回転量である. r は歩行経路の円弧の半径である.

回転ゲイン g_R を実空間での回転量 R_{real} にかけた時, 図 2(a) に示すようにバーチャル空間のカメラが $g_R \cdot R_{real}$ 回転する. 一方で, 旋回ゲイン g_{TN} をかけた時, 図 2(b) に示すようにバーチャル空間のカメラが R_{real} 回転し, さらに歩行経路の円弧の中心を回転軸として $R_{real} \cdot (g_{TN} - 1)$ 回転する.

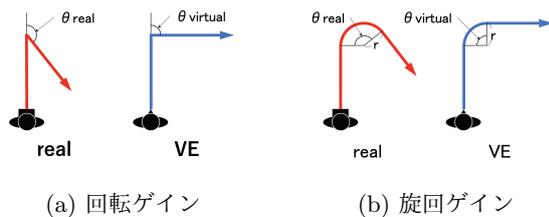


図 1: 回転ゲインと旋回ゲインの模式図

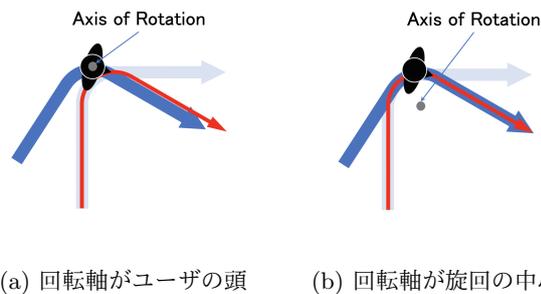


図 2: 回転軸を変更する。薄い青線と濃い青線が、それぞれ視点操作の前後のバーチャル空間での歩行経路を表す。赤線が実空間で想定される歩行経路を表す。

3. 旋回ゲインの閾値検証実験

本研究では、ユーザに気付かれずに視点操作可能な旋回ゲインの範囲を検証する。

3.1 実験概要

実験は 5 m × 4 m の屋内空間で行なった。実験参加者は男性 15 名、女性 3 名（年齢 18–48 歳、平均年齢 30.1 歳）であった。実験参加者の視力または矯正視力は全員正常であった。実験参加者全員が以前にヘッドマウントディスプレイ（HMD）の使用経験があった。いずれの実験参加者も今回の実験に関する事前知識を持たなかった。

今回の実験では、実空間に対するバーチャル空間の旋回量の倍率である旋回ゲインのユーザに気付かれない範囲を評価するために、二肢強制選択法（two-alternative forced-choice task: 2AFC 法）を用いた。実験参加者は、バーチャル空間での旋回量が実空間の旋回量に比べて”小さい”と感じたか”大きい”と感じたかの二択で回答する。本実験は 4 × 9 の参加者内計画で、4 種類の旋回半径 ($r \in \{0.0 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, 1.0 \text{ m}, 2.0 \text{ m}\}$) それぞれに対して、9 種類の旋回ゲイン ($g_{TN} \in \{0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4\}$) を設定した。それぞれの条件で、右旋回と左旋回を 2 試行ずつ、計 4 試行ずつ行った。実験参加者は合計 144 試行を行い、試行順は完全無作為化した。ここで $r = 0$ の時、視点操作手法は回転ゲインとほぼ同じである。提案手法における回転ゲインの閾値を旋回ゲインの閾値の基準として評価した。さらに、ビジュアルアナログスケールを用いて、歩行時の違和感を評価した（0: 違和感は全くなかった, 1: 違和感は非常にあった）。

