

首振りを主としたリズム運動による VR 歩行システムの開発と予備的調査

中村倫太郎¹ 福地健太郎¹

概要：ヘッドマウントディスプレイを用いた Virtual Reality(VR)環境において、VR 酔いの軽減は重要な課題となっている。本研究では、首振りを主としたリズム運動による VR 歩行システムを実装し、その予備的調査を行った。実装したシステムは、音楽に合わせた首振り動作を入力とし、VR 空間内を一步步移動するものである。これは、ユーザ自身による能動的な身体内部への刺激生成を促すことで、視聴覚情報と身体感覚の不一致を軽減することを目的としている。3名の参加者による調査では、従来のスティック操作による移動と比較して、参加者によって異なるリズム運動パターンが観察された。SSQ による主観評価の結果、2名の参加者において提案システムのほうが酔いの程度が高いことが示された。参加者の行動観察からは、リズム運動に個人差があること、また与えられた課題が教示される音楽の無視へ参加者を導く可能性が示唆された。今後は、これらの知見に基づき、個人差への対応とタスク設計の改善を行う必要がある。

1. 導入

Virtual Reality(以下 VR)技術の利用に際して、VR 酔い (VR sickness) と呼ばれる不快症状が発生することが多数報告されている。この VR 酔いは、物理世界において得られるはずの刺激に対し、VR 技術によって与えられる刺激の間に不一致があるために発生すると考えられている[1]。

この VR 酔いに対し、より酔いにくいインタフェースを目指して多くの実装が試みられている。例として全方向に動作可能なトレッドミルである、Cyberith 社の Virtualizer ELITE 2 が挙げられる[2]。同デバイスを用いた実験では参加者の相当数が全く、またはほとんど酔いを感じなかったことが報告されている[3]。しかし、同デバイスはトレッドミルに加えて転倒防止用の柵が設置されるなど、一定の設置面積を要するため、利用できる条件は限られる。必要なデバイス構成を抑えつつ、いかに VR 酔いを抑えた移動を実現するかが求められている。

Meta 社 (2017 年当時は Oculus 社) は VR 酔いを軽減する移動方法の実験の一環として、「Nodding Acceleration」という移動方法を提案している[4]。この Nodding Acceleration は、ユーザが頷くことによって前進するシステムとされる[4]。しかし、記事内にリンクされた Meta 社のページには現在 Nodding Acceleration の記載は無く、また当システムがどれほど酔いを防ぐのかに関する実証的な検証は見当たらなかった。現在は体験の様子が YouTube 上の動画として公開されている[5]のみである。

動画では Nodding Acceleration の利点として、通常の人間の歩行動作に近い動きにすることで、VR 内での移動を快適に感じられるようにする点が挙げられていた[5]。たしかに、VR 酔いの軽減として、物理法則的な矛盾のない自然環境の再現は推奨され[6]、この頷き動作により、歩行における全身の上下動が部分的に再現されている可能性は考えられる。しかし、頷き動作を用いて実際の歩行に近い体験を得る可能性については、さらなる探求の余地があると考えられた。

ここで筆者は、単なる頷き動作よりも、リズム運動としての首振り動作を、VR 内での歩行のインプットとして利用することを提案する。この提案は以下二つの私見によって支えられる。第一に、Nodding Acceleration に見られる、座位において頸部だけを上下する頷き動作に比較して、立位におけるリズム運動としての首振りは、身体内部の揺れを伴う全身的な体験である点。第二に、歩行という運動もまた、身体内部の揺れを伴う全身的な体験であり、この点においてリズム運動としての首振り歩行動作とが共通している点である。以上二つの観点から、リズム運動としての首振りを利用した VR 歩行システムにおいては、より酔いにくい歩行体験が実装可能であると推測された。

実際、筆者がリズム運動としての首振りによって歩行するシステムを実装し、また利用したところ、酔わない可能性を見て取った。また、予備実験において 10 名を超える参加者に体験してもらったところ、一人も酔いを表明しなかった。そこで、本研究では音楽に乗りつつ首を振ることで歩行するシステムを実装し、その実証的な検証のための予備的

