

筋電位を用いた VR 空間歩行インタフェースとその評価

岡島浩介^{†1} 木村朝子^{†1} 柴田史久^{†1}

概要：人工現実感 (Virtual Reality; VR) 空間を歩き回ることができるロコモーションインタフェースの研究が活発化している。既存のロコモーションインタフェースは、その多くが広いスペースや大掛かりな装置を必要とするため、家庭のようなあまり広くない場所で利用するには適していない。既存のゲームコントローラを利用した方法は、簡便であるが、歩行の臨場感を得ることは難しい。そこで、本研究では、足の筋電位を利用して、その場で足踏みをするタイプの簡便な歩行インタフェースを構築し、これを立位で利用する場合、座位で利用する場合と一般的なコントローラを利用する場合とで比較評価することで、どの程度の臨場感が得られるのか、また作業負荷はどの程度増加するのか分析・考察する。

キーワード：VR 空間、歩行インタフェース、表面筋電位、立位・座位

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) 技術の発達と廉価で高性能なヘッドマウンテッドディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) の普及により、より身近な環境で VR を楽しむことができるようになってきている。HMD を装着して世界旅行を楽しんだり、仮想世界を巡り歩いたり、バーチャル修学旅行といったプログラムも登場している。

このように VR 体験が映像面でもよりリアルになる中、ロコモーションインタフェースと呼ばれる、VR 空間での歩行移動インタフェースに関する研究が活発化してきている。現実同様の歩行動作を行うことで、VR 空間を歩行する方法やトレッドミルを利用して現実世界ではほとんど移動することなく VR 空間を歩行する方法など、より高い歩行感覚を再現する方法が各種研究されている。

一方で、これらのロコモーションインタフェースは、広い場所や大掛かりな装置を必要とするため、家の中のようなあまり広くない場所で利用するには適していない。今後、ますます VR システムが普及すると、簡便で臨場感も得られる VR 空間歩行インタフェースが必要になると考えられる。

そこで、本研究ではまず、筋電位を用いたその場で足踏みをするタイプの簡便な歩行インタフェースを構築する。実際に歩くわけではなく、その場で足踏みするだけなの、トレッドミルなどを使う方法と比べると歩行感覚は下がると思われるが、家庭で利用することを想定すると、トレッドミルのような大型装置を導入せずに、トレッドミルとゲームコントローラの中間程度の歩行感覚が得られるのであれば、一定の利用価値はあると思われる。

VR 空間での歩行のために把持型コントローラを用いない手法は、立位での歩行動作を VR 空間での歩行に対応させることが中心である。しかし近年では、運用スペースや

ユーザの安全性などの観点から、座位での身体動作を用いた歩行を行うインタフェースも増加している。一般的に VR 空間の移動に歩行動作を用いた場合、コントローラを用いた移動に比べて臨場感が高くなるとされている[1]。しかし、VR 体験を行う際の姿勢は臨場感に影響があると考えられる。立位と座位で歩行動作を行う場合、より実際の歩行動作に近い立位の方が座位よりも臨場感があると思われる。また、身体動作を伴う歩行操作はコントローラよりも負荷が掛かる一方、座位であれば方が椅子に座っている分、立位より作業不可が低くなる可能性もある。

そこで、本研究でも、我々が構築した VR 空間歩行インタフェースを立位で利用する場合、座位で利用する場合と一般的なコントローラを利用する場合とで比較し、どの程度の臨場感が得られるのか、また作業負荷はどの程度増加するのか分析・考察する。

2. 関連研究

典型的なロコモーションインタフェースは、実際の歩行動作を行うことで、高い没入感で VR 空間の移動を実現している。例えば、HTC VIVE や VICON などの位置姿勢検出装置を使うことでユーザの現実世界での移動をトラッキングし、それを VR 空間に範囲させる。この手法は実際の歩行に最も近いが、VR 空間の移動範囲がルームスケールに限定される。

