

身体と環境との整合性を考慮した 回転量操作型リダイレクションに関する基礎検討

水谷 純也^{*1} 長尾 涼平^{*1} 松本 啓吾^{*1}
鳴海 拓志^{*1} 谷川 智洋^{*1} 廣瀬 通孝^{*1}

Basic Study on Rotational Manipulation Type Redirection Considering Consistency of Body and Environment

Junya Mizutani^{*1}, Ryohei Nagao^{*1}, Keigo Matsumoto^{*1},
Takuji Narumi^{*1}, Tomohiro Tanikawa^{*1} and Michitaka Hirose^{*1}

Abstract - In virtual reality (VR), there is a technique called redirection that enables to expand a limited real space into a large VR space. It had been proposed that it is possible to manipulate spatial perception more effectively by adding haptic cues. However, with this method, since the positions and shapes of the objects in the VR space and the real space are different, misalignment occurs in the positional relationship between the body and the environment when a part of the body is displayed. On the other hand, human spatial perception is classified into a personal space, a peripersonal space, and an extrapersonal space according to the distance from the body, and it is said that the perception characteristics of each space are different. Conventional redirection mainly manipulated the extrapersonal space, we devised an operation method suitable for peripersonal space and thought to solve the problem caused by the method of adding haptic cues. The results from our experiment, it indicates that the proposed method can effectively manipulate the spatial perception than the conventional one.

Keywords : redirected walking, rotational manipulation, body-integration, visuo-haptic interaction

1. はじめに

「VR 元年」と呼ばれた 2016 年を経て、バーチャルリアリティ(VR)技術はさらに発展し、エンターテインメントのみならず、医療や教育など様々な分野に応用されている。そういった VR コンテンツの体験において重要な要素の一つとして没入感が挙げられる。

バーチャル空間での体験に高い没入感を与えるにはバーチャル空間に身体性を取り入れることが重要とされ、バーチャル空間を移動する際に実空間の移動とバーチャル空間の移動を等しく対応させる手法が考えられてきた[1, 2]。しかし、バーチャル空間と実空間を一对一に対応させる手法では、広大なバーチャル空間を歩き回ることが可能にするためにバーチャル空間と同等の広大な実空間が必要になる。この問題の解決策として、様々なロコモーションインターフェースが提案されてきた。岩田らは、ユーザの歩行に応じて台座型のロボットが移動し、仮想的な床を作り出すことができるデバイスを提案している[3]。また、人間サイズの任意の方向に回転するカゴの中を移動することでバーチャル空間を移動するデバイスも提案されている[4]。さらに研究者だけでなく様々な

企業が、Virtuix Omni¹, strider VR²といった、その場で歩行し、その移動量をバーチャル空間に反映するシステムを開発している。しかしこうしたデバイスはコストが高く、さらにユーザの位置は空間に対してほぼ静止しているため、前庭感覚、体性感覚が異なる実際の歩行時と同じ感覚を提示することは出来ない。

別の解決策として、図 1 のようなリダイレクションと呼ばれる方法論が提案されている[5]。リダイレクションとは、ユーザに実際の歩行による映像とわずかに異なるバーチャル空間の映像を視覚提示することで、限られた実空間を歩行するユーザの空間知覚を操作し、広大なバーチャル空間を歩行しているように知覚させることができる。リダイレクションの代表的な操作として並進移動量操作、回転量操作、曲率操作の 3 手法が挙げられる。並進移動量操作はユーザの実空間で歩行した移動量に、回転量操作はユーザが実空間で回転した角度に、曲率操

