

ショートペーパー (基礎)

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} 池井 寧^{*2}

Yaw-rotational Vestibular Stimulation for Virtual Turning Walking

Minori Unno^{*1} Yem Vibol^{*1} Tomohiro Amemiya^{*2} Michiteru Kitazaki^{*3} Yasushi Ikei^{*2}

Abstract – The objective of the present study is the creation of sensation under turning walking using a vestibular display (a motion seat). We added a yaw-rotation mechanism to our three degrees of freedom (3-DOF) motion seat, with which we investigated the contribution of yaw rotation for the turning walking sensation. After an equivalent stimulus of the seat's yaw rotation to a real left-turn walking was determined, the virtual turning walking sensation was rated by the user study. The result suggested that yaw rotation stimulation improved the sensation of turning walking by 1.6 to 2.2 times to the 3-DOF seat; the motion generated about 34.2% sensation of the actual walking.

Keywords : 旋回歩行, 前庭感覚ディスプレイ, ヨー回転, 歩行感覚

1 はじめに

VR (virtual reality) 空間を一人称で体験するとき空間内の移動に伴う身体感覚は重要¹である。体験者自身の実際の身体の運動(能動歩行)をVR空間での視点移動の根拠とすれば視野情報の変化と身体感覚が対応するが, VR空間の乗り物搭乗や他者の視点(遠隔または過去空間)を体験する(追体験[1])ときは対応が不成立²で, 一人称体験の知覚としての統合は困難となる。本研究は後者の場合, 即ち実際の自己身体の能動運動の情報に依拠せず, 遠隔や過去の空間の体験を一人称体験とするために, バイタルな身体運動感覚を付与する前庭感覚ディスプレイの提示手法を探索する。特に身体運動の中で多くのタスクに不可欠な歩行運動の感覚を対象とする。

実際の歩行による歩行感覚のVR利用は多数議論されている[2]が, 歩行せずに歩行の身体感覚を惹起させる手法は映像[3], 足底振動[4, 5]など限定される。我々は前庭感覚, 固有感覚, 触覚の刺激装置を開発し, 直線歩行感覚を再現した[1]。本研究では, 直線歩行だけでなく旋回歩行の感覚を実現するため, 構築した座席型の前庭感覚ディスプレイ(リフト・ロール・ピッチ運動)に新たにヨー回転運動を加え, 旋回歩行感覚の生成特性を調べた。

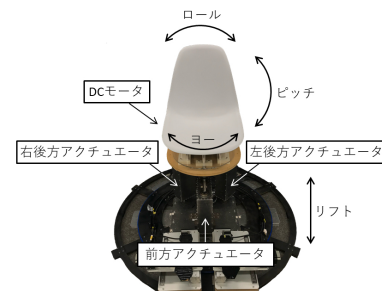


図1: 前庭感覚ディスプレイ
Fig.1 Vestibular display

2 刺激提示装置: 前庭感覚ディスプレイ

著者らは着座した体験者に立位の歩行運動と等価な感覚を提示する前庭感覚ディスプレイを開発した(図1)。これは, リフト, ロール, ピッチおよびヨー軸周りの4自由度を持つ可動座席である。座面直下に設置したDCモータが座面を水平面内で回転してヨー運動を提示し, 基部の3軸の直動アクチュエータが座面のリフト, ロール, ピッチ運動を行う。旋回歩行感覚の生成には, 直線歩行時の基部3軸運動に加えて, ヨー軸回転を用いる。この装置に着座して受ける感覚は, 左右のバーチャルな脚が遊脚相になる際の交互の持ち上げ運動³に相当する感覚(体幹の固有感覚)を含み, それに伴う姿勢反射も誘発する。故に前庭感覚だけを刺激するものではないが, ここでは慣例に従い前庭感覚ディスプレイと称して議論する。

