

歩行中の進行方向のズレと左右非対称な眼球運動 Asymmetric eye movements represent the walking deviation

平田 貴士^{1, a}, 山中 都史美², 田所 慎^{1, 3, 4}, 宮本 健史¹
Takashi Hirata, Toshimi Yamanaka, Shin Tadokoro, and Takeshi Miyamoto

¹名古屋大学 大学院情報学研究科, ²中部大学 大学院工学研究科,

³防衛医大・耳鼻咽喉科, ⁴航空自衛隊

¹Graduate school of Informatics, Nagoya University, ²Graduate school of Engineering, Chubu University,

³Otolaryngology, Head and Neck Surgery National Defense Medical College, ⁴Japan Air Self-Defense Force

^a hirata.t@cog.human.nagoya-u.ac.jp

概要

暗闇での直進歩行は困難であり、これは視覚以外の感覚、特に前庭感覚に基づいて進行方向を正確に推定できていないことを示唆している。進行方向の推定に用いられる前庭感覚は、歩行中の頭部回転と逆側に眼を動かす前庭動眼反射（VOR）の誘発にも関与している。本研究では歩行中の前庭感覚から推定される進行方向の結果が VOR に現れることを示した。具体的には左右の VOR の精度（ゲイン）に非対称性が見られ、VOR ゲインが低いときの頭部回転側へ軌道が逸れることが明らかとなった。

キーワード: ナビゲーション, 空間認知, 眼球運動, VR

1. 背景

目的地に移動することは生物の基本行動であり、その遂行には自己の進行方向を絶えず正確に推定することが求められる。自己の進行方向は外界や自己運動の手がかりを提供する感覚情報をもとに推定される。とりわけ視覚は、自身と目的地との位置関係や移動に伴って生じる視野全体の動きから、自己の進行方向に関する重要な情報を提供する。一見すると、視覚情報のみで正確な進行方向の推定が可能であるように思えるが、実際の環境では建物や他者による視界の遮蔽、あるいは頭部や眼球運動による視野の変化といった要因が、視覚情報と進行方向の一貫性を損なうことがある。このような制約を補うために、我々は前庭感覚も進行方向の推定に利用している。前庭感覚は、内耳に存在する前庭器官（三半規管）から出力される頭部の回転角速度の情報が含まれている。前庭感覚により我々は、視覚情報が遮断された状況下でも進行方向を推定することができる。

自己の進行方向は主に視覚と前庭感覚をもとに推定されるが、脳内での推定結果を直接的に観測するとはできない。しかし、感覚情報に基づく推定に従って生じる行動を参照することで、間接的にその内容を予測することができる。さらに、感覚入力情報を実験的に操作

することで、各感覚器の特性および特定の感覚情報から推定される進行方向の精度を間接的に評価できる。たとえば、目的地に向かう移動軌道の逸れ具合は進行方向の推定精度を反映する。さらに、視覚情報を遮断させた状況での移動軌道を参照することで、視覚以外の感覚情報をもとに推定される進行方向の推定精度を検討できる。実際、Souman et al. (2009) の研究では、視界が良好な条件と視覚情報が遮断された条件の両方で、実験参加者に直進歩行を課す実験を実施した。視界が良好である条件での歩行軌道は直進を示したが、視覚情報が遮断された条件では円を描くように逸れた。この知見は、視覚情報の有無が進行方向の推定精度に大きく関わることを裏付ける結果であるとともに、前庭感覚情報をもとに推定される進行方向が曖昧である可能性を示す。

前庭器官から出力される回転情報にはノイズが多く含まれることから、視覚情報が遮断された環境では、推定される自己の進行方向が曖昧となり、結果として歩行軌道が大きく逸れることが考えられる。一方で、非対称な両足の長さ (Lund, 1930) や脚力 (Lee, Kim, & Shin, 2025) などの身体特性も視覚情報遮断時の軌道逸脱の要因となる可能性がある。したがって、前庭感覚をもとに推定される進行方向の曖昧さが直進歩行軌道の逸脱に直接的に関与しているのかは不明である。