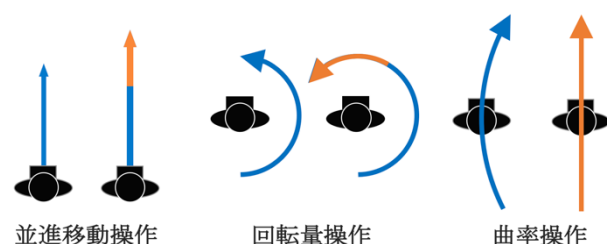


図 1 リダイレクションの操作

*1: 東京大学大学院 情報理工学系研究科

*1: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

1: <http://www.virtuix.com/>

2: <https://www.stridervr.com/>

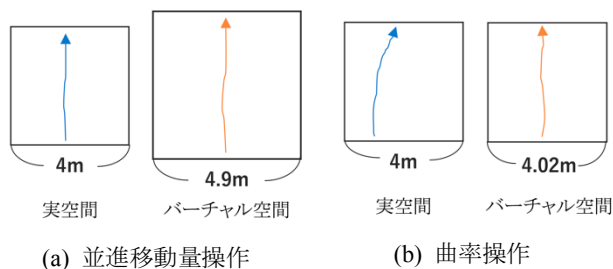


図 2 並進移動量操作と曲率操作の限界

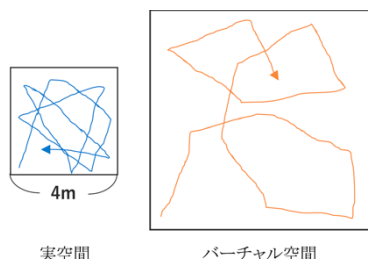


図 3 回転量操作による広大なバーチャル空間の表現

作はユーザが実空間で歩行した経路の曲率にゲインをかけることで、バーチャル空間でのユーザの歩行を操作するというものである。しかし、リダイレクションには操作できる範囲に限界がある。特に回転量を操作するリダイレクションにおいては、バーチャル空間で知覚させることができる回転量は実空間での回転量の 0.67~1.24 倍であることが知られている[6]。そのため図 2 のように、部屋全体を移動可能範囲とする現在のルームスケール VR で想定されている 4m×4m の実空間で広大なバーチャル空間を表現するには並進移動量操作と曲率操作だけでは限界がある。よって図 3 に示すように、広大なバーチャル空間を表現するには回転量操作が不可欠であり、より高い没入感を与えるには、より効果的な回転量操作手法が必要である。

他方で、ヒトの知覚空間は身体の距離に応じて身体空間、身体周辺空間、身体外空間に区分され、それぞれの空間の知覚の仕組みは異なることが知られている[7]。従来のリダイレクションは主に身体外空間を操作してきた。これに対し身体周辺空間における視触覚間相互作用をリダイレクションに応用することで、従来のリダイレクションより強力に空間知覚を操作できることが知られている[8]。この研究では、曲率操作を行う際にユーザが実空間で歪曲した壁に触れることで、直進していると知覚させるのに必要な曲率半径を 22m から 6m に縮小することができたと報告している。ところで、VR の 3 要素として「3次元の空間性」「実時間の相互作用性」「自己投射性」があげられる[9]。「3次元の空間性」とは人間にとっての自然な 3 次元空間のことであり、「実時間の相互作用性」とは人間が空間の中で環境との実時間の相互作用をしながら自由に行動できることであり、「自己投射性」とは環

境と人間がシームレスで人間が環境に入り込んだ状態のことである。このうち「3次元の空間性」、「実時間の相互作用性」は、視野角が広く、目を完全に覆うことで、ユーザがバーチャル空間に入り込める没入型 HMD を利用することで満たされることになる。さらに「自己投射性」として、手などの人間の身体のモデルをバーチャル空間で視覚提示することでリダイレクションの効果や没入感が増すと考える。しかし視触覚間相互作用をリダイレクションに利用する手法ではバーチャル空間と実空間の物体の形状や位置が異なるため、身体の一部を単純に実空間とバーチャル空間を対応させて表示した際に身体と環境との位置関係に不整合が生じることが考えられる。

リダイレクションによる身体外空間の操作に加え、身体周辺空間を操作してこの不整合を解消することで、強力にヒトの空間知覚を操作することが出来ると考えた。

そこで本研究では、身体外空間の操作であるリダイレクションに身体周辺空間の操作を加え、身体の一部を視覚提示するために生じる不整合を解消することで、リダイレクションの効果を向上させることを試みる。

2. 提案手法

2.1 バーチャルハンドによる自己投射

1で述べたように知覚空間は身体からの距離に応じて身体空間、身体周辺空間、身体外空間に分けることができる[7]。従来のリダイレクションでは、身体外空間の操作が主に行われてきた。しかし 2.1 で述べたように、視触覚間相互作用をリダイレクションに利用するなど、物体と身体の間相互作用がある場合に身体モデルを表示すると、実空間とバーチャル空間で物体の形状に差があるため、身体と環境の相対位置関係に不整合が生じる。この不整合を解消するため、身体外空間の操作とは別に身体周辺空間を操作する手法を提案する。伴らは触覚刺激を与えた上で、視覚提示した映像と対応するように手の位置を操作することで、体性感覚を操作し、物体の形状知覚を変化させることが可能だと示した[10-12]。また Azmandian らは、実空間の単一の物体に触れているにもかかわらず、ユーザの手の位置を変換することで、バーチャル空間内の複数の異なる物体に触れていると知覚させることができることを明らかにした[13]。これらの研究の知見をふまえて、身体周辺空間を操作することで、バーチャル空間での身体と環境との不整合を解消し身体からの距離に基づく全ての知覚空間において視空間と触空間をバーチャル空間に一致させることができると考える。従来のリダイレクションに視触覚間相互作用を利用し、さらに身体周辺空間を操作することで、従来の身体外空間のみを操作するリダイレクションよりもユーザの空間知覚を強力に操作できると考えた。

