



歩行 VR における旋回歩行表現のための ヨー回転前庭刺激の効果に関する研究

海野みのり¹⁾, ヤエム ヴィボル¹⁾, 雨宮智浩²⁾, 北崎充晃³⁾, 佐藤 誠¹⁾, 池井 寧²⁾

Minori UNNO, Yem VIBOL, Tomohiro AMEMIYA, Michiteru KITAZAKI, Makoto SATO and Yasushi IKEI

1) 東京都立大学 (〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, {unno, yem, sato}@vr.sd.tmu.ac.jp)

2) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {amemiya, ikei}@vr.u-tokyo.ac.jp)

3) 豊橋技術科学大学 (〒 441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1, mich@tut.jp)

概要: 本研究では、ヨー回転を含む 4 自由度の前庭感覚ディスプレイ (可動座席) によって、VR 歩行時の旋回歩行感覚の再現を目的とする。調整法により左旋回歩行時に最適なヨー回転刺激量を求め、調整した最適値を用い、歩行感覚の再現強度を評価した。その結果、ヨー回転刺激により、旋回歩行感覚が 1.6 倍~2.2 倍にまで向上することが示唆され、実際歩行時の約 34.2%の再現が可能となった。

キーワード: 歩行 VR, 前庭感覚, 歩行感覚

1. はじめに

VR 技術の発展により、仮想空間 (VR 空間) 内で現実空間に近い経験や現実では体験することが難しい状況を体験することが可能となった。HMD(Head Mounted Display) の普及に伴い、ゲームやアミューズメント施設などのエンターテインメントや研修、訓練といった教育現場、リハビリテーションなどの医療、福祉現場など、多くの場面で VR 技術が使われ始めている。特に、昨今の新型コロナウイルスによるテレワークや外出自粛、オンライン化の影響もあり、VR はより身近な技術となりつつある。

VR 体験の多くは、体験者が HMD を装着し、コントローラなどで直接アバターの操作を行うか、トラッキングによって現実空間での体験者の動きを VR 空間内のアバターに投影することで行われている。これに対し、本研究では、体験者が自ら自分の身体を動かすことなく、VR 空間内で身体を動かしている感覚を再現することを目的とする。身体運動の中でも、人間にとって不可欠な運動である歩行運動に着目し、歩行感覚の再現を目指す。実際の歩行時の感覚を惹起させる刺激提示を行う装置を用い、体験者に刺激を提示することで、あたかも自分が歩いているような感覚を再現する。先行研究では、体験者に歩行時の前庭感覚を提示する座席型の刺激提示装置 (前庭感覚ディスプレイ) が開発され、直線歩行時の歩行感覚を再現することが可能となった [1]。

本研究では、より歩行表現の幅を広げるため、直線歩行に加え旋回歩行時の歩行感覚の再現を目指す。旋回時の身体の運動を再現する手法として、従来の前庭感覚ディスプレイのリフト・ロール・ピッチ運動刺激に、新たにヨー回転運動刺激を加え、旋回歩行感覚の生成を試みた。実験 1 では、旋回歩行感覚に適したヨー回転運動刺激を調整法により求め、実験 2 では実験 1 で求めたヨー回転運動刺激およ