これに対して、特にその場に留まりながら歩行を行う Walk-In-Place と呼ばれる手法も存在する。代表的な例としては、岩田らのトーラストレッドミル[3] や Circula Floor[4]が挙げられる。トーラストレッドミルは、トレッドミルを全方向に循環させることで任意方向への移動量を相殺している。Circula Floor は移動する複数のタイルを循環させることでユーザを一定の位置に保っている。また Virtuix Omni は、摩擦を低減するような加工を施した靴と

^{†1} 立命館大学大学院 情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

床面により、移動量を相殺している。これらの方法では、体験者は実際とほぼ同じ歩行動作をしているにもかかわらず、実世界ではほとんど移動しないので、実世界の広さに依存することなく、広いVR空間を移動することができる。しかし、その場に留まりながら自然な歩行動作を実現するためには、一般的に大掛かりな装置機構となり、家庭用として導入するのは現実的でない。

一方、家庭のようなあまり広くない空間ではVR空間を移動するインタフェースとして、一般的にゲームなどのコントローラが利用される。コントローラでVR空間の移動を行う場合、左右のコントローラを移動と旋回に割り当てる手法やPoint&Teleport[2]と呼ばれる、移動先を指定してテレポートする手法などが主流であり、移動を伴うほとんどのVRアプリケーションで採用されている。しかし、コントローラの操作のみで歩行感覚を得ることは難しいと考えられる。

そこで本研究では、家庭のような狭い場所でVR空間歩行を実現する一手法として、その場で足踏みをするタイプの筋電位を用いた簡便な歩行インタフェースを構築する。

前述したほとんどの歩行インタフェースは立位での歩行を前提としているが、HMDを装着した状態での立位歩行は周囲が見えないため危険を伴う。そのため、座位で足踏みをするタイプのVR空間歩行インタフェースも各種提案されている。例えば、大島らのVirtual ISU [5]は椅子と圧力センサを用いることで歩行を実現しており、設置場所や安全面に関しては、立位よりも優れていると主張されている。また、雨宮らは足裏への振動刺激を提示することにより、座位姿勢で擬似的な歩行感覚を生成する技術を提案している[6]。座った状態で歩行動作を行う方法であれば、実質移動することはないが、立位での歩行と比べて臨場感が低下する可能性がある。

そこで、本研究では、筋電位を用いた簡便な歩行インタフェースを構築し、これを立位で利用する場合、座位で利用する場合、一般的なコントローラを使用する場合とで比較・分析する。

3. 筋電位を用いたVR空間歩行インタフェース

我々は、足の表面筋電位を取得することで歩行動作を入力として扱うロコモーションインタフェースを構築した。

3.1 筋電位の利用

身体動作は筋線維が電気的な興奮を引き起し、その結果として筋張力が発生するというメカニズムで成り立っている。この活動電位を電極で集約したものを筋電位といい、非侵襲で取得できるものを特に表面筋電位という。

筋電位の発生から筋張力が力学的信号の変化として捉えられるまでに、約30～100msの電気力学的遅延(Electro Mechanical Delay; EMD)が存在し、下肢などの

