

身体的動作と移動表現を用いた 仮想空間における長距離空間移動

石丸 敬登^{1,a)} 吉野 孝^{2,b)}

受付日 2022年3月20日, 採録日 2022年10月4日

概要: 現在, VR など仮想空間を利用した多くのコンテンツが開発されている. その普及にともない, 仮想空間において長距離を一瞬で移動するなど実現不可能な現象が利用されているが, このような実現不可能な現象には, 新しい適切な表現を行う必要があると考えられる. そこで本研究では, 仮想空間における長距離の空間移動表現の検証用のシステムとして「ドアクル」を開発した. ドアクルは, 仮想空間において身体的動作による操作方法および仮想空間特有の表現を用いることによって, 「遠く離れた場所に移動した感覚」を向上させることを目指す. 比較実験の結果, 身体的動作による操作方法と仮想空間特有の表現を用いた空間移動表現は, 移動した感覚や没入感などのユーザに与える様々な感覚を向上させることを確認できた.

キーワード: 長距離空間移動, 移動表現, 身体的動作, 仮想空間, VR

Long-distance Spatial Movement in Virtual Space Using Physical Movements and Movement Expressions

TAKATO ISHIMARU^{1,a)} TAKASHI YOSHINO^{2,b)}

Received: March 20, 2022, Accepted: October 4, 2022

Abstract: Currently, numerous contents are being developed using virtual space, such as VR. With its widespread use, unrealizable phenomena, such as moving long distances in an instant are being realized in virtual space. However, it is believed that it is necessary to design and create new and appropriate expressions for such phenomena. Therefore, in this study, a system for verifying long-distance spatial movement expression in virtual space, namely, “Doorcle” was developed. Doorcle aims to improve the “feeling of moving to a distant place” using the operation method involving physical movements and expressions peculiar to the virtual space in. As a result of a comparative experiment, it was confirmed that the spatial movement expressions using the operation method and expressions peculiar to virtual space improve the various sensations given to the user, such as the feelings of movement and immersion.

Keywords: long-distance space movement, moving expression, physical movement, virtual space, VR

1. はじめに

近年, VR など仮想空間を利用した多くのコンテンツが開発されている. さらにはスタンドアロン型のHMDが発

売されるなど仮想空間の普及にともなって, 今後も仮想空間を利用したコンテンツの増加が予想される. 実際に, 北アメリカのVR市場に対する分析^{*1}では2019年まで市場の増加傾向がみられ, 今後も増加が続くことが予測されている. 様々な分野でも研究, 開発が進んでおり, 医療分野において杉本らが遠隔医療や手術シミュレーション [1], 防災分野において中本らが被災体験と被災への対策を繰り返

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

² 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University, Wakayama 640-8510, Japan

a) ishimaru.takato@g.wakayama-u.jp

b) yoshino@wakayama-u.ac.jp

*1 Virtual Reality Market - Global Industry Analysis (ZION Market Research): <https://www.zionmarketresearch.com/report/virtual-reality-market#faq0>

すことによる防災意識の向上を目指す [2], 教育分野において Pietroszek らが VR のリモート教室参加システムのプロトタイプを開発を行う [3] など VR を利用した研究が多く進められている。

XR コンテンツでは, 体験を提供する観点において, 没入感や臨場感という要素がとても重要なものとなっている。この没入感や臨場感を増加させるという問題に対しては, 様々な方面からのアプローチが行われている。アプローチの一部として, 匂いや温度, 風をユーザに提示する「Feelreal^{*2}」, 触覚フィードバックを行う「HaptX GlovesDK2^{*3}」, 仮想空間での歩行をユーザが実際に歩行することで行う「KAT WALK C^{*4}」などがあげられ, 表現を行う分野は多岐にわたる。

また, 仮想空間では長距離を一瞬で移動するなど, 現在の科学技術では実現不可能であるものが実行可能あるいは表現可能になる。これらの現象を表現する際に, 従来の表現方法を利用するとユーザに与える没入感や臨場感などが損なわれる可能性がある。この問題に対して仮想空間特有の現象には今後適切な表現を行う必要があると考えられる。仮想空間のテレポート移動においては, 仮想空間上のどこにでも移動できるという利点がある。しかし, 現状ではテレポート移動においては移動した距離を表現できていない。移動の距離は仮想空間の広さや移動の没入感をユーザに提示するうえで重要であり, 仮想空間上の遠くへのテレポート移動において, 移動の実感や移動にかかった距離のユーザへの提示が要求されると考えられる。

そこで, 本研究では, 仮想空間でユーザの目の届かない遠く離れた場所へ一瞬で移動する現象に焦点を当て, 身体的な動作と仮想空間特有の表現を利用した長距離での空間移動表現を提案する。使用場面はメタバースなどの広大な仮想空間で自由に移動できる場面を想定している。自由な移動を行うために移動先の場所に縛られない表現によって移動の距離感を提示する。本手法では, ユーザの身体的な動きをシステムの操作に利用することで「仮想空間への没入感」や, 手で円を描くことで別空間につながる穴を生成することで移動先の空間と接続し, 空間移動中の表現を行うことで「遠く離れた別の場所に移動した感覚」の向上を目指す。

2. 関連研究

以下の関連研究に対して言及を行っていく中で, テレポート移動は, 暗転などの効果を挟み瞬時に現在とは違う位置に移動する移動方法, また平行移動は, ユーザの目線から水平方向に移動を行い続ける移動方法と定義する。

