原著論文

身体がない仮想現実環境において歩行と視点移動の同期が臨場感を伴う

西山 雄大, 植林 尚之, 野村 収作

長岡技術科学大学

Movement Consistency between Walk and Viewpoint is Accompanied with Feeling of Presence in a Virtual Reality Environment where a Body is not Presented

Yuta NISHIYAMA, Naoyuki UEBAYASHI and Shusaku NOMURA

Nagaoka University of Technology, 1603 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan

Abstract : In a virtual reality (VR) environment, users often control virtual bodies. While having a body is likely to promote a feeling of presence, does an invisible body make users lose the feeling? Using a head mounted display and 360-degree camera shooting pseudo image, we constructed a situation where participants can walk “with an invisible body.” The camera was moved in accordance with the participant’s walking and was hung at the height of the participant’s line of sight, so the participants felt walking in the virtual space freely. We tested a feeling of presence in the proprietary developed VR with/without obstacle in the image and found that the feeling of presence was maintained even in the situation when they virtually “transmitted” the obstacle. Our findings suggest that consistent somatosensory-vestibular-visual stimuli during walking are accompanied with the feeling of presence even when a body was not presented.

Keywords : Invisible body, Walking, Virtual reality

1. はじめに

ここ数年、精密なヘッドトラッキング機能を有する種々のヘッドマウントディスプレイ (HMD) が市販されるようになり、仮想現実 (VR) におけるユーザーの没入感は飛躍的に向上した [1]. 高機能のHMDを用いることで、ユーザーは“いまここに居るという感覚” (以降これを「臨場感」と呼ぶ) を強く感じることができる. VRでは、しばしばアバターやハンドトラッキングのような仮想身体により仮想環境内におけるユーザー自身の“存在”を明示することも多い [2]. 当たり前のことだが、実世界では自身の身体がないという状況は想像すら難しく [3], より実世界と同じように振る舞えるVR環境を志向するとき、仮想身体を想定することは自然なことである.

一方、最近の神経学的研究では、被験者の身体とそれを模した模型に対して多感覚同期的な刺激を与えるという実験パラダイムを導入し、自己の身体とその認識との関係性について研究がなされてきた [4, 5]. 例えば、ゴムの手錯覚 (Rubber Hand Illusion) の実験では、被験者はゴムでできた偽物の手が実験者に“触られる”様子を見ながら、実際に自分の手 (被験者は自分の手を直接目視できないように置かれている) が実験者により同期的に刺激されると、被験者はゴムの手があたかも自分の身体の一部であるように感じる [6]. こうした模型に対して自身に帰属していると感じる感覚は「所有感 (Sense of Ownership)」と呼ばれ [4, 7], 自己意識と身体的特徴 (形状・質感) を強く関連付ける感覚とされている [5, 8]. しかしながら、最近の研究では、自身の身体が“視覚的に

存在しない”状況であっても多感覚同期刺激により所有感が生じることが報告されている [9-11]. つまり、所有感は身体に基づく自己意識に関わる感覚であるものの、必ずしも身体的特徴そのものに隷属している訳ではないと考えられる. その様に考えた場合、VR空間においてハンドトラッキングのような身体表現やアバターのような仮想身体が無くとも Sense of Ownershipとしての所有感は生まれるかもしれない. また、そうした所有感はVRがもたらす臨場感そのものに対しても強く関連しているのかもしれない.

以上の研究動機に基づき、本研究では“視覚的に身体が存在しない状況で歩行する”という状況をVRと実空間の歩行により構成し、心理的な臨場感が伴われるか否かを検証した. つまり、歩行動作による体性感覚・前庭感覚のフィードバック、およびそれらに整合的な視点移動の多感覚同期刺激により、身体が存在しないVRにおいても「臨場感」が伴うか否かを検証した.