調査を行うこととした。

3名の参加者による調査では、従来のスティック操作による移動と提案手法が比較された。参加者の行動観察からは、リズム運動の仕方に個人差があること、その仕方に応じて疲労や痛みを報告すること、また与えられた課題が教示される音楽の無視へ参加者を導く可能性が示唆された。また、SSQ アンケート[9]による主観評価の結果では、2名の参加者において提案システムのほうが酔いの程度が高いことが示された。今後は、これらの知見に基づき、個人差への対応とタスク設計の改善を行う必要がある。

2. VR 酔いについて

VR 酔いは VR 環境での活動によって誘発される、眩暈や胃部不快感、重篤な場合には嘔吐を伴うといった症状を指す[6]。VR 酔いは「乗り物酔い」との類似性が指摘されており[6]、「乗り物酔い」は専門用語として「動揺病」が用いられる[7]。ただし、VR 酔いと動揺病との関係性をどのように位置づけるかについては論文によって異なっており、VR 酔いを動揺病の一種として見なすもの[8]と、VR 酔いと動揺病は類似しつつも大きな相違点を持つと見なすものがある[6]。後者においては、「なぜ、その環境が空間情報統合失調を生む環境であるのか」という観点から相違点が指摘される。動揺病では、人が知覚する刺激に物理法則的矛盾はないものの、その環境に適応できないために不快症状が生起するとされる。一方で VR 酔いにおいては、提供される刺激の間に物理法則的な矛盾が含まれるため、人の適応力の問題より先に、環境そのものの「不自然さ」が存在していると主張される[6]。

VR 酔いの主観評価手法としては、16 項目の症状について 4 択のアンケートで回答する Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)[9]が広く用いられている。これにより、VR 酔いの程度やその主たる構成要素について定量的評価が可能となる。

3. 提案手法

3.1 システムの目的

本システムの目的は、ユーザ自身による能動的な身体内部への刺激生成を促すことで、視聴覚情報と身体感覚の間の不一致を軽減することにある。特に、歩行という運動が身体内部の揺れの感覚を伴う全身的な体験である点に着目した。筆者の自己観察によれば、単調かつ機械的なうなずき動作では身体内部の揺れを十分に伴わず、歩行動作において本来受容できるリズムカルな振動が得られない。これに対し、リズム運動としての首振り動作においては、首振りを主としつつも、より全身的な動作が生成される可能性がある。そこで本システムでは、音楽に同期したリズム運動としての首振りを入力として用いた。これにより、ユーザ自身が能動的に身体内部の揺れを生成すること、またその揺れを自身により受容すること、この双方が達成されつつ VR 空間

上で歩行がなされることを目指している。

3.2 提案システム詳細

筆者が提案するのは、首振りを主としたリズム運動による VR 歩行システムである。システムは VRHMD と左手コントローラにより構成される。ユーザは立位であれば自由な体勢でシステムを体験できる。本システムの体験中には音楽が流され、リズムに合わせて首振りを主とするリズム運動が為されることが期待される。歩行については、スティックの前後操作で移動方向が定められ、首振り動作を行うことにより一歩前進、または後退する。この際に歩行音も再生される。なお、スティックが入力されていない場合には前後移動は行われず、ただ歩行音のみが再生される。

首振り検知のアルゴリズムについては、一定速度以上の頭部の上下動において、上昇から下降に転じた瞬間を首振りとして検知する簡便なものを実装した。このアルゴリズムを利用する利点は二つある。第一の利点として、僅かな頭部の上下動であっても、歩行が可能である点が挙げられる。これは首振り検知の手段を加速度依存ではなく、速度依存とする点に起因している。これにより、Nodding Acceleration で指摘されていた頸部の疲労を抑えた VR 歩行体験が可能となる。第二の利点として、あくまで HMD の上下動を検知するアルゴリズムであるため、ユーザによるリズム運動の仕方を、特定の首振りの仕方に限定させない運用が可能である。身長、体重、骨格、筋肉の付き方が個々人で異なるように、リズム運動の行われ方が個々人で異なり得ることは容易に想像される。アルゴリズムを単なる上下動の検知とすることで、多様なリズム運動の仕方を包括的に検知可能とする実装を試みている。