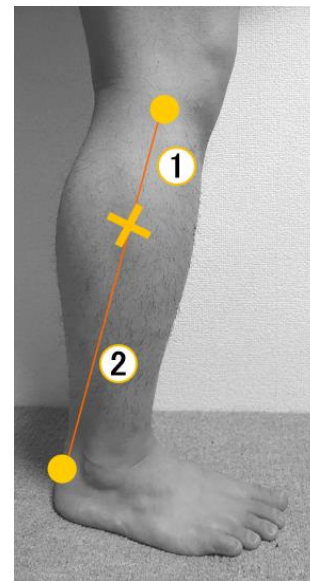


図1 電極の貼り付け位置

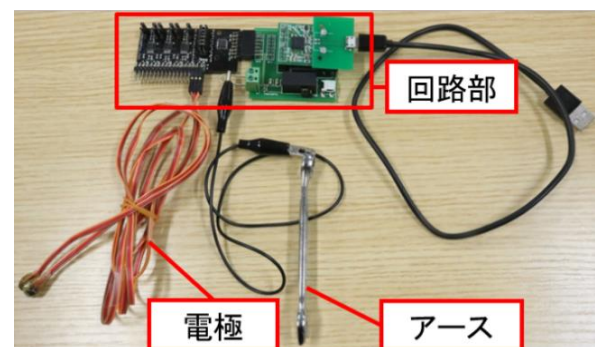


図2 筋電位計測装置

大筋群では、EMDが顕著に表れる[7]。EMDはリアルタイム性を重視した入力装置に適した特徴であることから、筋電位を義肢やロボットアームの制御にもいられる。

3.2 歩行動作

筋電位で識別する歩行動作として、足関節の底屈の上下動(踵を上下に上げ下げする動き)を採用する。足関節の底屈は運動の負荷が比較的小さく、実際の歩行に近い動作である。進行方向は、体験者の頭部の向きを基準としている。電極の貼り付け位置として、足関節の底屈のみを主動作とする表層筋である腓腹筋を採用する。図1に示すように、腓骨頭とかかとを1:2に内分する位置を目安として貼り付ける。

3.3 システム構成

構築したシステムは、信号計測部、信号処理部、信号利用部に分かれる。まず、電極を貼り付けた部分の筋電信号を取得し、ローパスフィルタにより波形データの前処理を行う。取得したデータの振幅情報と時間情報を基に、両脚の歩行動作を取得する。

【信号計測部】

信号計測部では、図2に示すような専用の筋電位計測装置を用いて表面筋電位を計測する。表面筋電位は皿電極を

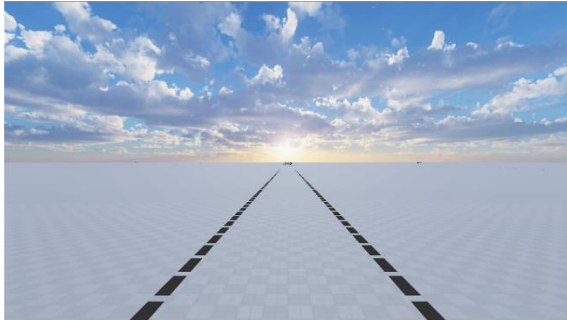


図3 開始地点から見た VR 空間

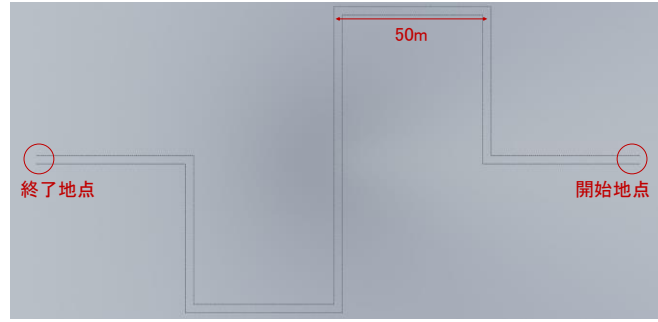


図4 VR 空間の俯瞰図

用いて皮膚表面より計測することが可能であり、非侵襲性であるため容易に計測することが可能である。本システムでは銀板にオペアンプを直付けした2極の皿電極を用いて、双極誘導方式で信号を計測する。筋電位は1000倍に増幅して計測し、サンプリング周波数1[kHz]、量子化ビット数14[bit]でサンプリングする。

【信号処理部】

本システムでは、リアルタイムな処理を行うため振幅情報、及び時間情報を利用する。識別部で用いる信号の前処理として、Rawデータの絶対値を求めた後、フレーム長32[ms] (32 サンプル) のフレーム内の絶対値平均 EMG (average of EMG: aEMG) を利用する。今回貼り付け位置は2か所であるため、それぞれの貼り付け位置でこの処理を行うものである。片脚から抽出した aEMG が設定された閾値を超えた場合、その脚が前に出るという情報を送信し、両脚の腓腹筋が交互に閾値を超えている場合に歩行していると判定する。

