

VRでの歩行を伴う物体運搬作業における一人称視点と三人称視点の切り替えが身体化感覚と作業効率に及ぼす影響

松田 勇祐, 平田 幸広

あらまし 本研究では、バーチャルリアリティ(VR)環境において、ユーザが一人称視点と三人称視点を切り替えることができるシステムを開発した。この視点切り替えシステムが、一人称視点や三人称視点のみを用いた場合と比較して、具現化感覚、臨場感、VR乗り物酔い、タスク効率にどのような影響を与えるかを調査した。このタスクは「物体を運ぶタスク」であり、指定された物体が限られた時間内に指定された箱に入れられ、VR環境での「歩行」を伴うものであった。この課題は、先行研究よりも自由度が高く、複雑であった。実験の結果、三人称視点に切り替えることで、具現化感覚が向上することが明らかになった。しかし、一人称視点に対する大きな優位性は見られなかった。

キーワード：一人称視点, 三人称視点, 視点切り替え, 身体化感覚, 作業効率, バーチャルリアリティ

1. Introduction

COVID-19パンデミックの発生以来、没入型バーチャルリアリティ(VR)コンテンツが注目されるようになり、その多くは一人称視点(1PP)からコンテンツを体験することである。多くのVRコンテンツは、実際の視覚、聴覚、触覚刺激をシミュレートしており、人々は仮想空間をより現実的な世界として認識することができる。このVRコンテンツは、ユーザーに高品質なVR体験を提供する。したがって、VR空間における視点を実世界における視点と同じにする(すなわち、1PP)ことは自然である。実世界と同じ刺激や視点を提供することで、臨場感(SoP)^{1,2)}として知られるユーザーの「そこにいる」感覚を高めることができる。SoPは、ユーザーがVRコンテンツにどのように没頭しているかを示す指標とみなされており、これまでの多くのVR研究において重要である。

SoPを強化する一つの方法は、VRアバターを導入することである。現実世界に自分の身体が存在し、手や足の位置を視覚情報として認識できるようになれば、VR空間にアバターを導入することで、SoPが向上することが期待できる。しかし、この効果が起こるためには、ユーザーはアバターが自分の体の一部であるという錯覚を経験しなければならず、これはSoE(Sense of Embodiment)として知られている。

さらに、SoEは3つのサブコンポーネントによって特徴付けられる: Sense of Ownership(SoO)は、仮想身体が自分自身の現実の身体であるという感覚であり、Sense of Agency(SoA)は、仮想身体の動きが自分自身の行動によって引き起こされるという感覚であり、Sense of Self-Location(SoSL)は、仮想身体にいるという感覚である^{3,4)}。これまでの研究で、SoEやその下位構成要素における錯覚は、視覚-触覚同期^{5,6)}や視覚-運動同期^{7,8)}によって生じることが実証されている。例えば、Sanchez-Vivesら(2010)は、モーションキャプチャを用いて実アームと仮想アームの動きを同期させ、参加者に仮想アームを観察させた。その結果、ゴム手錯視⁹⁾が誘発され⁸⁾、仮想腕のSoO錯視が発生した。さらに、これらの感覚とSoP^{10,11)}の関係を示した研究がいくつかある。つまり、VRアバターを用いてSoPを強化する有効な方法の一つは、ユーザとアバターの動きを同期させ、SoE(またはその3つのサブコンポーネント)に錯覚を誘発することである。

VR環境で一人称視点とVRアバターを同時に使用することで、よりリアルな体験ができるが、いくつかのデメリットが予想される。まず、一人称視点から見ると、自分のVRアバターはほとんど見えない。したがって、ユーザーはアバターを自分の身体として認識しない。ユーザが直接自分自身を観察できない場合、自分の動作とVRアバターが同期しているかどうかを確認できないため、SoEが低下する可能性がある。没入型VRコンテンツに関する体験のリアルさが低下する可能性がある。

Received June 6, 2024; Revised September 25, 2024; Accepted November 12, 2024

† Faculty of Engineering, Suwa University of Science
(Nagano, Japan)

This paper includes videos. Note that the videos are not viewable from this PDF file. The videos are available as separate files on the website that hosts this PDF file..

【機械翻訳コンテンツの著作権について】

当サイトに掲載されている原著論文の著作権は映像情報メディア学会に帰属します。原著論文および翻訳論文の無断使用は禁止します。
引用の際には、必ず原著論文の書誌情報をご記載ください。詳細は映像情報メディア学会著作権規定をご覧ください。

Effects of First- and Third-Person Perspective Switching on Sense of Embodiment and Task Efficiency in Object-Carrying Tasks with Walking in VR

Yusuke Matsuda[†] (member) and Yukihiro Hirata[†]

Abstract In this study, we developed a system that allow users to switch between first- and third-person perspectives in a virtual reality (VR) environment. We investigated how this perspective-switching system affects the sense of embodiment, sense of presence, VR motion sickness, and task efficiency, compared to using only first- or third-person perspectives. The task was an "object-carrying task" where a designated object was placed in a designated box within a limited time, accompanied by "walking" in VR environment. This task had a higher degree of freedom and complexity than those in previous studies. The experiment revealed that switching to a third-person perspective improved the sense of embodiment. However, there was no significant advantage over the first-person perspective.

Keywords: first-person perspective, third-person perspective, perspective switching, sense of embodiment, task efficiency, virtual reality.

1. Introduction

Since the onset of the COVID-19 pandemic, immersive virtual reality (VR) content has gained prominence, much of which involves experiencing content from a first-person perspective (1PP). Many VR contents simulate actual visual, auditory, and tactile stimuli, allowing people to perceive the virtual space as a more realistic world. This VR content provides users with a high-quality VR experience. Therefore, it is natural to make the viewpoint in the VR space the same as that in the real world (i.e., 1PP). Providing the same stimuli and viewpoints as in the real world can enhance the user's sense of "being there," known as the Sense of Presence (SoP)^{1, 2)}. SoP is regarded as an index of how the user is immersed in VR content and is important in many previous VR studies.

One way to enhance the SoP is by introducing VR avatars. Just as one's own body exists in the real world, allowing individuals to perceive the positions of their hands and feet as visual information, introducing an avatar in the VR space can be expected to increase SoP. However, for this effect to occur, users must experience the illusion that the avatar is a part of their body, known as

the Sense of Embodiment (SoE). Furthermore, SoE is characterized by three sub-components: the Sense of Ownership (SoO), which is the feeling that a virtual body is one's own real body; the Sense of Agency (SoA), which is the feeling that a virtual body's movement is caused by one's own actions; and the Sense of Self-Location (SoSL), which is the feeling of being in a virtual body^{3, 4)}. Previous studies have demonstrated that illusions in SoE or its subcomponents can be generated by visual-tactile synchronization^{5, 6)} or visual-motor synchronization^{7, 8)}. For example, Sanchez-Vives et al. (2010) synchronized the movements of real and virtual arms using motion capture, leading participants to observe the virtual arm. As a result, the rubber hand illusion⁹⁾ was induced⁸⁾, showing the generation of SoO illusion for the virtual arms. Furthermore, several studies have indicated a relationship between these senses and the SoP^{10, 11)}. In other words, one effective method to enhance SoP using VR avatars is to synchronize the user's and avatar's movements, inducing an illusion in SoE (or its three sub-components).

Using a first-person perspective and a VR avatar simultaneously in a VR environment provides a more realistic experience, but is expected to have some disadvantages. Firstly, from a first-person perspective, one's own VR avatar is almost invisible. Therefore, users do not perceive the avatar as their own body. When users cannot directly observe themselves, their SoE may decrease because they cannot confirm whether their motions and their VR avatars are synchronized. This may

Received June 6, 2024; Revised September 25, 2024; Accepted November 12, 2024

[†] Faculty of Engineering, Suwa University of Science
(Nagano, Japan)

This paper includes videos. Note that the videos are not viewable from this PDF file. The videos are available as separate files on the website that hosts this PDF file..

VR環境でアバターを表示するためのバーチャルミラーが提案されている。鏡を置き、自分の姿を確認することで、SoEが向上することがいくつかの研究で確認されている^{3,7,12,13)}。しかし、自己観察のために多くのミラーを配置した場合、シーンの不自然さがSoPを低下させる可能性がある。したがって、VR環境においてユーザが自然に自分自身を観察できるようなシステムを考慮する必要がある。

第二に、一人称視点から自分自身とVR対象との位置関係を正確に認識することは困難である。前述したように、VR空間でアバターを観察することは困難である。ほとんどの場合、VRアバターの物理的特徴をユーザの物理的特徴と完全に一致させることは難しく、ユーザによって共通のアバターが使用されることが多い。したがって、自分自身と物体との間の距離を誤認する可能性が高い。さらに、一人称視点からの視野が狭いことも、この問題の原因である。不正確な空間認識は、VR環境で作業する際に問題を引き起こす可能性がある。上記の2つの問題に加えて、VR乗り物酔いは一人称視点を採用することによるもう一つの悪影響であると言える。

VRコンテンツに三人称視点(3PP)を用いることで、これらの問題に対処することができる。三人称視点は、長い間コンピュータゲームで利用されており、広い視野を特徴としている。いくつかの研究では、三人称体験は一人称体験に比べて空間認知度^{14,15)}を向上させ、VRの乗り物酔い¹⁶⁾を軽減することが報告されている。

一般に、VRコンテンツに三人称視点を用いると、没入感の度合いが低下する¹⁷⁾。ただし、SoEはサブコンポーネントの種類によって異なる^{15,18)}。例えば、Gorisseら(2017)は、具現化感覚の構成要素と考えられる3つの感覚について、一人称視点と三人称視点の違いの効果を検討した: SoO、SoA、SoSL¹⁵⁾。その結果、SoOとSoSLは、三人称視点よりも一人称視点で有意に多く発生することがわかった。しかし、遠近法の条件がSoAに影響を与えるという証拠はない。一人称視点と三人称視点には、それぞれ長所と短所がある。

本研究では、VR環境において、ユーザがいつでも一人称視点と三人称視点を切り替えることができるシステムを開発した。本システムは、一人称視点や三人称視点のみを提供するシステムと比較して、ユーザのタスクパフォーマンス、SoP、SoEに影響を与えるかどうかを検討した。

このようなシステムを開発することで、一人称視点と三人称視点の両方の長所を統合できるようになると考えている。具体的には、本システムが強力なSoEとSoPを提供しながら、タスクの効率を高めることが期待される。

