

研究論文

Haptic Turntable：視触覚VRのためのリターゲティングと 回転運動を用いた力触覚提示システム

小川 剛史^{1,a)} 高橋 直人^{2,†1,b)}

受付日 2019年10月15日, 採録日 2019年12月2日

概要: 回転運動によるトルクによる力触覚ディスプレイと、リターゲティング操作を組み合わせたシステムを提案する。予備実験では提案ディスプレイによる力覚方向を知覚できることを確認し、実験1では提案する2つの現実物体の選択法の競合領域についてどちらが支持されるか主観評価を行った。実験2ではバーチャル物体の運動方向とは異なる方向への力覚提示を行ったときのリダイレクションの知覚閾値について調査を行い、45度程度の主観的等価値 (point of subjective equality: PSE) が推定された。

キーワード: 力触覚, リダイレクション, ハプティックリターゲティング

Haptic Turntable: Force Feedback System with Haptic Retargeting for Visuo-haptic VR

TAKEFUMI OGAWA^{1,a)} NAOTO TAKAHASHI^{2,†1,b)}

Received: October 15, 2019, Accepted: December 2, 2019

Abstract: We propose a novel force-feedback display using torque of rotational motion. In our system, a single physical prop can provide force-feedback of object which move in any directions on the table by applying retargeting techniques. In the preliminary experiment, we confirmed that users can perceive the force sense direction by the proposed display, and in experiment 1, we evaluated which one is supported for the conflicted region of the two real object selection methods proposed. In experiment 2, we investigated the threshold of perception when force sense presentation was performed in a direction different from the direction of motion of the virtual object and PSE (point of subjective equality) of about 45 degrees was estimated.

Keywords: haptics, redirection, haptic retargeting

1. はじめに

安価なヘッドマウントディスプレイ (HMD) の登場により誰でも容易に人工現実感 (Virtual Reality: VR) や拡張現実感 (Augmented Reality: AR) の世界を体験できるようになってきた。バーチャルペットを育てたり、街中で

バーチャルな建造物を建築したり、さまざまな VR/AR アプリケーションが登場し、バーチャル物体とインタラクションする機会が増加している。しかし多くのアプリケーションでは、映像や音声など視聴覚を介したインタラクションが中心となっており、よりリアルな体験を実現するためにはバーチャル物体からの力触覚提示が重要であると考えられる。

これまでバーチャル空間 (Virtual Environment: VE) への高い没入感を実現することを目的として、視覚情報と力触覚情報を組み合わせた VR 体験に関する研究 [1], [2] がさかんに行われてきた。アクチュエータを用いて力触覚を提示するアクティブ型のシステムは、主にロボット分野で研究されているが、利用される力触覚提示デバイスが高価

¹ 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo,
Bunkyo, Tokyo 113-8658, Japan

² 東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

^{†1} 現在, NTT コミュニケーションズ株式会社
Presently with NTT Communication Corporation

^{a)} ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

^{b)} n.takahashi@ogawa-lab.org

であったり [3], 力触覚の分解能を高めるために機構が複雑になってしまったりする [4] などの欠点が指摘されている。一方, VE に存在する物体と等しい形・大きさ・位置・テクスチャ感を持った現実空間 (Real Environment: RE) の物体を使用するパッシブ型の触覚フィードバックシステムは, 綿密な位置合せが必要な反面, 比較的安価で, その機構は非常にシンプルである。パッシブ型システムの欠点を補うために, 視覚と触覚, あるいは固有受容感覚の相互作用を利用することで, バーチャル物体とは少し異なる形状 [4], 位置 [3], [6] の現実物体でも操作できることが示されている。これは, 触覚などの知覚と同時に少し異なる視覚情報を与えると, 視覚情報が優先される現象 (dominance of vision) による効果である。特に, 与えられていない感覚の生起や, 与えられた刺激の強度とは異なる強度を知覚する現象はクロスモーダル知覚と呼ばれている。