【信号利用部】

信号利用部には、ゲームエンジンである Unity を使用している。送信された情報を取得し、VR 空間内の自身のアバターの片脚を前方に動かすことで歩行を実現している。片足から閾値を超えた情報が送られた後は、反対の足が閾値を越えるまで、連続して信号が送られることはない。

4. 実験

4.1 目的

本実験では、入力手法として、「筋電位を用いた座位での入力 (筋電位座位)」「筋電位を用いた立位での入力 (筋電位立位)」に「コントローラを用いた座位での入力 (コントローラ)」を加えた3種類の手法を用いて VR 空間内で歩行を行わせ、その評価から各入力手法の特徴を明らかにする。実験協力者は20代成人15名(女性1名)である。

4.2 入力手法

筋電位を用いた歩行インタフェースは3章で説明した通り。一方、比較対象となるコントローラには VIVE コントローラを使用し、トラックパッドに触れることで触れた方向に移動する。トラックパッドの方向は頭部の向きを基準

表1 臨場感に関する質問項目

PQ1. 移動をコントロールできましたか?
PQ2. 環境との相互作用は自然でしたか?
PQ3. 環境の中での動きをコントロールするメカニズムは自然でしたか?
PQ4. 仮想環境での体験は、現実世界と一致していましたか?
PQ5. 仮想環境の中を歩き回っている感覚はありましたか?
PQ6. 自分が行った行動に対して、次に何が起こるかを予測することができていましたか?
PQ7. 仮想環境の体験にはすぐに慣れましたか?
PQ8. 体験終了時に、仮想環境での移動に熟練度を感じましたか?
PQ9. タスクを実行するために使用されるメカニズムではなく、割り当てられたタスクや要求された活動に集中できましたか?
PQ10. あなたの感覚はこの経験と一致していましたか?
PQ11. 仮想環境の体験の中で、タスクや環境に完全に集中していると感じた瞬間はありましたか?
PQ12. 仮想環境と対話するために使用されるコントロールデバイスに簡単に適応できましたか?
PQ13. あなたの行動と期待される結果との間に遅延がありましたか?
PQ14. 視覚的な表示品質は、割り当てられたタスクや要求された活動の実行を妨げたり、気を散らしたりしましたか?
PQ15. 機器は割り当てられたタスクや他の活動の遂行を妨げましたか?
PQ16. 仮想環境の体験の結果、VR酔いがありますか?

表2 作業負荷に関する質問項目

WR1. この課題で、どの程度の知的・知覚的活動(考える、記憶するなど)を必要としましたか?
WR2. この課題で、どの程度の身体活動(押す、引く、制御するなど)を必要としましたか?
WR3. この課題を行っている間、どの程度時間的切迫感を感じましたか?
WR4. この課題で、どの程度の目標を達成できましたか?
WR5. 課題達成のために、精神的、身体的にどの程度一生懸命に作業する必要がありましたか?

としており、トラックパッドで前方の入力をしつつ身体を向けることで自然な旋回が可能である。また、本研究では座位のみでコントローラを使用するが、臨場感に関しては立位で使用する場合とほとんど変わらないと考えられるため、実験では作業負荷が少ない座位姿勢を採用した。

4.3 手順

実験協力者は、各手法を用いて、VR 空間を歩行した後、臨場感と作業負荷に関する質問用紙に回答した。歩行体験を始める前に、実験協力者に筋電位計測装置および HMD

を装着し、全ての手法について十分に練習を行わせた。

各手法を用いた歩行に十分に習熟した後、いずれかの方法を指定し、VR空間を歩行させた。VR空間は空と床で構成され、その他のオブジェクトは一切配置しなかった。歩行中、実験協力者は図3のように1人称視点でVR空間を観察する。歩行経路は2本の黒の点線で示され、実験協力者はその間を歩くよう教示された。歩行経路の俯瞰図を図4に示す。1試行当たりの歩行距離は400mであり、左右の旋回が同じ回数になるように直角の曲がり角を複数設けた。歩行開始前にキャリブレーションを行い、歩行中の頭部の3次元座標は100ms毎に取得された。