2.1 仮想空間における移動方法に関する研究

Coomer らは 4 種類のコントローラ操作による移動と身体的動作を利用した移動の比較調査を行った [4]。結果として身体的動作で「平泳ぎ」動作の移動が他の移動方法よりも高い評価が得られた。また Bozgeyikli らは移動後のユーザの向きを指定できるテレポート移動に対して平行移動や歩行動作による移動との比較評価を行った [5]。結果としてテレポート移動が直感的で楽しく, 方向の指定によってユーザの体験が低下したという評価が得られた。Griffin らはトラックパッドやポイント操作での移動, 頭の傾きと足踏み動作による移動の比較評価を行った [6]。結果から頭の傾きと足踏み動作による移動で存在感が, パフォーマンス面ではトラックパッドやポイント操作での移動が優れているという評価が得られた。Keil らは平行移動とテレポート移動による短距離の移動方法やトレーニングの実施によって移動距離の推定に生じる差の調査を行った [7]。結果としてテレポート移動で距離推定がより正確になるという評価が得られた。Frommel らはコントローラから出るポイントで指した先に移動するテレポート移動, コントローラで定められた移動先を選択するテレポート移動, タッチパッド操作での前方への平行移動, 操作をしなくても自動で動く移動の計 4 つのコントローラ操作による移動の評価を行った [8]。結果としてポイントによるテレポート移動が不快感, 楽しさ, 存在感, 感情価で最も高い評価が得られた。

これらの研究は目に見える範囲で行う異なった移動方法, 操作方法での空間内の移動に生じる効果の調査を行っている。これらの研究に対して, 本研究では身体的動作と空間移動表現を利用することによってユーザに生じる空間移動の効果の調査を行っている。

2.2 仮想空間における身体的動作に関する研究

雨宮らは足踏み動作から歩行速度を推定し移動する身体装着型インタフェースの開発と評価を行った [9]。結果として動作途中で停止しても速度推定の遅延がなく, 生理的な負荷が小さいという評価が得られた。von Willich らは足の 3D 位置と足の裏への圧力に依存した移動方法を提案した [10]。コントローラによるテレポート移動と比較を行い, 結果として精度と利便性では低い評価となったが一部の足の 3D 位置と足の裏への圧力により行われる移動が効率において高い評価を得られた。Liu らは 3 つの足ジェスチャによる移動方法の提案を行った [11]。コントローラ操作による移動との比較実験から身体を前傾させるジェスチャによる移動が最も好まれるという結果が得られた。Rietzler らは頭の回転による進行方向の変化と移動距離のスケーリングによって実空間より広い範囲を歩行可能となるシステムの提案を行った [12]。評価結果として存在感と没入感で高い評価が得られたが, 乗り物酔いの影響が多くみられた。これらのシステムは短距離の移動に足に依存した身体

*2 Feelreal: <https://feelreal.com/>

*3 HaptX Gloves DK2: <https://haptx.com/dk2-release/>

*4 KAT WALK C: https://katvr.jp/product_katwalk.c.php

的動作を利用している。これらの研究に対して、本システムではユーザの視界内にないほど遠くに瞬時に移動を行う長距離のテレポーション移動に手や腕の身体的動作を利用している。

2.3 空間接続に関する研究

濱上らは「ドアコム AR」を開発した [13]。このシステムでは「ドア」をメタファとして遠隔地間が仮想的につながっているような表現と自身の空間へと侵入される「被侵入感」を提示し、遠隔地との空間接続感の向上を目指した。本信らは実空間の点群情報を用いた空間接続表現を行うシステムを開発した [14]。このシステムは遠隔地の空間を相互につなぐ表現として各遠隔地の実空間の点群情報の表示を行い、臨場感や対話相手との同室感の向上を目指した。長谷川らは遠隔地空間をつなぐ映像表現に加え、引っ張られる「被牽引感」を提示することで、対話相手のテレプレゼンスの向上を目指すシステムを開発した [15]。評価結果として「被牽引感」によって空間接続感、物の受け渡しの臨場感の向上がみられた。

これらの研究は遠隔地との接続などを行っており空間の移動を行っていない。本研究では仮想空間内の遠く離れた別空間に接続し、さらに空間の移動を身体的動作で行っている。

Kiyokawa らはハンドジェスチャにより生成され、ユーザが通過することでテレポーション移動を行う「Tunnel Window」を提案した [16]。この研究は身体動作による空間の接続、接続先への移動を行っているが移動の距離をユーザに提示していない。本研究では、移動に必要な身体動作の回数や空間移動中の表現により、移動の距離感をユーザに提示している。

3. ドアクル

3.1 システム概要

「ドアクル^{*5}」は、仮想空間において遠く離れた場所にテレポーション移動を行う表現とユーザの身体的動作を利用したシステムの操作を行う。本手法では、仮想空間特有の表現と身体的動作を利用することで「遠く離れた別の場所に移動した感覚」の向上を目指す。表現としては、仮想空間上でユーザに疑似的な 360 度画像を提示し、その空間においてユーザの身体的動作を利用したシステム操作を行うことで長距離の空間移動を行う。

3.2 設計方針

従来の仮想空間における長距離の移動では、暗転などを用いることが多く移動の距離などを感覚的に提示できてい

ない。ドアクルでは移動を行った感覚と移動を行った距離が大きいという感覚を各々向上させることによって、あたかも遠く離れた場所に移動したような感覚の向上を目指す。利用者に「移動を行った感覚」や「移動を行った距離が大きい感覚」を与えるためには、身体的動作を起点とした移動方法と利用者に移動したことや距離を直感的に提示する表現が重要であると考えた。この課題を解決するために、仮想空間における長距離の空間移動を身体的動作によるシステム操作と仮想空間上の表現によって行う「ドアクル」を開発する。