2.2 提案手法の実装

2.1 を踏まえて本研究では、図 4, 5 に示すような以下

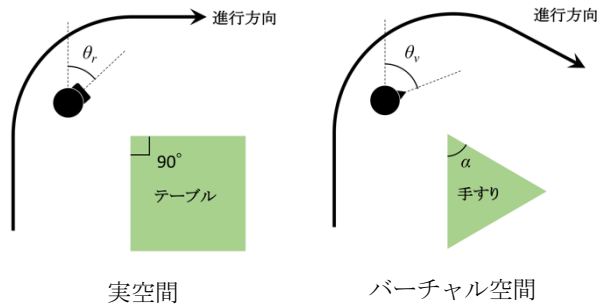


図 4 視点の座標変換

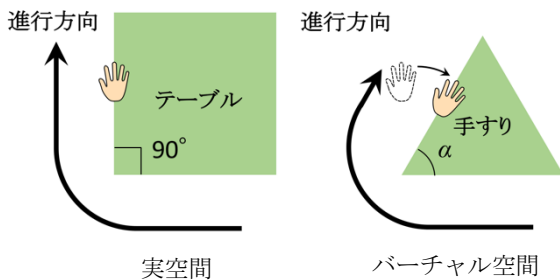


図 5 手の座標変換

の 2 つの操作を組み合わせる手法を提案する。

(1)途中で折れ曲がった経路を歩行するユーザに対し、途中で折れ曲がった通路の映像を提示し、その映像に対応したゲインをユーザの回転量にかける。これにより視点の座標変換を行い、ユーザの回転量を操作する(図4)。

(2)ユーザは実空間のテーブルに触れ、その手の位置を提示する映像に対応するよう変換し、その位置に手のモデルの映像を提示する。これにより身体周辺空間知覚操作を行う(図5)。

このように、回転量操作と身体周辺空間知覚操作を組み合わせることで、従来の回転量操作と比較してより強力にユーザの空間知覚を操作できると考えた。

3. 身体周辺空間知覚操作の有用性の検証

提案する回転量操作のリダイレクションに触覚刺激と身体周辺空間知覚操作を組み合わせることで、身体と環境との整合性を保つ手法と、従来の視触覚リダイレクションとの比較実験を行う。回転量操作を行った時に実験参加者が知覚する回転量、没入感、回転時の違和感を比較し、提案手法の優位性を検証する。

3.1 実験概要

実験参加者は図6に示すように HTC Vive³ の HMD、及びそのトラッカーが取り付けられたリストバンドを装着した。HTC Vive の HMD とそのトラッカーはモーショントラッキングされており、今回はこれを使用して、頭と手の位置・姿勢に合わせた映像を提示した。



図 6 実験の様子

実験参加者に提示する映像は図7のような、壁と床と天井、そして手すりで構成された、簡素なバーチャル空間を実験参加者の目の位置に合わせてレンダリングしたものである。レンダリングには Unity5⁴ を用い、3種類の角度の異なる曲がり角がある通路(曲がり角の角度が 60°、90°、120°)を表示した。また、バーチャル空間での手すりに相当する、テーブルを実空間に設置した。ユーザはこのテーブルに右手で触れることで触覚刺激を得る。テーブルはバーチャル空間の手すりの位置に合うように位置を調整して設置した。

実験参加者は男性7名、女性5名(年齢21-23歳、平均年齢21.8歳)である。実験参加者の視力または矯正視力は正常値であった。また実験参加者のうち1人が左利きで、他は全員右利きであった。全ての実験参加者が過去に HMD を使用した経験があったが、実験に関する事前知識は持たなかった。