2. 実験手法

前節に述べた研究目的に対し、本研究では、HMDを用いて視覚的に身体がない状況で歩行できる環境を構築した (図1 (a)). HMDには実験参加者にとって既知の場所が投影されているが、実際には中空に吊るされた360°カメラからのライブ映像のため、参加者は自身の身体が見えず視点のみが宙に浮いているような状況になっている. この状況で参加者には歩行動作を行ってもらうが、その際360°カメラを参加者の歩行に合わせて動かすことで、被験者はあたかも自分自身

が歩行して視点が動いている（なおかつ自身の身体は存在しない）ように感じる。この実験系を用い、HMDを装着して歩く試行を2種（障害物あり・なし）、さらにHMDを未装着で歩く試行を1種行った。

2.1 実験参加者

健康成人男性18名（年齢19–23歳，平均21歳）が実験に参加した。実験内容の説明の後，すべての参加者が実験参加同意書に署名した。本研究はヘルシンキ宣言の原則に則り，長岡技術科学大学倫理委員会の承認を得て実施された。

2.2 実験条件：通常歩行 (Normal), HMD通常歩行 (HMD_norm), HMD障害物歩行 (HMD_obst)

参加者は歩行エリアまたはHMDエリアを歩く（図1 (a)）。実験条件は次の3種ある。1)「通常歩行」では，参加者はHMDを装着せずに歩行エリアを歩く（図1 (b)）。これに対し，2)「HMD通常歩行」では，参加者はHMD (Oculus Rift cv1, Oculus VR, LLC, U.S, 解像度2160×1200 pixel, 視野角110°)を装着してHMDエリアを歩く（図1 (c)）。このときHMDに投影される映像は歩行エリアである。つまり，実際には参加者はHMDエリアで歩くが，その歩行に合わせて，視覚的には歩行エリアのスタート地点からゴール地点まで歩いているような映像が投影される。2)「HMD障害物歩行」はHMD通常歩行と同様だが，歩行エリアの中間地点に障害物（ダンボール箱W500, D750, H625 mmを3個設置）が置かれている（図1 (d)）。実際に障害物が置かれているのは歩行エリア内のみであり，中空カメラはその上を通過することができるため，参加者の視覚的にはあたかも障害物をすり抜けるような映像刺激となる。

歩行エリアに設置された360°カメラ (Theta s, RICOH社製) は，歩行エリアの2.5 m上空を通るレール（スタート地点と

ゴール地点を結ぶ）から吊り下げられており，レンズの高さは各参加者の直立時の目の高さに調節された。HMDに投影されるライブ映像はカメラ位置で全方向取得されており，参加者は歩行エリア内で自然に周囲を見回すことができる。参加者には，HMDを装着した時点で周囲を見回すよう指示した。さらに，見下ろした際に自身の身体が視覚的には無いことを確認させた。

2種類のHMD歩行条件では，訓練された実験者がカメラの水平位置を参加者の移動に合わせて手動で動かした。尚，「HMD障害物歩行条件」では，映像内の歩行経路に障害物（段ボール箱）があるが，参加者はそれを“無視して”直進するよう教示された。カメラは箱の上空を通り過ぎることができるため，参加者は視覚的に障害物をすり抜けることができる。

2.3 実験手順

参加者は実験中に行う動作を歩行エリアで練習した後，3条件それぞれについて10分程度の実験ブロックを3セット同日に実施した（参加者内実験計画）。ブロックの実施順序はカウンターバランスを考慮した。実験中，参加者には白色雑音が流れるノイズキャンセリング機能ヘッドホン装着させ，マイク入力による実験者の指示のみが与えられた。

実験条件は前節の3種だが，参加者が行う動作は共通している。まず参加者は閉眼のままスタート地点（通常歩行ではA地点，両HMD歩行ではB地点：図1 (a)）に誘導され，進行方向へと身体の向きを調整される。次に参加者は目を開けゴール地点（看板で示される）まで直進するよう指示される。その際，歩幅や速さについては，できるだけ普段通りに歩くよう教示された。ゴール地点に着くと再び目を閉じ，後述の歩行時間の報告を行うと1試行が終了する。以上の試行を各条件について10回ずつ，エリア内を往復するように実施した。全試行終了後，参加者は質問表に回答した。