3.3 システム構成

図 1 に、本システムの構成を示す。OculusQuest2 から顔の方向に加えてハンドトラッキングによりユーザの手の位置や形を取得し、仮想空間と現実空間の手の位置合わせを行っている。仮想空間ではユーザの手と Google Street View を利用したある場所の疑似的な 360 度画像をユーザに提示する。ユーザの手をもとに動作の認識を行い、特定の手の動作を認識することで空間移動を行う。本システムの機能は「Google Street View を利用した周囲画像の提示」「ユーザの動作認識」「空間移動表現」「空間移動中の表現」に分けることができる。

3.4 Google Street View を利用した周囲画像の提示

ユーザを中心とした周囲画像の外観を図 2 (a) に、画像の配置を図 2 (b) に示す。画像は Google Maps Platform の Street View Static API を利用して緯度、経度を指定することで任意の地点の風景画像を取得する。取得した画像を 8 度ごとに分割し、ユーザを中心として円環上に、さら

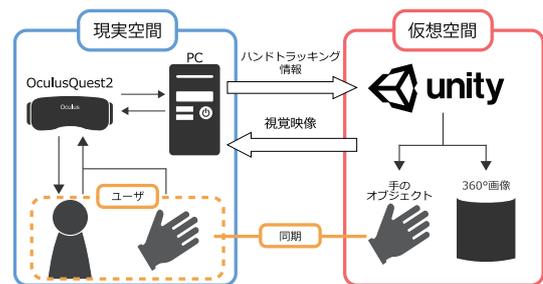


図 1 システム構成

Fig. 1 System configuration.



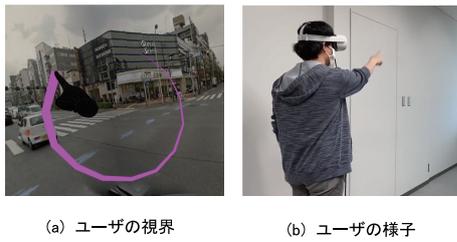
(a) ユーザの視界

(b) システム上の配置

図 2 周囲画像

Fig. 2 Surrounding image.

*5 ドアクルというシステム名は円を描くの英語訳である「draw a circle」と「クルッ」って円を描く動作を行うことで移動先を生成することを由来として命名を行った。



(a) ユーザの視界 (b) ユーザの様子

図 3 ユーザ動作の認識

Fig. 3 Recognition of user behavior.

にユーザの上下にも配置することでユーザの視界全体が任意の地点のものになる。画像の分割を8度ごとにした理由として、画像の結合部に生じる画像のズレを抑えることが目的となっている。分割する角度を小さくし、結合させる画像を小さく、多くすることで結合部に生じる画像のズレを抑えることができる。しかし、画像が多くなると取得する画像数も増加し通信を行うデータ量も増加するため、画像のズレが少なく、必要とする数が多くない8度を画像分割の角度として採用した。

3.5 ユーザの動作認識

動作認識のユーザの視界を図 3 (a) に、第三者から見た動作認識の様子を図 3 (b) に示す。ユーザの動作の取得はOculusQuest2によって行う。ハンドトラッキングにより手のボーン情報^{*6}を取得し、取得したボーン情報から演算を行うことで動作の認識を行う。以下に各要素に対しての処理について記述する。

(1) 手の形の認識

ユーザの手の形の認識は手の各ボーン的位置情報を利用する。OculusQuest2より入手したボーン情報により指の第1関節、指先など指の各部分の位置情報を取得する。隣り合うボーンの関係性をベクトルとして算出し、ベクトルの内積を計算して指が曲がっているかの判断を行う。この工程をすべての指で行うことによって曲がっている指を認識し、ユーザの手の形を認識する。

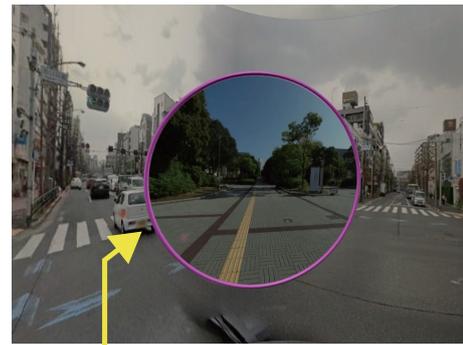
(2) 特定動作の認識

本システムでは、円を描く動作の認識を行う。動作認識は右手の指先の位置情報を取得することで行い、右手の形が人差し指のみを伸ばす形である際の値を利用する。ユーザに動作の認識中であることを提示するために指先の位置情報取得時には、指先の軌跡が提示される。また、ハンドトラッキングが外れた状態の値を除外することで認識精度の低下を防ぐ。

3.6 空間移動表現

空間移動表現における別空間との接続の様子を図 4 に、

^{*6} 手の各関節、指先部分を点座標として取得したデータ



別空間に繋がる穴を提示

図 4 空間移動表現における別空間との接続

Fig. 4 Connection with another space in spatial movement expression.

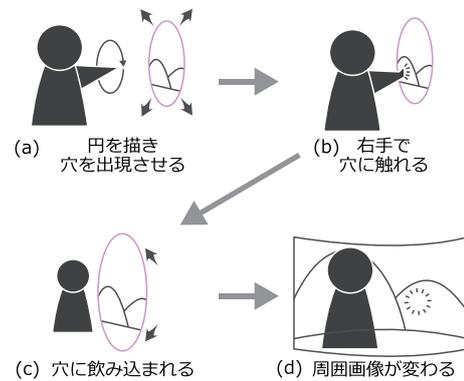


図 5 空間移動の流れ

Fig. 5 Flow of space movement.