コントローラを併用する利点としては、歩行の入力として為される首振りとは、単なる視界確保のための頭部移動とを区別する点が挙げられる。たしかに、移動方向をユーザの前方のみに限定し、コントローラを用いない方式も考えられた。しかし、実際に体験したところ、周囲を見渡す際にシステムが誤作動を起こし、意図しない歩行動作が遂行される場合があった。そこで、左手コントローラを併用することにより、ユーザの意図しないタイミングでの誤検知を防ぐことが試みられている。

4. 実験

実験は提案手法を実証的に検証するための予備的調査として行われた。参加者は提案システムおよび従来のスティック操作による連続的な移動（以下スティック移動）の2条件を体験し、各条件において SSQ アンケートに回答した。両条件の体験時には、首振りを誘発するための教示刺激としてサカナクションの「アルクアラウンド」を提示した。本楽曲の BPM はおよそ 132 であり、また楽曲全体を通して BPM の急激な変化はなかった。

実験装置は Windows 11 PC(NVIDIA GeForce RTX 2070

SUPER), 3m 長の C to C USB ケーブル, Meta Quest 2, Meta Quest 2 付属の左手用 Touch コントローラにより構成された。

実験環境として、図 1 に示されるような単純な一本道からなる VR 空間上の街を Unity を用いて構築した。街の全長はおよそ 1056 メートルであり、街には端があった。参加者は道路のセンターライン上から体験を開始し、図 1 で示されるセンターライン上のみを前後に移動可能とした。移動量として、提案システムにおいては首振り一度につき 2 メートル、スティック移動においては 1 秒につき 2 メートル移動するようにした。また、提案システムおよびスティック移動の両条件において、歩行の際には歩行音が再生された。提案システムにおいては首振りの際に歩行音が再生され、スティック移動においてはスティックの倒されている限り、歩行音が再生された。なお、歩行音は複数の歩行音からランダムに再生されており、これにより同じ音が繰り返し再生されることを防いでいる。

実験参加者は 3 名 (A, B, C) であり、参加者 A はスティック移動から提案システムの順に、B, C は提案システムからスティック移動の順に体験を行った。各システムの体験時間は楽曲の 2 回分の再生時間 (約 9 分) とした。これは十分な歩行時間の確保と参加者の負担軽減を考慮し設定した。

実験にあたっては参加者に、十分に周囲を眺めつつ VR 空間を探索してもらうため、指定された図像を探す課題を与えた。具体的には、図 2 で示されるような窓の表面上に配置される「×印」の探索を実施した。参加者には、見つけた「×印」の数を数え上げながら、街中を探索することを求めた。なお、事前に「×印」を筆者自身で探索した際、街の端まで到達した後、街の反対側を探索するために折り返す際には、既に探索済みの「×印」ばかりを目にするため移動が退屈に感じられた。そのため、「×印」の表示位置は、楽曲が 2 回連続して再生されるうち、1 回目と 2 回目の再生で異なる配置とした。なお、配置が異なった後に見つけた「×印」は、それまでにカウントしていた「×印」の個数に上乗せして数え上げるものとした。

実験の手順として、参加者は一方のシステムを体験後、約 10 分の休憩を挟んでもう一方のシステムを体験した。各システムの体験前には簡単な操作説明が為された。その際、提案システムにおいては「音楽に合わせて首を振ってください」と指示した。各システムの体験後には、SSQ を含むアンケートへの回答を求め、自由記述による感想の記入を依頼した。なお、SSQ の質問項目には[10]による和訳を用いた。また、アンケートの他に口頭での質疑応答および感想の聴取を行った。