実験協力者が目的地までたどり着いたら、HMDを外させ、臨場感および作業負荷に関する質問用紙(表1, 2)に回答させた。臨場感に関する質問にはWitmer and Singer's questionnaire[8]を改変したものを使用し、16項目の質問に7段階のリッカート尺度(1:「全くそう思わない」から7:「完全にそう思う」)で回答させた。また、作業負荷の評価にはNASA-TLX[9]を使用し、100点を最高とした6項目の質問に回答させた。

以上の手続きを全ての手法を用い実施した。各手法の試行順には実験協力者ごとにカウンタバランスをとった。練習や各試行の後には1分程度の休憩を設け、疲労が無いかを確認する。全ての手法の体験を終了した後、手法の好み

や実験に関するコメントを聴取した。

4.4 実験結果

4.4.1 臨場感

臨場感についての結果を図5に示す。図中のPQ1~PQ16は16項目の質問を表している。各項目に対し、対応のある一元配置分散分析を行い、手法の主効果が有意であったものについては、下位検定として、Ryanの方法による多重比較を行なった。

手法の主効果が有意であった質問項目は以下の8項目である：

- PQ1「移動をコントロールできましたか？」($F(2, 28) = 4.603, p < .05$)
- PQ2「環境との相互作用は自然でしたか？」($F(2, 28) = 3.578, p < .05$)
- PQ4「仮想環境での体験は、現実世界と一致していましたか？」($F(2, 28) = 12.121, p < .001$)
- PQ5「仮想環境の中を歩き回っている感覚はありましたか？」($F(2, 28) = 30.575, p < .001$)
- PQ6「自分が行った行動に対して、次に何が起こるかを予測することができていましたか？」($F(2, 28) = 3.431, p < .05$)
- PQ11「仮想環境の体験の中で、タスクや環境に完全に集中していると感じた瞬間はありましたか？」($F(2, 28) =$

