



## 旋回歩行感覚生成のための前庭刺激の提示手法

海野みのり<sup>1)</sup>, 清水広一<sup>2)</sup>, 雨宮智浩<sup>3)</sup>, 北崎充晃<sup>4)</sup>, ヤエム ヴィボル<sup>1)</sup>, 池井 寧<sup>3)</sup>

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

2) 元首都大学東京大学院 (〒 191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6, shimizu@vr.sd.tmu.ac.jp)

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

4) 豊橋技術科学大学大学院 (〒 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, 身体のヨー回転を含む 4 自由度の前庭感覚ディスプレイ (可動座席) によって, 歩行 VR(Virtual Reality) 時の旋回歩行感覚の再現を目的とする. 直線歩行感覚に加え, 旋回歩行感覚の生成を行うための刺激提示手法として, ヨー回転運動と左右のロール運動を非対称とする運動 (非対称ロール運動) の効果を調査した. 調整法により求めた刺激量を提示し, 左旋回歩行時の旋回歩行感覚の評価を行った. その結果, ヨー回転運動の刺激を加えることで, 旋回歩行感覚を生成し得ることが示唆された.

**キーワード:** 前庭感覚, 歩行 VR, 旋回歩行感覚

### 1. はじめに

本研究では, 着座したユーザが他者の歩行運動状態を体験する歩行 VR の実現を目的とする [1]. 先行研究では, 前庭感覚刺激による直線歩行感覚の生成が行われてきた. しかし, 歩行運動を表現するためには, 直線歩行だけでなく, 旋回歩行の表現も必要である. そこで本稿では, 旋回歩行感覚を生成するための新たな刺激提示手法について述べる. 旋回歩行時に適合する刺激提示運動として, ヨー回転運動および非対称ロール運動を用い, その有用性と旋回歩行感覚への効果について評価を行った.

### 2. システムの構成

本研究では, 着座状態のユーザに歩行運動時と等価な感覚を惹起するための前庭感覚刺激を設計している. 図 1 に本実験で使用した刺激提示装置を示す. これは, リフト, ロール, ピッチおよびヨー回転運動を発生する 4 自由度の可動座席である. 直線歩行感覚の生成には, 歩行周期に合わせて, 調整法により求めたリフト, ロール, ピッチの各運動の合成刺激を図 1 に示すように提示する.

### 3. 刺激提示量の調整

ヨー回転運動および左右のロール運動を非対称とする運動 (非対称ロール運動) による旋回歩行感覚生成への効果を評価する前に, 本装置の刺激提示量を実際旋回歩行時の感覚を惹起するよう調整し, 適合する刺激提示量を求める. 実験参加者は, 装置に着座して, コントローラを用い, (1) ヨー回転運動量, (2) 往復時間比率, (3) 左右の振幅比率, (4) 平均振幅倍率の 4 項目を調整した. 往復時間比率は, 往復ヨー運動の往路と復路の時間比率である. 左右の振幅比率は, 装置後方の左右それぞれのアクチュエータの移動パルスの振幅比率であり, 平均振幅倍率は, 左右両方のアクチュエータ

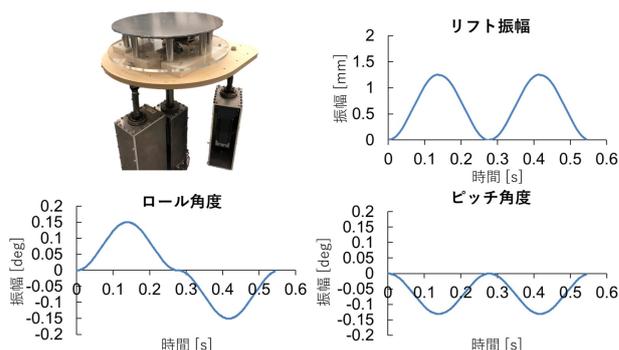


図 1: 4 自由度前庭感覚ディスプレイおよび運動波形

の振幅倍率である. 駆動時は, 2つのアクチュエータの移動パルスに振幅比率 (左/右) と平均振幅倍率をかけたものを入力する.

実験参加者は男子学生 9 人 (平均年齢 23.2 歳) である. まず初めに, 歩行周期 1400 ms で半径 1 m の円周上を左旋回歩行し, その際の身体運動感覚量を記憶する. その後, 前庭感覚ディスプレイに着座し, 上記 4 項目の調整を左旋回感覚に相当するように行った. 調整中は, 閉眼で, ヘッドホンでホワイトノイズを提示しながら行った.