空間移動表現の流れを図 5 に示す。ここでの空間移動表現は移動先に空間接続を行い、穴に飲み込まれる形で移動を完了させる一連のプロセスと定義する。本システムでは、自身の空間に別空間につながる穴が開く表現を行い、その穴にユーザの手が触れることで空間移動を行う。空間移動表現はユーザの動作認識により右手で円を描く動作を認識した場合に開始する。

表現は空間に穴が開く表現から始まり、穴が開く表現はユーザが円を描いた方向に円形のオブジェクトを出現させることで行う。出現する際に、オブジェクトが小さい状態から徐々に拡大しながら出現することで空間に穴が広がりながら開く表現を行う (図 5 (a))。この表現は円を描く動作を起点とすることでユーザの行動により空間に穴が出現した感覚の向上を促す。さらに、空間の穴に移動先の風景を投影することで別空間につながる感覚を提供する (図 4)。

この出現した穴にユーザの手が触れることで空間移動を行う (図 5 (b))。穴はユーザから少し離れた場所に出現し、穴に触れるには実際に歩き穴に近づく必要がある。ユーザの手が触れた際に、オブジェクトを徐々に拡大しながらユーザに接近させることで空間の穴に飲み込まれるような表現を行う (図 5 (c))。この表現は飲み込まれるように移動先に接近することで移動先の空間に侵入していく感



図 6 空間移動中の表現

Fig. 6 Expression during space movement.

覚の向上を促す。オブジェクトの接触と同時に周囲画像を移動先の風景に変更させることで移動の完了を表現する(図 5(d))。以上の表現を一連の流れで行う。これらによりユーザの意思で移動先の確認、移動を行い、表現では穴の生成による空間接続、空間への接触、穴に飲み込まれることによる空間への侵入、移動の完了と徐々に移動の段階を踏んでいくことでユーザ自身が移動を行った感覚の向上を目指す。

3.7 空間移動中の表現

長距離のテレポート移動中の移動表現の外観を図 6 に示す。空間移動表現の流れにおいて図 5(c) と図 5(d) の間に長距離のテレポート移動中の移動表現を行う。表現は元の空間から移動先の空間まで別空間を中継して移動するものとなっている。中継する別空間は暗い空間に光球が点在しており、移動先の空間に向けて光柱が一定間隔で配置されている。さらに、別空間内を直進し続けることで移動先の空間の穴に衝突し、移動を完了することによって、別空間で移動先の空間に接近していく移動表現も行っている。この表現は別空間内での移動速度と移動先の空間までの距離を変化させやすい。さらに、空間内の光球と光柱は移動の速度と距離が視覚的に分かりやすくなるように配置を行っている。光柱は一定の間隔で配置を行っており、ユーザに移動速度の変化を提示している。中継する別空間において、移動先の穴までの距離を現実から 1/1,000 スケールに縮小した位置に配置している。縮小スケールである 1/1,000 の値は、現在のところ暫定的に採用している。システム利用時の空間移動に必要な時間は移動距離に応じて変化する。移動時間は、100 km 以下の移動で 1 秒かかり、移動距離が 100 km に達するごとに移動時間が 1 秒ずつ増える。ユーザの周囲の光球や光柱の移動速度は、徐々に速くなっていき、移動先に到着が近づくにつれて減速する。

現在、ユーザの仮想空間上のテレポート移動では暗転や視界を一気に変化させることにより移動を行うことが多い。関連研究においてもテレポート移動では移動中の表現を挟んでいるものはなかった。また、移動距離を表現しているものもなかった。本研究では、仮想空間上でユーザが

実行する移動方法の中でも、移動中の表現が挟まれることが少ない長距離のテレポート移動に、周囲のオブジェクトが流れていく空間移動中の表現を利用している。

4. 実験

4.1 事前実験

本研究の前に事前実験を行った。事前実験では前述したシステム機能のうち「Google Street View を利用した周囲画像の提示」「ユーザの動作認識」「空間移動表現」の 3 つを利用した「円動作による移動」とコントローラのボタン操作を利用した移動方法との比較実験を行った。この「円動作による移動」は、ユーザが円を描く動作で空間接続を行った後に接続先の空間に触れ、穴に飲み込まれることで、移動中の表現を挟まずに移動を完了させる移動方法と定義する。

事前実験は、身体的動作を利用したシステム操作と空間移動表現を利用したシステムである「円動作による移動」が、ユーザに与える効果の実証を行った。事前実験では、実験協力者に「円動作による移動」と HMD のハンドコントローラでのボタン操作を利用した移動方法を体験してもらった後にアンケートに回答をしてもらい、システムの評価を行った。アンケートの結果から、身体的動作によるシステム操作によって「移動した感覚」「能動的に移動を行った感覚」を、空間移動表現によって「空間への接続感」「空間移動の想起性」を向上させ、「空間への侵入感」は身体的動作によるシステム操作と空間移動表現の両方により感覚を向上させる評価が得られ、各項目において有意差がみられた。また、移動したと感じた距離を km 単位で自由な数字で回答してもらった。結果として移動したと感じた距離に関して有意差はみられず、「移動の距離感」に関して差がみられなかった。これらの結果から円動作による移動によって「移動した感覚」においては感覚の向上がみられたが、長い距離を移動したという「移動の距離感」における感覚の向上はみられなかった。

4.2 実験概要

本システムでは、仮想空間特有の表現と身体的動作を利用することで「遠く離れた別の場所に移動した感覚」の向上を目指している。しかし、事前実験の結果から「移動の距離感」における感覚の向上がみられなかった。そこで本実験では、「空間移動中の表現」を追加することによって「移動の距離感が向上される」、「さらに移動した感覚が向上される」という 2 つの仮説を立て、検証を行った。