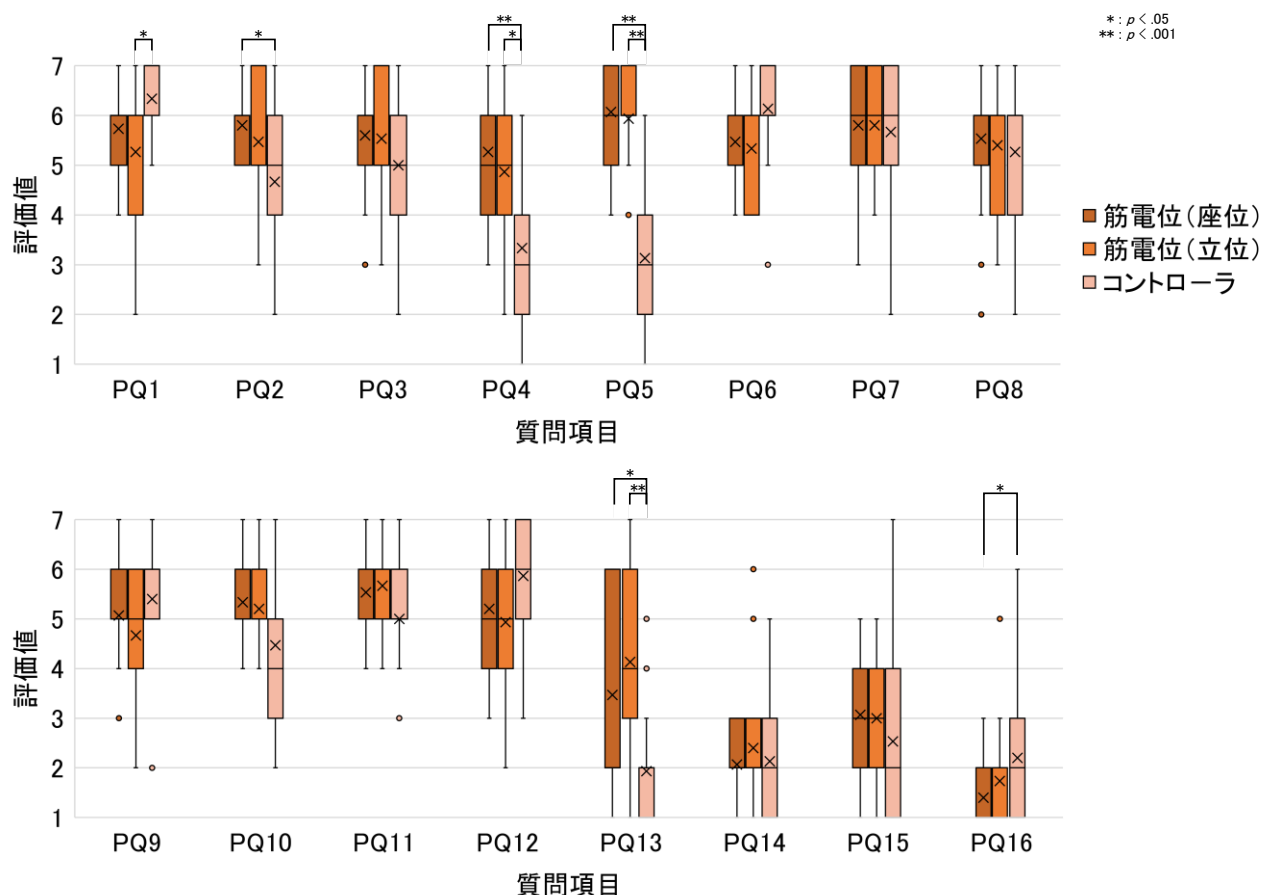


図5 臨場感に関する質問の結果

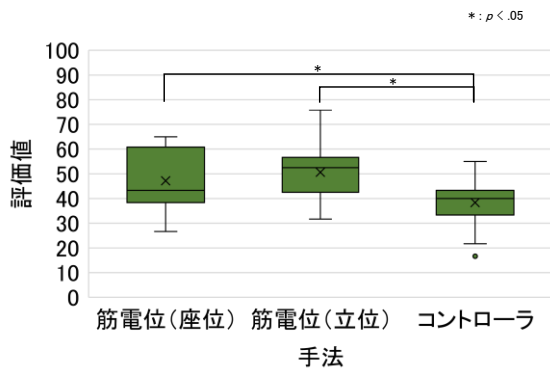


図6 主観的作業負荷 (NASA-TLX)

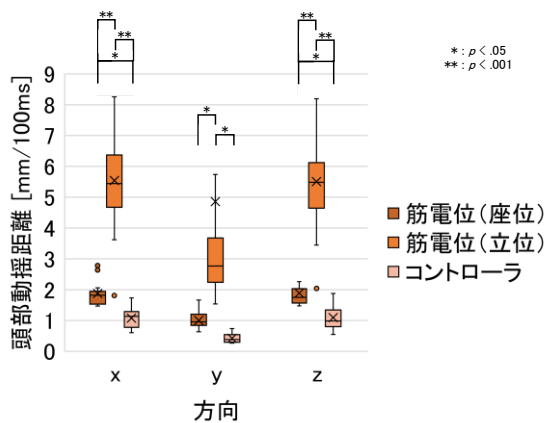


図7 頭部動揺距離

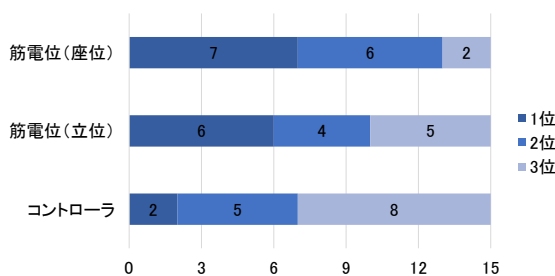


図8 好み

3.350, $p < .05$)