3.2 実験手順

実験説明、事前アンケートへの記入、練習、実験試行、休憩、事後アンケートへの記入を含めた実験参加者 1 人あたりの実験時間は 2 時間であった。実験参加者は実験に入る前に、年齢・性別・視力・HMD の使用経験についての事前アンケートに回答した。加えて、実験の前後に酔いに関するアンケートである SSQ[5] に回答した。その後、HMD とヘッドフォンを装着し、コントローラを手を持って、視点操作を行わない状況下でバーチャル空間内を歩行する練習を行った。実験試行では、実験参加者は HMD を通して初期位置まで誘導され、そしてバーチャル空間の地面に描かれた線の上を歩行した。線は、1 m の直線部分、それぞれの旋回半径での 90° の円弧部分、1 m の直線部分で構成される。歩行終了後、HMD を通して 2AFC 法及び違和感に関するアンケートが表示され、実験参加者は HMD を装着したままコントローラを使用して回答した。

3.3 実験結果

本実験の 2AFC 法では、旋回ゲインが 1 より小さい時にバーチャル空間の旋回量の方が小さいと答え、旋回ゲインが 1 より大きい時にバーチャル空間の旋回量の方が大きいと答えるのが、正しい答えと言える。ゲインが 1 に近い時は、実空間とバーチャル空間のどちらの旋回量が大きいか判断するのが難しくなるため正答率は 50% 近くになると考えられ、ゲインが 1 から遠ざかるほど判別しやすくなり最終的には正答率は 100% に近くなる。そのため全試行の正答率が 50% を切ることは通常無いが、今回の実験で正答率が 50% 以下の実験参加者が 4 名おり、これらの実験参加者はアンケートの内容を誤って解釈してしまったと考え、これらのデータを除外した。図 3 に、14 名の実験参加者が、それぞれのゲインで”小さい”と回答した確率を示す。感覚強度曲線として、関数: $f(x) = \frac{1}{1+e^{a \cdot x+b}}$ を用いてカーブフィッティングを行なった。実験参加者が全実験試行の 50% で”小さい”と回答した旋回ゲインを主観的等価点 (point of subjective equality: PSE) とした。つまり PSE では、実験参加者は実空間とバーチャル空間の旋回量が等しいと評価したということである。下弁別閾 (DT_{low}) は実験参加者が 75% の確率で”小さい”と答えたゲインと定義する。また上弁別閾 (DT_{high}) は実験参加者が 25% の確率で”小さい”と答えたゲインと定義する。この時、結果は以下ようになった: $r = 0.0 \text{ m}$ (PSE = 0.979, $DT_{low} = 0.602$, $DT_{high} = 1.356$), $r = 0.5 \text{ m}$ (PSE = 0.988, $DT_{low} = 0.686$, $DT_{high} = 1.289$), $r = 1.0 \text{ m}$ (PSE = 0.984, $DT_{low} = 0.795$, $DT_{high} = 1.174$), and $r = 2.0 \text{ m}$ (PSE = 0.923, $DT_{low} = 0.650$, $DT_{high} = 1.196$)。

また歩行時の違和感の結果を、図 4 の箱ひげ図に示す。正規性を検定するために Shapiro–Wilk 検定を行い、仮定が棄却された ($p < 0.01$, $W = 0.930$)。そのため、違和感に対する Friedman 検定をそれぞれのゲインで行ったところ、ゲイン 0.6, 0.7, 0.8, 1.1, 1.2, 1.3 の時に有意差が認められた ($0.6 : p < 0.01$, $\chi^2 = 17.23$; $0.7 : p < 0.01$, $\chi^2 =$