図1 実験環境と3種の実験条件

(a) 実験環境の俯瞰写真。参加者は実験条件によりスタート位置AまたはB (A', B'は復路時) からゴール位置（スタート位置から5 m前方に看板設置）まで直進する。(b)「通常歩行」条件では，参加者はHMDを装着せず歩行エリアを歩く。(c)「HMD通常歩行」条件では，参加者はHMDを装着しHMDエリアで歩く。ただし，HMDには歩行エリアのライブ映像が投影されるため，参加者は歩行エリアで歩いているような視覚刺激を与えられる。(d)「HMD障害物歩行」条件では，投影された歩行エリアに障害物が置かれている。ただし，障害物の実体はカメラ（視点）の置かれた歩行エリアにあり，参加者が歩くHMDエリアにはないため，参加者は視覚的に障害物をすり抜けることができる。

身体がない仮想現実環境において歩行と視点移動の同期が臨場感を伴う

2.4 評価指標

(1) 歩行時間

各試行において客観的および主観的歩行時間を評価した。客観的歩行時間は試行ごとに実際に参加者が歩いてゴールまで到達するまでの時間である。さらに主観的歩行時間として、参加者自身がゴールに到達した直後にその試行で自分が歩いた時間(秒)をストップウォッチにより見積もらせた。

(2) 歩行軌跡

HMD装着時の歩行軌跡を床上高さ6mに設置されたビデオカメラ(Gopro Hero8, Woodman Labs社製。Camera mode: 2.7K 4:3 60fps Wide Lens)により記録・評価した。記録された映像の歪み補正を行った後、フレーム毎に参加者の頭部位置を取得した。参加者間の身長差による誤差を排除するため、各参加者の身長から推定される地面位置での座標を算出した[12]。この座標データから、参加者の進行角度変化の標準偏差を算出した。

(3) 心電図

ワイヤレス生体計測装置(Polymate Mini, 株式会社ミユキ技研)を用いて歩行中の心電図を計測し、計測波形からR-R間隔に基づく瞬時心拍数を求めた(Acqnaledge4.1, BIOPAC社)。尚、心拍数はzスコアを用いて標準化した。

(4) 心理評価

HMD歩行時の心理的な「臨場感」および能動的な動きの自覚(「主体感」: Sense of Agency [13])に関して、身体認識に関する先行研究を参考に質問表を作成した[14, 15]。臨場感は「いまここにいる」という感覚であり、「ここ」に関する感覚と「いま」に関する感覚に分けて質問項目を設定した。「ここ」に関する質問として「映像の場所に実際にいるように感じた」(質問1)および、「いま」に関する質問として「事前に録画された映像だと感じた」(質問2)という質問を設けた(ただし、質問2の得点は逆符号表記とした)。またこれとは別に「主体感」に関する質問として「自ら歩いて視線を移動させていると感じた」(質問3)を設けた。

参加者は各HMD歩行の終了後、歩いているときに感じたことについて、上述の3つの質問にノートパソコンとマウスを用いてヴィジュアルアナログスケール(VAS) (“まったくそう思わない”~“まったくそう思う”)により回答した。

(5) 統計手法

有意水準を $\alpha=.05$ とし、 t 検定を用いて解析した。通常歩行・HMD歩行2種の3条件を比較する場合はBonferroni補正により p 値を調整した。なお心理評価に関して、機材トラブルにより1名分のデータが損失したため17名分のデータを解析した。

図2 (a) 実際の歩行時間(客観的歩行時間). (b) 参加者が歩行直後に報告した歩行時間(主観的歩行時間)

エラーバーは標準誤差を示す。* $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$

3. 結果

3.1 行動様態

1試行につき実際に歩いた時間はHMD障害物歩行でもっとも長く、次にHMD通常歩行、通常歩行の順であった(図2(a)). Normal vs. HMD_norm: $t(17)=4.38, p=.001$; Normal vs. HMD_obst: $t(17)=6.01, p<.001$; HMD_obs vs. HMD_norm: $t(17)=3.29, p<.05$ 。また試行直後に参加者によって報告された歩行時間はHMD障害物歩行がもっとも長かった(図2(b)). Normal vs. HMD_norm: n.s.; Normal vs. HMD_obst: n.s.; HMD_obs vs. HMD_norm: $t(17)=3.17, p<.05$ 。

図3 参加者の歩行軌跡から算出された歩行ゆらぎ

エラーバーは標準誤差を示す。* $p<.05$

図4 平均心拍数のzスコア
(a) 試行ごとの結果. (b) 条件ごとの平均値.
エラーバーは標準誤差を示す.