び先行研究で最適化されたリフト・ロール・ピッチ運動を提示した際の旋回歩行感覚を計測した。

2. 刺激提示装置：前庭感覚ディスプレイ

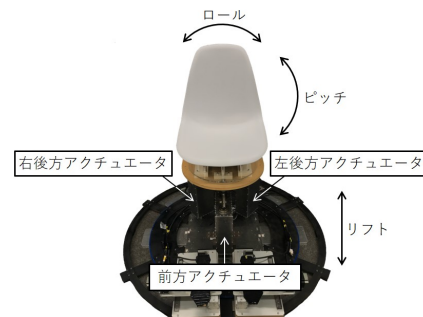
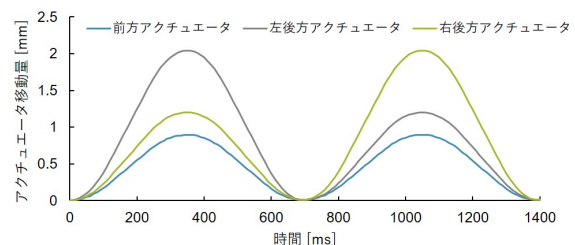
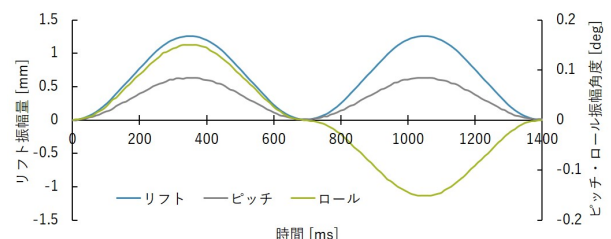


図 1: 前庭感覚ディスプレイ



(a) 各アクチュエータの駆動波形



(b) リフト・ロール・ピッチ量

図 2: 直線歩行表現時の駆動波形

本研究では、着座状態の体験者に実際の歩行運動時と同等の感覚を提示するための前庭感覚刺激提示装置を開発している。図1に、前庭感覚刺激提示装置（前庭感覚ディスプレイ）を示す。これは、リフト、ロール、ピッチおよびヨー軸方向への4自由度の運動を行う可動座席である。座面上部と下部の2つの機構から構成されており、座面下部に設置した3軸のアクチュエータ駆動によってリフト、ロール、ピッチ運動を行う。ヨー回転運動は、座面上部に設置したDCモータによって座面を水平面内で回転させることで行う。直線歩行時の歩行感覚の再現には、座面下部の3軸によって刺激提示を行い、リフト：1.26 mm、ロール：0.15 deg、ピッチ：0.13 degの3つの運動を合成した刺激を提示する[2]。旋回歩行時の歩行感覚の再現には、直線歩行時の前庭感覚刺激に加え、ヨー方向への回転運動を行う。

3. 実験1：ヨー回転運動刺激量の調整

直線歩行時の歩行感覚の再現に加え、旋回歩行時の歩行感覚の再現を行うため、実際の旋回歩行時の感覚に適したヨー回転運動量の調整を行った。左右への旋回歩行は対称と見做し、本実験では左旋回時の旋回歩行を対象とした。これまでも旋回歩行表現のためのヨー回転運動の調整実験を実施したが、2歩分を1刺激とし、変位後には初期位置に戻る対称往復運動での調整であった[3]。本実験では、より実際旋回歩行時に適した調整を行うため、左旋回歩行時の内側(左足)、外側(右足)のそれぞれにおける1歩ずつの調整を行い、往復運動の戻り率についての調整も行った。調整は、閉眼と左旋回歩行時の映像を提示しながらの2条件で行い、閉眼での実験参加者は、学生10名(平均年齢22.8歳)である。映像提示の条件での実験参加者は、学生9名(平均年齢22.0歳)である。

3.1 歩行条件および実験条件

調整対称の旋回歩行の条件は、以下のとおりである。

歩行の種類：左旋回歩行(左足から踏み出す)

歩行周期：700 ms / 歩

歩行軌道：半径2 mの円周一周

ヨー回転運動刺激量の調整は、以下の条件で行う。

視覚(2条件)：閉眼、映像提示(半径2mの円周上を進行する映像)

聴覚：ホワイトノイズにより遮断

前庭感覚：直線歩行に適した刺激を提示

実験参加者は、前庭感覚ディスプレイに着座し、実際の旋回歩行時の感覚と等価になるようコントローラを使用して刺激量の調整を行う。

3.2 実験方法

実験参加者は、まず半径2 mの円周上を実際に左旋回歩行しその際の歩行感覚を記憶する。次に、前庭感覚ディスプレイに着座し、ヘッドホンおよびHMD(映像提示条件の場合)を装着する。続いて、閉眼または映像を見ながら、コントローラを用いて、実際左旋回歩行時の歩行感覚に近づくようヨー回転運動について下記の3項目の調整を、左旋回歩行時の内側(左足)踏み出し時と外側(右足)踏み出し時のそれぞれの足ごとに行う。