いくつかの実験では、視点を切り替えたり^{18,19)}、他の方法²⁰⁾を用いたりすることで、一人称視点と三人称視点の両方の利点を活用することが試みられている。ほとんどの先行研究において、参加者は、その場で回転させたり、視点を特定の目標点に切り替えたりするなど、自由度の限られたタスクを実行した。対照的に、本研究では、参加者にVRルーム内を自由に歩き、指定されたオブジェクトを指定された箱に入れることができる「物体を運ぶタスク」を割り当てた。先行研究とは異なり、本研究の物体運搬タスクは高い自由度を持ち、より実世界のシナリオに近い行動をシミュレートした。したがって、SoPとSoEはVRコンテンツを評価するための重要な指標であると考えられた。

2. Methods

2.1 Observers

本研究には、ある大学の20~23歳(M=21.7)の観察者15名(男性14名)が参加した。すべての観察者は視力が正常か矯正視力であった。すべての参加者は、実験前にHMDを介してVRコンテンツについて少なくとも何らかの経験があった。ヒトを対象とした本研究は、スワ理学大学ヒト被験者研究倫理委員会の審査・承認を得た(承認番号:28)。すべての参加者は、研究への参加について文書によるインフォームド・コンセントを行った。

2.2 Apparatus

Windows OS 10 を搭載したコンピュータ(Intel Core i7 6700)を使用した。刺激提示は、ヘッドマウントディスプレイ(HMD; Oculus Quest 2, resolution 1832 × 1920 pixels, refresh rate 90 Hz)で表示したUnity(2021.1.6f.1)を用いて実施した。VR空間内の物体を操作するためにコントローラを使用した。最終的なIK Unityプラグインは、参加者の頭と手の動きをアバターの動きと関連付けるために採用された。

2.3 Stimuli

図1(a)、(b)に示すように、テクスチャーのある床(幅50m×奥行50m)と4つのテクスチャーのある側壁(幅40m×高さ10m×奥行1m)からなる仮想部屋を作成した。テクスチャーを施した床と側壁は、それぞれ木材と石材でできている。

reduce realism of experiences with immersive VR content. Virtual mirrors have been proposed for displaying an avatar in a VR environment. Several studies have confirmed that SoE is enhanced by placing a mirror and confirming one's figure^{3, 7, 12, 13}). However, if many mirrors are placed for self-observation, the unnaturalness of the scene may reduce the SoP. Therefore, it is necessary to consider a system that allows users to observe themselves naturally in a VR environment.

Secondly, it may be challenging to accurately perceive the positional relationship between ourselves and VR objects from a first-person perspective. As mentioned previously, observing an avatar in a VR space is difficult. In most cases, it is difficult to perfectly match the physical features of the VR avatar with those of the user, and a common avatar is often used by users. Therefore, there is a high possibility of misjudging the distance between ourselves and objects. Additionally, the narrow field of view from the first-person perspective is also a cause of this problem. Inaccurate spatial recognition could lead to problems when working in the VR environment. In addition to the above two problems, it can be said that VR motion sickness is another adverse effect of adopting the first-person viewpoint.

The use of the third-person perspective (3PP) for VR content may address these problems. Third-person perspective has long been utilized in computer games and is characterized by a wide field of view. Several studies have reported that a third-person experience improves spatial awareness^{14, 15}) and reduces VR motion sickness¹⁶) compared to a first-person experience in VR.

In general, the degree of immersion decreases when a third-person perspective is used in VR content¹⁷). However, the SoE differs depending on the subcomponent type^{15, 18}). For example, Gorisse et al. (2017) examined the effect of differences between the first- and third-person perspectives on three senses considered as components of the sense of embodiment: SoO, SoA, and SoSL¹⁵). The results showed that the SoO and SoSL occurred significantly more in the first- than in the third-person perspective. However, there is no evidence that the perspective condition affects the SoA. The first- and third-person perspectives each have their own advantages and disadvantages.

In this study, we developed a system that enables users to switch between first- and third-person perspectives at any time within a VR environment. We investigated whether this system influences user's task performance, SoP, and SoE compared to systems offering

only first- or third-person views. We believe that developing such a system will allow us to integrate the strengths of both first- and third-person perspectives. Specifically, we anticipate that this system will enhance task efficiency while providing a strong SoE and SoP.

Some experiments have attempted to leverage the advantages of both first- and third-person viewpoints by switching between viewpoints^{18, 19}) or using other methods²⁰). In most previous studies, participants performed tasks with limited degrees of freedom, such as rotating in place or switching viewpoints to specific target points. In contrast, this study assigned participants an "object-carrying task" in which they could freely walk within a VR room and place designated objects into designated boxes. Unlike prior research, the object-carrying task in this study featured a high degree of freedom, simulating behavior more akin to real-world scenarios. Therefore, the SoP and the SoE were considered important indicators for evaluating VR content.

2. Methods

2.1 Observers

Fifteen observers (14 men) aged 20-23 years ($M = 21.7$) from a university participated in this study. All observers had normal or corrected-to-normal vision. All participants had at least some prior experience with VR content via an HMD before the experiment. The study involving human participants was reviewed and approved by the Ethical Committee for Human-Subject Research at Suwa University of Science (Approval number: 28). All participants provided written informed consent to participate in the study.

2.2 Apparatus

We used a computer (Intel Core i7 6700) running Windows OS 10. Stimulus presentation was conducted using Unity (2021.1.6f.1) displayed through a Head-Mounted Display (HMD; Oculus Quest 2, resolution 1832×1920 pixels, refresh rate 90 Hz). Controllers were used to manipulate objects in the VR space. The final IK Unity plugin was employed to synchronize associate the head and hand movements of the participants with the avatar's movements.

2.3 Stimuli

As shown in Fig. 1 (a) and (b), we created a virtual room consisting of a textured floor (50 m width $\times$ 50 m depth) and four textured sidewalls (40 m width $\times$ 10 m height $\times$ 1 m depth). The textured floor and sidewalls are made of wood and stone, respectively. Four white displays (23.6 m width $\times$ 17.5 m height) were positioned

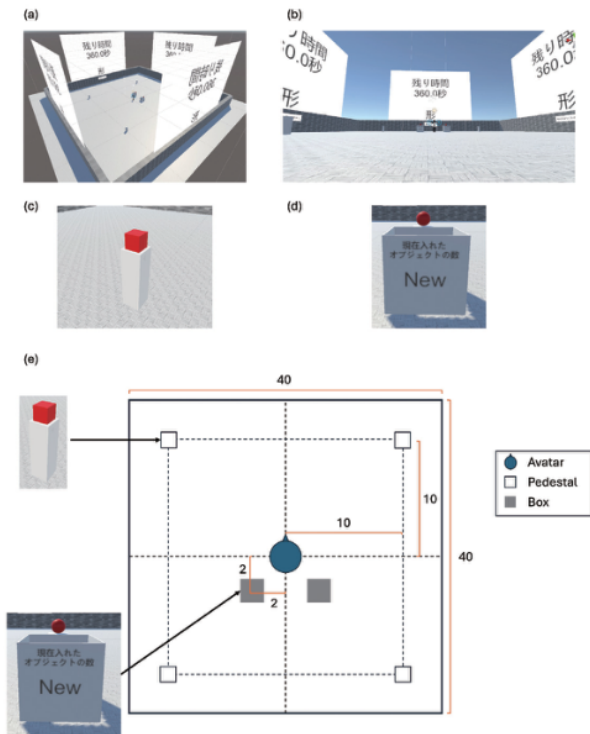
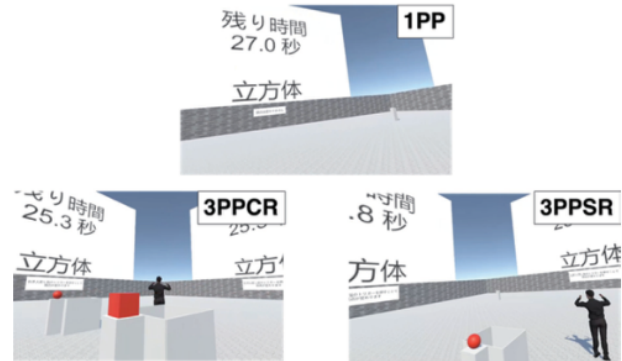


図1. VR環境におけるビジュアルシーン(a)VR部屋の全体図(上から見た図)、(b)VR部屋の内観、(c)物体が写っている台座、(d)物体を収納するための箱、(e)VR部屋の概略図(鳥瞰図)。長さの単位はメートルである。

4つの側壁の上に4つの白いディスプレイ(幅23.6m×高さ17.5m)を配置した。各ディスプレイの上部には残り時間(秒)が表示され、下部には日本語で運ぶべき物体(「立方体」または「球体」)が表示された。仮想室内では、台座(図1(c))に示すように、幅0.35m×奥行き0.35m×高さ1.25mを、中心から水平方向に10m、垂直方向に10mずつ、計4箇所(前右、前左、後右、後左)に設置した(図1(e))。赤い球体(直径0.25m)または赤い立方体(0.25m)が台座の上に置かれることが多かった(詳細は手順を参照)。球または立方体を収納するための2つの箱(図1(d))に示すように、幅1.0m×高さ1.0m×深さ1.0mを、それぞれ中心から水平方向に2m、垂直方向に-2m、水平方向に-2m、垂直方向に-2m配置した(図1(e))。各ボックスの前面には、上段が日本語で「現在内側にある物体の数」、下段が実際の箱の中の物体の数を示している。

全参加者の全身アバターとして、3次元人体モデルである東代(レンダリング担当者)を利用した。アバターの各目の高さは155cmとした。当初、アバターはバーチャルルームの中央に配置されていた。



ビデオ1. 3つの視点についての説明

実験を通して、アバターは3つの位置で追跡された：参加者が装着したHMDと、左右のコントローラが手に保持された。参加者の動作をリアルタイムで計測し、逆運動学に基づいてアバターの動作を決定した。さらに、アバターの歩行範囲は側壁内のスペース(幅40m×奥行き40m)に限定した。

この実験では、3つの視点を使用した：1PPと2種類の3PPである。1PPでは、参加者はアバターの視点からシーンを観察した(Video.1)。3PPでは、参加者はアバターの視点から4m後方の位置からシーンを観察した。2つの3PPのうち1つでは、参加者の頭部が回転するとカメラがアバターの周りを回転し、常にアバターの背中を捉えていた(ビデオ.1)。この条件を円周回転カメラ条件(3PPCR)と定義した。もう1つの3PPでは、参加者の頭部が回転するとカメラがその場で回転したが、頭部の回転によってアバターを捉えることができなかった(動画1)。この条件をスポットローテーションカメラ条件(3PPSR)と定義した。本実験では、1PP、3PPCR、1-3PPCR、1-3PPSRの4つの視点条件を用いた。1-3PPCR条件と1-3PPSR条件では、参加者はいつでも視点を切り替えることができた(ビデオ1)。