実験は被験者内計画で、2×3条件に対して各2回の試行を行なった。手の映像の表示の有無の2条件において、通路の角の角度3条件(60°、90°、120°)での試行を各2回ずつ、全て右回りで行なった。実験は完全無作為化法で行なった。

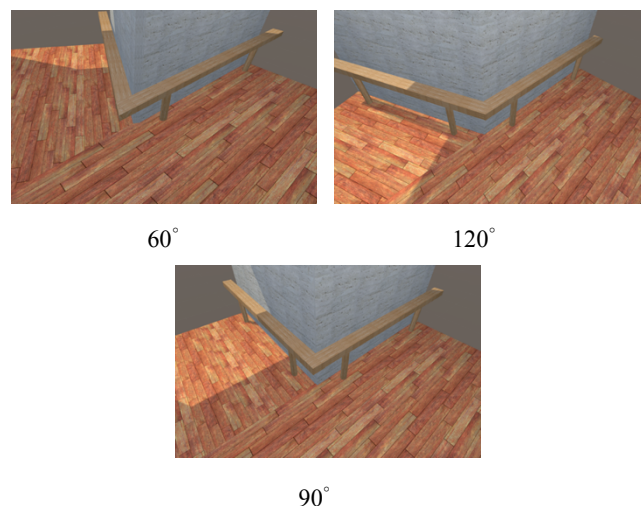
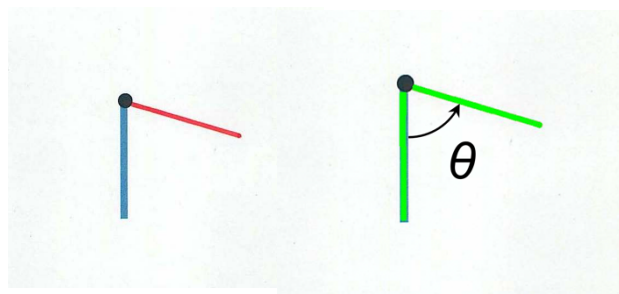


図 7 通路の角の角度

3: <https://www.vive.com/>
4: <https://unity3d.com/>



(a) 記入例 (b) 解析例

図 8 主観的角のアンケート

3.2 実験手順

説明, 実験試行, アンケート, 休憩時間を含めた実験参加者 1 人あたりの実験の合計時間は 40 分で, 実験参加者は約 20 分間 HMD を着用した. 実験参加者は実験室に入室後, 回答席に移動し, 年齢, 性別, 利き手, HMD の使用経験の有無, VR 酔いに関する設問集である Simulator Sickness Questionnaire(SSQ)[14]に回答を行なった. 実験の真の目的を把握しているとその先入観がアンケート結果に影響するため, 実験参加者は, 実験の真の目的に気づかれないように「仮想空間内で回転運動をした際の酔いに関する研究」という偽の実験目的の説明を受けた.

練習として HMD 及びリストバンドを装着した状態で, 実空間に設置されたテーブルには触れずにバーチャル空間内の直線の通路を 1m 歩いた. 実験では, まず HMD 及びリストバンドを装着した実験参加者が, HMD を通じて提示された経路に従い, 初期位置まで移動した. その後, 映像で提示された通路の中を, 映像内の手すりに見立てた現実空間内のテーブルに触れながら 1m 歩いた. 実験参加者が歩行する際は, アシスタントが HMD のケーブルを管理し, 実験参加者がケーブルにより転倒しないよう十分注意した. 歩行終了後, 実験参加者は HMD を通じて提示された経路に従い回答席まで移動し, アンケートに回答した. まず, 実験参加者が角を曲がった際に知覚した回転量を評価するため, 実験参加者には通路をどのように移動したかを紙に線で記載してもらった. 図 8 に記入例と解析例を示す. 青線をあらかじめ図示しておき, 黒点から赤線を引くことで知覚した角度を図示してもらった. 赤線の端点と黒点を結んだ直線と青線のなす角度を主観的角とした. 実験参加者が記入した用紙を画像処理により 2 つの線を色抽出した後, ハフ変換を行い, 2 つの直線がなす角度を求め, 解析に使用した. また, 没入感を計測するアンケートである SUS PQ[15]と回転時の違和感を評価するためのアンケートに回答してもらった. この際実験参加者から実験環境は見えなかった. 実験の半ばには 3 分間の休憩を設けた. 実験終了後, SSQ および自由記述のアンケートを行い, 真の実験目的を説明した.