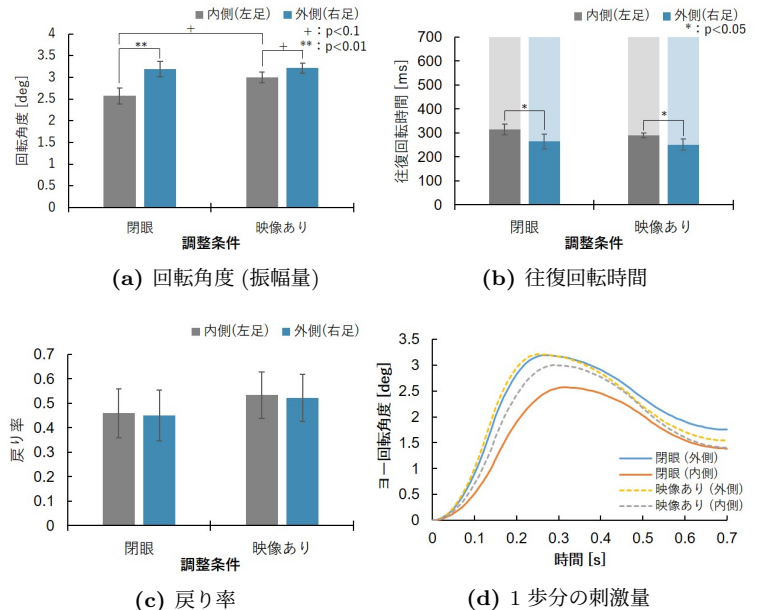


図3: 回転角度・往復回転時間・戻り率の調整結果

(a) 回転角度 (振幅量)

(b) 往復回転時間 (往路と復路の移動時間の合計 700 ms)
往路と復路の回転移動時間の合計を1歩分の歩行周期700msとし、往路の移動回転時間を調整する。

(c) 戻り率 (最大値 1)

往路方向への移動量に対する、復路方向への移動率(戻り率)を調整する。最大値1の場合、常に初期位置に戻る対称往復運動となり、最小値0の場合、往復運動せず一方向のみの移動となる。

調整中は、ヨー回転運動に加え、直線歩行再現時のリフト、ロール、ピッチ運動を組み合わせた刺激提示を行う。実験参加者は、実験中いつでも再度実際旋回歩行を行うことが可能である。聴覚情報はホワイトノイズにより遮断した。

3.3 実験結果

各足(内側・外側)の3項目の調整結果を図3に示す。調整した3項目の平均値は(閉眼 内側/外側(映像あり 内側/外側))、(a) 回転角度(振幅量)[deg]: 2.57 / 3.19 (3.00 / 3.21)、(b) 往復回転時間 [ms]: 314 / 264 (290 / 251)、(c) 戻り率: 0.46 / 0.45 (0.53 / 0.52)となった。各調整項目について、Holm法により視覚情報(2水準)と足(2水準)の2要因で分散分析を行った。その結果、(a) 回転角度において、旋回時の内側外側間に有意差が見られ、内側については調整時の視覚情報間に有意差が見られた。(b) 往復回転時間では、旋回時の内側外側間に有意差が見られた。(c) 戻り率については、有意差は見られなかった。

4. 実験2：旋回歩行感覚の評価

4.1 実験目的と実験参加者

実験1で求めた調整結果(平均値)を最適値とし、その刺激で惹起される旋回歩行感覚の強度を評価する。さらに、調

整時の視覚情報による再現強度の変化を求める。実験参加者は、学生 11 名 (平均年齢 23 歳) である。

4.2 刺激条件および実験方法

刺激条件は、前庭感覚について 4 条件 {A. 4 自由度 (閉眼調整値)、B. 4 自由度 (映像付き調整値)、C. 3 自由度 (ヨ一回転なし)、D. なし}、視覚情報について 2 条件 {閉眼、旋回歩行時の映像提示} の計 8 条件のうち、前庭感覚が D. なしで閉眼時の条件を除いた全 7 条件である。