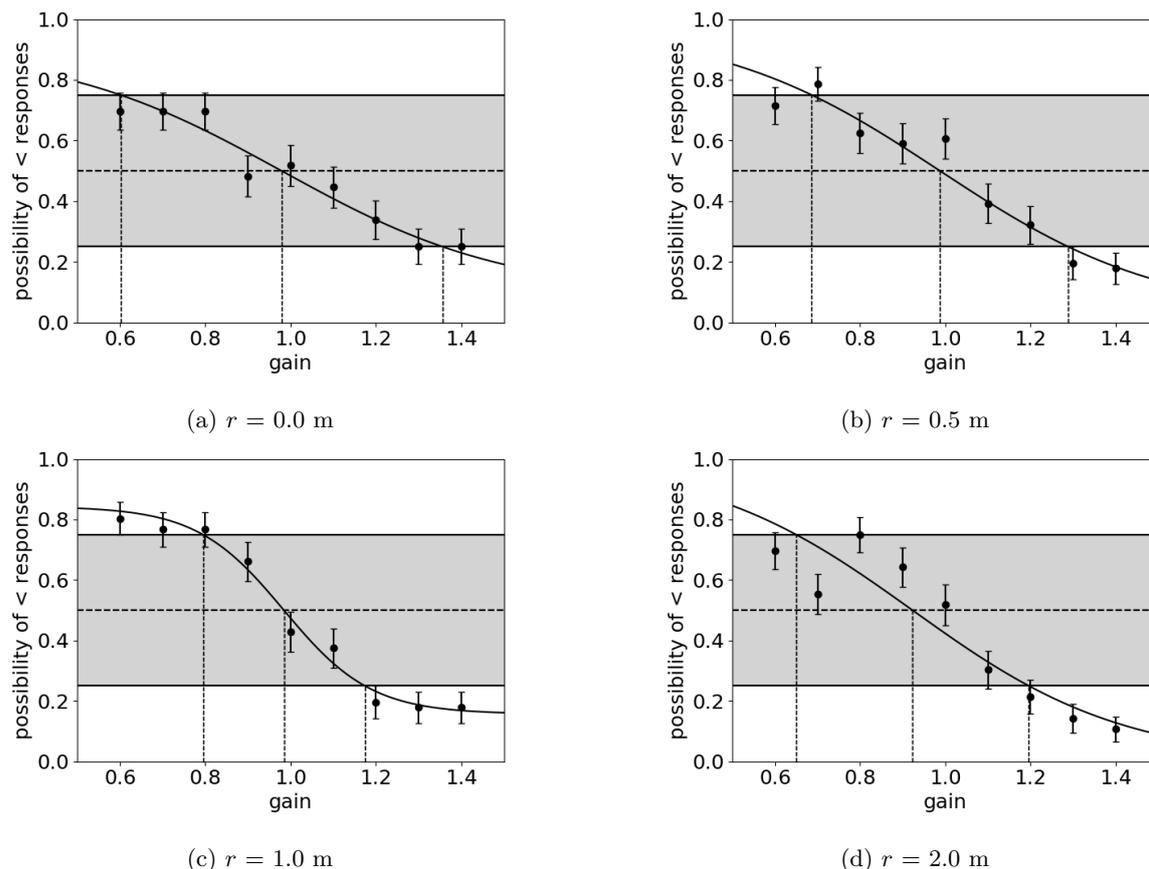


図 3: (a) $r = 0.0$ m, (b) $r = 0.5$ m, (c) $r = 1.0$ m, (d) $r = 2.0$ m における, 実空間での旋回とバーチャル空間での旋回間の弁別結果の感覚強度曲線. x 軸は旋回ゲイン g_{TN} を表し, y 軸はバーチャル空間での旋回量が実空間での旋回量より小さいと評価した確率を表す.

16.03; 0.8 : $p < 0.05, \chi^2 = 9.26$; 0.9 : $p = 0.073, \chi^2 = 6.97$; 1.0 : $p = 0.340, \chi^2 = 3.36$; 1.1 : $p < 0.05, \chi^2 = 7.92$; 1.2 : $p < 0.01, \chi^2 = 14.31$; 1.3 : $p < 0.05, \chi^2 = 8.14$; 1.4 : $p = 0.053, \chi^2 = 7.71$). そこでゲイン 0.6, 0.7, 0.8, 1.1, 1.2, 1.3 の時, それぞれの旋回半径 r 間の違和感に対して, Wilcoxon の符号順位検定により Holm 法で多重比較を行なった. 検定の結果を表 1 に示す. ゲイン 0.6, 0.7, 0.8 においては, $r = 2.0$ m の時の違和感が他の旋回半径の時に比べて有意に上昇した. ゲイン 1.2 においては, $r = 2.0$ m の時の違和感が, $r = 0.0$ m, 1.0 m の時に比べて有意に上昇した. またゲイン 1.3 においては, $r = 2.0$ m と $r = 0.5$ m の間で違和感に有意差が認められた. その他の条件間では有意差は認められなかった.