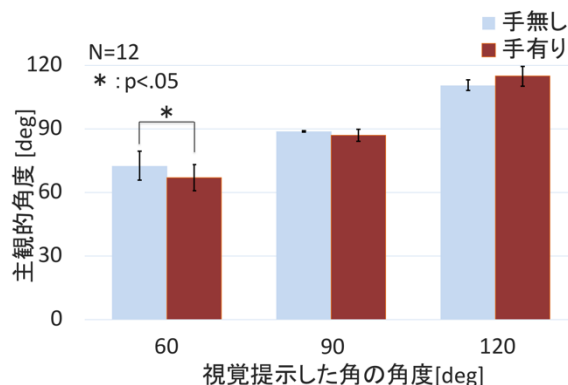


図 9 主観的角(Mean±SE)

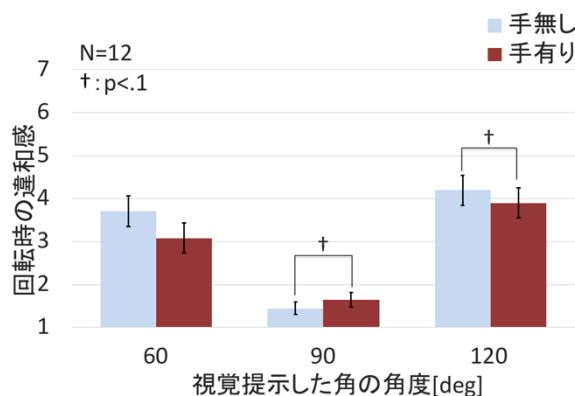


図 10 回転時の違和感(Mean±SE)

3.3 実験結果

今回の実験は, 独立変数が手のモデルの表示の有無と, 視覚提示する角の角度の 2 要因であり, 従属変数は主観的角, 回転時の違和感, 没入感の 3 変量であるため, 本来は多変量二元配置分散分析を適用するべきであるが, いずれもデータの正規性が満たされなかった(Shapiro-Wilk test, $p < .01$)ため, ノンパラメトリック検定を行うことにした. 2 要因の検定にノンパラメトリック検定は対応しておらず, また本実験の目的は主観的角, 回転時の違和感, 没入感を, 手のモデルの表示の有無で比較することであるので, 手のモデルの表示の有無の条件に対して, Wilcoxon の符号順位検定を視覚提示した角の角度それぞれに行なった.

図 9 は手の映像の表示の有無と視覚提示した通路の角の角度の各条件に対して, 主観的角を棒グラフとして記載したものである. 横軸は視覚提示した通路の角の角度であり, 縦軸は主観的角である. 主観的角に対して, 視覚提示した角の角度それぞれに Wilcoxon の符号順位検定を行なったところ, 視覚提示した角の角度が 60° の時に有意差と大きな効果量が認められた($Z = 2.03, p = .042, r = .586$). 視覚提示した角の角度が 90° の時は有意差は認められず, 小さい効果量が得られた($Z = 0.569, p = .57, r = .164$). 視覚提示した角の角度が 120° の時にも有意差は認められず, 小さい効果量が得られた($Z = 0.800,$

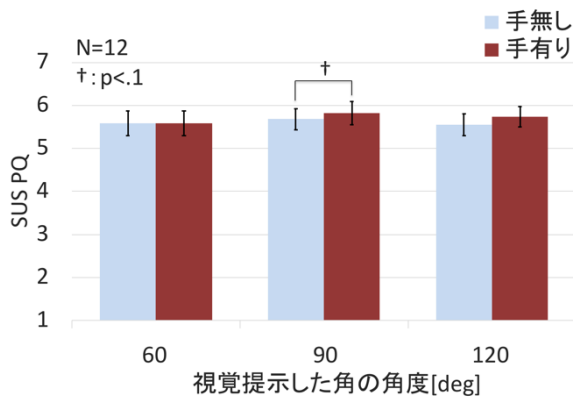


図 11 没入感(Mean ± SE)

$p = .42, r = .231$).