歩行軌道の他に、前庭感覚に基づいて推定された進行方向は眼球運動に現れる可能性がある。歩行中には、頭部および身体の左右回転 (Yaw 回転) が発生する。頭部の回転は胴体よりも先行する (Hollands et al., 2002) ことから、歩行中の頭部回転の推定は進行方向の推定に直接的に関与すると考えられる。歩行中には頭部が回転するだけでなく、頭部の回転方向と逆側に眼球を動かし、視野のブレを防ぐ前庭動眼反射 (vestibulo-ocular reflex: VOR) が発生する。VOR は、頭部運動によって出力される前庭感覚をもとに推定され、頭部と

眼球の速度比（眼球速度 / 頭部速度）× -1 で算出されるゲインで評価される。ゲインが 1 に近いことは、脳内で推定された頭部運動が正確であることを意味し、ゲインが 0 に近いことは頭部の運動を過小に推定していることを意味する。従って、VOR ゲインを参照することで前庭感覚から推定される進行方向の推定精度を間接的に評価できる可能性がある。

直進歩行課題において、まっすぐ歩けた場合、歩行により生じる左右の Yaw 頭部回転は、脳内で正確に推定されている可能性がある。このとき、歩行中の左右の Yaw 頭部回転に対するそれぞれの VOR ゲインは 1 に近く、VOR ゲインが左右対称であることが考えられる。一方で、進行方向を正確に推定できず、歩行軌道が左右どちらかに逸れた場合、逸れた方向の Yaw 頭部回転が過小に推定され、VOR ゲインが逸れた方向と逆側の VOR ゲインよりも低いことが予想される。即ち、直進歩行において、VOR ゲインが低い頭部回転方向に歩行軌道が逸れることが考えられる。このことを確かめるために、本研究では、視覚情報が遮断された VR 空間内を直進歩行する課題を実施し、歩行中に発生する VOR と歩行軌道を計測した。

2. 方法

2.1 参加者と実験環境

インフォームドコンセントが得られた大学生 6 名（男性 3 名、女性 3 名）を対象に VR 直進歩行課題を実施した。図 1A に実験環境の概略図を示す。実験参加者は、room runner（KAT VR, KATWALKC2 CORE）専用の靴（KAT Walk C2 Shoes）を履き、room runner に付属するベルトを装着して歩行した。また、参加者は VR 映像を提示するための Head Mounted Display（HMD, VIVE Pro Eye, HTC VIVE）を装着し、歩数を計測するためのトラッカー（VIVE tracker 2.0, HTC VIVE）を左右の足首に装着した。本実験では、HMD を用いて参加者の眼球運動と頭部角度を 90 Hz で計測した。KAT VR を用いて歩行中の腰の回転角度、両足に装着したトラッカーを用いて左右の足の位置を 90 Hz で計測した。周囲の音を遮断するために、HMD に搭載されているヘッドフォンからホワイトノイズを再生した。

2.2 VR 映像

本研究ではリアルタイム 3D 開発プラットフォーム Unity（Unity Technologies）を用いて直進歩行課題の VR

空間を作成した。実験で使用した VR 空間の俯瞰図を図 1B に示す。灰青色空間において、参加者の正面 120 m 先に目的地である高さ 2 m の青色立方体のゴールを設置した。また、参加者の初期位置（0 m）からゴールに続く横幅 2 m、距離 120 m の灰色の道を設置した。

2.3 実験条件と実験手続き

図 1C に VR 直進歩行課題における実験条件を示す。実験は、with goal (w/ goal) 条件と without goal (w/o goal) 条件の 2 種類が存在した。両条件において実験参加者は VR 空間内で正面に提示されるゴールに向かって直進歩行した。w/ goal 条件では、ルームランナーを用いて VR 空間を直進歩行できるかを確かめるため、常にゴールと道を提示した。w/o goal 条件では、視覚情報ではなく主に前庭感覚情報を利用して進行方向を推定させるために、20 m 移動以降、ゴールと道を消失させた。参加者は、消失した以降も提示されていたゴールに向かって直進歩行した。