2.4 Procedure

実験中、参加者はHMDを装着し、2つのコントローラを持った。はじめに、白の画面に「立方体」または「球体」(日本語)を4方向にランダムに表示した。同時に、4つの台座のうちの1つの上に立方体と球体がランダムに現れた。参加者は、指定された物体(立方体または球体)を見つけ、運び、対応する箱に入れるよう指示された。ディスプレイに指定された物体から30秒以内に、正しい物体が対応する箱の中に置かれた場合、その課題は成功したと判断し、そうでない場合、失敗したと判断した。各視点条件は、6分間にわたって12回テストされた。最初の2つの試行は練習ラウンドとして機能し、これらの練習試行のデータは分析から除外された。

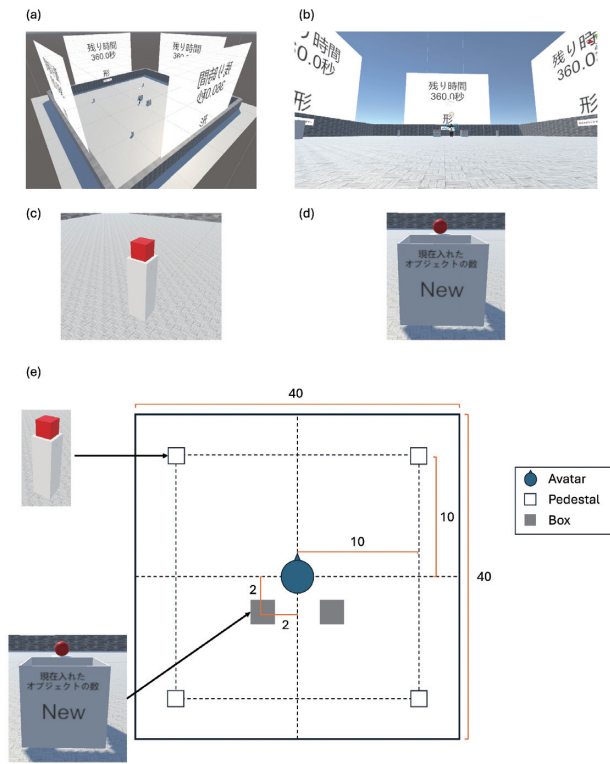
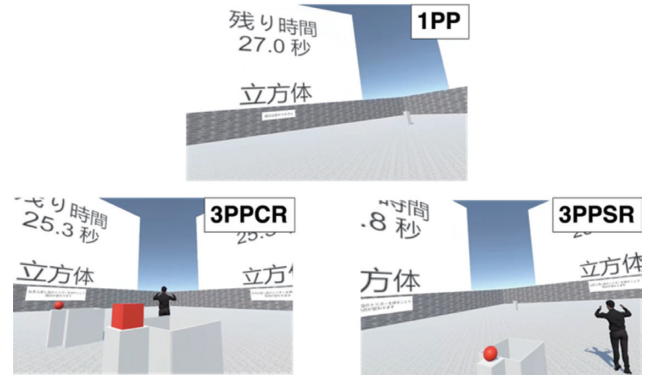


Fig 1. Visual scenes in the VR environment. (a) Overall view of the VR room (from top view), (b) interior view of the VR room, (c) pedestal where objects appear, (d) box for storing objects, (e) schematic view of the VR room (bird's eye view). Units of length are meters.

above the four sidewalls. The top of each display showed the time remaining (in seconds), while the bottom indicated the object to be carried ("cube" or "sphere" in Japanese). Within the virtual room, pedestals (0.35 m width $\times$ 0.35 m depth $\times$ 1.25 m height, as shown Fig. 1 (c)) were placed at four locations (front-right, front-left, back-right, back-left), each 10 m horizontally and 10 m vertically from the center (Fig. 1 (e)). A red sphere (diameter 0.25 m) or red cube (0.25 m) was often placed on top of the pedestal (see Procedures for details). Two boxes (1.0 m width $\times$ 1.0 m height $\times$ 1.0 m depth as shown Fig. 1 (d)) for storing spheres or cubes were placed 2 m horizontally and -2 m vertically, and -2 m horizontally and -2 m vertically from the center, respectively (Fig. 1 (e)). On the front of each box, the top section displayed the text "number of objects currently inside" in Japanese, and the bottom section showed the actual number of objects in the box.

We utilized a three-dimensional human model, Toshiro (Renderpeople), as a full-body avatar for all participants. The height of each eye of the avatar was set to 155 cm. Initially, the avatar was positioned at the center of the virtual room. Through the experiment, the avatar was tracked in three positions: the HMD the



Video 1. Explanation of the three perspectives.

participant wore, and the left and right controllers held in their hands. Participants' movements were measured in real time, and the avatar's movements were determined based on inverse kinematics. Additionally, the walking range of the avatar was limited to the space within the sidewalls (40 m wide $\times$ 40 m deep).

In this experiment, three perspectives were used: 1PP and two types of 3PP. In the 1PP, participants observed the scene from the viewpoint of the avatar (Video. 1). In the 3PPs, participants observed the scene from a position 4 m behind the avatar's viewpoint. In one of the two 3PPs, the camera rotated around the avatar when the participant's head rotated, always capturing the back of the avatar (Video. 1). This condition was defined as circumferential rotation camera condition (3PPCR). In the other 3PP, the camera rotated on the spot when the participant's head rotated, but it could not capture the avatar depending on the head rotation (Video 1). This condition was defined as spot rotation camera condition (3PPSR). In this experiment, four perspective conditions were used; 1PP, 3PPCR, 1-3PPCR, and 1-3PPSR. In the 1-3PPCR and 1-3PPSR conditions, participants could switch perspectives at any time (Video 1).

2.4 Procedure

During the experiment, participants wore an HMD and held two controllers. In the beginning, either "cube" or "sphere" (in Japanese) was randomly displayed on a white screen positioned in four directions. Simultaneously, a cube and a sphere randomly appeared above one of the four pedestals. Participants were instructed to locate, carry, and release the specified object (cube or sphere) into the corresponding box. The task was deemed successful if the correct object was placed in the corresponding box within 30 s of the object being specified on the displays; otherwise, it was considered unsuccessful. Each perspective condition was tested 12 over a 6 min period. The first two trials served as practice rounds, and

実験は4つのブロック(1PP、3PPCR、1-3PPCR、1-3PPSR)からなり、これらのブロックの順番は参加者間で無作為化された。

VR環境での歩行は、左手のコントローラスティックを用いて行われ、参加者の頭部(およびリンクされたアバター)が直面する方向は、スティックの前進方向に対応した。参加者がスティックを使って方向を変えたとき、あらかじめ作成したウォーキングアニメーションでアバターの動きを調整した。物体は、コントローラの左右両手の中指のトリガーを押して把持した。物体を把持した後、中指のトリガーを離すことで、物体を離すことができる。スイッチング可能な遠近法条件(1-3PPCR、1-3PPSR)では、参加者は右手の人差し指で右手のコントローラのトリガーをいつでも押すことで遠近法を変更することができた。参加者は、この条件下で、1回の試行につき少なくとも1回は視点を切り替えるように指示された。

2.5 Questionnaire

各視点条件の後、参加者はSoE(So0、SoA、SoSL)、VR酔い、タスクパフォーマンス、臨場感に関する11項目のアンケートに回答した。質問票は、VR環境におけるSoEを調査した先行研究^{11, 19, 21, 22)}に基づいて作成した。アンケートの内容

was as follows:

- a: 仮想アバターが自分の体であるかのように感じた。
- b: 仮想アバターが自分の体ではないような気がした。
- c: 仮想アバターが他人の体であるかのように感じた。
- d: 仮想アバターを動かしたいと思った。
- e: パーチャルアバターが自分のコントロールできないと感じた。
- f: 仮想アバターが自分のコントロール下にあると感じた。
- g: 離れた場所にいる人を見ているような気がした。

from my virtual avatar.

- h: 仮想の身体の中にいるような気がした。
- i: VRの乗り物酔いを感じた。
- j: タスクを完了するのが難しいと感じた。
- k: 仮想空間にいるような気がした。

上記の質問紙では、(a)~(c)がSo0、(d)~(f)がSoA、(g)~(h)がSoSL、(i)がVR乗り物酔い、(j)が課題の難易度、(k)がSoPを評価する項目である。各項目は、1(全く同意しない)から7(全く同意する)までの7段階で回答される。各項目の評価値は、アンケート結果に基づいて決定された。So0、SoA、SoSLは式(1~3)を用いて評価した:

$$So0 = \frac{a + (8 - b) + (8 - c)}{3} \quad (1)$$

$$SoA = \frac{d + (8 - e) + f}{3} \quad (2)$$

$$SoSL = \frac{(8 - g) + h}{2} \quad (3)$$

3. Results

The statistical analysis software JASP (version 0.18.3) を分析に使用した。4つの視点条件(1PP、3PPCR、1-3PPCR、1-3PPSR)にわたる質問の平均評価について、一元配置反復測定ANOVAを実施した。データの球形性を調べるために、ANOVAの前にMauchlyの検定を行った。データの球形性に違反した場合は、Greenhouse-Geisser補正を適用した。ポストホック分析にはHolm法を用いた。3.1 身体感覚、臨場感 Fig.2 (a) に示すように、So0 の主観的評価を分析した結果、有意な主効果が認められた ($F(3, 42) = 36.46, p < .001, \eta^2 p = 0.72, 1 - \beta = 0.99$)。事後分析の結果、視点間の一対比較はすべて統計的に有意であった(1PP ($M = 5.73, SD = 0.74$) and 3PPCR ($M = 2.89, SD = 0.82$), $t(14) = 10.11, \text{adj. } p < 0.001$; 1PPと1-3PPCR($M = 4.89, SD = 1.40$), $t(14) = 3.00, \text{adj. } p = 0.009$; 1PPと1-3PPSR($M = 4.22, SD = 1.48$), $t(14) = 5.37, \text{adj. } p < 0.001$; 3PPCRと1-3PPCR, $t(14) = 7.11, \text{adj. } p < 0.001$; 3PPCRと1-3PPSR, $t(14) = 4.74, \text{adj. } p < 0.001$).

