

# 現実空間での移動量低減を目的とした VR 空間における歩幅の運動学習に関する一検討

中澤 陽介<sup>\*1</sup> 萩生 翔大<sup>\*2</sup> 野崎 大地<sup>\*2</sup> 小川 剛史<sup>\*3</sup>

**A study on motor learning of footsteps in virtual reality for reducing amount of movement in the real world**

Yosuke Nakazawa<sup>\*1</sup>, Shota Hagio<sup>\*2</sup>, Daichi Nozaki<sup>\*2</sup>, and Takefumi Ogawa<sup>\*3</sup>

**Abstract** --- This paper describes about a novel method to reduce the amount of movement in the real world during virtual reality experience by changing the relationship of visual information and body movement. We designed the experiment that a visual feedback of stride gradually increases while walking in virtual reality world. Our results show that 6 out of 10 subjects didn't notice that their strides even doubled.

**Keywords:** virtual reality, locomotion, motor adaptation, error feedback

## 1 はじめに

高性能かつ安価なヘッドマウントディスプレイ(HMD)の普及により、バーチャルリアリティ(VR)という概念が一般的にも認知されつつある。バーチャル世界を体験する際には、例えば HMD と手にしたコントローラなどの位置から利用者の身体動作をセンシングし、バーチャル空間内の動作として投影することで、あたかもその空間にいるかのような表現が可能である。しかし、等身大の VR 空間を体験するためには同一の実空間が必要となり、多くの場合は実空間に存在する障害物などによる身体動作の制限が問題となる。実空間における狭い領域での歩行のみで広い VR 空間における歩行を実現する研究[3]も行われているが、必要となる実空間の領域は依然として広い。

本研究では、実空間における身体動作を変更することで、広大な VR 空間を移動する際にも、同様の広さの実空間を必要としない VR 空間の提示手法を提案する。提案手法では、視覚情報と身体動作の関係性を変更するような運動学習を促し、動作者が知覚している身体動作量よりも実際に出力される身体動作量を低減する。

実際の身体動作が出力されない状況が実現できれば、BMI[8]のような身体動作を全く伴わないインタフェースが実現できる可能性もある。また、身体が動かないように固定した状態でバーチャル身体を操作する研究も行われている[9]。

本稿では、歩行動作に着目し、実空間を歩き回ることなく VR 空間内を歩行させるために実施した実験について述べる。具体的には、VR 空間において歩幅の視覚フィードバックを操作し、実際の身体動作出力とは異なっているにも関わらず、VR 空間内では通常通りに歩行しているように知覚させる実験系を構築した。運動学習により、VR 空間での移動量に対して実空間の移動量が短くなるように歩行運動における視覚と運動の関係性を変更することができれば実空間に対してより大きな VR 空間を体験することが可能となる。構築した実験系を用いて、ヒトは歩行動作において、どれだけ自身の歩幅が短くなったことに気付くことなく適応できるのかを検証した。

## 2 関連研究

VR 空間内を実際に歩いているかのような感覚を生起させるロコモーションインタフェースが提案されている[1,2]。これらのインタフェースには、ユーザの歩行動作に応じて任意方向に動く床面を提供するものや、半球状の床面の上を足を滑らせながら歩行するものなどがあり、VR 空間と同じ広さの実空間を用意しなくても、VR 空間内を実際と同じように歩き回ることが可能である。し

\*1 東京大学大学院学際情報学府

\*2 東京大学大学院教育学研究科

\*3 東京大学情報基盤センター

\*1 Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo.

\*2 Graduate School of Education, The University of Tokyo.

\*3 Information Technology Center, The University of Tokyo.