- PQ13「あなたの行動と期待される結果との間に遅延がありましたか？」 ($F(2, 28) = 9.244, p < .001$)
- PQ16「仮想環境の体験の結果, VR 酔いがありますか？」 ($F(2, 28) = 3.668, p < .05$)

多重比較は図5中に示す。その他の項目においては手法の主効果は有意ではなかった (全て $F(2, 28) < 2.600, p > .094$)。作業負荷 NASA-TLX の6項目の平均得点を主観的な作業負荷とし、その結果を図6に示す。縦軸は100点を最高とした評価値を表しており、点数が高いほど高負荷であることを示す。分散分析より手法の主効果が有意であった ($F(2, 28) = 6.728, p < .005$)。続けて多重比較を行ったところ、コントローラより筋電を用いた2つの手法の方が点数は有意に高かった (筋電座位とコントローラ, $p < .05$; 筋電立位とコントローラ, $p < .05$)。

4.4.2 頭部動揺距離

客観評価として各軸方向に分解した 100ms あたりの頭部動揺距離の平均値を算出した。頭部動揺距離を図7に示す。

まず、左右の動揺を表す x 軸方向で手法の主効果が有意であった ($F(2, 28) = 95.810, p < .001$)。すべての手法間で動揺距離に有意な差があった (筋電位立位と筋電位座位, $p < .001$; 筋電位立位とコントローラ, $p < .001$; 筋電位座位とコントローラ, $p < .05$)。次に、上下の動揺を表す y 軸方向で手法の主効果が有意であった ($F(2, 28) = 7.311, p < .005$)。2 手法間で動揺距離に有意な差があった (筋電位立位と筋電位座位, $p < .05$; 筋電位立位とコントローラ, $p < .05$)。また、前後を表す z 軸方向で手法の主効果が有意であった ($F(2, 28) = 95.802, p < .001$)。すべての手法間で動揺距離に有意な差があった (筋電位立位と筋電位座位, $p < .001$; 筋電位立位とコントローラ, $p < .001$; 筋電位座位とコントローラ, $p < .05$)。

4.5 考察

歩行時の臨場感に関しては、先行研究と同様、歩行動作を行う筋電位立位、および筋電位座位の方が、コントローラより評価が高いことが分かった (PQ4, PQ5)。一方、立位と座位では、立位の方が歩行の臨場感が高くなると予想していたが、筋電位座位と筋電位立位の間では有意な差は見られなかった (PQ2, PQ4, PQ5)。今回の結果では、踵を上げ下げするその場足踏み入力動作において、入力姿勢による差は小さく、特に PQ5 の結果においては座位の評価が高かった。そのため、身体動作を利用した入力手法は姿勢を問わず仮想空間を歩き回っている感覚を提示可能であることが示唆された。また、PQ10の結果から、座位であっても実際の歩行と類似した疑似的な歩行感覚が得られることも示唆された。

頭部動揺距離に関しては、筋電位立位は筋電位座位と比較的大きな差があるが、臨場感の評価との因果関係はみられなかった。

作業負荷に関しては、NASA-TLX の結果から、身体動作を利用した場合はコントローラに比べて作業負荷が大きいたことがわかる。また、筋電位立位よりも筋電位座位の方が作業負荷の平均値は小さい。ここまでは予想と一致しているが、筋電位座位と筋電位立位の間には有意な差は見られず、聴取したコメントから「座位は疲れる」という意見も得られた。実際、実験協力者 15 名のうち 6 人で、作業負荷は筋電位立位より筋電位座位の方が大きい。この理由として、そもそも座位で足踏み動作を行うことが少なく、普段使用しない筋肉を使ったり、主に脛脛に集中して負担が掛かったりしていることが考えられる。また、姿勢と椎間板内圧には関係があり、座位は立位の 1.4 倍の負担が腰に掛かると言われている[8]。したがって、筋電位座位での足踏み動作は、想像していたより負荷が高い可能性もある。