^{*1}東京都立大学大学院

^{*2}東京大学大学院

^{*3}豊橋技術科学大学

^{*1}Tokyo Metropolitan University

^{*2}The University of Tokyo

^{*3}Toyohashi University of Technology

¹視覚だけの空間移動体験は多くの場合に著しい酔いを伴う

²自己の能動運動の随件事象ではないため

³ロール回転とリフト・ピッチの連動運動で片足が上がる感覚

3 実験1：ヨー回転運動の等価刺激

3.1 目的と実験参加者

旋回歩行の感覚を惹起するヨー回転運動の主観的等価値を調整法で得る。左右方向は同等として左旋回を考え、実験参加者が実際に行った左旋回歩行を標準刺激とする。旋回の内側足（バーチャル左足）と外側足（バーチャル右足）に相当するヨー回転往復波形の往路回転角と時間、復路回転角比率（戻り率）を求める。学生10名（平均年齢22.8歳）が閉眼条件、9名（同22.0歳）が映像提示条件で実験に参加した。

3.2 標準刺激と提示条件

標準刺激は、左旋回（左足から踏み出す）、歩行周期0.7 s（1歩）、半径2 mの円周軌道一周である。等価値探索時の視覚条件は、閉眼と映像提示（半径2 mの円周上を進行する映像）の2条件である。基部3軸の提示は直線歩行に等価な運動[6]である。聴覚はホワイトノイズで遮断した。

3.3 手順

実験参加者は最初に標準刺激を実行し、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を装着しコントローラを持つ。映像提示条件の場合は頭部搭載ディスプレイ（VIVE Pro, HTC）も装着する。閉眼と映像提示下で、次のヨー回転特徴3項目の等価値を両側（左右足）について求める。

- 往路回転角度
- 往路時間率（ただし往復の合計時間: 0.7 s）
- 復路戻り率⁴（最大値1.0）

実験参加者には、調整中に再度の標準刺激（実際旋回歩行）を確認可能と指示した。

3.4 実験結果

両足（内側、外側）の3項目の調整結果と1歩分のヨー回転角度波形を図2、3項目の平均値を表1に示す。誤差棒は標準誤差である。視覚情報と内外側の2要因の分散分析の結果、(a) 回転角度は内外側に主効果があり ($p=0.0004$)、外側が内側より大きい。交互作用も認められ ($p=0.0473$)、閉眼条件では外側が内側より有意に大きくなり ($p=0.0027$)、映像提示条件では有意傾向で大きい ($p=0.0909$)。また内側は、閉眼条件が映像提示条件より有意傾向で小さい ($p=0.0789$)。 (b) 往路時間率は内外側に主効果があり ($p=0.0303$)、有意に内側が大きい。 (c) 戻り率は有意差はない。

4 実験2：旋回歩行感覚の評価

4.1 目的と実験参加者

実験1で得られた等価値を提示したときの旋回歩行感覚量を得る。実験参加者は、11名（平均年齢23.0歳

⁴往路の回転角に対する復路の回転角の比率。戻り率が最大値1.0の場合、初期位置に戻る対称往復運動。最小値0の場合、復帰しない一方向への回転。

表1: 往路回転角, 往路時間, 戻り率
Table 1 Outward angle, time, return ratio

	閉眼		映像提示	
	内側	外側	内側	外側
往路回転角 (deg)	2.57	3.19	3.00	3.21
往路回転時間 (ms)	314	264	290	251
戻り率	0.46	0.45	0.53	0.52

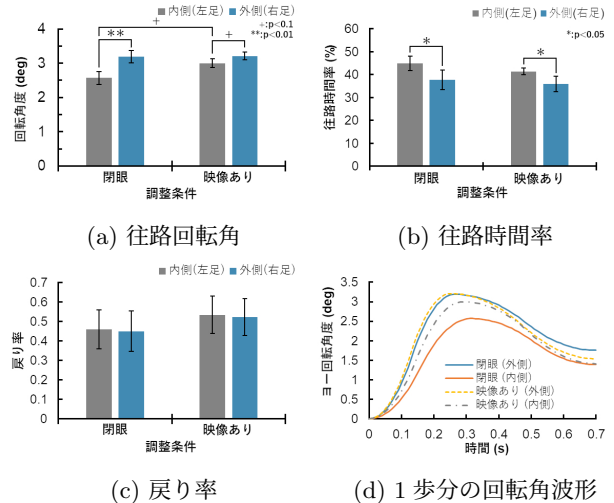


図2: 往路回転角, 往路時間率, 戻り率, 軌道

Fig.2 Outward angle, time ratio, return ratio, trajectory

の学生)である。

4.2 刺激および実験方法

刺激は前庭感覚の4水準{A. 4自由度(閉眼調整), B. 4自由度(映像付き調整), C. 3自由度(ヨー回転なし), D. なし}, 視覚情報の2水準{閉眼, 旋回歩行映像}で, Dかつ閉眼を除く7条件である。聴覚をホワイトノイズで遮断し, 以下の手順で実施した。