Azmandian らは, バーチャルハンドの位置と回転を操作することで, 空間的に異なる位置にある複数のバーチャル物体を把持する際の触覚フィードバックを, 1つの現実物体で提示できることを明らかにし, この手法を Body Warping の Haptic Retargeting [6] と呼んでいる。本論文では, これをリターゲティング操作と表す。これまでに Haptic Retargeting を応用したシステム [2], [7] が多く開発されているが, パッシブ型のシステムでは, 現実物体が固定されているためバーチャル物体からの応力は静的であり, バーチャル物体からの力覚や抵抗感を提示することはできない。つまり, 運動中のバーチャル物体を把持する際には, 把持することでバーチャル物体は静止し, 同時に運動方向と同じ方向への力を知覚することを期待するが, Haptic Retargeting ではこれを実現できない。その結果, バーチャル物体の存在感が失われてしまうことが懸念される。完全にバーチャル物体の動作を再現するアクティブ型のシステムを用いれば, バーチャル物体の運動方向に力覚を提示することも可能ではあるが, 前述のデメリットが大きい。

本論文では, 机上を移動するバーチャル物体を把持する際に受ける力触覚フィードバックを提示するためのディスプレイ Haptic Turntable を提案する。提案システムでは, まず, 机上面に平行な平面内における任意方向の力覚提示を目標として, アクティブ型システムにリターゲティング操作を適用することで, アクティブ型システムのデメリットを低減しつつ, バーチャル物体の運動による力覚を提示する。リターゲティング操作を行うことでもバーチャル物体の存在感が低下する場合があることが文献 [6] で報告されているため, 提案システム実現における要件を以下のとおりとした。

- 力触覚ディスプレイは安価でシンプルな機構であること。
- 任意の把持位置において, 方向性のある力覚フィードバックを提示し, これを知覚できること。

- リターゲティング操作によるバーチャル物体の存在感低下を防止すること。

以下, 2章で力覚提示を目的とした従来研究について述べ, 3章で提案するシステムの構成について述べる。4章では提案システムの有効性を検証するために実施した被験者実験について述べ, 最後に5章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 力触覚ディスプレイ

佐藤らの SPIDAR [9] は, パラレルワイヤによる力触覚提示デバイスである。テーブルトップで用いることのできる SPIDAR-G [10] など, 国内外でもこれを用いた研究がさかんに行われている。SensAble Technologies 社の PHANToM [11] は, アクティブ型の力覚提示インタフェースである。3自由度のリンク機構によってバーチャル物体からの力覚提示を行う。Zenner と Krüger は, パッシブ型フィードバックで用いる現実物体の重さをアクチュエータを用いて動的に変更することで, パッシブ型の利点とアクティブ型の利点を兼ね備えた Shifty を提案している [12]。

2.2 リダイレクション

パッシブ型のシステムでは現実物体とバーチャル物体の位置と形状を完全に一致させなければならないことが大きな制約の1つであったが, 視覚優位の原理を用いて, 物体の位置と形状を操作するリダイレクションに関する研究が進められている [4], [13]。

リダイレクションは, パッシブ型触覚フィードバックだけでなく, VE におけるロコモーションインタフェースでさかんに関与されてきた。たとえば VE を歩いて体験するシステムでは, 基本的に VE と同一サイズの RE が必要となるが, Redirected Walking [14] はユーザが頭部を回転させたときに, ユーザに気付かせない範囲で VE での頭部の回転角を実際よりも多く (あるいは少なく) することで RE での移動方向を操作し, RE の限られた領域内を歩くだけで広い VE を歩いているように知覚させている。Matsumoto らは, RE に設置した円柱型の壁の周りを歩かせる際に, リダイレクションに加えて, 触覚フィードバックを提示することで, VE では無限に直線を歩いているかのように錯覚させるシステム Unlimited Corridor [1] を提案している。

2.3 ハプティックリターゲティング

VE において, 遠くにあるバーチャル物体へのリーチング動作は, 疲労感と不快感を引き起こしてしまう。Murillo らは三角錐を基本単位としたリターゲティング操作を用いて, より簡単に操作できるシステム Erg-O [5] を提案している。Cheng らは, ユーザを中心とした半球を, パッシブ型触覚フィードバックを行う現実物体として配置し, 視線

とバーチャルハンドの動きから、次のターゲットを予測するシステムを提案している [3].