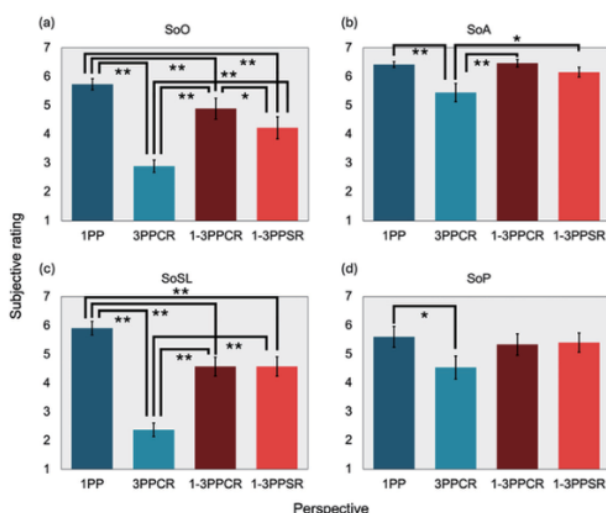


図2. 身体感覚(SoE)とプレゼンス(SoP)の結果。(a) 所有感(So0)、(b) 主体性(SoA)、(c) 自己位置感(SoSL)、(d) 存在感(SoP)。エラーバーはSEM(平均値の標準誤差)を示す。* $p < .05$, ** $p < .01$

data from these practice trials were excluded from the analysis. The experiment consisted of four blocks (1PP, 3PPCR, 1-3PPCR, and 1-3PPSR), and the order of these blocks was randomized across participants.

Walking in the VR environment was performed using the left-hand controller stick, where the direction the participant's head (and the linked avatar) faced corresponded to the stick's forward direction. While the participant changed the direction using the stick, the avatar's movement was adjusted with a pre-made walking animation. Objects were grasped by pressing the trigger on the middle finger of both controller's left and right hands. The object could be released by releasing the trigger of the middle finger after grasping it. In the switchable perspective conditions (1-3PPCR and 1-3PPSR), participants could change perspectives by pressing the trigger on the right controller with their right index finger at any time. Participants were instructed to switch perspectives at least once per trial under these conditions.

2.5 Questionnaire

After each perspective condition, participants completed an 11-item questionnaire about their SoE (SoO, SoA, and SoSL), VR sickness, task performance, and sense of presence. The questionnaire was developed based on previous studies investigating the SoE in a VR environment^{11, 19, 21, 22}. The content of the questionnaire was as follows:

- a: I felt as if the virtual avatar was my own body.
- b: I felt as if the virtual avatar was not my own body.
- c: I felt as if the virtual avatar was another person's body.
- d: I felt I could move the virtual avatar if I wanted to.
- e: I felt that the virtual avatar was out of my control.
- f: I felt that the virtual avatar was in my control.
- g: I felt as if I was looking at someone at a distance from my virtual avatar.
- h: I felt as if I were in a virtual body.
- i: I felt VR motion sickness.
- j: I felt it was difficult to complete the task.
- k: I felt as if I were in a virtual space.

In the above questionnaire, items (a) – (c) assess the SoO, (d) – (f) assess SoA, (g) – (h) assess SoSL, (i) assesses VR motion sickness, (j) assesses task difficulty, and (k) assesses SoP. Each item is answered on a 7-point scale ranging from 1 (completely disagree) to 7 (completely agree). The evaluation values for each item were determined based on the questionnaire results. The SoO, SoA, and SoSL were evaluated using Equations (1 – 3):

$$SoO = \frac{a + (8 - b) + (8 - c)}{3} \quad (1)$$

$$SoA = \frac{d + (8 - e) + f}{3} \quad (2)$$

$$SoSL = \frac{(8 - g) + h}{2} \quad (3)$$

3. Results

The statistical analysis software JASP (version 0.18.3) was used for the analysis. We conducted a one-way repeated measures ANOVA on the mean assessment of the questions across the four perspective conditions (1PP, 3PPCR, 1-3PPCR, and 1-3PPSR). Mauchly's test was conducted before the ANOVA to examine the sphericity of the data. If the sphericity of the data was violated, Greenhouse-Geisser corrections were applied. The Holm procedure was used for *post-hoc* analysis.

3.1 Sense of embodiment, Sense of presence

As shown in Fig. 2 (a), analysis of subjective ratings for SoO revealed a significant main effect ($F(3, 42) = 36.46, p < .001, \eta^2p = 0.72, 1 - \beta = 0.99$). The *post-hoc* analysis showed that all pairwise comparisons between perspectives were statistically significant (1PP (M = 5.73, SD = 0.74) and 3PPCR (M = 2.89, SD = 0.82), $t(14) = 10.11, \text{adj. } p < .001$; 1PP and 1-3PPCR (M = 4.89, SD = 1.40), $t(14) = 3.00, \text{adj. } p = .009$; 1PP and 1-3PPSR (M = 4.22, SD = 1.48), $t(14) = 5.37, \text{adj. } p < .001$; 3PPCR and 1-3PPCR, $t(14) = 7.11, \text{adj. } p < .001$; 3PPCR and 1-

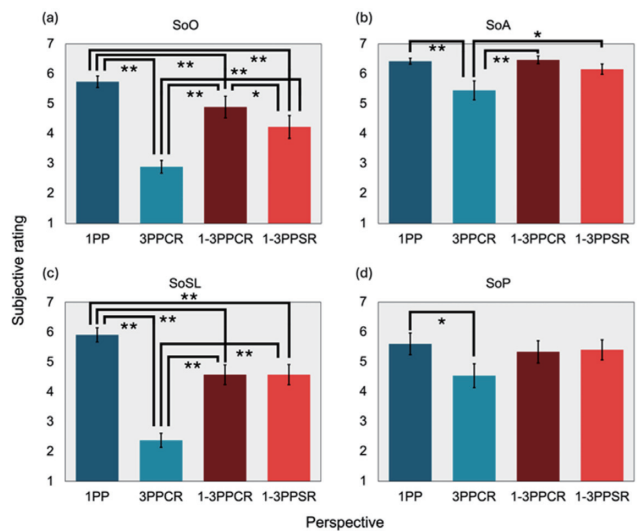


Fig 2. Results of sense of embodiment (SoE) and presence (SoP). (a) Sense of ownership (SoO), (b) sense of agency (SoA), (c) sense of self-location (SoSL), (d) sense of presence (SoP). Error bars indicate SEMs (Standard Errors of the Means). * $p < .05$, ** $p < .01$

$p < 0.001$; 1-3PPCRと13PPSR, $t(14) = 2.37$, $\text{adj. } p = .022$).

図2(b)に示すように、SoAでは有意な主効果が認められた($F(1.59, 22.18) = 6.87$, $p = 0.007$, $\eta^2 p = 0.33$, $1 - \beta = 0.99$)。事後分析の結果、3PPCR($M = 5.44$, $SD = 1.23$)と他の視点を含む比較は、統計的に有意であった(1PP($M = 6.42$, $SD = 0.39$)および3PPCR, $t(14) = 3.84$, $\text{adj. } p = 0.002$; 3PPCRと1-3PPCR($M = 6.47$, $SD = 0.50$), $t(14) = 4.01$, $\text{adj. } p = 0.001$; 3PPCRと1-3PPSR($M = 6.16$, $SD = 0.67$), $t(14) = 2.79$, $\text{adj. } p = .032$)。

図2(c)に示すように、SoSLでは有意な主効果が見られた($F(3, 42) = 36.32$, $p < .001$, $\eta^2 p = 0.72$, $1 - \beta = 0.99$)。事後分析の結果、1-3PPCRと13PPSRを除くすべての視点間の比較は、統計的に有意であった(1PP($M = 5.90$, $SD = 0.91$)と3PPCR($M = 2.37$, $SD = 0.92$), $t(14) = 10.29$, $\text{adj. } p < 0.001$; 1PPと1-3PPCR($M = 4.57$, $SD = 1.28$), $t(14) = 3.88$, $\text{adj. } p = 0.001$; $t(14) = 3.88$, $\text{adj. } p = 0.001$; 1PPと13PPSR($M = 4.57$, $SD = 1.31$), $t(14) = 3.88$, $\text{adj. } p = 0.001$; 3PPCRと1-3PPCR, $t(14) = 6.40$, $\text{adj. } p < 0.001$; 3PPCRと1-3PPSR, $t(14) = 6.40$, $\text{adj. } p < .001$)。

図2(d)に示すように、SoPについては、有意な主効果($F(3, 42) = 3.36$, $p = 0.028$, $\eta^2 p = 0.19$, $1 - \beta = 0.87$)が認められた。事後分析の結果、1PP($M = 5.60$, $SD = 1.40$)と3PPCR($M = 4.53$, $SD = 1.55$)の差は統計的に有意であった($t(14) = 2.95$, $\text{adj. } p = .032$)。しかし、13PPCR($M = 5.33$, $SD = 1.45$)と他者の視点または1-3PPSR($M = 5.40$, $SD = 1.30$)と他者の視点との差は、統計的に有意ではなかった。

2つの視点を切り替えた物体運搬課題では、3人称視点と比較して、SoEの3つの構成要素すべてが改善された。この結果は、スイッチング視点VRシステムが、3人称視点のみを用いたシステムよりも効果的にSoEを向上させることができることを示唆している。しかし、2つの視点を切り替えた物体運搬課題では、1人称視点条件と比較して、So0とSoSLのレベルが低下した。条件間でSoAに有意差は見られなかった。これらの結果は、1PPが3PPと比較してSo0とSoSLに大きな利点をもたらすことを示す先行研究と一致しているが、SoA¹⁵⁾には有意差は見られなかった。

さらに、2つのスイッチング視点間のSoPは、1人称視点または3人称視点と比較して、有意な差は見られなかった。この結果は、スイッチングの視点など、一見複雑な操作を導入しても、SoPが維持されることを示唆している。