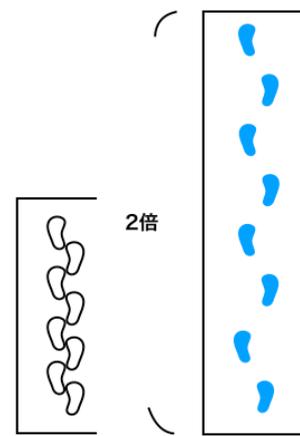
かし、大規模な装置が必要となることが多く、1方向にしか進めないなどといった制約が存在するものもある。

リダイレクテッドウォーキング (Redirected Walking, RDW) [3]は、ユーザの実空間における動作で生じる VR 空間内での視覚情報を操作することによって、実空間内での移動領域を変化させている。ユーザが知覚できない範囲で実空間での移動量を減少させたり回転量を増大させたりすることにより、実空間よりも広大な VR 空間での歩行が可能になる。一方で、その変化量に限度があることが報告されており、例えば VR 空間で直進し続けるためには半径 22m 以上の円弧上の経路が必要で[4]、依然として広い実空間を要する。それ以上に大きな変化を与えると視覚情報と他の感覚からの情報との差異が大きくなり、違和感を与えてしまう。ユーザの移動経路の誘導のために、視覚情報の操作と共に触覚による手掛かりを用いる手法[5]が提案されているが、この場合でも曲率操作の閾値は約 6m に留まっている。これらのことから、ヒトの歩行感覚のフィードバックには体性感覚の影響が強いことが示唆される。

#### ・運動学習

運動学習とは、運動制御分野の概念のひとつで、巧みな課題遂行能力を比較的永続する変化に導く実践あるいは経験に関係する一連の過程である。

生物が運動制御を行う際にはいくつかの問題点があることが知られている[6]。一点目は感覚器官から得られるフィードバックは大きなノイズを含み、時間遅れがあること、二点目は身体と周囲の環境が一定ではないことから、それらに対応するために感覚情報と運動指令の関係を変化させなければいけないことである。これらを解決するために、生物は身体と世界をつなぐ内部モデルを構築し、感覚器官から常にフィードバックを受けながら適応することにより、環境に沿った運動制御を行うことができる。この過程が運動学習であるが、実験的に日常ではあり得ないような状況を設定してもそれに適応できることが知られている。平島らは、左右2方向のターゲットに対し手を伸ばすリーチング運動課題を用いて実験を行った[7]。実験中、被験者には自身の手先位置を示すカーソルとターゲットのみを提示した。右のターゲットにリーチングする際には時計回りに、左のターゲットにリーチングする際には反時計回りにカーソル位置がずれるよう操作を施し、被験者に気付かれないように試行回数に伴ってそのずれを大きくしていくと、カーソル位置の軌跡は徐々に中心方向へ寄っていき、最終的に被験者は2方向にリーチングしていると認識しているにも関わらず、実際の手は真っ直ぐの一方方向にしか動いていないという状況を作り出すことに成功している。これは被験者の左右のターゲットに関する視覚運動変換が変更されたことを意味し、視覚フィードバックを気付かない範



現実空間での移動距離 VR空間での移動距離

図1 半分の歩幅に適応した状態

Fig.1 State adapting half stride

囲で少しずつ変化させることで容易に内部モデルを変更できることを示唆している。

本研究では、トレッドミル上での歩行動作中に、歩幅の視覚フィードバックを少しずつ大きくすることで実際の歩幅を少しずつ減衰させるような実験系を構築し、どこまで歩幅のフィードバックを変化させても被験者は気付かないのか、そしてその状況にどれだけ適応できているのかを検証した。