図 1 3DCG で構成された、一直線上に建物の並ぶ単純な街。この VR 空間の中で参加者は、道路のセンターライン上を前後にのみ移動した。



図 2 窓の表面上の×印。窓の表面に近い、少し奥まった位置に×印が表示されている。×印を見つけるには、参加者は一定程度窓に近づく必要があった。

5. 結果

実験結果は SSQ アンケートの回答結果、システム体験中の観察、参加者からのフィードバックに分けて報告する。

5.1 SSQ アンケートの回答結果

SSQ アンケートの回答結果から算出したトータルスコア [9] は表 1 に示す通りである。結果として、参加者 A, B は提案システムにおいて、参加者 C はスティック移動においてより高い酔いの程度を示した。なお、本実験と同じく VRHMD 体験時の酔いについて検証した[11]において、酔いの判定基準となされた 60 点以上を示した参加者は、いずれの条件においても観察されなかった。

表 1 SSQ の回答からトータルスコアを計算したもの

トータルスコア を計算した条件	参加者 A	参加者 B	参加者 C
提案システム	46.92	9.48	19.96
スティック移動	23.7	3.74	29.7

5.2 システム体験中の観察

システム体験中の観察結果について、参加者 A, B, C それぞれに差異が見受けられた。以下、各参加者についてスティック移動および提案システムの順で観察結果を報告する。

スティック移動の観察において、B と C は道路遠方を見続ける動作が複数回観察された。具体的には、遠方を注視した後、周囲の窓を確認し、再度遠方を注視する行動パターンが繰り返し確認された。この観察項目は B の実験後に見出されたため、A における当該行動の有無は不明である。また、提案システムからスティック移動の順に体験した B は、スティック移動開始直後において、数秒間楽曲に合わせたリズム運動を示した。C に関しては、スティック移動の体験中に「ダッシュがしたい」という発言が為された。

提案システムの観察において、参加者 B は一貫して楽曲のリズムに同期した運動を示したのに対し、参加者 A, C は楽曲に同期したリズム運動をほとんど示さなかった。なお、ここでの「リズム運動」は「周期的運動」を意味し、楽曲のリズムとの同期・非同期の両状態を含む点に留意されたい。参加者 A は街路の終端到達後、数秒間のみ楽曲のリズムに同期した運動を示したが、その後楽曲のテンポを上回るリズム運動へと移行した。一方、参加者 C は瞬間的な同期を除き、楽曲との同期は観察されなかった。また C は街路の終端到達後も、方向のみ転換した後、高速なリズム運動を続けた。参加者 A, C 共通の特徴として、楽曲の BPM を上回る非同期のリズム運動が持続的に観察された。

リズム運動の仕方もまた三者で違いが見られた。参加者 A は主に首のみを運動させるリズム運動を続けており、首振り参加者の中で最大であるように感じられた。ただし、首振りの幅は体験を続けるにつれ縮小していったように見られた。参加者 B は微小な首振りに全身の上下動を伴う、楽曲に同期したリズム運動を持続した。B の首振りは参加者の中で最も小さいように見受けられた。参加者 C は上下のリズム運動について、すべて楽曲に非同期でありつつ、首振りのみ、首振りとは全身の上下動、軽い屈伸の 3 つのリズム運動を交互に切り替えながら歩行を続けた。楽曲の終盤では、楽曲に非同期な高速の足踏みへと移行した。

5.3 参加者からのフィードバック

実験後のフィードバックとして、全条件で全ての参加者に、自由回答での自由記述を求めた。このうち参加者 B, C が各回において記述を行った。参加者 B は提案システム体験時において「前歩行から後ろ向き歩行になった瞬間に倒れる気がした」と報告し、スティック移動体験時には歩行速度の遅さを指摘した。C の提案システム体験時における報告は時系列に沿って記述され、体験開始時は傾くような動作であったが、途中から足踏みを伴う上下運動へと移行したことが報告された。この動作変更の理由として、早く移動したい」「装置がズレそう」「頭が揺れていた」が参加者 C 自身により挙げられた。一方スティック移動時については、歩行速度の遅さと「手持ち無沙汰感」が指摘された。加えて、実験順序による影響は不明であるとした上で、頭部の重さ、目よりも頭部の疲労、および持続的な上方視による首の痛みが報告された。