- 標準刺激（歩行周期0.7 s（1歩）で、直線の実際歩行および半径2 mの円周上の左/右旋回の実際歩行）の身体感覚を記憶する。
- 前庭感覚ディスプレイに着座し、ヘッドホンおよび頭部搭載ディスプレイを装着する。7条件の刺激をランダム順で提示する。
- 刺激提示直後に歩行感覚{直線歩行感覚, 左旋回歩行感覚, 右旋回歩行感覚}を, Visual Analog Scale (VAS) で評価する。
- 上記の(2)~(3)を7条件について繰り返す。
- 7条件を1セットとし, 3セット繰り返す。1セット終了後, (1)の標準刺激を提示する。

実験参加者は、任意時点で標準刺激（実際の旋回歩行）を確認（身体感覚を再度記憶すること）できる。

VASの両端は、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

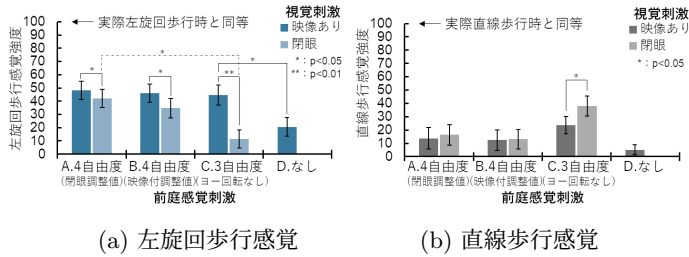


図 3: 歩行感覚の強度
Fig. 3 Intensity of walking sensation

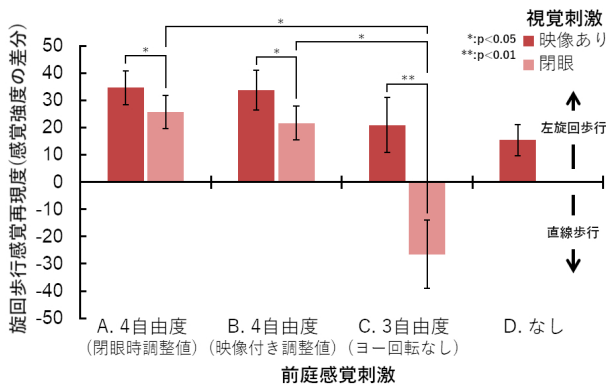


図 4: 感覚強度の差分 (旋回感覚 - 直線感覚)
Fig. 4 Difference of sensation

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」とした。

4.3 実験結果

図 3 は歩行感覚の強度 (VAS の左端を 0, 右端を 100) だが, 右旋回歩行感覚は全条件で 0 のため記載しない。誤差棒は標準誤差である。歩行感覚 (左旋回, 直線), 前庭刺激条件, 視覚条件の 3 元分散分析で全主効果は有意 ($p=0.0084$, $p=0.0001$, $p=0.0012$) で, 左旋回歩行感覚は直線歩行感覚より有意に高い。多重比較 (Holm 法 5%水準) で, 歩行感覚は D より A, B, C が高い。

惹起された歩行感覚は直進成分と旋回成分を含むため, 左旋回歩行感覚 (a) から直線歩行感覚 (b) を引いた感覚強度の差分を旋回感覚表現の効果と定義し, 図 4 に示す。前庭感覚 (4 水準) と視覚条件 (2 水準) の分散分析 (2 要因, Holm 法 5%水準) によれば, 前庭感覚と視覚条件の両者に主効果 ($p=0.0004$, $p=0.0007$), さらに交互作用 ($p=0.0002$) が見られた。多重比較の結果, $A>D$, $B>D$ となりヨー回転が左旋回歩行感覚を高めた。A, B, C, D において視覚条件に単純主効果があり ($p=0.0191$, $p=0.0299$, $p=0.0012$, $p=0.0221$), 映像提示により左旋回歩行感覚が向上した。映像提示条件と閉眼条件での前庭感覚に単純主効果があった ($p=0.0404$, $p<0.0001$)。映像提示時の前庭感覚は, 多重比較で有意差が生じなかったが, 閉眼時の前庭感覚は, $A>D$, $A>C$, $B>C$, $B>D$ となった。