- 仮説 1 移動の距離感が向上される。
- 仮説 2 さらに移動した感覚が向上される。

本実験の検証では比較実験を実施し、比較対象として事前実験で使用した「円動作による移動」、円動作による移動に空間移動中の表現を追加した「空間中継表現」、「複数回

の円動作による移動」の3種類を用意した。本論文で記述したドアクルは「空間中継表現」となっている。実験協力者は和歌山大学の21歳から24歳までの大学生および大学院生の男女12名を対象に行った。うち、男性は6名、女性は6名である。実験にあたり、順序効果を考慮するために実験協力者を2つのグループに分けた。この2グループ間の違いは「空間中継表現」「複数回の円動作による移動」の2種類の条件を体験してもらう順番が逆になっている点のみとなっている。

4.3 比較条件

比較条件である「複数回の円動作による移動」は複数回円を描くことで移動先の空間につながる穴の出現を行う。これにより、「円動作による移動」では1回の動作で行うことができた空間接続にかかる労力を増加させる。本条件の表現は空間の穴を出現させるのに複数回円を描くものになっている。本条件では円を描く動作を4回行ってもらう。1回目の動作で小さな空間の穴が出現し、円を描くごとに穴を段階的に拡大させ、4回目で空間の穴の拡大を終了する。最後に、空間の穴に右手で触れることで円動作による移動と同様の空間移動を行う。複数回の円動作表現において行う円を描く動作の回数は移動先への距離で決定する。空間接続にかかる動作の回数は、移動先への距離が100km以下で1回の動作を必要とし、100km以降は距離が100km増えるごとに必要とする動作回数を1回ずつ増やす。本実験では空間移動にかかる距離が442kmのため、計4回の動作を必要とする。動作回数は離散的に値を調節することで、ユーザに要求される動作の変化を分かりやすくする。このように距離に応じて、空間接続にかかる回数を変化させ、ユーザに移動にかかる距離感を提示することを目指す。「複数回の円動作による移動」では、身体的動作を増やし、空間接続にかかる労力を増加させることで、移動の距離感の向上を行えるかを検証する。別動作の利用もありうるが、今回は同一の動作を増加させることで、単純な動作の増加による効果の検証を行う。比較条件として、「円動作による移動」は本実験では他の条件との比較基準となる移動方法である。「空間中継表現」は空間移動中の表現の追加を行っており、「円動作による移動」と比較することで空間移動中の表現の評価を得ることができる。また「複数回の円動作による移動」は空間接続に要する円を描くという身体的動作の増加を行っており、「円動作による移動」と比較することで身体的動作の増加への評価を得ることができる。さらにすべての条件は同じアンケートで比較を行うので「空間中継表現」と「複数回の円動作による移動」の同項目を比較することで項目において「空間移動中の表現」と「身体的動作の増加」のどちらが影響が大きいかの検証も行う。

4.4 実験手順

(1) システムのトレーニング

本実験ではシステムの体験をする前に円を描く動作のトレーニングを行った。このトレーニングでは円を描く動作が認識されたか実験協力者に分かる状態で複数回円を描く動作を行ってもらい、実験協力者に正しく認識される円を描く動作を学習してもらった。

(2) システムの体験

実験協力者は「円動作による移動」「空間中継表現」「複数回の円動作による移動」の3種類の条件を体験する。このとき、条件ごとに1回システムを利用して仮想空間における長距離の空間移動を体験してもらう。順序効果を考慮するために、体験の順番としては最初に「円動作による移動」を行ってもらい、その後に「空間中継表現」「複数回の円動作による移動」を2グループ間で順序を逆にして行う。

本実験では移動後の背景が、和歌山大学の敷地内から東京都中野区の交差点の風景に変化する。現実空間ではこの2点は442km離れており、「空間中継表現」利用時の空間移動には5秒を要する。中継する別空間において、移動先の穴までの距離は442m離れた位置に配置している。実験協力者の周囲の光球や光柱の移動速度は、平行移動速度で88m/s、移動速度の最大速度は220m/sとなり、システム内の処理で自動的に決められる。

(3) アンケートへの回答

実験協力者に各条件の体験後に1回ずつ最後に1回、計4回のアンケートを実施した。各条件に対する質問項目は「(1) 実際に別の場所に移動したように感じた」「(2) 移動先の空間に入っていくように感じた」「(3) 移動先の空間とつながっているように感じた」「(4) 長い距離を移動したように感じた」「(5) 移動先は遠く離れた場所であると感じた」「(6) どれくらいの距離を移動したと感じましたか」の6つとなる。(6)以外の質問では5段階のリッカート尺度(1.強く同意しない, 2.同意しない, 3.どちらともいえない, 4.同意する, 5.強く同意する)で、(6)の質問では実験協力者が仮想空間上で移動したと感じた距離をkm単位で自由な数字を回答してもらった。加えて回答理由も自由記述で答えてもらった。最後のシステムに対する順位付けアンケートの質問項目は「(1) 移動した感覚」「(2) 空間がつながる感覚」「(3) 移動したと感じた距離」「(4) システムの楽しさ」の4つとなる。各質問で体験した3つの条件に順位をつける形で回答してもらい、条件の直接的な比較を行った。加えて回答理由も自由記述で答えてもらった。

表 1 各条件に対するアンケート結果
Table 1 Questionnaire results for each condition.