その他のフィードバックとして、各参加者に対し実験終了後に、口頭で質疑応答および感想の聴取を行った。参加者 A においては首の疲れが報告された。また、筆者からの VR 酔いに関する問いに対して、どちらの条件においても想定よりは酔わなかったが、首振り条件のほうが酔いは強かったと回答した。参加者 B においては、提案システムの後にスティック移動を体験した状況に言及しつつ、スティック移動に対して物足りなさを報告した。参加者 C においては、スティック移動の体験後に「足が遅かった」と報告した。また、実験終了後に筆者から参加者 C に対し、提案システムについて、音楽に対してリズム運動を同期させなかった点について質問した。これに対し C は、音楽はただ流れているだけであり、あまり意識していなかったと回答した。

全参加者と全条件に共通の振る舞いとして、移動を始めた後には必ず街路の終端に到達する様子が観察された。その後初めて移動方向を転換し、後退を始めていた。なお、両条件において参加者 A, B は体験開始とともに前方への歩行を始めたが、参加者 C は提案システムにおいて前方への移動から、スティック移動において後方への移動から歩行を始めた。

6. 議論

本研究では、首振りを主としたリズム運動による VR 歩行システムの予備的調査を行った。以降では、この調査から得られた課題を整理し、その後に考えられる改善手法を述べるという形で議論を行う。

6.1 課題について

第一の課題として、参加者が教示した音楽を意に介さず、音楽に非同期のリズム運動を行う可能性が示唆された。この傾向は参加者 A, C において、音楽のリズムを超過するという形で見られた。特に参加者 C は「音楽はただ流れているだけ」と報告している。既に述べたように、全参加者には

体験前の操作説明として、「音楽に合わせて首を振ってください」と説明している。そのため、Cにおいては音楽の無視、または指示の忘却がある。

第二の課題として、スティック移動における移動速度が適当な値でなかった可能性が示唆された。参加者 B, Cにおいて観察された道路遠方を見続ける動作は、「×印」を見つけない一方で中々移動できない状況を反映しているものと見られる。実際、BとCからは移動速度の遅さが報告された。

第三の課題として、継続した首振り動作により、頸部の痛みが生じる可能性が示唆された。これは参加者 A, Cによって報告された。両者に共通する特徴として、教示された音楽のリズムを超えて首振りを行ったこと、またその動作の振り幅が参加者 Bに比較して大きかったことが挙げられる。

6.2 改善について

第一の課題の原因として、参加者に課した「×印」の探索課題が、音楽に合わせたリズム運動という要件を忘却させる要因となったと推察される。実験において筆者から提示した情報は、スライド及び口頭での「音楽に合わせて首を振ってください」という指示のみであった。一方で、「×印」はスライドにおいて画像付きで説明していた。これら事前情報の偏りにより、探索課題ばかりが前景化して参加者に記憶された可能性がある。したがって改善策として、スライドによる説明の際に、実際の体験の様子について動画を提示することが考えられる。これにより、機械的な頷き動作でない、全身的なリズム運動を引き出す可能性が高まると推測される。

また、「×印」の探索が前景化した要因として、街中の固定された箇所に「×印」が表示されていた点も挙げることができる。5.2節で述べたように、全参加者は体験中、街路の終端に達するまで一方方向に移動し続けた。探索課題が「×印」を見つけて数えることであり、また街が単純な直線状の構造であるならば、たしかに、できる限り早く、一方方向へと移動し続けることが最善となる。ならばこの状況の改善として、「×印」の位置を固定しないことが挙げられる。具体的には、特定の窓の位置に、数秒だけ「×印」が現れ、その後消えていくという実験環境を組むことである。本設計であれば、たとえ立ち止まっていたとしても「×印」を新たに数えることが可能となり、現在の実験環境ほどには、歩行することだけが前景化する状況を避けられると推察される。

第二の課題の原因として、スティック移動における移動量が不適當であった可能性が考えられる。実験で設定されたスティック移動における移動量は、先に述べたように1秒あたり2メートルであるが、これは一度の首振りにおける移動量と等しくするためであった。しかし、2条件間で時間あたりの移動量を等しくするためには、教示刺激である音楽のBPMを考慮し移動量を決定するべきである。実際、首振りによって歩行を行う場合には、1分間におよそ132回首