図 10 は手の映像の表示の有無と視覚提示した通路の角の角度の各条件に対して、回転時の違和感を棒グラフとして記載したものである。横軸は視覚提示した通路の角の角度であり、縦軸はアンケートから得られた回転時の違和感の指標である。回転時の違和感に対して、視覚提示した角の角度それぞれに Wilcoxon の符号順位検定を行なったところ、視覚提示した角の角度が 60° の時は有意差は認められず、中程度の効果量が得られた ($Z = 1.53, p = .13, r = .443$)。視覚提示した角の角度が 90° の時は有意傾向がみられ、大きな効果量が得られた ($Z = 1.77, p = .077, r = .510$)。視覚提示した角の角度が 120° の時も有意傾向がみられ、大きな効果量が得られた ($Z = 1.86, p = .063, r = 0.536$)。

図 11 は手の映像の表示の有無と視覚提示した通路の角の角度の各条件に対して、没入感を棒グラフとして記載したものである。横軸は視覚提示した通路の角の角度であり、縦軸は SUS PQ[15]によって得られた没入感の指標である。没入感に対して、視覚提示した角の角度それぞれに Wilcoxon の符号順位検定を行なったところ、視覚提示した角の角度が 60° の時は有意差は認められず、小さい効果量が得られた ($Z = 0.360, p = .72, r = .104$)。視覚提示した角の角度が 90° の時は有意傾向がみられ、大きな効果量が得られた ($Z = 1.76, p = .078, r = .509$)。視覚提示した角の角度が 120° の時は有意差は認められず、中程度の効果量が得られた ($Z = 1.34, p = .18, r = 0.387$)。

また VR 酔いの指標である SSQ について Wilcoxon の符号順位検定を行なったところ、有意差と大きな効果量が得られた ($Z = 2.49, p = .013, r = .719$)。

3.4 考察

主観的角度において、視覚提示した角の角度が 60° の時、手のモデルを表示することで主観的角度が有意に減少し、視覚提示した角度に近づいた。また有意な差は認められなかったが、視覚提示した角度が 120° の時も主観的角度が提示した角度に近づいた。先行研究では、回転量操作可能な回転ゲインの閾値は $0.67 \sim 1.24$ とされて

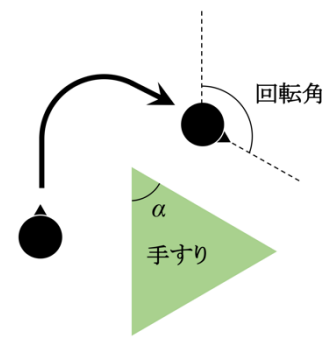


図 12 角の角度と回転量の関係

いる[6]。従って実空間の 90° の回転量をバーチャル空間で $60.3^\circ \sim 111.6^\circ$ の回転量に操作することができる。ところで図 12 のように、今回の実験で視覚提示した曲がり角の角度 α と、実験参加者の曲がり角での回転量は合計して 180° となる関係にある。従って、今回の実験で使用した曲がり角の角度は $68.4^\circ \sim 119.7^\circ$ の範囲で操作が可能である。視覚提示した角度が 120° のときは、ほぼ操作可能な範囲内にあり、手のモデルを表示しなくても主観的角度を視覚提示した角の角度に近づけることができたため、手のモデルの表示の有無で有意差が認められなかったと考えられる。視覚提示した角度が 60° のときは、操作可能な範囲を超えており、提案手法により、操作可能な範囲が拡大されることが示唆された。

また、回転時の違和感については、手の映像の表示の有無で有意差は認められなかったが、視覚提示した角の角度が 120° のときに有意な傾向と大きな効果量が得られ、 60° のときも中程度の効果量が得られた。そのため、サンプル数を増やすことで、有意差が認められる可能性があり、手の映像を表示することで回転時の違和感を軽減させることができる可能性がある。今回の実験で表示した手のモデルは男性のモデルであったので、女性の実験参加者にとっては自分の手と大きく異なる。そのため、自分の手と感じるができずに違和感が生じた可能性がある。加えて表示した手のモデルは固定されたモデルの位置や姿勢が実験参加者の手の動きに合わせて変化するのみで、指などを動かしても表示した手のモデルは動かず、自分の手と感じるができずに違和感が生じた可能性がある。 90° のときに手のモデルを表示した方が違和感が増大する傾向にあったのは、このような理由であると考えられる。

没入感に対しては、手の映像の表示の有無で有意差は認められなかったが、視覚提示した角の角度が 90° のときに有意な傾向と大きな効果量が得られ、 120° のときも中程度の効果量が得られた。そのため、サンプル数を増やすことで、有意差が認められる可能性があり、手の映像を表示することで没入感を上昇させることができる可能性がある。