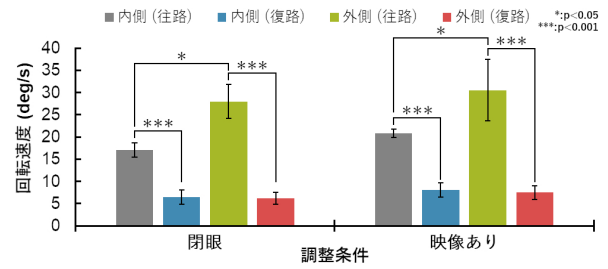


図 5: 平均回転速度 (絶対値)
Fig. 5 Mean rotation speed (absolute value)

5 考察

5.1 実験 1: ヨー回転の等価刺激

左旋回歩行時の感覚を与えるヨー回転の往路は, 図 2a より最大で 3.2 度であった。一方, 実際歩行時の体幹の方位回転を計測したところ, 一周平均 24 歩の安定歩行時では 15 度であることが明らかとなり, この回転角度は明確に小さい。この等価運動の縮小は受動的刺激で能動運動感覚を合成するときに固有の現象で上下方向の変位 [7] や他の感覚 [6] でも確認された感覚抑制の特性 [8] と考えられる。前庭刺激は逆回転 (戻り率で表記) も含むため, 下で再度議論する。

この往路回転角 (図 2a) は, 調整時の視覚条件に関わらず, 外側が内側より大きかった。これは実際の旋回歩行時の外側の軌道半径が内側より大きく, 足の移動量が大きいと考えられる。閉眼での等価値が映像提示下よりも内外側の回転角の差が大きい理由として, 映像だけでも旋回感覚が得られ, 内外側の回転量の差への依存が減少したことが推測される。

図 2b で往路回転時間は復路より短く, 1 周期 0.7 s の平均 40.0%であった。また外側は回転角度が大きいにも関わらず, 内側より往路時間が短かった。そこで図 5 に, 平均回転速度の絶対値を示す。左旋回感覚を得るために, 内外側とも往路 (左方向) の回転速度 (加速度) を復路 (右方向) より明確に大きくしたと考えられる。さらに外側は上記の理由 (角度大, 時間短) から内側より顕著に大きい。知覚容易な加速度も同様の傾向となる。これは実際の旋回歩行で, 外側の足の方位と着地点を変える運動の負荷 (筋力と意識下の身体制御) が内側より大きいことを反映したと推測される。

図 2c より戻り率は, 往路回転角の平均 49.1%であった。しかし実際歩行時に計測された体幹の方位は, 戻る回転を含まないのでヨー回転の戻り率は 0%に相当し, 復路は不要と考えられる。それにも関わらず復路があるのは, 脚が前後に往復運動し, 前方に踏み出した右足が体幹の進行で後になり, 骨盤が右に回転するのが原因と推測できる。つまり体幹の方位 (身体座標

系)に対して骨盤が往復ヨー(振れ)運動している⁵ことが根拠と考えられる。この振れ感覚の等価回転量(戻り率)は1.0ならば左旋回の踏み出し時の体幹の回転を全て元に戻す刺激となるがこれは実際歩行に非等価、0なら脚の後退(振れ)がなく非等価で、その間となると考えられる。戻り率の大きさを決定する理論は見出していないが、上記の両端の非等価刺激を同等に忌避した結果で丁度中点が選択されたと見做せる。

5.2 実験2: 旋回歩行感覚の評価

図3aの左旋回歩行感覚は、映像がある場合、前庭感覚刺激条件A, B, C間に有意差はなく全て高い。しかし図3bより、ヨー回転のない条件Cの3自由度運動では、不要な直線歩行感覚強度が左旋回歩行感覚の53.0%もあり、ヨー回転運動が有効と考えられる。

条件Cは、映像の有無で歩行感覚が顕著に異なった。閉眼では、直線歩行感覚が予想通り大きかったが、旋回する映像がある場合は、明確な視覚優位で旋回歩行感覚が直線歩行感覚に卓越した。