歩行のゆらぎ（進行角度変化の標準偏差）はHMD歩行でのみ計測された。条件間で有意な差があり，HMD障害物歩行でより大きいばらつきを示した（図3. HMD_obs vs. HMD_norm: $t(17) = 2.88, p = .01$ ）。

図4は試行ごとの平均心拍数および条件ごとの平均心拍数を示している。統計的な差は認められないものの，全体の傾向として通常歩行の心拍数が高かった。また，1回目の試行においては両HMD歩行条件の心拍数が通常歩行よりも高い傾向にあった。

3.2 心理評価

「いま」「ここ」という臨場感，そして主体感がおおむね認められた（図5. one-sample t -test, Q1-HMD_norm: $t(16) = 15.1, p < .001$, Q1-HMD_obst: $t(16) = 8.54, p < .001$; Q2-HMD_norm: $t(16) = 2.16, p < .05$, Q2-HMD_obst: $t(16) = 1.27, p = .22$; Q3-HMD_norm: $t(16) = 13.91, p < .001$, Q3-HMD_obst: $t(16) = 7.12, p = .001$ ）。条件間の比較に注目すると，「ここ」に関する質問1ではHMD通常歩行の得点が有意に高い（ $t(16) = 3.20, p < .01$ ）。「いま」に関する質問2では条件間の得点差はなく，どちらの条件でも個人差が大きく否定と肯定が同数程度である。主体感に関する質問3では条件間の差はない。

図5 質問表への回答結果

質問2の得点は逆符号で示されている。箱の上下端および内線は四分位数を表し，ひげの上下端は最大値最小値を表す。全データが点でプロットされており，ひげの外側の点は第一第三四分位数を基準に四分位範囲の1.5倍を超える外れ値を示す。

4. 考察

HMDを用いたVR環境において，操作対象となる身体が提示されない場合，「いまここに居る」という臨場感は損なわれてしまうのだろうか？この疑問に対し，本研究では“視覚的に身体が存在しないままに歩行する”という状況を仮想空間により構築し，その空間に対する心理的な臨場感の有無を調査した。

実験参加者が装着するHMDには参加者が既に見知った場所の映像が投影されている。ただし，どこを見てもその映像中に身体はなく，視点が宙吊りになっている。その状況で参加者は歩行するよう指示され，なおかつ，進路に障害物があってもそれを無視して通り抜けるよう求められた。その結果，障害物がある場合において，参加者の歩行時間は客観的にも主観的にもより遅く，歩行軌跡はより大きいゆらぎを示した。これは進行方向の障害物に対する行動としてある意味で自然な反応であるように思える。しかしながら，そのように障害物を認識して行動様態を変化させつつも，参加者は障害物をすり抜ける場合でさえ「ここ」という場所に関する感覚を有し，「いま」という時間に関する感覚も完全に失われることはなかった。つまり，“身体が存在しない”という非現実的なシチュエーションにおいても尚，歩行による体性感覚・前庭感覚のフィードバック，およびそれらに整合的な視点移動による多感覚同期刺激がある場合は「臨場感」が伴われることが示唆された。

さらに「主体感」についても障害物の有無に関わらず高い得点を示した。主体感はSense of Agencyと呼ばれ，「私が行為の原因である」と感じることであり，意図した行為が適切に実行されることで生じる[13, 16]。本研究でも歩行するのは参加者自身であるから，主体感が高スコアになることは理解