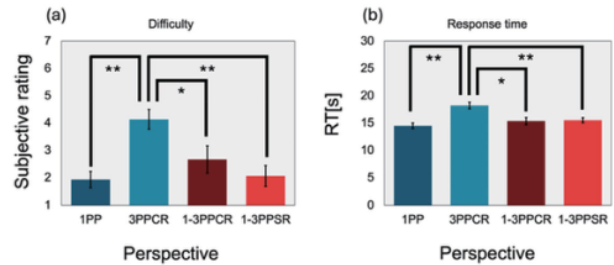


図3. タスク効率の結果(a)難易度、(b)応答時間。エラーバーはSEM(平均値の標準誤差)を示す。* $p < .05$, ** $p < .01$

3.2 タスクのパフォーマンス

図3(a)に示すように、難易度に対する主観的評価の分析では、有意な主効果が認められた($F(3, 42) = 6.74$, $p < .001$, $\eta^2 p = 0.33$, $1 - \beta = 0.99$)。事後分析の結果、3PPCR($M = 4.13$, $SD = 1.41$)と他の視点との差は統計的に有意であった(1PP($M = 1.93$, $SD = 1.16$), $t(14) = 4.01$, $\text{adj. } p = 0.001$; 1-3PPCR($M = 2.67$, $SD = 1.92$), $t(14) = 2.67$, $\text{adj. } p = 0.043$; 1-3PPSR($M = 2.07$, $SD = 1.49$), $t(14) = 3.77$, $\text{adj. } p = .003$)。図3(b)に示すように、応答時間の分析では、有意な主効果が認められた($F(2.12, 29.72) = 14.54$, $p < .001$, $\eta^2 p = 0.51$, $1 - \beta = 0.99$)。事後分析の結果、3PPCR($M = 18.22$ 秒, $SD = 2.33$)と他の視点との差は統計的に有意であった(1PP($M = 14.51$ 秒, $SD = 1.99$), $t(14) = 6.23$, $\text{adj. } p < 0.001$; 13PPCR($M = 15.37$ s, $SD = 2.51$), $t(14) = 4.77$, $\text{adj. } p < 0.001$; 1-3PPSR($M = 15.52$ s, $SD = 1.85$), $t(14) = 4.53$, $\text{adj. } p < .001$)。成功率は、三人称視点(3PPCR, $M = 86.7\%$, $SD = 21.93$)を除き、すべての視点条件(1PP, $M = 99.3\%$, $SD = 2.58$; 13PPCR, $M = 98.7\%$, $SD = 3.52$; 1-3PPCR, $M = 99.3\%$, $SD = 2.58$)でほぼ100%であった。

これらの結果は、三人称視点条件では、他の3つの条件と比較して、主観的にも客観的にも物体運搬課題がより困難であることを示している。この知見は、三人称視点空間認識を向上させることを示唆した先行研究と矛盾する^{14,15)}。

3.3 VR乗り物酔い

図4に示すように、VR乗り物酔いの主観的評価を分析した結果、有意な主効果が認められた($F(3, 42) = 3.64$, $p = 0.020$, $\eta^2 p = 0.21$, $1 - \beta = 0.91$)。事後分析の結果、1PP($M = 2.60$, $SD = 1.96$)と3PPCR($M = 4.27$, $SD = 2.05$)の差は統計的に有意であった($t(14) = 3.28$, $\text{adj. } p = .013$)。1-3PPCR($M = 3.27$, $SD = 2.12$)およびその他の視点、または1-3PPSR($M = 3.33$,

3PPSR, $t(14) = 4.74$, adj. $p < .001$; 1-3PPCR and 1-3PPSR, $t(14) = 2.37$, adj. $p = .022$).

As shown in Fig. 2 (b), for SoA, we found a significant main effect ($F(1.59, 22.18) = 6.87$, $p = .007$, $\eta^2p = 0.33$, $1 - \beta = 0.99$). The *post-hoc* analysis showed that comparisons involving 3PPCR ($M = 5.44$, $SD = 1.23$) and other perspectives were statistically significant (1PP ($M = 6.42$, $SD = 0.39$) and 3PPCR, $t(14) = 3.84$, adj. $p = .002$; 3PPCR and 1-3PPCR ($M = 6.47$, $SD = 0.50$), $t(14) = 4.01$, adj. $p = .001$; 3PPCR and 1-3PPSR ($M = 6.16$, $SD = 0.67$), $t(14) = 2.79$, adj. $p = .032$).

As shown in Fig. 2 (c), for SoSL, we found a significant main effect ($F(3, 42) = 36.32$, $p < .001$, $\eta^2p = 0.72$, $1 - \beta = 0.99$). The *post-hoc* analysis showed that comparisons between all perspectives, except between 1-3PPCR and 1-3PPSR, were statistically significant (1PP ($M = 5.90$, $SD = 0.91$) and 3PPCR ($M = 2.37$, $SD = 0.92$), $t(14) = 10.29$, adj. $p < .001$; 1PP and 1-3PPCR ($M = 4.57$, $SD = 1.28$), $t(14) = 3.88$, adj. $p = .001$; $t(14) = 3.88$, adj. $p = .001$; 1PP and 1-3PPSR ($M = 4.57$, $SD = 1.31$), $t(14) = 3.88$, adj. $p = .001$; 3PPCR and 1-3PPCR, $t(14) = 6.40$, adj. $p < .001$; 3PPCR and 1-3PPSR, $t(14) = 6.40$, adj. $p < .001$).

As shown in Fig. 2 (d), for SoP, we found a significant main effect ($F(3, 42) = 3.36$, $p = .028$, $\eta^2p = 0.19$, $1 - \beta = 0.87$). The *post-hoc* analysis showed that the differences between 1PP ($M = 5.60$, $SD = 1.40$) and 3PPCR ($M = 4.53$, $SD = 1.55$) was statistically significant ($t(14) = 2.95$, adj. $p = .032$). However, the differences between 1-3PPCR ($M = 5.33$, $SD = 1.45$) and others perspectives or 1-3PPSR ($M = 5.40$, $SD = 1.30$) and others perspectives were not statistically significant.

The object-carrying task with two switching perspectives improved all three components of SoE compared to the third-person perspective. This finding suggests that the switching-perspective VR system could enhance the SoE more effectively than a system using only the third-person perspective. However, the object-carrying task with two switching perspectives showed reduced levels of SoO and SoSL compared to the first-person perspective condition. There was no significant difference in SoA between the conditions. These results align with prior research indicating that 1PP offers greater advantages for SoO and SoSL compared to 3PP, while showing no significant difference in SoA¹⁵⁾.

Additionally, there was no significant difference in the SoP between the two switching perspectives compared to the first- or third-person perspectives. This result suggests that the SoP is preserved even when seemingly complex operations, such as switching perspectives, are introduced.

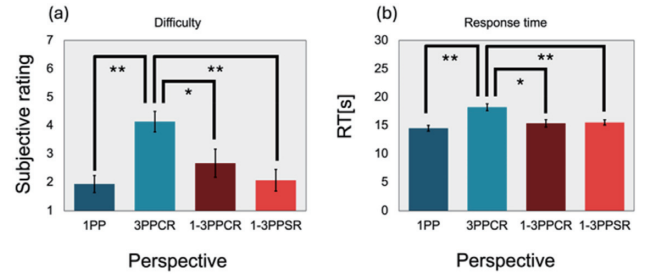


Fig 3. Results of task efficiency. (a) Difficulty, (b) response time. Error bars indicate SEMs (Standard Errors of the Means). * $p < .05$, ** $p < .01$

3.2 Task performance

As shown in Fig. 3 (a), analysis of subjective ratings for difficulty revealed a significant main effect ($F(3, 42) = 6.74$, $p < .001$, $\eta^2p = 0.33$, $1 - \beta = 0.99$). The *post-hoc* analysis showed that the differences between 3PPCR ($M = 4.13$, $SD = 1.41$) and the other perspectives were statistically significant (1PP ($M = 1.93$, $SD = 1.16$), $t(14) = 4.01$, adj. $p = .001$; 1-3PPCR ($M = 2.67$, $SD = 1.92$), $t(14) = 2.67$, adj. $p = .043$; 1-3PPSR ($M = 2.07$, $SD = 1.49$), $t(14) = 3.77$, adj. $p = .003$). As shown in Fig. 3 (b), the analysis of response time revealed a significant main effect ($F(2.12, 29.72) = 14.54$, $p < .001$, $\eta^2p = 0.51$, $1 - \beta = 0.99$). The *post-hoc* analysis showed that the differences between 3PPCR ($M = 18.22$ s, $SD = 2.33$) and the other perspectives were statistically significant (1PP ($M = 14.51$ s, $SD = 1.99$), $t(14) = 6.23$, adj. $p < .001$; 1-3PPCR ($M = 15.37$ s, $SD = 2.51$), $t(14) = 4.77$, adj. $p < .001$; 1-3PPSR ($M = 15.52$ s, $SD = 1.85$), $t(14) = 4.53$, adj. $p < .001$). The success rate was nearly 100 % for all perspective conditions (1PP, $M = 99.3$ %, $SD = 2.58$; 1-3PPCR, $M = 98.7$ %, $SD = 3.52$; 1-3PPSR, $M = 99.3$ %, $SD = 2.58$), except for the third-person perspective (3PPCR, $M = 86.7$ %, $SD = 21.93$).

These results indicate that the object-carrying task was more difficult both subjectively and objectively in the third-person perspective condition compared to the other three conditions. This finding contradicts previous research which suggested that the third-person perspective improves spatial awareness^{14, 15)}.

3.3 VR motion sickness

As shown in Fig. 4, analysis of subjective ratings for VR motion sickness revealed a significant main effect ($F(3, 42) = 3.64$, $p = .020$, $\eta^2p = 0.21$, $1 - \beta = 0.91$). The *post-hoc* analysis showed that the differences between 1PP ($M = 2.60$, $SD = 1.96$) and 3PPCR ($M = 4.27$, $SD = 2.05$) were statistically significant ($t(14) = 3.28$, adj. $p = .013$). The 1-3PPCR ($M = 3.27$, $SD = 2.12$) and others perspectives or 1-3PPSR ($M = 3.33$, $SD = 2.29$) and

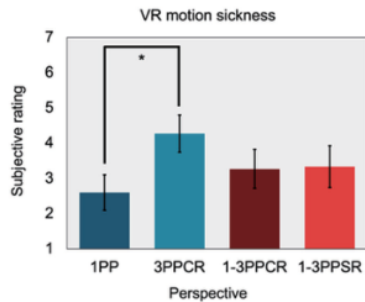


図4. VRによる乗り物酔いの結果エラーバーはSEM(平均値の標準誤差)を示す。* $p < .05$, ** $p < .01$

の観点で、あるいは統計的に有意でなかった。

これらの結果は、VR乗り物酔いは、他の3つの条件よりも三人称視点条件で起こりやすいことを示している。この結果は、他の研究¹⁶⁾の先行提案に反して、三人称視点を採用してもVR乗り物酔いは軽減されないことを示唆している。

4. Discussion

本研究では、VR環境において一人称視点と三人称視点の切り替えシステムを導入し、一人称視点と三人称視点のみを用いた場合と比較することで、物体運搬タスク時のSoEやタスク効率に影響を与えるかどうかを検討した。その結果、3PPのみを使用した場合と比較して、遠近法切り替えシステムによりSoEが向上することが明らかになった。しかし、一人称視点と比較して、優れたタスク効率は示されなかった。