3. 提案システム (Haptic Turntable)

本論文で提案するシステム Haptic Turntable は、ユーザが把持行為を行った際にフィードバックを与える力触覚ディスプレイ部と VE 内でのリターゲティング操作を実現する VE システム部から構成される。以下ではこれらについて詳しく述べる。

3.1 力触覚ディスプレイ部

実装した力触覚ディスプレイを図 1 に示す。本ディスプレイはターンテーブル型のシステムで、把持動作に特化しているため、これまでに提案されている力触覚提示システムとは異なり身体に装着する必要はなく、リンク機構 [11] やワイヤ [9], [10] を利用しない。ユーザが把持する現実物体とサーボモータおよび制御マイコンのみからなるシンプルな機構である。アクチュエータには 360 度フィードバックサーボモータ (Parallax 社 Feedback 360° High Speed Servo) を使用し、マイコン (Arduino 社 Arduino Uno) を用いて PWM 制御を行った。円形の台座 (直径 30 cm) の中心にサーボモータを固定し、さらにスパーサの上にレコード用台座 (直径 30 cm) を設置した。サーボホーンはレコード (直径 30 cm) をマウントできるように改造した。レコードの円周上に力触覚提示用の現実物体 (素ボール・直径 10 cm) を、人が把持しても外れないようにネジおよび接着剤で固定した。サーボモータに 12 W の電力を供給したとき、現実物体から受ける力を吊り測りで計測したところ最大 0.50 [kg 重] であった。人が現実物体を把持した場合には、サーボモータが回転しようとして力は加わるが、

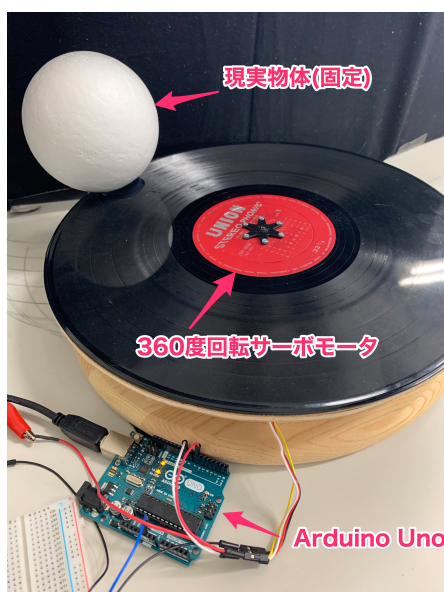


図 1 実装した力触覚ディスプレイ
Fig. 1 Implemented force feedback display.

レコードは回転せず現実物体は移動しない。

本ディスプレイでは、円盤を時計回り (Clockwise: CW) あるいは反時計回り (Counter Clockwise: CCW) 方向へ回転させることで生じる円盤の接線方向への力をバーチャル物体を把持した際の力覚フィードバックとしている。現実物体の把持位置と円盤の回転方向によって提示できる力の方向 (2 方向) が決定され、特定の位置で特定の 2 方向しか力が提示できないため、提案システムでは、リターゲティング操作を組み合わせることで、円盤に平行な任意方向への力覚を提示する。

3.2 VE システム部

ハンドトラッキングデバイスに Leap Motion を使用し、HMD (HTC 社 HTC VIVE) にマウントした。VE 構築は Unity を使用し、C# によるコーディングを行った。Unity は左手系であることから、以後の座標系は左手系で論じる。

3.2.1 リターゲティング操作の実装

リターゲティング操作は、Body Warping 手法 [6] を用い、Cheng らのリーチングモデル [3] を実装した。リーチング始点の高さに対し、力触覚ディスプレイの現実物体は 6 cm の台座の上にあるため、バーチャルハンドが把持位置に到達した際に、6 cm 上昇するようにした。Unity Assets for Leap Motion Orion Beta (ver.4.4.0) における、再描画イベントをオーバーライドし、バーチャルハンドの位置を操作することでリターゲティング操作を実装した。

3.2.2 力触覚ディスプレイ部との通信

力触覚ディスプレイ部の制御マイコン (Arduino) と VE システム部の Unity との間はシリアル通信で情報を送受信した。Unity から Arduino へは、角度を入力するとサーボモータが即時その角度へ回転するように実装した。この角度を要求モータ角度と定義する。実装に用いたサーボモータは PWM 制御でコントロールでき、パルス幅によって CW・CCW 連続回転および停止が行える。また、サーボモータから取得した回転角を監視モータ角度と定義して、要求モータ角度と監視モータ角度との差分をなくす方向へサーボモータを連続回転させ、差分が閾値に達した時点で停止させた。Arduino から Unity へは、つねに監視モータ角度を送信し、監視モータ角度に応じてバーチャル物体の位置を描画した。