また, 実験の前後に回答した SSQ のスコアに対して Wilcoxon の符号順位検定を行なったところ, 実験の後のスコアが有意に上昇していた ($p < 0.01; r = 0.932$).

3.4 考察

$r = 0.0$ m の時, ゲインが 0.602 から 1.356 の間においては実験参加者は実空間とバーチャル空間の旋回量の違いを区別することはできなかった. つまり, 実空間の旋回量を, バーチャル空間の旋回量より 66.1%多い, もしくは 26.3%少ない量まで操作することができる. また, PSE = 0.979 で

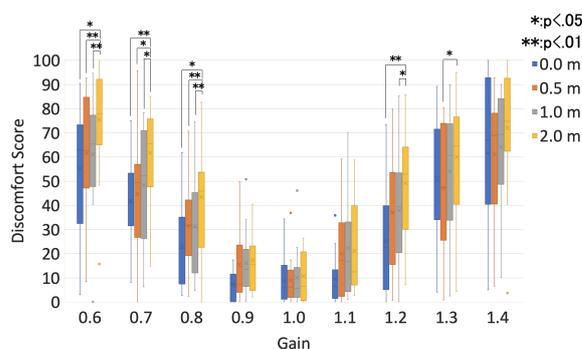


図 4: 違和感のスコア

あることから, 実験参加者はバーチャル空間で 90° 旋回したと知覚した時, 実空間では 91.93° 回転したといえる. つまり, 実験参加者は旋回量を 2.1%過小評価したといえる.

$r = 0.5$ m の時, ゲインが 0.686 から 1.289 の間においては実験参加者は実空間とバーチャル空間の旋回量の違いを区別することはできなかった. つまり, 実空間の旋回量を, バーチャル空間の旋回量より 45.8%多い, もしくは 22.4%少ない量まで操作することができる. また, PSE = 0.988 であることから, 実験参加者はバーチャル空間で 90° 旋回したと知覚した時, 実空間では 91.09° 回転したといえる. つ

表 1: 違和感に対する検定結果

条件の組	p	r
(0.0 m, 0.6) × (2.0 m, 0.6)	$p = 0.00403 *$	0.769
(0.5 m, 0.6) × (2.0 m, 0.6)	$p < 0.001 **$	0.891
(1.0 m, 0.6) × (2.0 m, 0.6)	$p = 0.00122 **$	0.864
(0.0 m, 0.7) × (2.0 m, 0.7)	$p < 0.001 **$	1.027
(0.5 m, 0.7) × (2.0 m, 0.7)	$p = 0.00525 *$	0.746
(1.0 m, 0.7) × (2.0 m, 0.7)	$p = 0.00855 *$	0.703
(0.0 m, 0.8) × (2.0 m, 0.8)	$p = 0.00855 *$	0.703
(0.0 m, 0.8) × (2.0 m, 0.8)	$p = 0.00122 **$	0.864
(0.0 m, 0.8) × (2.0 m, 0.8)	$p = 0.00171 **$	0.838
(0.0 m, 1.2) × (2.0 m, 1.2)	$p < 0.001 **$	0.891
(1.0 m, 1.2) × (2.0 m, 1.2)	$p = 0.00855 *$	0.703
(0.5 m, 1.3) × (2.0 m, 1.3)	$p = 0.00403 *$	0.769