	質問項目	比較条件	評価の分布					中央値	最頻値	有意確率
			1	2	3	4	5			
(1)	実際に別の場所に移動したように感じた.	円動作による移動	0	0	1	6	5	4	4	$p = 0.1573$
		空間中継表現	0	0	0	6	6	4, 5	4, 5	
		複数回の円動作による移動	0	1	0	7	4	4	4	$p = 0.1025$
(2)	移動先の空間に入っていくように感じた.	円動作による移動	0	0	1	6	5	4	4	$p = 0.7055$
		空間中継表現	0	0	2	3	7	5	5	
		複数回の円動作による移動	0	0	2	6	4	4	4	$p = 0.1797$
(3)	移動先の空間とつながっているように感じた.	円動作による移動	0	3	5	3	1	3	3	$p = 0.2714$
		空間中継表現	0	1	5	5	1	3, 4	3, 4	
		複数回の円動作による移動	0	1	2	9	0	4	4	$p = 0.5637$
(4)	長い距離を移動したように感じた.	円動作による移動	2	5	3	2	0	2	2	$p = 0.0030^*$
		空間中継表現	0	0	2	4	6	4, 5	5	
		複数回の円動作による移動	0	3	5	3	1	3	3	$p = 0.0064^*$
(5)	移動先は遠く離れた場所であると感じた.	円動作による移動	0	3	7	2	0	3	3	$p = 0.0026^*$
		空間中継表現	0	0	1	4	7	5	5	
		複数回の円動作による移動	0	1	5	5	1	3, 4	3, 4	$p = 0.0057^*$

・評価項目：1：強く同意しない，2：同意しない，3：どちらともいえない，4：同意する，5：強く同意する

・有意確率に、ウィルコクソンの符号順位検定とボンフェローニ法による補正を使用し、検定結果は空間中継表現と各条件間で行ったものを示す。

・*：有意差あり $p < 0.05$

5. 実験結果と考察

5.1 各条件へのアンケートに対する考察

各条件に対するアンケートの結果を表 1 に示す。アンケート結果の比較条件間の有意確率はウィルコクソンの符号順位検定を質問 (6) でのみ t 検定を用いた。また、ボンフェローニ法による補正を行っている。

(1) 移動した感覚に関する質問

表 1 (1) の質問に対する 5 段階評価はすべての移動で高評価が得られた。有意差に関して「空間中継表現」と「円動作による移動」($p = 0.1573 > 0.05$)、「複数回の円動作による移動」($p = 0.1025 > 0.05$) 間で有意差がみられなかった。回答で「強く同意する」を選んだ理由として周囲の様子に変化することに対する言及が多くみられた。以上の結果からすべての条件において高い評価を獲得することができたが、「空間移動中の表現」による移動した感覚のさらなる向上は確認できなかった。

(2) 空間の侵入感に関する質問

表 1 (2) の質問に対する 5 段階評価はすべての移動で高評価が得られ、空間中継表現は中央値、最頻値ともに 5 と他システムより高い評価を得た。有意差に関して「空間中継表現」と「円動作による移動」($p = 0.7055 > 0.05$)、「複数回の円動作による移動」($p = 0.1797 > 0.05$) 間で有意差がみられなかった。回答で「強く同意する」を選んだ理由として移動先への接近に対する言及が多くみられた。以上の結果から

すべての条件において高い評価を獲得することができたが、「空間移動中の表現」による空間の侵入感のさらなる向上は確認できなかった。

(3) 空間の接続感に関する質問

表 1 (3) の質問に対する 5 段階評価は複数回の円動作による移動で他の移動よりわずかに高評価が得られた。有意差に関して「空間中継表現」と「円動作による移動」($p = 0.2714 > 0.05$)、「複数回の円動作による移動」($p = 0.5637 > 0.05$) 間で有意差がみられなかった。回答で「強く同意する」を選んだ理由として空間の中継に対する言及が多くみられた。しかし「同意しない」や「どちらともいえない」と回答した理由として移動時間が長いことに対する言及がみられた。以上の結果からわずかに複数回円を描く移動で高い評価が得られたが、「空間移動中の表現」による空間の接続感のさらなる向上は確認できなかった。

(4) 長い距離を移動した感覚に関する質問

表 1 (4) の質問に対する 5 段階評価は空間中継表現で高評価が得られた。有意差に関して「空間中継表現」と「円動作による移動」($p = 0.0030 < 0.05$)、「複数回の円動作による移動」($p = 0.0064 < 0.05$) 間で有意差がみられた。回答で「強く同意する」を選んだ理由として移動にかかる時間や中継空間内を移動する表現に関する言及が多くみられた。以上の結果から「空間中継表現」が長い距離を移動した感覚を向上させており、移動にかかる時間や中継空間内を移動する表現が高評価の大きな要因となることが分かった。

表 2 質問 (6) に対するアンケート結果

Table 2 Questionnaire results for question (6).

	質問項目	比較条件	中央値	有意確率
(6)	どれくらいの距離を移動したと感じましたか。	円動作による移動	27.5 km	$p = 0.0016^*$
		空間中継表現	200 km	
		複数回の円動作による移動	50 km	$p = 0.0050^*$

・自由記述により移動したと感じた距離を数字で回答。
 ・有意確率の計算には、t 検定とボンフェローニ法による補正を使用し、検定結果は空間中継表現と各条件間で行ったものを示す。
 ・*：有意差あり $p < 0.05$

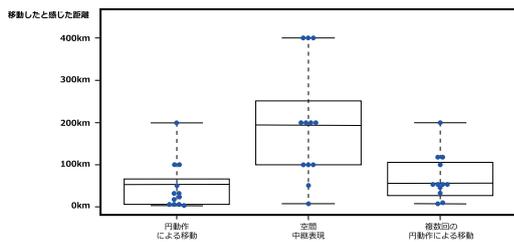


図 7 (6) の回答距離の箱ひげ図

Fig. 7 (6) Answer distance box plot.