### 3 提案手法

本研究では、歩行動作の内部モデルを VR 体験に都合の良いように変更することによって実空間での移動量を低減する手法を提案する。歩行動作にはピッチとストライドがあり、移動量はピッチとストライドの掛け合わせで求められる。そこで、ピッチは一定のまま、ストライドが短くなるように内部モデルを変更することを目指した。得られる視覚情報は自身の感覚と一致したストライドではあるが、実際の出力としては短いストライドになっているという状況を作ることができれば、例えばその比率が半分になると、図1に示すように実空間の倍の距離の VR 空間を体験できる。しかし、平島らの研究[7]でも右回転左回転共に 30 度以内の学習に留まっており、どこまでユーザが気付くことなく学習が進むのかを検証する必要がある。本研究では図2に示したようにトレッドミル上で歩行動作させ、並進方向の歩幅の視覚フィードバックを少しずつ大きくすることで実際の歩幅を少しずつ減衰させる。構築した実験系を用いて、どこまで歩幅のフィードバックを変化させても被験者は気付かないのか、そしてその状況にどれだけ適応できているのかを検証した。図2は、実験において被験者が VR 空間上の補正のかかった足を手掛かりに目標地点に足を置こうとする際のイメージ図である。目標とする倍率の設定に関して、徐々にフィ

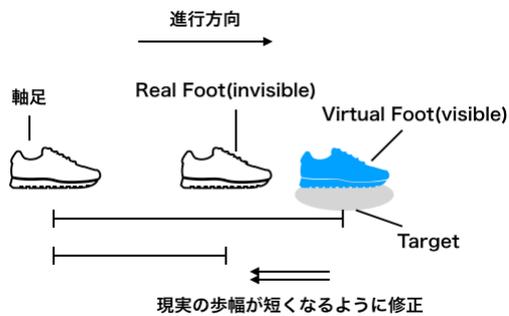


図 2 実験系

Fig.2 Experimental system

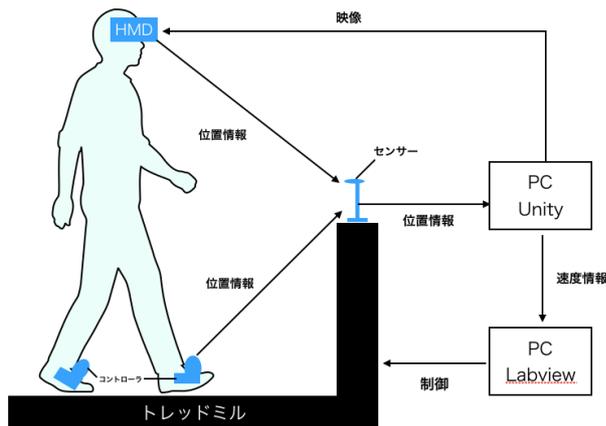


図 4 システム構成図

Fig.4 Configuration of system

ードバックを変化させる場合、最終的な倍率を大きくするには学習時間が長くなるが、被験者の負担を考慮し、HMD を装着した状態での歩行時間が 25 分程度となるよう最大倍率を 2 倍程度とした。

## 4 実験

### 4.1 実験環境

ダブルベルトトレッドミル (Bertec 社 Columbus, OH, USA) を用い、長時間の歩行を実験的に行えるようにした。VR 空間の提示には HMD (Oculus 社 Oculus Rift) を用いた。足のトラッキングのために、HMD に付属のコントローラを靴に取り付けた。また、トレッドミルの稼働音を遮断するため被験者にはノイズキャンセリングヘッドフォン (OneOdio 社 OneOdio A9) を着用させ、ホワイトノイズを再生した。実験の様子を図 3 に示す。

### 4.2 被験者

本研究への参加の同意を得た、健康な 20 代の男性 10 名を対象とした。本研究は東京大学倫理審査専門委員会の承認を受けて実施している。

### 4.3 実験システム

VR 空間内での移動スピードに合わせてトレッドミルを動作させるシステムを構築した (図 4)。被験者が歩行する VR 空間は図 5 に示すような直線の道とした。道に



図 3 実験の様子

Fig.3 The condition of the experiment



図 5 実験で用いた VR 空間

Fig.5 VR space for the experiment

は被験者が歩行時に足を置く場所を示すマーカが表示されている。トレッドミルの動作は Labview で制御し、VR 空間の提示には Unity を用いた。Unity 側で計算したスピードを Labview に送信し、そのスピードでトレッドミルを動かすように制御した。