図4より旋回歩行感覚と直線歩行感覚の差分は、4自由度の前庭感覚刺激の採用で平均値は上昇しているが誤差が大きく、映像がある場合には多重比較の基準では有意水準になっていない。閉眼の場合に、ヨー回転を入れるAおよびBで明確に左旋回歩行感覚がCより高まることから、前庭感覚への旋回感覚の等価刺激は有効と考えられる。また、それとほぼ同程度の効果を映像刺激が有していると考えられる。しかし映像のみのDでは低い旋回感覚のため、少なくとも3自由度の前庭感覚を加えることが有効である。一方で、旋回する映像は非常に酔い易い、注意水準を高める特性を有すること、そしてそのために他の感覚をマスクし易い傾向であったことも付記する。

明確な有意差は認められていないが、傾向は認められるため平均値で要約すると、映像提示時、ヨー回転運動を加えた4自由度の等価度は約34.2%で、3自由度の1.6倍、映像のみの場合の2.2倍である。従来使われている映像だけのVR体験と比べて旋回歩行の表現は大きく向上したと考えられる。

等価値探索時の視覚条件(閉眼調整値条件Aと映像付き調整値条件B)は、旋回歩行感覚の等価度に差がなかったため、映像なしの調整で有効であることが示唆された。

6 まとめと今後の課題

本研究では、ヨー回転運動を含む前庭感覚刺激の提示で着座姿勢の体験者に旋回歩行感覚を生成する際の特性を調べた。その結果、ヨー回転運動で旋回歩行感覚の等価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自由度時の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。また提示量の調整では、閉眼と映像提示下とで等価度が同等であった。

本研究の手法は、実際歩行とは姿勢が全く異なり、能動運動でなく、歩行の中心的役割となる足の固有感覚および触覚も用いていない。その中で、前庭感覚を中心とした受動刺激で旋回歩行感覚を惹起させた結果の上記の再現度は十分に大きな効果と認識している。今後の課題は、下肢固有感覚、触覚の刺激を含む多感覚刺激の統合の効果を明らかにし、歩行感覚をさらに高めることである。

謝辞

本研究は、総務省SCOPE(191603003)、JSPS科研費(JP18H04118, 18H03283)、JKAの支援で実施された。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 池井 寧, 広田光一, 阿部浩二, 雨宮智浩, 佐藤 誠, 北崎充晃, 身体的追体験の概念の提案と一部機能の試験実装—多感覚・運動情報提示による歩行・走行体験の共有, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24(2), 153-164, (2019.6)
- [2] Iwata, H., Yano, H., and Nakaizumi, F., Gait master: A versatile locomotion interface for uneven virtual terrain, Proc. IEEE Virtual Reality, 131-137, (2001.3)
- [3] Lécuyer, A., Burkhardt, J. M., Henaff, J. M., Donikian, S., Camera motions improve the sensation of walking in virtual environments, Proc. IEEE Virtual Reality Conference, 11-18, (2006.3)
- [4] Terziman, L., Marchal, M., Multon, F., Arnaldi, B., Lécuyer, A., The King-Kong effects: Improving sensation of walking in VR with visual and tactile vibrations at each step, Proc. 2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), (2012.3)
- [5] Matsuda, Y., Nakamura, J., Amemiya, T., Ikei, Y., Kitazaki, M., Enhancing Virtual Walking Sensation Using Self-Avatar in First-Person Perspective and Foot Vibrations. Front. Virtual Real. 2:654088. (2021.4)
- [6] Shimizu K. et al., Rendering of Virtual Walking Sensation by a Vestibular Display. In: Yamamoto S., Mori H. (eds) Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems. HCI International 2019, (2019.6)
- [7] Amemiya, T., Kitazaki, M., Ikei, Y., Pseudo-sensation of walking generated by passive whole-body motions in heave and yaw directions, IEEE Trans. Haptics, 13(1), 80-86, (2020.3).
- [8] Wolpe N, Zhang J, Nombela C, Ingram JN, Wolpert DM; Cam-CAN, Rowe JB., Sensory attenuation in Parkinson's disease is related to disease severity and dopamine dose. Sci Rep. 23;8(1):15643. (2018.10)

(2021年9月13日受付)

⁵旋回歩行時の光学式運動計測の結果