(5) 移動先が遠く離れた場所である感覚に関する質問

表 1(5) の質問に対する 5 段階評価は空間中継表現で高評価が得られた。有意差に関して「空間中継表現」と「円動作による移動」($p = 0.0026 < 0.05$)、「複数回の円動作による移動」($p = 0.0057 < 0.05$) 間で有意差がみられた。回答で「強く同意する」を選んだ理由として移動の速度や移動にかかる時間に関する言及が多くみられた。以上の結果から「空間中継表現」の方が移動先が遠く離れた場所である感覚を向上させており、移動の速度や移動にかかる時間が高評価の大きな要因となることが分かった。

5.2 移動にともなう距離感の考察

実験協力者が本実験で移動したと感じた距離の中央値と有意差を表 2 に、回答の値を箱ひげ図にしたものを図 7 に示す。自由記述で回答してもらい、中央値において「円動作による移動」は 27 km, 「空間中継表現」は 200 km, 「複数回の円動作による移動」は 50 km と空間中継表現が 3 つの比較条件の中で最も遠いという結果が得られた。有意差に関して「空間中継表現」と「円動作による移動」($p = 0.0016 < 0.05$)、「複数回の円動作による移動」($p = 0.0050 < 0.05$) 間で有意差がみられた。回答で長い距離を推定した理由として「時間をかけて移動した感覚があった」や「周囲の速さにより大きな距離を移動したように感じた」という意見がみられた。以上の結果から「空間中継表現」が移動に感じる距離感を向上させており、移動の速度や移動にかかる時間が距離を長く推定させた大きな

表 3 条件に対する順位付けアンケート結果

Table 3 Ranking questionnaire results for conditions.

	質問項目	比較条件	合計点
(1)	移動した感覚	円動作による移動	15
		空間中継表現	36
		複数回の円動作による移動	21
(2)	空間がつながる感覚	円動作による移動	17
		空間中継表現	29
		複数回の円動作による移動	26
(3)	移動したと感じた距離	円動作による移動	13
		空間中継表現	34
		複数回の円動作による移動	25
(4)	システムの楽しさ	円動作による移動	17
		空間中継表現	34
		複数回の円動作による移動	21

・順位ごとの得点：1 位=3 点, 2 位=2 点, 3 位=1 点, 最高合計点=36 点, 最低合計点=12 点。

要因となることが分かった。

5.3 条件に対する順位付けに対する考察

条件に対する順位付けアンケートの結果を表 3 に示す。すべて質問に対する評価の合計点は最も高く、全体的に空間中継表現が高評価となった。「空間がつながった感覚」では他の項目よりも「空間中継表現」と「複数回の円動作による移動」の差が小さいがすべての質問項目において「空間中継表現」が最も順位が高いという結果が得られた。各項目において「空間中継表現」を 1 位と回答した実験協力者の意見としては「別空間を通る時間と周囲の動きで遠くまで移動している感覚になった」など別空間での移動の速さや時間、移動中の表現に言及するものが多くみられた。以上の結果から別空間での移動の速さや時間、移動中の表現が、全体における高評価につながったことが考えられる。

さらに「複数回の円動作による移動」においてもすべての項目で「円動作による移動」よりも高い評価が得られた。「複数回の円動作による移動」を高く評価した実験協力者の意見としては、「何回も手を回すことで自分が操作している感じがかった」など、動作を重ねたことに対する言及が多くみられた。特に空間接続感においては労力が上がり、接続が困難になった分、遠くの場所に接続したように感じたという回答もみられた。このように動作が増え、移動への労力が増えることで移動の距離や移動の感覚の向上することが分かった。しかし、人によっては「動作が増えた分、負担を感じる」といった意見もみられた。以上の結果から移動にかかる動作の増加が、評価につながったことが考えられる。

5.4 仮説に対する考察

5.4.1 仮説 1 に対する考察

仮説 1 の「移動の距離感が向上される」について、移動

の距離感に関する質問である表 1(4)「長い距離を移動した感覚」、表 1(5)「移動先が遠く離れた場所である感覚」、表 1(6)「移動したと感じた距離」において「空間中継表現」と他の移動方法間に有意差がみられた。これらのアンケート結果から、空間移動中の表現の追加によって長い距離を移動したという移動の距離感が向上することが分かった。以上のことから仮説 1 は成立となる。さらにアンケートの回答理由から空間移動中の移動にかかる時間や移動の速さ、中継空間内を移動する表現が移動の距離感の向上につながったことも分かった。

5.4.2 仮説 2 に対する考察

仮説 2 の「さらに移動した感覚が向上される」について、移動した感覚に関する質問である表 1(1)の「移動した感覚」、表 1(2)「空間の侵入感」、表 1(3)「空間の接続感」において「空間中継表現」と他の移動方法間に有意差はみられなかった。これらのアンケート結果から空間移動中の表現の追加によってさらなる移動した感覚の向上はみられなかった。以上のことから仮説 2 は棄却となる。仮説 2 が棄却となった原因として移動を行った感覚においては移動結果による場所の変化が大きな要素であり、移動中の表現は移動結果による場所の変化ほどの大きさの要素ではなかったことが考えられる。しかし、アンケートの結果から移動した感覚は円動作による移動と同様に全体的に高く、順位付けのアンケートからわずかながら「空間中継表現」が他の手法より高い評価であることが分かった。事前実験を加味すると本実験では円動作による移動からさらなる感覚の向上はなかったが空間中継表現でも十分に移動を行った感覚が大きいことが分かる。

6. おわりに

本論文では、仮想空間における長距離の空間移動表現の検証用のシステム「ドアクル」について述べた。ドアクルはユーザの身体的動作を利用したシステムの操作と長距離の空間移動表現を用いて仮想空間における空間移動を行う。身体的動作においては指で円を描く動作を行うことで移動先の空間との接続を移動先の空間に触れることで空間移動の開始を行い、仮想空間特有の表現では空間移動先への侵入と空間移動中の表現を行った。