実験手順は以下のとおりである。

- (1) 歩行周期 1400ms で、直線歩行および半径 2 m の円周上を左/右旋回で実際に歩行し、その際の身体感覚を記憶する。これを標準刺激とする。
- (2) 前庭感覚ディスプレイに着座し、HMD およびヘッドホンを装着する。ホワイトノイズにより聴覚情報を遮断した状態で、7 条件のうちランダム順で選んだ 1 条件の刺激を提示する。
- (3) 刺激を受けた直後、Visual Analogue Scale (VAS) を用い、歩行感覚 { 直線歩行感覚、左旋回歩行感覚、右旋回歩行感覚 } を評価する。
- (4) 上記の (2)~(3) を 7 刺激分繰り返す。
- (5) 7 刺激を 1 セットとし、7 刺激終了後、同じ手順で 3 セット分実験を繰り返す。1 セット終了後は必ず、(1) の身体感覚の記憶から行う。

実験参加者は、実験中いつでも実際の旋回歩行を行い、身体感覚を記憶しなおすことができる。

歩行感覚の評価には VAS を用い、その両端指定は、直線歩行感覚では「歩行している感覚はない」、「実際の直線歩行時と同等」、左/右旋回歩行感覚では「左/右旋回歩行している感覚はない」、「実際の左/右旋回歩行時と同等」である。図 4、5 では、全評価項目において、VAS の左端「歩行している感覚はない」を 0、右端を 100 とした。

4.3 実験結果

図 4 に歩行感覚の評価結果を示す。右旋回歩行感覚については、全条件について全実験参加者とも 0 であったため、記載していない。図 4 より、左旋回歩行感覚と伴に直線歩行感覚も惹起されている。そこで、提示目的の感覚である左旋回歩行感覚 (図 4a) から不要な直線歩行感覚 (図 4b) と右旋回歩行感覚を引いた値を旋回歩行感覚再現度として図 5 に示す。図 5 の旋回歩行感覚の再現度について、Holm 法により前庭感覚 (4 水準) と視覚情報 (2 水準) の 2 要因で分散分析を行った。前庭感覚、映像がともになしの条件は全評価項目において評価結果を 0 であるとし、分析した。その結果、前庭感覚と視覚情報のそれぞれに主効果が見られ、交互作用も認められた。前庭感覚については、A-D 間と B-D 間に有意差が見られた。交互作用が認められたことから、各群の多重検定を行った結果、映像提示ありおよび閉眼での前庭感覚条件間と各前庭感覚条件での視覚情報間において有意差が見られた。映像提示時の前庭感覚については、条

件間で有意差は見られなかったが、閉眼時の前庭感覚については、A-D、A-C、B-C、B-D 間で有意差が見られた。

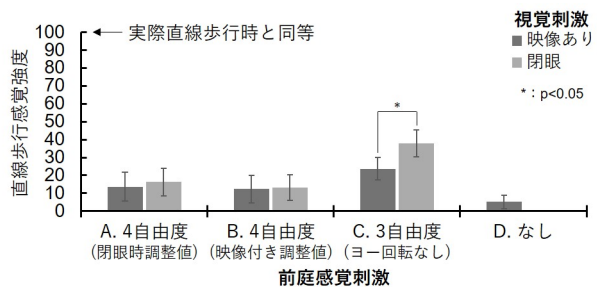
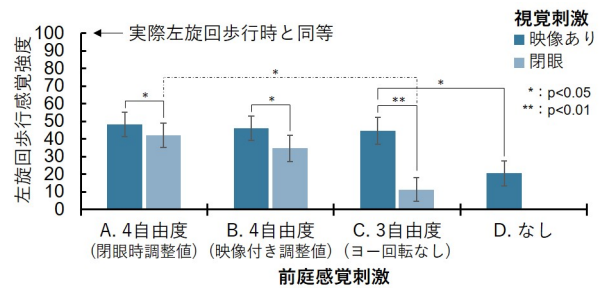