歩幅の視覚フィードバックを与えるためには被験者自身の足が見える状態にする必要があるが、通常通 VR 空間における視点の直下に足を表示すると、被験者は下を見ながら歩かなければならず、自然な歩行動作ができない。そこで図 6 のように被験者の 1m 前に足のオブジェクトを表示し、それを自分の足だと思って歩行するように指示した。足の提示には靴のみを表示している。

### 4.4 実験内容

バイアスがかからないように被験者には「トレッドミルを用いた VR 歩行の研究」とだけ伝え、VR 空間の地面上に設置されたマーカを靴で踏みながら歩くタスクを課した。被験者がきちんとマーカを踏むことができれば、当該マーカは消えるように設定している。以下に実験手順を示す。

手順 1: HMD を装着せずに、トレッドミル上での歩行練

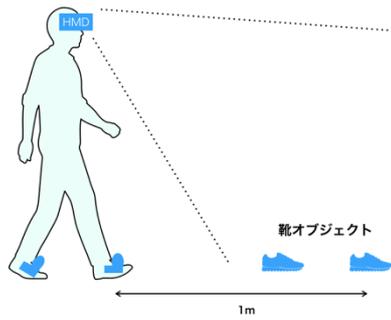


図 6 足提示手法

Fig.6 The method to show shoes

習(約 1 分)

手順 2: HMD を装着し, 実験で用いる VR 空間での歩行練習およびマーカを踏みながら歩く練習(約 2 分)

手順 3 本実験の実行(約 25 分)

手順 1 における歩行練習時の歩行速度は 1.2 m/s とした. マーカの基本間隔は通常の自然な歩幅となるよう被験者ごとに設定し, 基本間隔を 1.1 分の 1 倍した少し狭い間隔と, 1.1 倍した少し広い間隔の 3 種類を用意した. 基本間隔の値は, まず被験者の身長に応じて設定し, 手順 2 の段階で被験者に歩きやすい歩幅をヒアリングして決定した. 図 7 に各被験者の身長とマーカの基本間隔を示す. 本実験ではマーカの間隔が一定ではないことを事前に被験者に伝えている. VR 空間内の移動スピードは 1.2 m/s で固定し, 実験中は常にこのスピードを維持した.

マーカを踏むタスクを行いながら歩幅の視覚フィードバックの並進方向に倍率をかけ, その倍率を少しずつ大きくしていくことで, 現実空間の歩幅を気付かないように低減させていく.

実空間の座標系(図 8)における被験者の頭の並進方向の座標を  $p$ [m], VR 空間内での被験者の並進方向の座標を  $p'$  [m]とすると, 実験の経過時間を  $t$  [sec]として, VR 空間内のスピードは常に秒速 1.2 m のため,

$$p' = p + 1.2t$$

で表される. 実空間の被験者の左足, 右足の並進方向の座標をそれぞれ  $f_1$  [m],  $f_2$  [m]とし, VR 空間内での靴オブジェクトの並進方向の座標  $f'_1$  [m]  $f'_2$  [m]は, その時の歩幅の倍率を  $r$ とすると, 1 m 前方に表示されることを

図 7 身長と基本間隔

Fig.7 Height and basic interval

被験者ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
身長(cm)	175	172	170	169	180	183	175	172	175	172
マーカ幅(cm)	68	68	68	68	68	75	70	70	70	68

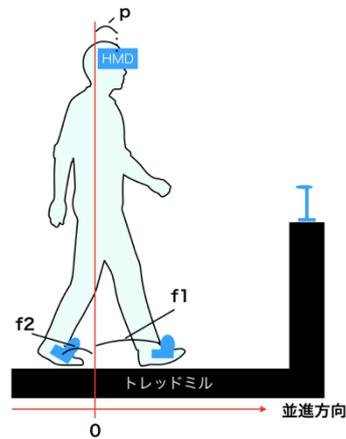


図 8 座標系

Fig.8 System of coordinates

加味し, それぞれ

$$f'_1 = p + (f_1 - p) * r + 1.2t + 1.0$$

$$f'_2 = p + (f_2 - p) * r + 1.2t + 1.0$$

で表される.