まり、実験参加者は旋回量を 1.2%過小評価したといえる。

$r = 1.0$ m の時、ゲインが 0.795 から 1.174 の間においては実験参加者は実空間とバーチャル空間の旋回量の違いを区別することはできなかった。つまり、実空間の旋回量を、バーチャル空間の旋回量より 25.8%多い、もしくは 14.8%少ない量まで操作することができる。また、PSE = 0.984 であることから、実験参加者はバーチャル空間で 90° 回転したと知覚した時、実空間では 91.46° 回転したといえる。つまり、実験参加者は旋回量を 1.6%過小評価したといえる。

$r = 2.0$ m の時、ゲインが 0.650 から 1.196 の間においては実験参加者は実空間とバーチャル空間の旋回量の違いを区別することはできなかった。つまり、実空間の旋回量を、バーチャル空間の旋回量より 53.8%多い、もしくは 16.4%少ない量まで操作することができる。また、PSE = 0.923 であることから、実験参加者はバーチャル空間で 90° 回転したと知覚した時、実空間では 97.51° 回転したといえる。つまり、実験参加者は旋回量を 7.7%過小評価したといえる。

$r = 0.0$ m の時、視点操作は従来の回転ゲインとほぼ同じである。PSE が 1 より小さいという結果は先行研究の結果とも合致する [6]。先行研究の結果と比較して、操作可能なゲインの範囲は拡大したが、これは機材や環境の違いなどの影響だと考えられ、この得られた閾値を基準として $r > 0$ の時の閾値を考察する。

$r = 0.0$ m, 0.5 m, 1.0 m で比較すると、PSE はほぼ変わらず、 r が大きくなるにつれ、 DT_{low} は大きくなり、 DT_{high} は小さくなった。ここから、 r が大きくなるにつれ、実験参加者が旋回量の違いを区別できないゲインの範囲は狭くなる傾向があることがわかる。一方で、 $r = 2.0$ m の時は PSE が他に比べて小さく、閾値も、先程記した傾向に当てはまらない。さらに図 4 から、 $r = 2.0$ m の時だけ違和感が非常に大きくなってしまっているのが示されている。ここから、 $r = 2.0$ m であると、回転ゲインによる視点操作が

難しいことが分かる。 $r \leq 1$ であれば回転ゲインの操作が可能であり、 r が大きくなるにつれて、ユーザは回転ゲインの操作に気付きやすくなると考えられる。

4. まとめと今後の展望

本研究では、立ち止まらずに回転する際に回転ゲインを適用すると歩行経路がずれるという問題に着目し、新たな視点操作ゲインとして回転ゲインを提案した。回転ゲインは操作の回転軸を歩行経路の円弧の中心に変更することで、従来の回転ゲインと異なり、移動しながら回転しても歩行経路のずれなく視点を操作することが可能である。

実験から、各回転半径における回転ゲインの閾値を調査することができた。回転半径が大きくなるにつれて視点操作可能な範囲は狭くなるが、回転半径が 1 m 以下であれば、問題なく視点を操作できることがわかった。一方で回転半径が 2 m の時に違和感が非常に大きくなってしまった。今後は、回転半径が大きい時に、歩行経路のずれなく視点操作を行う手法を新たに検討する。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究 (B)(19H04149) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Mel Slater, Martin Usoh, and Anthony Steed. Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 2(3):201–219, 1995.
- [2] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C Whitton. Redirected walking. In *Proceedings of EUROGRAPHICS*, volume 9, pages 105–106. Citeseer, 2001.
- [3] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Luv Kohli, Jason Jerald, and Klaus Hinrichs. Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback. In *Cyberworlds, 2008 International Conference on*, pages 217–223. IEEE, 2008.
- [4] Thomas Nescher, Ying-Yin Huang, and Andreas Kunz. Planning redirection techniques for optimal free walking experience using model predictive control. In *3D User Interfaces (3DUI), 2014 IEEE Symposium on*, pages 111–118. IEEE, 2014.
- [5] Robert S Kennedy, Norman E Lane, Kevin S Berbaum, and Michael G Lilienthal. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, 3(3):203–220, 1993.
- [6] 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*, 16(1):17–27, 2010.