図 4: 歩行感覚の評価結果

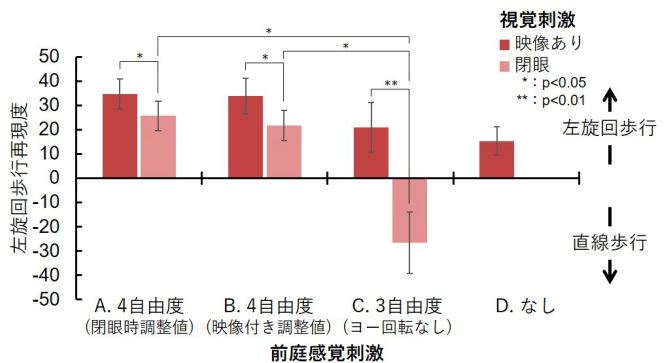


図 5: 左旋回歩行再現度

5. 考察

5.1 実験 1 (適合ヨ一回転刺激量)

左旋回歩行時の歩行感覚に合わせ、ヨ一回転運動の調整を行った結果、図 3a より、(a) 回転角度は、調整時の視覚情報に関わらず、旋回時の外側と内側の足で差が生じ、外側の方が内側に比べ回転角度が大きくなった。この差は、閉眼での調整時の方が大きな結果となった。図 3b より、(b) 往復回転時間は、往路時間の方がやや短く、往路時間の平均は、1 周期 0.7s の 40.0% 程となった。また内側と外側については、回転角度の大きい外側の方が内側よりも往路時間がより短くなった。図 6 に、移動速度を示す。外側の移動速度は、回転角度による速度の増加に加え、回転時間による速度の増加が生じた。これは、人が動きの遅い運動に比べ速い運動をより敏感に知覚するためだと考えられる。進行方向である左方向への移動感覚をより強く感じるために、往路時間を短くし移動速度を復路よりも速く調整し、回転角度の大きい外側ではより短い往路時間になったと考えられる。回転角度の増加だけでなく、回転時間によっても速度を増加させた要因としては、旋回時に外側の感覚を内側よ

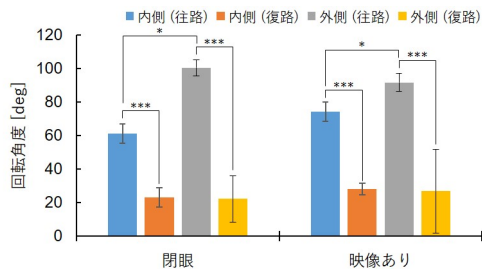


図 6: 回転速度

りも強く感じている可能性が考えられるが、復路方向への移動速度を、内側外側で合わせるために時間を調整した可能性も考えられる。

図 3c より、(c) 往路に対する復路の戻り率は、往路に対し 49.1% 程戻る結果となった。戻り率の最小値である 0 (復路方向へ移動しない) という結果にならなかったことから、旋回歩行の再現には復路運動が必要であることが示唆された。3 項目を調整した結果、左旋回歩行の再現時のヨー回転運動は、左方向へ非対称な往復運動をしながら徐々に移動する運動が選択された。旋回時の内側外側の足の刺激は、外側の方が内側に比べ少し大きく移動する結果となった。これは旋回歩行時に、内側に比べ外側の方が回転半径が大きくなり、移動量が大きいためだと考えられる。右旋回歩行の再現は、調整した左旋回歩行時の刺激と左右対称な刺激を提示することで、可能であると考えられる。

5.2 実験 2

図 5 より旋回歩行感覚の再現度は、座席の運動を 4 自由度としヨー回転運動を加えることで、3 自由度の刺激時と映像のみの場合に比べ高くなることが示唆された。映像がある場合、ヨー回転運動を加えた 4 自由度での再現度の平均は約 34.2% となり、3 自由度での刺激時の 1.6 倍、映像のみの場合の 2.2 倍の結果となった。閉眼での刺激時も、ヨー回転運動を加えることで再現度が高くなっていることから、ヨー回転運動が旋回歩行感覚の再現に効果があると考えられる。歩行感覚の内訳に着目すると、図 4a の左旋回歩行感覚は、映像がある場合、ヨー回転のない刺激条件 C においてもヨー回転のある刺激条件 A、B に近い評価となっていた。しかし図 4b より、左旋回歩行感覚の半分以上の直線歩行感覚も生じていることから、より適切な左旋回歩行感覚の再現には、ヨー回転運動が有効であると考えられる。