を振るため、すなわち1秒間に約4.4メートル進む計算となる。したがって改善策としては、提示する楽曲のBPMを勘案したうえでスティック移動による移動量を決定する必要がある。

第三の課題の原因として、参加者に対して単に「首を振ってください」と指示してしまった点が挙げられる。確かに、Nodding Accelerationを参照する本研究において、首振りが行われることは主要な目的であった。しかし、3.1節において述べたように、感覚の不一致の軽減という観点から重視されるのは、リズム運動としての全身的な上下動である。実際、小さく首を動かしつつ全身で上下動をしていたBにおいては、痛みや疲労は報告されなかった。したがって、改善策としては、首振りを過度に主張せず、ただ音楽に合わせ、上下に揺れることを参加者に求めることが挙げられる。また、実験実施前に提案システムの体験の様子についての動画を提示することで、過度な首振りを抑え、無理なく上下に揺れ続けられる可能性も考えられる。

7. おわりに

本研究では、首振りを主としたリズム運動によるVR歩行システムを実装し、その予備的調査を行った。調査の結果、参加者によって異なるリズム運動のパターンが観察され、また提案システムにおける酔いの程度は、従来のスティック操作による移動と比較して、参加者によって異なる結果となった。さらに、本研究を通じて、リズム運動に関する個人差や、教示されたリズムの無視といった課題が明らかとなった。

今後の展望として、以下の3点について研究を進める必要がある。第一に、動的な探索課題の設計など、音楽との同期を促すタスクデザインの改善である。第二に、首振り動作に伴う身体的負荷を軽減するため、全身的なリズム運動を促す指示方法の確立である。第三に、より多くの参加者による実験を通じて、個人差への対応方法を検討することである。これらの改善により、VR酔いの軽減と、より快適なVR歩行体験の実現を目指す。今後は、より詳細な実験計画のもと、提案システムの有効性を検証していく予定である。

謝辞 実験に協力して頂いた参加者の皆様に、謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- [1] 舘璋, 佐藤誠, 広瀬通孝 (編): バーチャルリアリティ学, 日本バーチャルリアリティ学会, p.326 (2011).
- [2] Cyberith : Virtualizer ELITE 2 (オンライン), 入手先
〈<https://www.cyberith.com/virtualizer-elite/>〉 (参照 2024-12-24).
- [3] Lohman, J. and Turchet, L.: Evaluating Cybersickness of Walking on an Omnidirectional Treadmill in Virtual Reality, IEEE Trans. Human-Machine Systems, Vol. 52, No. 4, pp. 613-623 (2022).
- [4] MoguLive : Oculus、VR での移動に関する 8 つのアイデアを公開 (オンライン), 入手先
〈<https://www.moguravr.com/oculus-rift-vr/>〉 (参照 2024-12-23).
- [5] Meta Quest : Nodding Acceleration (オンライン), 入手先
〈<https://www.youtube.com/watch?v=9KPLLNmA6As>〉 (参照 2024-12-23).
- [6] 田中信壽 : VR 酔い対策の設計に求められる知の現状, 日本バーチャルリアリティ学会論集, Vol. 10, No. 1, pp. 129-138 (2005).
- [7] 平柳要 : 乗り物酔い (動揺病) 研究の現状と今後の展望, 人間工学, Vol. 42, No. 3, pp. 200-211 (2006).
- [8] 氏家弘裕, 兵頭啓一郎, 多田充徳, 伊藤弘大 : (招待講演) VR 酔い : 影響要因とその軽減に向けた取り組み, 三次元画像コンファレンス講演論文集, Vol. 27, 三次元画像コンファレンス 2019, pp.107-110 (2019).
- [9] Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., Lilienthal, M. G. : Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness, The International Journal of Aviation Psychology, Vol. 3, No. 3, pp. 203-220 (1993).
- [10] 財団法人 機械システム振興協会 : 映像酔いガイドライン検証システムの実用化に関するフィージビリティスタディ報告書, p.41 (2008).
- [11] 章斯楠, 小野弓絵 : VR 視聴時の主観的不快感に関連する自律神経指標の検討, 自律神経, Vol. 59, No. 2, pp. 246-254 (2022).