これらの結果を解釈すると、パースペクティブ・スイッチング・システムは以下のように理解できる:「少なくともこの実験の条件下では、「三人称視点のデメリットは改善できるが、一人称視点のデメリットは改善できない」とある。特に、本実験における空間認識のしやすさ(タスク効率で測定)は、一人称視点と三人称視点で同程度であった。その理由の一つは、実験中に参加者がVR空間を自由に歩くことができたことである。参加者の位置がほぼ固定されていた先行研究とは異なり、本研究ではコントローラやスティックを自由に使って歩くことができたため、一人称視点を用いても空間レイアウトの理解が深まった可能性がある。もう一つの理由は、タスクが簡単すぎたからかもしれない。本実験における物体運搬タスクの成功率は、一人称視点でも極めて高い(99.3%)。この結果は次のことを示唆している。

SD=2.29)と参加者は、VR環境における空間レイアウトを素早く把握することができた。

本研究の課題は比較的単純であったため、成功率は視点切り替えの有効性を評価するための適切な客観的尺度ではないかもしれない。しかし、成功率は応答時間とトレードオフの関係にあることは一般的に認められている。したがって、応答時間に基づく遠近感切り替えの有用性を評価することは有意義である。本研究では、三人称視点条件では、他の3つの条件と比較して、回答時間が有意に遅かった。言い換えれば、視点切り替えは、少なくとも三人称視点よりもタスク完了に効率的であるように見える。とはいえ、この傾向が、より実世界のオブジェクトを運ぶタスクに近いVR環境でも当てはまるかどうかは不明である。今後の研究では、VR空間の拡大、仮想壁のような課題の導入、VR空間内での物体の拡大・操作の困難化などによる遠近感スイッチングの有効性を探る必要がある。この実験では、明示的な基準点は提供されていない。これは被験者内デザインであるため、参照点の欠如による潜在的な交絡因子の影響は最小限であると考えた。しかし、今後の実験で基準点を設定することで、遠近法切り替えの有効性がさらに明らかになる可能性がある。

この実験結果における注目すべき傾向は、SoE、SoP、タスク効率、VR乗り物酔いの点で、一人称視点と三人称視点より優れていたことである。三人称視点でのSoEの減少は先行研究と一致するが、課題効率の低下^{14,15)}とVR乗り物酔いの症状の増加¹⁶⁾は初期の知見と矛盾する。このことは、このVR環境における物体運搬タスクが、三人称視点から見て不利であった特別な理由を示唆している。その理由の一つは、固定的な立場で行われた先行研究とは異なり、以下の通りである。(例:仮想ボールに到達¹⁹⁾、仮想ボールを逸脱¹⁵⁾)、本研究では、タスク中に「歩行」を行った。参加者が物体を把持するために移動すると、アバターと物体の空間的關係が毎回変化する。物体の位置とアバターの位置の両方がダイナミックに変化するため、物体を把持する際にはより注意が必要である。したがって、一人称視点の重要性は、先行研究と比較して相対的に高まっている可能性がある。

さらに、歩行の「不自然さ」は、タスクの難易度の上昇、VR乗り物酔いの症状、三人称視点からのSoEの低下に寄与している可能性がある。

【機械翻訳コンテンツの著作権について】

当サイトに掲載されている原著論文の著作権は映像情報メディア学会に帰属します。原著論文および翻訳論文の無断使用は禁止します。引用の際には、必ず原著論文の書誌情報をご記載ください。詳細は映像情報メディア学会著作権規定をご覧ください。

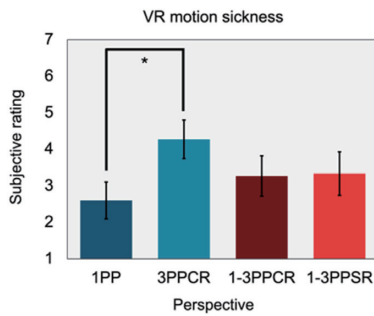


Fig 4. Results of VR motion sickness. Error bars indicate SEMs (Standard Errors of the Means). * $p < .05$, ** $p < .01$

others perspectives or were not statistically significant.

These results indicate that VR motion sickness was more likely to occur in the third-person perspective condition than in the other three conditions. This finding suggests that adopting a third-person perspective does not alleviate VR motion sickness, contrary to previous suggestions from other studies¹⁶⁾.

4. Discussion

In this study, we implemented a switching system between first- and third-person perspectives in a VR environment and compared it with using only first- or third-person perspectives to investigate whether it affected the SoE and task efficiency during object-carrying tasks. The findings revealed that the perspective-switching system enhanced the SoE compared to using only the 3PP. However, it did not demonstrate superior task efficiency compared to the first-person perspective.

If we interpret these results, the perspective-switching system can be understood as follows: "Though the demerits of the third-person perspective could be improved, the demerits of the first-person perspective could not be improved," at least under the conditions of this experiment. In particular, the ease of spatial recognition (measured by task efficiency) in this experiment was similar between the first- and third-person viewpoints. One reason for this is that the participants could walk freely in the VR space during the experiment. Unlike previous studies where participants' positions were almost fixed, in this study they could freely walk using the controllers and sticks, which may have facilitated a better understanding of the spatial layout, even when using the first-person perspective. Another reason could be that the task was too easy. The success rate of the object-carrying task in this experiment was extremely high, even in the first-person perspective (99.3%). This result suggests that

participants could quickly grasp the spatial layout in the VR environment.

The success rate may not be an appropriate objective measure to evaluate the effectiveness of perspective switching because the task in this study was relatively simple. However, it is generally acknowledged that success rate has a trade-off relationship with response time. Thus, evaluating the usefulness of perspective switching based on response time is meaningful. In this study, response times were significantly slower in the third-person perspective condition compared to the other three conditions. In other words, perspective switching appears to be at least more efficient than the third-person perspective for task completion. Nevertheless, it remains uncertain if this trend would hold true in VR environments that are more similar to real-world object-carrying tasks. Future studies should explore the effectiveness of perspective switching by expanding the VR space, introducing challenges like virtual walls, or making objects larger and more difficult to manipulate within the VR space. No explicit reference point was provided in this experiment. Since this was a within-subjects design, we considered the impact of potential confounding factors from the lack of reference points to be minimal. However, establishing a reference point in future experiments could further clarify the effectiveness of perspective switching.

A noteworthy trend in the results of this experiment is that the first-person perspective was superior to the third-person perspective in terms of SoE, SoP, task efficiency, and VR motion sickness. The decrease in SoE in the third-person perspective aligns with previous studies, but the decrease in task efficiency^{14, 15)} and increase in symptoms of VR motion sickness¹⁶⁾ contradict early findings. This suggests a particular reason why the object-carrying task in this VR environment was disadvantageous from the third-person perspective. One reason for this is that, unlike previous studies conducted in a fixed position. (e.g., reaching the virtual ball¹⁹⁾, deviating the virtual ball¹⁵⁾), this study involved "walking" during the task. As participants moved to grasp objects, the spatial relationship between the avatar and the object changed each time. The dynamic changes in both the object's position and the avatar's position mean that we need to be more careful when grasping the object. Therefore, the importance of the first-person perspective may have relatively increased compared to previous studies.

Additionally, the "unnaturalness" of walking may

この実験では、参加者はコントローラスティックを使って自由に360°をナビゲートすることができ、アバターの頭部方向は常に自分の頭部の動きと同期していた。このセットアップにより、物理的な頭を回さずに「横方向」や「後ろ方向」に移動することができ、現実世界の動きに比べて不自然である。この不自然な歩行行動は、特に三人称視点からは目立ち、一人称視点からは目立たなかった。三人称視点を用いるほど、この不慣れた歩行を経験し、それが感覚に影響を与えた可能性がある。しかし、当初は、この不自然な歩行パターンにより、参加者はアバターの頭をターゲットに向けることなくターゲットの位置に到達することができ、潜在的にタスクの難易度を下げることができた。興味深いことに、実験後の非公式なインタビューでは、三人称視点を用いることでタスクを完了できたと述べている参加者もいた。参加者は、視点の切り替え条件において、少なくとも1回は視点の切り替えを要求されただけなので、個々の戦略は大きく異なっていた。したがって、不自然な歩行行動が参加者に与える具体的な影響は依然として不明であり、今後の研究においてさらなる調査が必要である。

もう一つの注目すべき点は、本研究で擬似歩行感覚をシミュレートするために用いた方法である。既存の多くの仮想歩行システムは、全方位トレッドミルでの踏み込み^{23, 24)}、ハムスターボールの使用²⁵⁾、タイルの移動²⁶⁾、低摩擦シューズの着用²⁷⁾など、視覚情報(オプティカルフロー)と身体運動を統合することでこれを実現している。例えば、実空間で知覚される触覚刺激のシミュレート²⁸⁾や、仮想鏡で自分のVRアバターを見ることができるようになる²⁹⁾などである。一方、本実験では、オプティカルフロー以外の刺激による歩行感覚の誘導は考慮していない。その結果、生成された歩行感覚は制限された可能性がある。歩行感覚とSoPの関係はまだ不明であるが、歩行感覚を高めることでこれらの感覚が向上すると考えるのが妥当であろう。したがって、今後の研究では、歩行感覚の発生を調査する必要がある。

本研究では、2つのスイッチング視点を導入したが、So0のみが有意差を示した。具体的には、

1-3PPCRと1-3PPSRの間で、感覚とタスク効率にはほとんど影響を受けなかった。アバターが常に後ろから観察できる13PPCR条件では、頭の回転量によってアバターが観察できない1-3PPSR条件よりも、So0がより顕著であった。この結果は、アバターの動きを自分の動きと同期して観察することが、So0錯視の発生に重要な役割を果たすことを示唆している。

この実験のサンプルサイズは15であり、比較的小さい。事後検出力分析の結果、臨場感やVR乗り物酔いの評価には統計的検出力が低いことが明らかになった。その結果、一人称視点と比較して、三人称視点は臨場感を低下させ、VR乗り物酔いを増加させるという主張は、高い信頼性をもって行うことはできない。さらに、参加者全員がVRコンテンツについてある程度の経験を持っており、“VRに精通している”ことによるバイアスが生じた可能性がある。したがって、今後の実験では、視点切り替えの効果を総合的に評価するために、VR経験のない参加者を含めるべきである。

本研究の結果をまとめると、パースペクティブ・スイッチング・システムが、一人称視点よりも空間理解が容易であるという点で、大きな利点をもたらすという明確な証拠はない。この結果は、スイッチングの視点がこれらの側面を改善した先行研究とは対照的である。具体的には、物体を運ぶタスクのような自由度の高いタスクは、自由度の低いタスクと比較して、遠近感の切り替えの恩恵を受けない可能性がある。しかし、この結果は、特定の感覚(例えば、主体性の感覚)とタスクの効率性に対しては、スイッチング視点と一人称視点とがほぼ同等に有効であることも示唆している。さらに、この結果は、日常生活では通常遭遇しない視点である三人称視点に適應できることを示している。したがって、自由度の高いタスクでは、一人称のみのシステムか、視点切り替えシステムのどちらかを考慮することが重要である場合がある。これらの知見は、本研究の新たな貢献である。