VR 酔いに関しては、筋電位座位はコントローラに比べて VR 酔いしづらいことは分かった (PQ16) が、頭部動揺距離との因果関係はみられなかった。

今回構築した筋電位による歩行インタフェースに関して、PQ13 の結果から、コントローラと比べ遅延があるという結果となった。この理由として、コントローラでの移動は同じ動作を連続的に継続するため遅延を感じにくいのに対して、足の動きを利用する場合は、左右の足を交互に動かすことで移動するため遅れを感じやすかったと考えられる。

図 8 に示した手法の好みに関しては、筋電位座位と筋電位立位は同程度好まれた一方で、コントローラはあまり好まれなかった。今回、実験で利用した VR 空間には、建物や物体などが配置されていないため、コントローラの操作が退屈であったという意見も観られた。

実験協力者に関して、今回の実験協力者は 20 代であり、コントローラの操作に不馴れた人はいなかった。そのため、PQ1 及び PQ12 の結果において、コントローラの評価が高くなったと考えられる。作業負荷についても、高齢者であれば座位よりも立位の方が負荷が大きいと感ずる可能性もあるので、今後さらなる実験が必要である。

5. むすび

本研究では、家庭のようなあまり広くないスペースで VR 空間を歩行するための入力手段として「立位姿勢での歩行動作」「座位姿勢での歩行動作」「コントローラ」の 3 種類の手法を用いて VR 空間内で歩行を行わせる実験を行い、その結果から各入力手法の特徴を考察した。

当初は、歩行動作を入力として利用する場合、実際の歩行動作に近い立位の方が座位よりも臨場感が高いと予想していたが、実験の結果、座位であっても十分に臨場感が高く、歩行動作を利用した入力手法は姿勢を問わず仮想空間を歩き回っている感覚を提示可能であると示唆された。

一方、歩行動作を伴うことでコントローラよりも負荷が掛かることは予想通りであったが、立位より座位の方が椅子に座っている分、作業負荷が少ないと予想していたが、姿勢による差があるとは言えず、個人差により立位と同等以上に負荷を感じる場合もあることが分かった。

謝辞

本研究の筋電計測装置を貸与していただいた京都大学工学研究科所属中村裕一先生とご指導いただいた井藤秀隆氏に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] M. Usoh, K. Arthur, M. C. Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater, and F. P. Brooks: Walking > walking-in-place > flying, in virtual environments; Proc. SIGGRAPH, pp. 359–364, 1999
- [2] E. Bozgeyikli, A. Raji, S. Katkooi, and R. Dubey: Point &

- Teleport Locomotion Technique for Virtual Reality, In Proceedings of ACM Symposium on Computer-Human Interaction in Play (CHI Play), pp. 205–216, 2016
- [3] H. Iwata: The torus treadmill realizing locomotion in VEs, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 19, pp. 30–35, 1999
- [4] H. Iwata, H. Noma, H. Iwata, H. Yano: CirculaFloor: A locomotion interface using circulation of movable tiles, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, pp. 64 – 67, 2005
- [5] 大島登志一, 枝元瑠, 舘脇望, 柴田龍輝: Virtual ISU: 座位姿勢での擬似歩行運動による歩行感覚提示インタフェース (第 3 報), エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2016 論文集, pp. 295–300, 2016
- [6] 雨宮智浩, 池井寧, 広田光一, 北崎充晃: 歩行を模擬した足底振動刺激による身体近傍空間の拡張, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, pp. 627–633, 2016
- [7] 木塚朝博, 増田正, 木竜徹, 佐渡山亜兵: 表面筋電図, パイオメカニズム・ライブラリー, 2006–18
- [8] B. G. Witmer and M. J. Singer: Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire, Presence: Teleoper. Virtual Environ, Vol. 7, No. 3, pp. 225–240, 1998
- [9] A. Nachemson: The lumbar spine. An orthopaedic challenge, Spain 1, pp. 59–71, 1976