すべての参加者は、w/ goal 条件を 3 試行実施したあとに w/o goal 条件を 10 試行実施した。VR 直進歩行課題を実施する前に、トレッドミル上での VR 歩行の練習を 1 時間程度実施した。各試行の開始前に実験参加者の眼球位置を決定するためのキャリブレーションが実施され、その後、実験参加者の位置と VR 空間の位置を調節するキャリブレーションが実施された。すべてのキャリブレーションが終了したあと、実験開始の

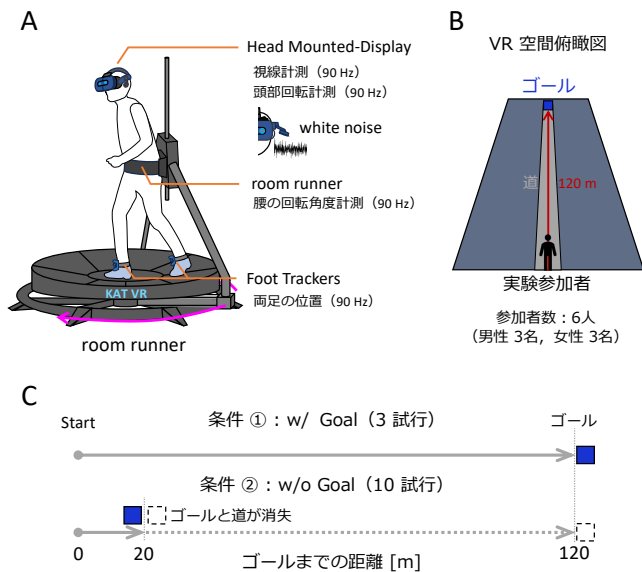


図 1. A : 実験環境の概略図. B : VR 空間の俯瞰図. C : 実験条件.

合図とともに灰青色の VR 空間が提示され計測が開始された。参加者はゴールと道が開始 10 秒後に提示されてから任意のタイミングで歩行を開始した。すべての試行において、参加者がゴールに到達もしくは歩行移動距離が 120 m に達した時点で計測を終了した。

2.4 データ解析

記録された眼球位置、頭部回転、腰の回転、左右の足の位置 (高さ) の時系列データは、MATLAB (Mathwork, USA) に読み込み、オフラインで解析された。w/ goal 条件では、歩行開始からゴールに到達するまでの距離を解析対象とした。w/o goal 条件では、ゴールと道が消失以降 (20 m) を解析対象とした。

1 歩あたりの身体の回転角度を算出するために、歩行中の両足の高さから 1 歩の開始と終わりのタイミングを検出した (図 2A)。左右それぞれの足の高さ (距離) を速度に変換し、速度が 0 に最も近い値を示す時間を開始と終了のタイミングとした (図 2A 青点、橙点)。検出した 1 歩の開始と終了のタイミングをもとに、足を踏み出し着地した際の身体回転角度 (Body Rotation (n): $BR(n)$) から踏み出す前の身体回転角度 ($BR(n-1)$) を引いた 1 歩あたりの身体回転角度 (ΔBR) を次式のように求めた。

$$\Delta BR(n) = BR(n) - BR(n-1) \quad (1)$$

ここで n は 1 歩の終わりの時間を表し、 $n-1$ は 1 歩の開始時間を表す。 ΔBR が負の値を示すとき、身体が左に回転したことを意味し、正の値は身体が右に回転したことを意味する。歩数ごとの ΔBR を算出したあと、試行ごとの平均 ΔBR を求めた。

2 つの条件において、試行ごとの VOR ゲインを算出するために、水平方向の眼球角度と Yaw 方向の頭部角度をそれぞれ時間微分し角速度に変換した。眼球角速度と頭部角速度の結果の 1 部を図 2B に示す。頭部左回転時 (回転速度 < 0) の角速度を説明変数、そのときの眼球角速度を目的変数とした線形モデルを使用して、直線を当てはめ (図 2B 青色)、直線の傾きを頭部左回転時の VOR ゲイン (L-VOR ゲイン) とした。同様に、頭部が右に回転したとき (回転速度 > 0) の VOR ゲイン (R-VOR ゲイン) を求めた (図 2B 橙色)。試行ごとに L-VOR と R-VOR ゲインの算出後、L-VOR ゲインから R-VOR ゲインを引いた VOR ゲインの差を試行ごとに求めた。