今回の実験では、実験参加者に手すりに見立てたテーブルに触れながら歩行してもらったが、触り方に関しては特に指示をしていなかった。そのため、触り方によっては実空間に設置したテーブルの角の角度を知覚しやすくなり、主観的角度に影響した可能性がある。

今回の実験で主観的角度を評価するために、知覚した歩行経路を紙に記載するという手法を採用したが、自身の歩行経路を思い出し、それを紙に記載するという行動が介在するため、歩行中の実験参加者が知覚した歩行経路とは異なる可能性が考えられる。

また、VR酔いの指標であるSSQについて、実験の前後で有意差が認められたので、実験が進行するに従い、実験参加者の空間知覚にVR酔いの影響が出た可能性がある。実験の試行は完全無作為化法で行なったが、サンプル数が少なく、順序効果が発生した可能性がある。

今回の実験では現実での回転量を90°に固定し、視覚提示した曲がり角の角度も3水準のみであったので、実空間、バーチャル空間ともに提示する角度の条件を増やして提案手法の有用性を再検討する必要があると考える。

4. まとめと今後の展望

本章ではまず、既存のリダイレクション技術の問題点を論じた上で、その解決策としての視点操作手法と、身体周辺空間知覚操作を身体外空間知覚操作に組み合わせる手法を提案した。従来の視覚リダイレクションと、視覚リダイレクションとは別に手の座標変換を行い、それを組み合わせる手法を比較実験することで、リダイレクションの基本操作の一種である回転量操作を行った際に、提案手法が従来のリダイレクションと比較して、主観的角度が視覚提示した角度に近づき、回転時の違和感が減少し、没入感が上昇することがわかった。この結果から、手の座標変換を回転量操作とは別に行い、組み合わせることで、回転量操作の効果を上昇させることができることが示唆された。一方で、通路を曲がるときに違和感があつたという意見が複数得られたことから、視点操作アルゴリズムを再検討する必要がある。今後は角を曲がる際に適した回転量操作アルゴリズムを構築し、さらに身体周辺空間知覚操作を組み合わせることで、より強力な回転量操作を行うことができるか検証する。

謝辞

本研究の一部は科研費若手研究(A)(16H05866)の支援を受けた。

参考文献

- [1] Mel Slater et al.: Taking steps: the influence of a walking technique on presence in virtual reality.; ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), Vol. 2, No. 3, pp. 201-219, 1995.
- [2] Martin Usoh et al.: Walking > walking-in-place > flying,

- in virtual environments.; In Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 359-364. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999.
- [3] Hiroo Iwata et al.: Circulafloor [locomotion interface].; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 25, No. 1, pp. 64-67, 2005.
- [4] Eliana Medina et al.: Virtusphere: Walking in a human size vr "hamster ball"; In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, Vol. 52, pp. 2102-2106. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2008.
- [5] Sharif Razzaque et al.: Redirected walking.; In Proceedings of EUROGRAPHICS, Vol. 9, pp. 105-106. Manchester, UK, 2001.
- [6] Frank Steinicke et al.: Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques.; IEEE transactions on visualization and computer graphics, Vol. 16, No. 1, pp. 17-27, 2010.
- [7] Elisabetta Ladavas et al.: Action-dependent plasticity in peripersonal space representations.; Cognitive neuropsychology; Vol. 25, No. 7-8, pp.1099-1113, 2008.
- [8] Keigo Matsumoto et al.: Curvature manipulation techniques in redirection using haptic cues.; In 3D User Interfaces (3DUI), 2016 IEEE Symposium on, pp. 105-108. IEEE, 2016.
- [9] 舘 et al.: バーチャルリアリティ学.; コロナ社, 2010.
- [10] Yuki Ban et al.: Modifying an identified angle of edged shapes using pseudo-haptic effects.; In International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp. 25-36. Springer, 2012.
- [11] Yuki Ban et al.: Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect.; In Haptics Symposium (HAPTICS), 2012 IEEE, pp. 211-216. IEEE, 2012.
- [12] Yuki Ban et al.: Modifying an identified size of objects handled with two fingers using pseudo-haptic effects.; 2012.
- [13] Mahdi Azmandian et al.: Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences.; In Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1968-1979. ACM, 2016.
- [14] Robert S Kennedy et al.: Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness.; The international journal of aviation psychology, Vol. 3, No. 3, pp. 203-220, 1993.
- [15] Mel Slater et al.: Depth of presence in virtual environments.; Presence: Teleoperators & Virtual Environments, Vol. 3, No. 2, pp. 130-144, 1994.