身体がない仮想現実環境において歩行と視点移動の同期が臨場感を伴う

できる。ただし、本研究では、実際には実験者が参加者の動作に合わせてレールに吊り下げたカメラを手動で移動させているため、参加者の主体的な動作に対し視点移動のずれを完全になくすることはできない（特に始動停止時の遅れや実際と映像の進行方向のずれ）。それにもかかわらず、参加者が自ら視点を動かしていると感じていることは、歩行と視点移動の対応づけが頑健であることを示唆している。これは、歩行時の主体感が時空間的なずれに頑健であることを示す先行研究と整合的である。例えば、歩行によってスクリーン上の仮想身体を操作するVR環境において、両者の軌跡間に時空間的なずれ（時間：210 ms以内、空間：10°以内）が提示されるときでさえ、参加者は主体感を感じることができる[17, 18]。同研究では、参加者は無自覚にずれを補償するように動くことも示されているが、本研究で観察されたHMD条件で実際の歩行時間の伸長は、視点移動のずれに対する動作補償が影響しているのかもしれない。

現在、HMDに代表されるVR技術は神経学的研究の重要な研究ツールに留まらず[2, 19]、高度に適応的で制御可能なツールとして、身体機能を改善するための理学療法への応用でもその注目度は増してきている[20, 21]。このような利用法において、ユーザーはアバターを操作して作業をこなし、その結果がVR環境内で直ちに反映されるようなリアルタイム・多感覚フィードバックが与えられる。行為の観察は同等の行為の実行に関わる脳内運動系を充進する[22]ことから、自身の運動結果の観察と改善の機会が与えられるという点で、このリアルタイムフィードバックの仕組みは重要である。一方、現実には起こりえないことを可能とするVR技術の利点を最大限生かすならば、あえてユーザーが意図しても実際にはできない動作をVR環境で実現させる仕組みも考えられる。このような物理的な制約を超えた発想は、ユーザーの感性に着目するからこそ生み出すことができる。本研究では、身体がなくとも参加者の運動と視点移動の同期は臨場感を伴った。このことを踏まえ、たとえば、あえてアバターを使わず、意図する動作が環境に与える結果のみを整合的にフィードバックするといった仕組みを構築することで、実際には運動が起こらなくとも、意図と結果の整合性が臨場感を伴い、逆に実際には働いていない運動系に働きかけることができないうだろうか。そのためには、歩行によって生じる感覚フィードバック自体も実験的に操作するような環境を構築するなど、臨場感を引き起こすための最小要件を見極めるさらなる研究が必要となるだろう。以上のように、VR環境中の身体の内方をも考慮した臨場感の起源の探求は、現実世界では味わえない臨場感をもたらすシステムという点で感性工学分野への寄与が期待できる。

本研究には以下の制約がある。まず、本研究は視覚的に身体がない場合の障害物への反応を調査したが、HMD着用時の身体の有無による効果を比較するためにアバターの利用やHMD前面のカメラ映像による通常視点の歩行など、「身体がある」条件についても検討の余地がある。さらに、本研究では参加者の歩行に視点移動を同期させたが、特に主体感に

対して参加者の能動性の寄与を確かめるためには、たとえば車椅子や台車などで受動的に動かされる状況も加えて比較検討する余地がある。

5. ま と め

本研究では、HMDに360°カメラで取得したリアルタイム映像を投影することで、視覚的に身体がないVR環境を構築した。この環境において、ユーザー自らの歩行に合わせて映像の視点が移動するとき、障害物をすり抜けるような特殊な状況でさえ心理的な臨場感が伴われるかを調査した。その結果、参加者は視覚的に身体が無いと認識しつつ障害物に対して行動様態を変え、そのうえで心理的には臨場感を感じていた。このことから、VR環境において視覚的に身体がなくとも、歩行と視点移動の同期が臨場感をもたらすことが示唆された。