5. Conclusion

遠近法切り替えシステムが、一人称視点システムと比較して、SoE、SoP、タスク効率を改善したという直接的な証拠はなかった。しかし、これらの感覚の多くは、三人称視点と比較して、その効率性が向上している。これらの結果は、人はタスク中に視点を切り替えるという複雑な動作にある程度適應することができ、指示なしにそれを効率的に利用できることを示唆している。

contribute to increased task difficulty, symptoms of VR motion sickness, and decreased SoE from a third-person perspective. In this experiment, the participants could freely navigate 360° using the controller stick, with the avatar's head direction always synchronized with their own head movements. This setup allowed them to move "sideways" or "backward" without physically turning their heads, which is unnatural compared to real world movements. This unnatural walking behavior was particularly noticeable from the third-person perspective and less apparent from the first-person perspective. The more participants used the third-person perspective, the more they experienced this unfamiliar gait, which may have influenced their senses. However, initially, this unnatural walking pattern allowed participants to reach their target positions without needing to orient the avatar's head toward the target, potentially reducing task difficulty. Interestingly, in informal interviews after the experiment, some participants mentioned that using the third-person perspective helped them complete tasks. Since participants were only required to switch perspectives at least once during the switching perspective condition, their individual strategies varied significantly. Therefore, the specific impact of the unnatural walking behavior on participants remains unclear and warrants further investigation in future studies.

Another noteworthy point is the method used to simulate the pseudo-walking sensation in this study. Many existing virtual walking systems achieve this by integrating visual information (optical flow) with physical movement, such as stepping on an omnidirectional treadmill^{23, 24)}, using a Hamster Ball²⁵⁾, moving tiles²⁶⁾, or wearing low-friction shoes²⁷⁾. Further innovations are needed to enable users to experience walking in a VR environment while standing still, such as simulating tactile stimuli perceived in real space²⁸⁾ and allowing one's VR avatar to be seen by virtual mirrors²⁹⁾. In contrast, this experiment did not consider stimuli other than optical flow to induce a walking sensation. Consequently, the generated sense of walking may have been limited. Although the relationship between the sense of walking and the SoP remains unclear, it is reasonable to assume that these senses are improved by increasing the sense of walking. Therefore, future studies should investigate the occurrence of the sense of walking.

In this study, we implemented two switching perspectives, but only SoO showed a significant difference. Specifically, the sensations and task

efficiencies were almost unaffected between 1-3PPCR and 1-3PPSR. The SoO was more significant in the 1-3PPCR condition, in which the avatar could always be observed from behind, than in the 1-3PPSR condition, where the avatar could not be observed depending on the amount of head rotation. This finding suggests that observing the avatar's movements in synchrony with one's own movements plays an important role in generating the SoO illusion.

The sample size in this experiment was 15, which is relatively small. Post-hoc power analysis revealed that the statistical power was low for evaluating the sense of presence and VR motion sickness. As a result, the claim that the third-person perspective reduces the sense of presence and increases VR motion sickness compared to the first-person perspective cannot be made with high confidence. Additionally, all participants had some level of experience with VR content, which may have introduced bias due to "familiarity with VR." Therefore, future experiments should include participants with no prior VR experience to comprehensively assess the effects of viewpoint switching.

To summarize the findings of this study, there is no clear evidence that the perspective-switching system offers significant advantages over the first-person viewpoint in terms of easier spatial understanding. This result contrasts with previous studies, where switching perspectives improved these aspects. Specifically, tasks with a high degree of freedom, such as object-carrying tasks, may not benefit as much from perspective switching compared to tasks with lower degrees of freedom. However, the results also suggest that switching perspectives and first-person perspectives are almost equally effective for certain senses (e.g., sense of agency) and task efficiency. Furthermore, the results indicate that individuals can adapt to the third-person perspective, which is a view not typically encountered in daily life. Thus, for tasks with high degrees of freedom, it may still be important to consider either a first-person-only system or a perspective-switching system. These findings represent the novel contributions of this study.

5. Conclusion

There was no direct evidence that the perspective-switching system improved the SoE, SoP, or task efficiency compared to the first-person perspective system. However, many of these senses and their efficiencies were improved compared to the third-person perspective. These results suggest that people can adapt to the complex operation of switching perspectives

結論として、遠近法切り替えシステムは、定点到達タスクのような自由度の限られたタスクだけでなく、VR空間を歩くような自由度の高い物体を運ぶタスクにも有用であると考えられる。COVID-19の流行により、多くのVRコンテンツが提供されている。この実験結果は、一人称視点だけでなく三人称視点も提供し、ユーザーがいつでも視点を切り替えることができるようにすることで、質の高いVR体験を向上させることができることを示唆している。

Acknowledgments

We would like to thank Editage (www.editage.com) for the English language editing. We thank Koya Mita for conducting part of the experiments.

References

- 1) C. Heater: "Being There: The subjective Experience of Presence", Presence Teleoperators Virtual Environ., 1, 2, pp.262-271 (1992)
- 2) L.M. Wilcox, R.S. Allison, S. Elfassy and C. Grelik: "Personal Space in Virtual Reality", ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 3, 4, pp.412-428 (2006)
- 3) K. Kiltani, R. Groten and M. Slater: "The Sense of Embodiment in Virtual Reality", Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 21, 4, pp.373-387 (2012)
- 4) M. Guy, J.-M. Normand, C. Jeunet-Kelway and G. Moreau: "The Sense of Embodiment in Virtual Reality and Its Assessment Methods", Front. Virtual Real. 4, pp.1141683 (2023)
- 5) B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger and O. Blanke: "Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness", Science, 317, 5841, pp.1096-1099 (2007)
- 6) H.H. Ehrsson: "The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences", Science, 317, 5841, pp.1048-1048 (2007)
- 7) M. Gonzalez-Franco, D. Perez-Marcos, B. Spanlang and M. Slater: "The Contribution of Real-Time Mirror Reflections of Motor Actions on Virtual Body Ownership in an Immersive Virtual Environment", 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR), pp.111-114 (March 2010)
- 8) M.V. Sanchez-Vives, B. Spanlang, A. Frisoli, M. Bergamasco and M. Slater: "Virtual Hand Illusion Induced by Visuomotor Correlations", PLoS One, 5, 4, pp.e10381 (2010)
- 9) M. Botvinick and J. Cohen: "Rubber Hands 'Feel' Touch That Eyes See", Nature, 391, 6669, pp.756-756 (1998)
- 10) D. Jo, K. Kim, G.F. Welch, W. Jeon, Y. Kim, K.H. Kim and G.J. Kim: "The Impact of Avatar Body Visual Similarity on Body Ownership in Immersive Virtual Reality", Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp.1-2 (November 2017)
- 11) S. Ventura, M. Miragall, G. Cardenas and R.M. Baños: "Predictors of the Sense of Embodiment of a Female Victim of Sexual Harassment in a Male Sample through 360-degree Video-Based Virtual Reality", Frontiers in Human Neuroscience, 16, 845508 (2022)
- 12) B. Spanlang, J.M. Normand, D. Borland, K. Kiltani, E. Giannopoulos, A. Pomés, M. González-Franco, D. Perez-Marcos, J. Arroyo-Palacios, X.N. Muncunill and M. Slater: "How to Build an Embodiment Lab: Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality", Frontiers in Robotics and AI, 1, 9 (2014)
- 13) Y. Inoue and M. Kitazaki: "Virtual Mirror and Beyond: The Psychological Basis for Avatar Embodiment via a Mirror", Journal of Robotics and Mechatronics, 33, 5, pp.1004-1012 (2021)
- 14) E.L. Schuurink and A. Toet: "Effects of Third Person Perspective on Affective Appraisal and Engagement: Findings from SECOND LIFE" Simulation & Gaming, 41, 5, pp.724-742 (2010)
- 15) G. Gorisse, O. Christmann, E.A. Amato and S. Richir: "First-and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users", Frontiers in Robotics and AI, 4, 33 (2017)
- 16) D. Monteiro, H.N. Liang, W. Xu, M. Brucker, V. Nanjappan and Y. Yue: "Evaluating Enjoyment, Presence and Emulator Sickness in VR Games Based on First-And Third-Person Viewing Perspectives", Computer Animation and Virtual Worlds, 29, 3-4, e1830 (2018)
- 17) A. Denisova and P. Cairns: "First Person vs. Third Person Perspective in Digital Games: Do Player Preferences Affect Immersion?", Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.145-148 (April 2015)
- 18) H. Galvan Debarba, S. Bovet, R. Salomon, O. Blanke, B. Herbelin and R. Boulic: "Characterizing First and Third Person Viewpoints and Their Alternation for Embodied Interaction in Virtual Reality", PLoS One, 12, 12, e0190109 (2017)
- 19) Y. Matsuda: "[Sense of Body Ownership and Task Difficulty in a Reaching Task Using Perspective Switching in a VR Environment] VR Kankyo Ni Okeru Shitenkirikae wo Mochiita Reaching Kadai deno Shintaishoyukan to sono Nanido (in Japanese)", 2022 Winter Meeting of the Vision Society of Japan, Vision, 34, 1, pp.40-41 (2022)
- 20) I. Evin, T. Pesola, M.D. Kaos, T.M. Takala and P. Hämläinen: "3pp-r: Enabling Natural Movement in 3rd Person Virtual Reality", Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, pp.438-449 (November 2020)
- 21) R. Kondo, M. Sugimoto, K. Minamizawa, T. Hoshi, M. Inami, M. Kitazaki: "Illusory Body Ownership of an Invisible Body Interpolated between Virtual Hands and Feet via Visual-Motor Synchronicity", Scientific Reports, 8, pp.7541 (2018)
- 22) J.C. Eubanks, A.G. Moore, P.A. Fishwick and R.P. McMahan: "A Preliminary Embodiment Short Questionnaire", Frontiers in Virtual Reality, 2, pp.647896 (2021)
- 23) R.P. Darken, W.R. Cockayne and D. Carmein: "The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds", Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp.213-221 (October 1997)
- 24) H. Iwata: "Walking about Virtual Environments on an Infinite Floor", Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316), pp.286-293 (March 1999)
- 25) E. Medina, R. Fruland and S. Weghorst: "Virtusphere: Walking in a Human Size VR 'Hamster Ball'", Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 52, 27, pp.2102-2106. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications (September 2008)
- 26) H. Iwata, H. Yano, H. Fukushima and H. Noma: "Circulafloor [Locomotion Interface]", IEEE Computer Graphics and Applications, 25, 1, pp.64-67 (2005)
- 27) T. Cakmak and H. Hager: "Cyberith Virtualizer: A Locomotion Device for Virtual Reality", In ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, p. 1 (2014)
- 28) M. Kitazaki, T. Hamada, K. Yoshiho, R. Kondo, T. Amemiya, K. Hirota and Y. Ikei: "Virtual Walking Sensation by Prerecorded Oscillating Optic Flow and Synchronous Foot Vibration", i-Perception, 10, 5, pp.2041669519882448 (2019)
- 29) Y. Matsuda, J. Nakamura, T. Amemiya, Y. Ikei and M. Kitazaki: "Enhancing Virtual Walking Sensation Using Self-Avatar in First-Person Perspective and Foot Vibrations", Frontiers in Virtual Reality, 2, pp.654088 (2021)

during a task to some extent and can use it efficiently without instruction. In conclusion, the perspective-switching system may be useful not only for tasks with limited degrees of freedom, such as fixed-point reaching tasks, but also for object-carrying tasks that involve a higher degree of freedom, such as walking in a VR space. Due to the COVID-19 pandemic, many VR contents have been provided. The results of this experiment suggest that high-quality VR experiences can be enhanced by offering not only first-but also third-person perspectives and allowing users to switch between them at any time.