なお, トレッドミルのスピードは歩幅の倍率に反比例するように調整する必要があり, トレッドミルのスピード  $v$ [m/sec]は

$$v = 1.2 / r$$

となる.

本実験の流れを以下に示す. なお, マーカを 1 回踏む行為を 1 試行とし, 移動スピードは 1.2 m/s で統一していることからマーカの間隔によって実験時間が異なる.

- Phase1: マーカ無し状態の歩行(約 96 歩, 約 1 分)
- Phase2: マーカあり状態の歩行(97~384 歩, 約 3 分)
- Phase3: 運動学習フェーズ(385~1824 歩, 約 15 分)  
24 歩ごとに倍率  $r$  を 1.016 倍し, これを 4 回繰り返す(96 歩). その後の 48 歩は倍率を変更せずにその歩幅に慣れさせる時間とした. 以上の計 144 歩の試行を 1 セットとし, これを 10 回繰り返す. 最終的に歩幅の倍率は 2 倍程度となる.
- Phase4: 学習状態での歩行(1825~2016 歩, 約 2 分)
- Phase5: Wash Out 試行(2017~2496 歩, 約 5 分)  
歩幅のフィードバックを等倍に戻し, その状態で歩き続ける.  
ある被験者における歩幅の倍率変化を図 9 に示す.

#### 4.5 評価方法

1) 歩幅の変化に対する主観的評価  
どこまで気付かずに学習が進むのかを定量化するために, 実験中に何か違和感を感じたらそのタイミングで右手を上げるように被験者に指示し, その時間と VR 空間内での位置を記録した. 歩幅が変わることを伝えるとバイアスがかかる可能性あるため, 違和感という抽象度の高い言葉を用いた. 実験を途中で中断すると学習に影響があるため, 実験終了後にまとめて具体的な違和感