一方、刺激条件 C のヨー回転運動のない 3 自由度の刺激時では、映像の有無により再現度に大きな差が生じている。前庭感覚刺激のみの閉眼時は、「直線歩行している」と評価されたが、旋回歩行している映像が提示された場合は、「旋回歩行している」と評価された。閉眼時は、ヨー回転運動を加えた刺激条件 A、B では旋回歩行感覚、刺激条件 C では直線歩行感覚と、提示した前庭感覚と評価が一致していることから、実験参加者の閉眼時の前庭感覚による評価は正しいと考えられる。このことから、前庭感覚刺激と視覚情報 (映像) が異なる場合、視覚情報の方が歩行感覚の生成により大きく関わっていると考えられる。

調整時の視覚条件については、閉眼時の調整値 A と映像付きでの調整値 B とで、旋回歩行感覚の再現度に差が生じなかったことから、どちらで調整を行ってもよいことが示唆された。ただし、図 4a の左旋回歩行感覚のみに着目した場合は、閉眼での歩行 VR 時に閉眼での調整値 A と 3 自由度の刺激条件 C との間に有意差が見られるが、映像付きでの調整値 B と刺激条件 C との間には有意差が見られなかった。このことから、閉眼で調整を行う方が歩行 VR 時の視覚情報に関わらず、常に一定の旋回歩行感覚を再現できたと考えられる。よって、本研究において今後調整実験を行う際は、閉眼での調整を行う予定である。

6. まとめと今後の課題

本論文では、着座状態の体験者に旋回歩行感覚を再現する方法として、ヨー回転運動を含む前庭感覚刺激提示手法を検証した。調整法により旋回歩行時に適した刺激量を求め、調整結果による旋回歩行感覚の再現強度を調査した。その結果、ヨー回転運動により歩行の再現度が高くなることが示唆された。映像提示時の再現度は、ヨー回転運動を加えることで、3 自由度の場合の 1.6 倍、映像のみの場合の 2.2 倍となり、実際歩行時の約 34.2% であった。また調整時の視覚条件は、閉眼、映像提示のどちらにおいても再現度に差がないことが示唆された。

本研究では、実際に歩行を行わず、受動刺激により旋回歩行感覚を再現しているため、実際歩行時の約 34.2% の再現度は低いものではないと考えられるが、さらなる再現度の向上が望ましい。今後は、前庭感覚刺激および映像提示のみではなく、下肢への刺激提示 [4] など多感覚刺激と統合した刺激提示を行い、より高い再現度を目指す。

謝辞 本研究は、総務省 SCOPE(191603003)、JSPS 科研費 (JP18H04118、18H03283)、SCAT、JKA などの支援により実施された。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] Ikei, Y., Abe, K., Hirota, K., Amemiya, T.: A multi-sensory VR system exploring the Ultra-Reality, Proc. Virtual System and Multimedia 2012, pp. 71–78, 2012.
- [2] S. Shimabukuro, S. Kato, Y. Ikei, K. Hirota, T. Amemiya and M. Kitazaki: Characteristics of virtual walking sensation created by a 3-dof motion seat, 2015 IEEE Virtual Reality (VR), pp. 279–280, 2015.
- [3] 海野みのり, 清水広一, 兩宮智浩, 北崎充晃, ヤム ヴィボル, 池井 寧: 旋回歩行感覚生成のための前庭刺激の提示手法, 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, (2020 年 9 月).
- [4] H. Kaneko, T. Amemiya, V. Yem, Y. Ikei, K. Hirota, and M. Kitazaki: Leg-jack: generation of the sensation of walking by electrical and kinesthetic stimuli to the lower limbs, In SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies (SA '18), Article 6, pp. 1–2, 2018.