事前実験によって円動作による移動では移動を行った感覚を向上させるが、移動の距離感を提示できないという結果を得た。本実験では事前実験の結果をもとに、円動作による移動に「空間移動中の表現」を追加した空間中継表現に対して比較実験を行った。本実験の結果では、空間移動中の表現の追加により移動を行った感覚のさらなる向上はみられなかったが、移動の距離感の向上がみられた。

事前実験と本実験の結果からドアクルは仮想空間における長距離空間移動において「移動を行った感覚」と「移動の距離感」を向上させることが分かった。これにより、長

距離のテレポート移動に要求される「移動の実感」や「移動にかかった距離」のユーザへの提示は達成できたと考えられる。今後は、提案システムの表現の改善を行うとともに、空間移動先の場所の選択などを可能にしていくことを目指す。

参考文献

- [1] 杉本真樹, 谷口直嗣, 新城健一: XR (VR・AR・MR) によるテレグジスタンス・超臨場感コミュニケーションと遠隔医療・手術シミュレーション・トレーニング, *バイオメカニズム学会誌*, Vol.43, No.1, pp.35-40 (2019).
- [2] 中本涼菜, 谷岡遼太, 吉野 孝: VR を用いた被災体験とその対策を繰り返すことによる防災教育システムの提案, 第 16 回情報処理学会関西支部支部大会, 情報処理学会関西支部大会講演論文集 G-28, pp.1-6 (2017).
- [3] Pietroszek, K. and Lin, C.C.: UniVResity: Face-to-Face Class Participation for Remote Students using Virtual Reality, *VRST '19: 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Article No.97, pp.1-2, DOI: 10.1145/3359996.3364730 (2019).
- [4] Coomer, N., Bullard, S., Clinton, A., and Williams-Sanders, B.: Evaluating the effects of four VR locomotion methods: Joystick, armcycling, point-tugging, and teleporting, *SAP '18: Proc. 15th ACM Symposium on Applied Perception*, Article No.7, pp.1-8 (2018).
- [5] Bozgeyikli, E., Raji, A., Katkooori, S. and Dubey, R.: Point & Teleport Locomotion Technique for Virtual Reality, *CHI PLAY '16: Proc. 2016 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp.205-216 (2016).
- [6] Griffin, N.N., Liu, J. and Folmer, E.: Evaluation of Handsbusy vs Handsfree Virtual Locomotion, *CHI PLAY '18: Proc. 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, pp.211-219, DOI: 10.1145/3242671.3242707 (2018).
- [7] Keil, J., Edler, D., O'Meara, D., Korte, A. and Dickmann, F.: Effects of Virtual Reality Locomotion Techniques on Distance Estimations, *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, Vol.10, No.3, 150, DOI: 10.3390/ijgi10030150 (2021).
- [8] Frommel, J., Sonntag, S. and Weber, M.: Effects of Controller-based Locomotion on Player Experience in a Virtual Reality Exploration Game, *FDG '17: Proc. 12th International Conference on the Foundations of Digital Games*, Article No.30, pp.1-6, DOI: 10.1145/3102071.3102082 (2017).
- [9] 雨宮慎之介, 八木寿浩, 塩崎佐和子, 藤田欣也, 渡部富士夫: 足踏式空間移動インターフェース (WARP) の開発と評価, *TVRSJ*, Vol.6, No.3, pp.221-228 (2001).
- [10] von Willich, J., Schmitz, M., Müller, F., Schmitt, D. and Mühlhäuser, M.: Podoportation: Foot-Based Locomotion in Virtual Reality, *CHI '20: Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1-14, DOI: 10.1145/3313831.3376626 (2020).
- [11] Liu, S., Lee, G., Li, Y., Piumsomboon, T. and Ens, B.: Force-Based Foot Gesture Navigation in Virtual Reality, *VRST '21: Proc. 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, Article No.72, pp.1-3, DOI: 10.1145/3489849.3489945 (2021).
- [12] Rietzler, M., Deubzer, M., Dreja, T. and Rukzio, E.: Telewalk: Towards Free and Endless Walking in Room-Scale Virtual Reality, *CHI '20: Proc. 2020 CHI Confer-*

- ence on Human Factors in Computing Systems, pp.1-9, DOI: 10.1145/3313831.3376821 (2020).
- [13] 濱上宏樹, 吉野 孝: ドアコム AR: ポータルを用いた空間接続表現手法による対話相手の存在感の強化, 情報処理学会, インタラクション 2018, pp.1-9 (2018).
- [14] 本信敏学, 吉野 孝: 実空間の点群情報を用いた空間接続表現の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.63, No.1, pp.21-28 (2022).
- [15] 長谷川駿, 吉野 孝: ポータルを介した空間接続表現における被牽引感提示による対話相手の存在感の強化, 第27回社会情報システム学シンポジウム学術講演論文集, ISSN: 1882-9473, セッション3: キュレーションとエンゲージメント, pp.1-6 (2021).
- [16] Kiyokawa, K. and Takemura, H.: A Tunnel Window and Its Variations: Seamless Teleportation Techniques in a Virtual Environment, *Proc. Int. Conf. Human-Computer Interaction (HCI International)* (2005).



石丸 敬登 (学生会員)

2022年和歌山大学システム工学部システム工学科卒業。現在、同大学大学院システム工学研究科システム工学専攻博士前期課程に在学中。仮想空間におけるユーザ体験に関する研究に従事。



吉野 孝 (正会員)

1992年鹿児島大学工学部電子工学科卒業。1994年同大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。博士(情報科学)。現在、和歌山大学教授。コミュニケーション支援およびビッグデータの社会的応用に関する研究に興味を持つ。本会シニア会員。