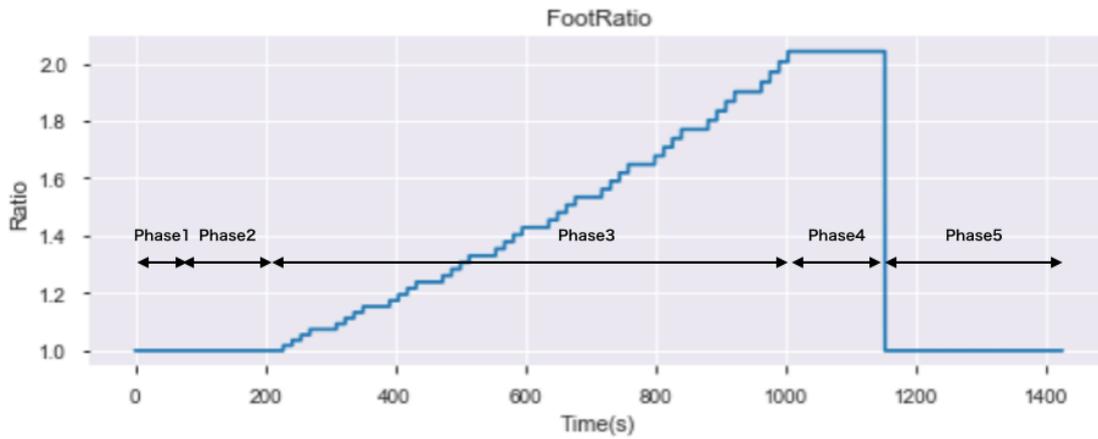


図 9:歩幅の倍率のグラフ

Fig.9 Ratio of stride

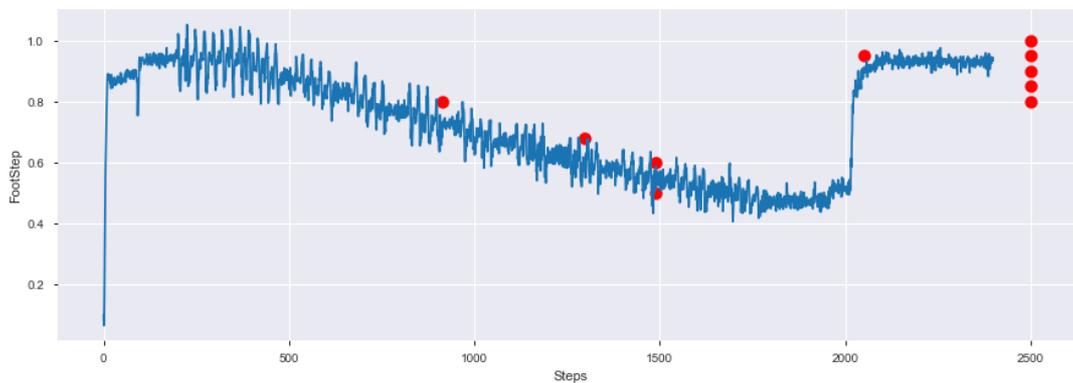


図 11:全被験者の歩幅の平均の推移

Fig.11 Average of stride

についてヒアリングし、「歩幅が変わった」という言及があったタイミングを「気付いたタイミング」とした。

## 2) 歩幅の変化の定量化

実際の歩幅がどれだけ変更されているのかを評価するために、コントローラの位置情報から実際の歩幅を算出した。VR 空間内のマーカの幅は一定のため、VR 空間内の歩幅の倍率と現実の歩幅は反比例する。

## 5 結果

1)各被験者が歩幅の変化に気付いた倍率を図 10 に示す。図 10 では、歩幅の変化に気付かなかった被験者の倍率は最大倍率である 2.04 倍としている。

歩幅が 1.3 倍程度および 1.6 倍程度で気付いた被験者が各 1 名、1.7 倍程度で気付いた被験者が 2 名、6 名は歩幅が約 2 倍となってもその変化に気付かなかった。歩幅の変化に気付かなかった被験者の閾値を最大倍率である 2.04 倍として計算すると、平均  $1.87 \pm 0.24$  倍ま

図 10 歩幅の変更に気付いた倍率

Fig.10 Ratio when subject noticed

被験者ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
倍率	2.04	2.04	1.33	2.04	1.77	2.04	2.04	2.04	1.6	1.77

で歩幅の変化に気付かないという結果が得られた。さらに、最後まで変化に気付かなかった 6 名の内 5 名は Phase5 の歩幅フィードバックを等倍に戻し、トレッドミルのスピードが急に早くなるタイミングでも、その変化に気付くことはなかった。

2)図 11 は、横軸に歩数、縦軸に全被験者の歩幅をマーカの基本間隔で割った値の平均を取り、グラフ化したものである。図 9 と比較して、VR 空間での歩幅の倍率に反比例して現実の歩幅が変化している。このことから、この運動系に適応していることが分かる。

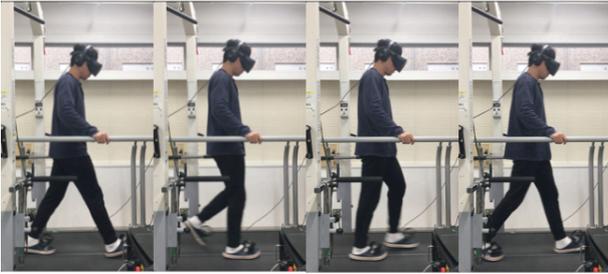
図 11 の赤丸は各被験者が歩幅の変化に気付いたタイミングを示している。

運動学習前後でのある被験者の歩幅の変化を図 12 に示す。

## 6 考察

被験者 10 名中 6 名において、自分の歩幅が半分となっていることに気付かない状況を作り出すことに成功した。リダイレクテッドウォーキングの研究[4]において Frank らは並進方向の倍率は 1.2 倍程度と述べているのに対し、本実験では歩幅が半分となったことで 2 倍の並進移動量操作を行っていると考えることができ、従来研究よりも