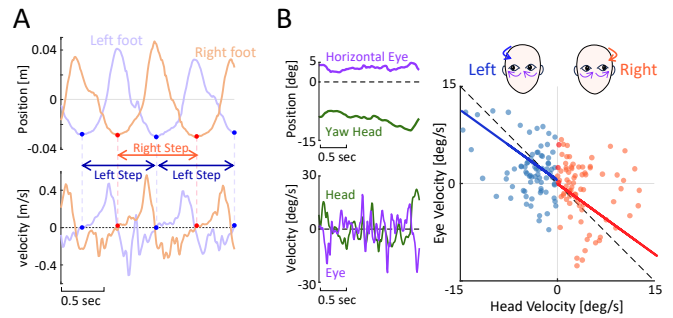


図 2. A : 歩行開始と終了の検出. 上下の図の横軸は時間を表す. 上図の縦軸は位置 (m) を表し, 下図の縦軸は速度 (m/s) を表す. 青色と橙色はそれぞれ両足の高さを意味する. 青色と橙色の点は, それぞれ左右の歩行の開始と終了のタイミングを表す. B : VOR ゲインの検出. 上下の図の横軸は時間を表す. 上図の縦軸は位置 (deg), 下図は角速度 (deg/s) を表す. 紫色と緑色はそれぞれ Yaw 方向の眼球と頭部を意味する. 下図の頭部と眼球角速度の散布図を右側に示す. 線形モデルに当てはめた青色直線の傾きが頭部左回転時の VOR ゲイン, 橙色直線の傾きが右回転時の VOR ゲインとなる。

3. 結果

3.1 歩行軌道

両条件におけるすべての実験参加者の全試行の歩行軌道の結果を図 3 の左上と左下に示す。すべての参加者において、w/ goal 条件では、左右に大きく進行方向が逸れることなくゴールに到達した (図 3 左上)。各試行の 1 歩ごとの平均身体回転角を示した平均 ΔBR は、0 付近に集中している。これらの結果から、視覚情報が遮断されていない VR 空間においても、参加者はまっすぐ歩けることが示された。対して w/o goal 条件では、左右に大きく逸れる歩行軌道や w/ goal 条件のように直進的な歩行軌道が見られた (図 3 左下)。平均 ΔBR の結果から、参加者ごとによって逸れる方向が異なることが示された (図 3 左下)。また、同じ参加者においても逸れる方向が全 10 試行で一貫していないことが示された (図 3 右下, Sub. C, D, F)。

3.2 L-VOR と R-VOR のゲイン差と歩行軌道のズレ

図 4 に w/ goal 条件 (左) と w/o goal 条件 (右) における、全参加者の試行ごとの L-VOR ゲインと R-VOR ゲインの差と平均 ΔBR の結果を示す。常にゴールと道が提示されている w/ goal 条件では、相関が見られな

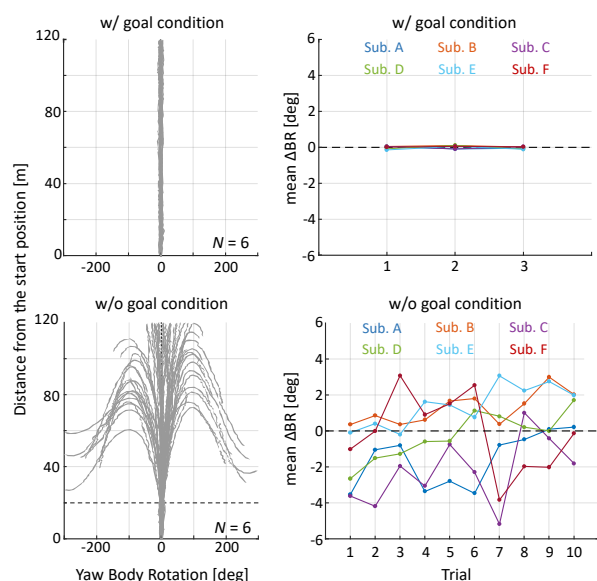


図3. w/ goal 条件と w/o goal 条件の歩行軌道の結果（左側）と平均 ΔBR の結果（右側）。左側の図の横軸は身体回転角度、縦軸は開始地点からの歩行距離を表す。右側の図の横軸は試行番号、縦軸は1試行あたりの平均 ΔBR を表す。各色はSub. A から F の参加者を表す。