謝 辞

本研究はJSPS科研費JP19K20384の助成を受けて実施された。

参 考 文 献

- [1] Jensen, L., and Konradsen, F.: A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4), pp.1515-1529, 2018.
- [2] Sanchez-Vives, M. V., and Slater, M.: From presence to consciousness through virtual reality. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, pp.332-339, 2005.
- [3] James, W.: *The principles of psychology*. Dover, New York, NY., 1890.
- [4] Ehrsson, H. H.: Multisensory processes in body ownership. In *Multisensory Perception*. Academic Press, pp.179-200, 2020.
- [5] Blanke, O., Slater, M., and Serino, A.: Behavioral, neural, and computational principles of bodily self-consciousness. *Neuron*, 88(1), pp.145-166, 2015.
- [6] Botvinick, M., and Cohen, J.: Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), p.756, 1998.
- [7] Kiltner, K., Maselli, A., Kording, K. P., and Slater, M.: Over my fake body: body ownership illusions for studying the multisensory basis of own-body perception. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 141, 2015.
- [8] Park, H. D., and Blanke, O.: Coupling inner and outer body for self-consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(5), pp.377-388, 2019.
- [9] Guterstam, A., Abdulkarim, Z., and Ehrsson, H. H.: Illusory ownership of an invisible body reduces autonomic

- and subjective social anxiety responses. *Scientific Reports*, 5, 9831, 2015.
- [10] D'Angelo, M., Di Pellegrino, G., and Frassinetti, F.: Invisible body illusion modulates interpersonal space. *Scientific Reports*, 7(1), pp.1-9, 2017.
- [11] Kondo, R., Sugimoto, M., Minamizawa, K., Hoshi, T., Inami, M., and Kitazaki, M.: Illusory body ownership of an invisible body interpolated between virtual hands and feet via visual-motor synchronicity. *Scientific Reports*, 8(1), pp.1-8, 2018.
- [12] Boltes, M., and Seyfried, A.: Collecting pedestrian trajectories, In: *Neurocomputing, Special Issue on Behaviours in Video*, 100, pp.127-133, 2013.
- [13] Chambon, V., Sidarus, N., and Haggard, P.: From action intentions to action effects: how does the sense of agency come about?. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 320, 2014.
- [14] Longo, M.R., Schüür, F., Kammers, M.P., Tsakiris, M., and Haggard, P.: What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition*, 107(3), pp.978-998, 2008.
- [15] Gonzalez-Franco, M., and Peck, T.C.: Avatar embodiment. Towards a standardized questionnaire. *Frontiers in Robotics and AI*, 5, 74, 2018.
- [16] Wolpert, D.M., Ghahramani, Z., and Jordan, M.I.: An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), pp.1880-1882, 1995.
- [17] Kannape, O.A., Schwabe, L., Tadi, T., and Blanke, O.: The limits of agency in walking humans. *Neuropsychologia*, 48(6), pp.1628-1636, 2010.
- [18] Kannape, O.A., and Blanke, O.: Self in motion: sensorimotor and cognitive mechanisms in gait agency. *Journal of Neurophysiology*, 110(8), pp.1837-1847, 2013.
- [19] Herbelin, B., Salomon, R., Serino, A., and Blanke, O.: Neural mechanisms of bodily self-consciousness and the experience of presence in virtual reality. *Human Computer Confluence*, pp.80-96, 2016.
- [20] Kannape, O.A., Barré, A., Aminian, K., and Blanke, O.: Cognitive loading affects motor awareness and movement kinematics but not locomotor trajectories during goal-directed walking in a virtual reality environment. *PloS one*, 9(1), e85560, 2014.
- [21] Howard, M.C.: A meta-analysis and systematic literature review of virtual reality rehabilitation programs. *Computers in Human Behavior*, 70, pp.317-327, 2017.
- [22] Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., and Rizzolatti, G.: Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of neurophysiology*, 73(6), pp.2608-2611, 1995.

西山 雄大 (非会員)

2012 年 神戸大学大学院理学研究科博士後期課程修了。同年 新潟大学超域学院特別研究員。2014 年 大阪大学産学連携本部特任助教。2017 年 長岡技術科学大学工学部講師。理論生命科学、内部観測。博士 (理学)。

y-nishiyama@kjs.nagaokaut.ac.jp

植林 尚之 (非会員)

2018 年 熊本高等専門学校機械知能システム工学科卒業。2020 年 長岡技術科学大学工学部情報・経営システム工学課程卒業。

野村 収作 (正会員)

2001 年 神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年 室蘭工業大学 PD。2003 年 島根大学総合理工学部助手。2008 年 長岡技術科学大学産学融合トップランナー養成センター特任准教授。2020 年 同大学工学部教授。アンビエント生体医工学研究に従事。博士 (理学)。