## 学習前



## 学習後(2倍)

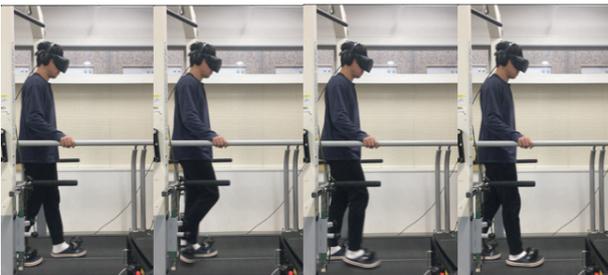


図 12: 学習前後の歩幅の変化

Fig.12 Transition of stride

大きな操作が可能となった。しかし、Frankらの評価手法は二肢強制選択法を用いており、被験者にバイアスがかかってしまうため、バイアスのない状態でのリダイレクテッドウォーキングとの比較が必要であると考えられる。

また、本実験の被験者は全員 VR 経験が初めてあるいは一回のみだったことが影響している可能性は否定できない。VR 体験に慣れず、注意力が散漫だった可能性がある。さらに、トレッドミル上での歩行という点も影響している可能性は考えられる。安全のため手すりを掴んだ状態で歩行運動させたことにより、トレッドミルからのフィードバックを受け取っている可能性もある。

歩幅の変化に気付いた4名の内2人は「歩幅が変わった」と明確に答えてはならず、「トレッドミルのスピードが遅くなった」と回答していた。これは歩行動作は普段視覚制御をしておらず、体性感覚に頼っているためこのような表現になったと考えられる。

## 7 おわりに

本研究では、運動学習により歩行動作の内部モデルを変更することによって実空間での移動量を低減し、実空間よりも広い VR 空間を歩行させるための手法を提案し、被験者実験によりその効果を検証した。実験では、被験者の約半数が、自身の歩幅が短くなっていることに気付くことなく、VR 空間内を違和感なく歩行することができ、歩行運動に対しても運動学習を適用できることが示唆された。

今後は、歩幅の視覚フィードバックが変化した運動系においてどれだけ適応できているのか、より詳細に解析を進めていく。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 19H04150 の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1]John M Hollerbach: Locomotion interfaces; Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications, 239-254 (2002)
- [2]Medina Eliana, Ruth Fruland, and Suzanne Weghorst: Virtusphere: Walking in a human size VR “ hamster ball ”; Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, vol(52), 2102-2106 (2008.9)
- [3]Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C. Whitton: Redirected walking; Proceedings of EU- ROGRAPHICS, vol(9), 105-106 (2001.9)
- [4]Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe: Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol(16), 17-27 (2010.1)
- [5]松本圭吾, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通考: 視触覚相互作用を用いた曲率操作型リダイレクテッドウォーキング: TVRSJ vol(23) No.3 129-138(2018)
- [6]Reza Shadmehr, Maurice A.Smith, and John W.Krakauer: Error Correction, Sensory Prediction, and Adaptation in Motor Control: Annual Review of Neuroscience, vol(33),89-108(2010.7)
- [7]Masaya Hirashima and Daichi Nozaki: Distinct Motor Plans Form and Retrieve Distinct Motor Memories for Physically Identical Movements: Current Biology vol(22), 432-436(2012.3)
- [8]Mijail D. Serruya, Nicholas G. Hatsupoulos, Liam Paninski, Matthew R. Fellows and John P.Donoghue : Instant neural control of a movement signal:Nature 416, 141-142(2002)
- [9]望月典樹, 中村壮亮: Motion-Less VR:リアル身体の運動を必要としない全身没入型 VR インタフェース: 第24回日本バーチャリアリティ学会大会論文集(2019.9)

(c) 2020 by the Virtual Reality Society of Japan ( VRSJ )