かった ($r = 0.07, p = 0.9$)。対して、w/o goal 条件では、VOR ゲインの左右差が大きくなるほど平均 ΔBR の値が大きくなる正の相関が示された ($r = 0.80, p < 0.01$)。この結果は、左頭部回転時の VOR ゲインが右頭部回転時の VOR ゲインよりも低いとき、進行方向が左に逸れ、右頭部回転時の VOR ゲインの方が低いとき進行方向が右に逸れることを意味する。

4. 考察・まとめ

本研究では、視覚情報が遮断された状況において、前庭感覚にもとづいて脳内で推定される自己の進行方向が、直進歩行中に発生する Yaw 頭部回転の VOR ゲインの左右差として表現されることを確かめた。実験の結果、進行方向が逸れる方向への Yaw 頭部回転時の VOR ゲインがその逆方向の VOR ゲインに比べて小さくなることが示された。VOR ゲインが低いことは、Yaw 頭部回転速度が脳内で小さく見積もられていることを表し、結果として歩行中の頭部回転速度の誤推定が進行方向の逸れを引き起こした可能性が考えられる。ゴールと道が常に提示される w/ goal 条件では、全実験参加者が左右に大きく逸れることなくゴールに到達した。この結果は、視覚情報であるゴールと道が常に提示されていことで正確に進行方向が推定されたことを示し

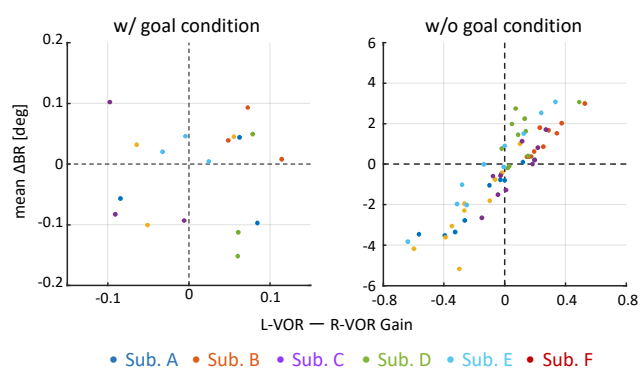


図4. w/ goal 条件と w/o goal 条件の L-VOR と R-VOR ゲインの差と ΔBR の関係図。横軸は試行ごとの左頭部回転時の VOR から右頭部回転時の VOR ゲインを引いた値を表す。縦軸は試行ごとの平均身体回転角度 (ΔBR) を表す。各色はSub. A から F の参加者を表す。

ている。

本研究の結果は、前庭感覚から推定される自己の進行方向の推定結果が Yaw 頭部回転時に発生する VOR ゲインの左右差に現れることを示した。この結果から、Yaw 回転以外の上下や左右の頭部回転運動 (Pitch・Roll) の推定のズレも、非対称な VOR ゲインとして現れる可能性が考えられる。さらに、本研究の知見は、乗り物操縦中に生じる VOR ゲインの低下が操縦者の方向感覚の喪失 (空間識失調) を客観的に評価する指標として応用できることを示唆する。

5. 文献

- Lee, Y., Kim, G. B., & Shin, S. (2025). Association Between Lower Limb Strength Asymmetry and Gait Asymmetry: Implications for Gait Variability in Stroke Survivors. *Journal of Clinical Medicine*, 14(2), 380.
- Lund, F.H. (1930). Physical asymmetries and disorientation. *The American Journal of Psychology*, 42(1), 51-62.
- Sorensen, K. L., Hollands, M. A., & Patla, A. E. (2002). The effects of human ankle muscle vibration on posture and balance during adaptive locomotion. *Experimental brain research*, 143, 24-34.
- Souman, J. L., Frissen, I., Sreenivasa, M. N., & Ernst, M. O. (2009). Walking straight into circles. *Current biology*, 19(18), 1538-1542.