Acknowledgments

We would like to thank Editage (www.editage.com) for the English language editing. We thank Koya Mita for conducting part of the experiments.

References

- 1) C. Heater: "Being There: The subjective Experience of Presence", *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, 1, 2, pp.262-271 (1992)
- 2) L.M. Wilcox, R.S. Allison, S. Elfassy and C. Grelik: "Personal Space in Virtual Reality", *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 3, 4, pp.412-428 (2006)
- 3) K. Kiltani, R. Groten and M. Slater: "The Sense of Embodiment in Virtual Reality", *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 21, 4, pp.373-387 (2012)
- 4) M. Guy, J.-M. Normand, C. Jeunet-Kelway and G. Moreau: "The Sense of Embodiment in Virtual Reality and Its Assessment Methods", *Front. Virtual Real.* 4, pp.1141683 (2023)
- 5) B. Lenggenhager, T. Tadi, T. Metzinger and O. Blanke: "Video Ergo Sum: Manipulating Bodily Self-Consciousness", *Science*, 317, 5841, pp.1096-1099 (2007)
- 6) H.H. Ehrsson: "The Experimental Induction of Out-of-Body Experiences", *Science*, 317, 5841, pp.1048-1048 (2007)
- 7) M. Gonzalez-Franco, D. Perez-Marcos, B. Spanlang and M. Slater: "The Contribution of Real-Time Mirror Reflections of Motor Actions on Virtual Body Ownership in an Immersive Virtual Environment", 2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR), pp.111-114 (March 2010)
- 8) M.V. Sanchez-Vives, B. Spanlang, A. Frisoli, M. Bergamasco and M. Slater: "Virtual Hand Illusion Induced by Visuomotor Correlations", *PloS One*, 5, 4, pp.e10381 (2010)
- 9) M. Botvinick and J. Cohen: "Rubber Hands 'Feel' Touch That Eyes See", *Nature*, 391, 6669, pp.756-756 (1998)
- 10) D. Jo, K. Kim, G.F. Welch, W. Jeon, Y. Kim, K.H. Kim and G.J. Kim: "The Impact of Avatar-Owner Visual Similarity on Body Ownership in Immersive Virtual Reality", *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.1-2 (November 2017)
- 11) S. Ventura, M. Miragall, G. Cardenas and R.M. Baños: "Predictors of the Sense of Embodiment of a Female Victim of Sexual Harassment in a Male Sample through 360-degree Video-Based Virtual Reality", *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 845508 (2022)
- 12) B. Spanlang, J.M. Normand, D. Borland, K. Kiltani, E. Giannopoulos, A. Pomés, M. González-Franco, D. Perez-Marcos, J. Arroyo-Palacios, X.N. Muncunill and M. Slater: "How to Build an Embodiment Lab: Achieving Body Representation Illusions in Virtual Reality", *Frontiers in Robotics and AI*, 1, 9 (2014)
- 13) Y. Inoue and M. Kitazaki: "Virtual Mirror and Beyond: The Psychological Basis for Avatar Embodiment via a Mirror", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 33, 5, pp.1004-1012 (2021)
- 14) E.L. Schuurink and A. Toet: "Effects of Third Person Perspective on Affective Appraisal and Engagement: Findings from SECOND LIFE" *Simulation & Gaming*, 41, 5, pp.724-742 (2010)
- 15) G. Gorisse, O. Christmann, E.A. Amato and S. Richir: "First-and Third-Person Perspectives in Immersive Virtual Environments: Presence and Performance Analysis of Embodied Users", *Frontiers in Robotics and AI*, 4, 33 (2017)
- 16) D. Monteiro, H.N. Liang, W. Xu, M. Brucker, V. Nanjappan and Y. Yue: "Evaluating Enjoyment, Presence and Emulator Sickness in VR Games Based on First-And Third-Person Viewing Perspectives", *Computer Animation and Virtual Worlds*, 29, 3-4, e1830 (2018)
- 17) A. Denisova and P. Cairns: "First Person vs. Third Person Perspective in Digital Games: Do Player Preferences Affect Immersion?", *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.145-148 (April 2015)
- 18) H. Galvan Debarba, S. Bovet, R. Salomon, O. Blanke, B. Herbelin and R. Boulic: "Characterizing First and Third Person Viewpoints and Their Alternation for Embodied Interaction in Virtual Reality", *PloS One*, 12, 12, e0190109 (2017)
- 19) Y. Matsuda: "[Sense of Body Ownership and Task Difficulty in a Reaching Task Using Perspective Switching in a VR Environment] VR Kankyo Ni Okeru Shitenkirikae wo Mochiita Reaching Kadai deno Shintaishoyukan to sono Nanido (in Japanese)", 2022 Winter Meeting of the Vision Society of Japan, *Vision*, 34, 1, pp.40-41 (2022)
- 20) I. Evin, T. Pesola, M.D. Kaos, T.M. Takala and P. Hämmäläinen: "3pp-r: Enabling Natural Movement in 3rd Person Virtual Reality", *Proceedings of the Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp.438-449 (November 2020)
- 21) R. Kondo, M. Sugimoto, K. Minamizawa, T. Hoshi, M. Inami, M. Kitazaki: "Illusory Body Ownership of an Invisible Body Interpolated between Virtual Hands and Feet via Visual-Motor Synchronicity", *Scientific Reports*, 8, pp.7541 (2018)
- 22) J.C. Eubanks, A.G. Moore, P.A. Fishwick and R.P. McMahan: "A Preliminary Embodiment Short Questionnaire", *Frontiers in Virtual Reality*, 2, pp.647896 (2021)
- 23) R.P. Darken, W.R. Cockayne and D. Carmein: "The Omni-Directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds", *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.213-221 (October 1997)
- 24) H. Iwata: "Walking about Virtual Environments on an Infinite Floor", *Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, pp.286-293 (March 1999)
- 25) E. Medina, R. Fruland and S. Weghorst: "Virtusphere: Walking in a Human Size VR "Hamster Ball"". *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 52, 27, pp.2102-2106. Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications (September 2008)
- 26) H. Iwata, H. Yano, H. Fukushima and H. Noma: "Circulafloor [Locomotion Interface]", *IEEE Computer Graphics and Applications*, 25, 1, pp.64-67 (2005)
- 27) T. Cakmak and H. Hager: "Cyberith Virtualizer: A Locomotion Device for Virtual Reality", In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, p. 1 (2014)
- 28) M. Kitazaki, T. Hamada, K. Yoshiho, R. Kondo, T. Amemiya, K. Hirota and Y. Ikei: "Virtual Walking Sensation by Pre-recorded Oscillating Optic Flow and Synchronous Foot Vibration", *i-Perception*, 10, 5, pp.2041669519882448 (2019)
- 29) Y. Matsuda, J. Nakamura, T. Amemiya, Y. Ikei and M. Kitazaki: "Enhancing Virtual Walking Sensation Using Self-Avatar in First-Person Perspective and Foot Vibrations", *Frontiers in Virtual Reality*, 2, pp.654088 (2021)



Yusuke Matsuda received the M.S. and Ph.D. degrees in interdisciplinary science and engineering from the Tokyo Institute of Technology, in 2011 and 2014, respectively. From January 2015 to October 2015, he was a Research Assistant at Tokyo Institute of Technology. From 2015 to 2019, he was a Research Assistant at the Tokyo University of Marine Science and Technology. From 2019 to 2020, he was a Research Assistant at the Toyohashi University of Technology. From 2020 to 2022, he was an Assistant Professor at Toyohashi University of Technology. Since 2022, he has been an Assistant Professor at the Suwa University of Science. His current research interests are virtual reality, binocular vision, and multisensory information integration.



Yukihiro Hirata received M.E. and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology in 1988 and 1993 respectively. From 1991 to 1993, he was a Research Associate at Tokyo Institute of Technology. From 1993 to 2011, he was a lecturer at Tokyo University of Science, Suwa. From 2011 to 2014, he was an Associate Professor at Tokyo University of Science, Suwa. From 2014 to 2018, he was a Professor at Tokyo University of Science, Suwa. Since 2018, he has been a Professor at Suwa University of Science. His research interests are virtual reality and human interface.



Yusuke Matsuda received the M.S. and Ph.D. degrees in interdisciplinary science and engineering from the Tokyo Institute of Technology, in 2011 and 2014, respectively. From January 2015 to October 2015, he was a Research Assistant at Tokyo Institute of Technology. From 2015 to 2019, he was a Research Assistant at the Tokyo University of Marine Science and Technology. From 2019 to 2020, he was a Research Assistant at the Toyohashi University of Technology. From 2020 to 2022, he was an Assistant Professor at Toyohashi University of Technology. Since 2022, he has been an Assistant Professor at the Suwa University of Science. His current research interests are virtual reality, binocular vision, and multisensory information integration.



Yukihiro Hirata received M.E. and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology in 1988 and 1993 respectively. From 1991 to 1993, he was a Research Associate at Tokyo Institute of Technology. From 1993 to 2011, he was a lecturer at Tokyo University of Science, Suwa. From 2011 to 2014, he was an Associate Professor at Tokyo University of Science, Suwa. From 2014 to 2018, he was a Professor at Tokyo University of Science, Suwa. Since 2018, he has been a Professor at Suwa University of Science. His research interests are virtual reality and human interface.