調整した 4 項目のそれぞれの平均値は, (1) ヨー回転運動量: 2.8 deg, (2) 往復時間比率: 377.5 ms, (3) 左右の振幅比率: 左/右 = 0.72/1.31, (4) 平均振幅倍率: 1.22 であった. 調整結果をもとに駆動した, 装置の運動波形を図 2 に示す.

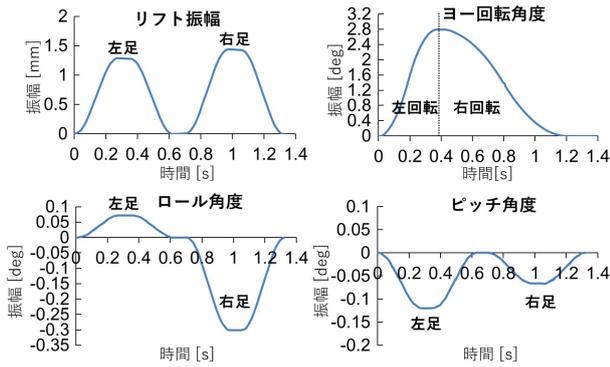


図 2: 旋回歩行提示の調整結果の運動波形

## 4. 旋回歩行感覚の評価

### 4.1 実験目的

リフト、ロール、ピッチ、ヨーの4自由度前庭感覚刺激によって、旋回歩行感覚を生成するための刺激として、ヨー回転運動および左右のロール運動を非対称とする運動(非対称ロール運動)による刺激の有用性を調査した。

### 4.2 実験参加者および提示刺激

実験参加者は学生10名(平均年齢22.8歳)である。

提示刺激は、直線歩行時の前庭感覚刺激として調整された前庭感覚刺激に、ヨー回転運動の有無、後方アクチュエータ(左右)の非対称振幅比率の有無の合計4条件の刺激を加えて、左旋回感覚を表現したものである。全条件において、ホワイトノイズおよび閉眼により、視聴覚情報を遮蔽する。

### 4.3 実験手順および評価内容

実験手順は以下のとおりである。尚、左旋回、右旋回は対称として、ここでは左旋回だけを取り上げる。

- i 歩行周期1400msで直線歩行および、半径1mの円周上を左/右旋回歩行し、その際の身体運動感覚量を記憶する。これを標準刺激とする。
- ii 前庭感覚ディスプレイに着座し、ホワイトノイズおよび閉眼により視聴覚情報を遮蔽した状態で、ランダム順で4条件のうちの1条件の左旋回の刺激提示を行う。
- iii 刺激を受けた直後に、Visual Analogue Scale(VAS)により、歩行感覚(左/右旋回歩行感覚、直線歩行感覚)を評価する。
- iv 上記の2~3を4回繰り返す。

評価には、VAを用い、その両端指定は、左/右旋回歩行感覚では「旋回歩行している感覚はない」、「左/右旋回実際歩行時と同等の歩行感覚」、直線歩行感覚では「歩行している感覚はない」、「直線実際歩行時と同等の歩行感覚」である。全評価項目においてVASの左端を0、右端を100として図にまとめる。

## 4.4 実験結果

### 4.4.1 旋回歩行感覚

歩行感覚(左/右旋回歩行感覚、直線歩行感覚)の評定結果を図3に示す。左旋回歩行感覚を橙色、直線歩行感覚を

灰色、右旋回歩行感覚を青色で示す。それぞれの結果に対し、ヨー回転運動、ロール運動の2要因で、2元配置分散分析を行った。

左旋回歩行感覚は、ヨー回転運動に0.1%有意水準で主効果があり、ロール運動との相互作用が認められた( $F(1,9)=39.67$ ,  $p<.001$ :  $F(1,9)=8.71$ ,  $p=.0162$ )。多重比較を行った結果、非対称ロール運動および対称ロール運動時のヨー回転運動に有意傾向と0.1%有意水準で有意差があり( $F(1,9)=4.29$ ,  $p=.0683$ :  $F(1,9)=52.71$ ,  $p<.001$ ,  $p=.0162$ )、ヨー回転運動がない場合にロール運動間に5%有意水準で有意差があった( $F(1,9)=8.09$ ,  $p=.0193$ )。左旋回歩行感覚は、ヨー回転運動がある場合向上した。ヨー回転運動がない場合は非対称ロール運動により、左旋回歩行感覚が向上したが、同時に直線歩行感覚も知覚され、知覚された直線歩行感覚よりも低い結果となった。また、ヨー回転運動がある場合は、非対称ロール運動による旋回歩行感覚の向上はみられなかった。

右旋回歩行感覚は、どちらの要因に対しても有意差がみられず、全条件において0~2%ほどであった。

直線歩行感覚は、ヨー回転運動に1%有意水準で主効果が認められた( $F(1,9)=14.37$ ,  $p=.0043$ )。つまり、ヨー回転運動で直線歩行感覚は減少した。ロール運動間には有意差はみられず、ヨー回転運動とロール運動との相互作用は認められなかった。

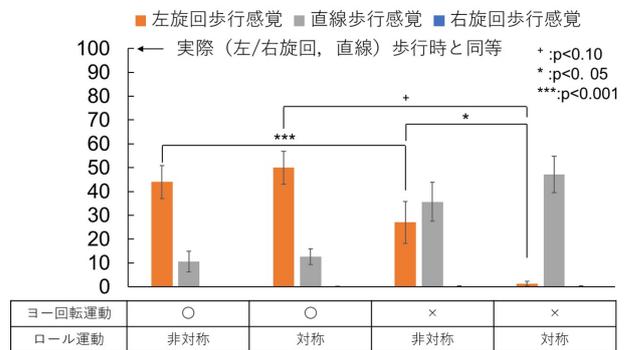


図 3: 歩行感覚の評定結果 (N=10)

### 4.4.2 能動感・受動感

歩行VR時の体験を自分の体験と思うためには、自分で体を動かしているという能動感があることが望ましい。そのため、今後の課題の予備評価として、上記の実験時に歩行感覚の評価に加え、旋回歩行VR時の能動感および受動感の評価も合わせて行った。

評価方法は歩行感覚の評価と同様に、VASを用い、両端指定は、能動感では「全くない」、「自分の意志で身体を動かしている」、受動感では「全くない」、「自分の意志に関係なく身体が動かされている」とした。

左端を0、右端を100とした能動感の評定結果を図4、受動感の評定結果を図5に示す。それぞれの結果に対し、ヨー回転運動、非対称ロール運動の2要因で、2元配置分散分析を行った。能動感は、どちらの要因に対しても有意差がみられず、全条件において20~28%ほどであった。

受動感は、ヨー回転運動に 5%有意水準で主効果が認められ ( $F(1,9)=6.73, p=.0291$ ), ヨー回転運動により受動感が高まる結果となった。

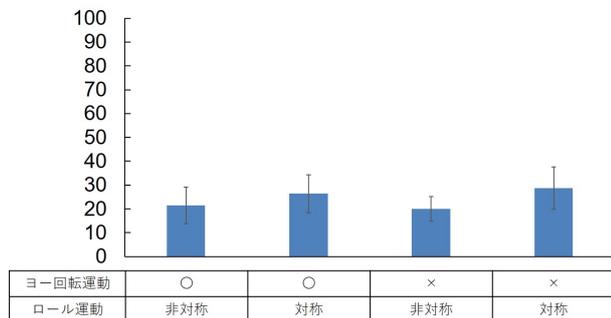


図 4: 能動感の評定結果 (N=10)

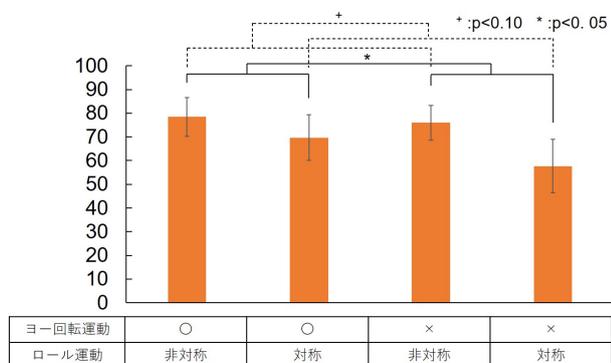


図 5: 受動感の評定結果 (N=10)

## 5. 考察

### 5.1 旋回歩行感覚

本実験では、ヨー回転運動と非対称ロール運動による左旋回歩行感覚の生成を検討した。実験結果より、ヨー回転運動を加えることで左旋回歩行感覚を生成することが示唆された。ヨー回転運動時の左旋回歩行感覚は約 50%であり、ヨー回転運動により、実際左旋回歩行時の約 50%の旋回歩行感覚を生成することが可能となった。左旋回歩行時の前庭感覚と対称となる刺激提示を行うことで、右旋回歩行感覚の生成も可能となると考えられる。

また、ヨー回転運動および非対称ロール運動のない場合では、直線歩行感覚が約 47%であった。したがって、リフト、ロール、ピッチ運動による前庭感覚刺激のみによる刺激提示では、実際の直線歩行時の約 47%の歩行感覚の生成が可能であることがわかった。

今後は、ヨー回転運動による刺激提示量の調整や、視聴覚刺激や、下肢、上肢への刺激提示 [2][3] との組み合わせによって、さらに多くの情報を与えることにより、実際歩行時に近い感覚を生成することが可能であると考えている。

### 5.2 能動感・受動感

能動感は、平均 20~30%であり、ヨー回転運動および非対称ロール運動による能動感の変化はみられなかった。受動感は、ヨー回転運動または非対称ロール運動を加えた場合、約 70~78%であり、最も低くなったヨー回転運動がなく、対称ロール運動の場合で 57.7%であった。受動感が高い原因として、ヨー回転運動の刺激量の調整が不十分であることや、刺激が前庭感覚刺激のみであることが考えられる。ヨー回転運動がなく、ロール運動が対称である場合は、図 1 で示したリフト、ロール、ピッチ運動の合成刺激による直線歩行 VR 時の刺激提示となる。実際歩行時の能動感および受動感は、能動感が 70%、受動感が 20%であるとされているが [4]、前庭感覚刺激のみの刺激提示では、能動感 28.7%、受動感 57.7%であった。歩行 VR 時の感覚をより実際歩行時の感覚に近づけるためには、能動感の向上と受動感の低下が今後の課題となる。

解決策として、ヨー回転運動による刺激提示量の調整や、映像、聴覚提示および前庭感覚刺激以外の身体感覚の提示を合わせて行うことが考えられる。また、刺激提示前に映像等で運動のイメージを持たせることで、能動感を向上できると考える [5]。さらに、刺激開始のタイミングを体験者が自ら決定できるようにすることで、能動感の向上につながるのではないかと考える。今後は上記の方法を検討し、能動感の向上および受動感の低下を目指す予定である。

## 6. むすび

本研究では、着座状態のユーザに旋回歩行感覚を生成する方法として、ヨー回転運動と非対称ロール運動の刺激提示手法を検証した。調整法により刺激提示量を調整し、それに対応する旋回歩行 VR 時の旋回歩行感覚を調査した。その結果、ヨー回転運動は旋回歩行感覚の生成に効果があることが示唆された。

ただし、歩行 VR 時の能動感は約 20~28%、受動感は約 57~78%と、能動感が低く受動感が高い結果となった。原因として、刺激提示量の調整が不十分であることや、提示刺激が前庭感覚刺激に限定され、実際歩行に含まれる視覚情報がない点の効果も大きいことが考えられる。

今後は、刺激提示量の調整を行い、より実際歩行時に近い、旋回歩行感覚および直線歩行感覚の生成を目指す。また、視聴覚刺激の追加や刺激開始のタイミングを体験者が入力する方法により、能動感の向上および受動感の低下を目指す。

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 Multi Media 2012, pp. 71-78, 2012.
- [2] Hirofumi Kaneko, Tomohiro Amemiya, Vibol Yem, Yasushi Ikei, Koichi Hirota, and Michiteru 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), pp. 12, 12 2018.
- [3] Saka N., Ikei Y., Amemiya T., Hirota K., Kitazaki M.: Passive arm swing motion for virtual walking sensation, ICAT-EGVE '16: Proceedings of the 26th International Conference on Artificial Reality and Telexistence and the 21st Eurographics Symposium on Virtual Environments, pp. 1723., 2016.
- [4] 清水広一, 池井寧, Yem Vibol, 雨宮智浩, 北崎充晃 : 歩行の身体的追体験における能動性と受動性に関する研究, 2018 年度第 1 回 VR と超臨場感研究会, pp. 17-18, 2018.
- [5] 海野みのり, 清水広一, 雨宮智浩, 北崎充晃, ヤム ヴィボル, 池井 寧 : 歩行 VR の能動/受動感覚・歩行感覚への歩行イメージの効果, 2019 年度第 1 回 VR と超臨場感研究会, pp. 7-8, 2019.