3.2.3 システム・アーキテクチャ

VE システム部において、以下の 4 状態を定義し、各状態における動作を実装した。図 2 に構成を示す。4 状態における遷移は図中の紫矢印で示している。

(1) Ready

システムを立ち上げたときの初期状態。

(2) Virtual Object Spawned

システムに力覚提示角度および、把持位置を入力後、バーチャル物体が表示された状態。

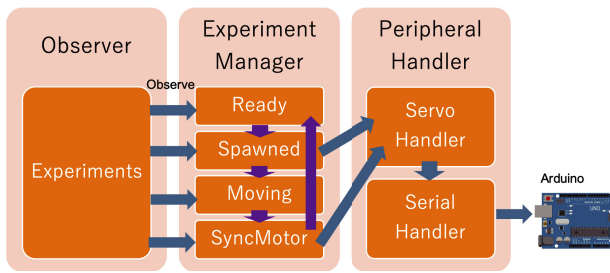


図 2 システム状態とアーキテクチャ
Fig. 2 Overview of system architecture.

(3) Auto Moving

バーチャル物体が自動で運動している状態. 体験者はこの運動を見ることで, 物体の運動方向を知覚する.

(4) Sync Motor

運動中のバーチャル物体が把持位置に到達したときに監視モータ角度に応じてバーチャル物体の位置を同期した状態.

Auto Moving 状態から Sync Motor 状態へは, バーチャル物体が把持位置に到達したとき, 自動的に遷移し, それ以外の状態遷移は任意タイミングで行えるように実装した.

Virtual Object Spawned 状態および, Sync Motor 状態への遷移時, 力触覚提示デバイスへ要求モータ角度を入力し, シリアル通信で Arduino に送信される. なお, 後述する被験者実験に関する設定は 4 状態の変化をつねに監視するオブザーバパターンで実装を行った.

3.3 現実物体の把持位置選択

提案ディスプレイは, 現実物体の位置における円の接線方向への力覚が提示でき, 現実物体の位置を変更することで円盤と平行な平面内における任意の方向への力覚を提示する. サーボモータの回転方向によって, ある力覚提示角度に対して, 現実物体は 2 つの候補位置をとることができる. リターゲティング操作を行うにあたっては, VE と RE における位置の不一致と動きの不一致が操作性を低下し, 不快感を与えること [8] が分かっているため, これらの問題を解決するための 2 つの手法を提案する.

3.3.1 Shorter Distance (SD 法)

バーチャル物体の把持位置から, それぞれの候補位置への距離を計算し, 近い候補位置を選択する方法である. 図 3 の左は, SD 法による現実物体の選択を表している. バーチャル物体が V_{start} から直線運動し, V_{grab} で把持される時, 現実物体がバーチャル物体の運動方向と等しい方向の力覚を提示できる位置および回転方向は, 候補位置 R_1 における CW 回転または, 候補位置 R_2 における CCW 回転である. V_{grab} と R_1, R_2 それぞれの距離を d_1, d_2 と定義したとき, 距離が短い方の候補位置である R_2 を現実物体の位置と選択する.

これにより, バーチャルハンドとリアルハンドの位置の

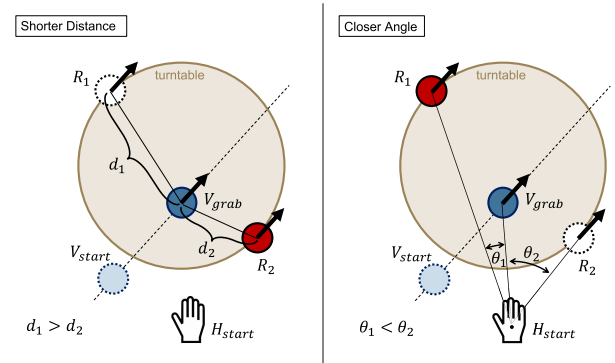


図 3 把持位置選択
Fig. 3 Selection of grasping position.

乖離が小さくなり, 位置の不一致が軽減できると考えた.

3.3.2 Closer Angle (CA 法)

リーチング始点からそれぞれの候補位置および, バーチャル物体の把持位置への角度を計算し, バーチャル物体の角度と近い候補位置を選択する方法である.

図 3 の右は, CA 法による現実物体の選択を表している. バーチャル物体の運動方向および把持位置は 3.4.1 項の SD 法の状況と同じである. リーチング始点 H_{start} から V_{grab} へのベクトルと, H_{start} から候補位置 R_1, R_2 へのベクトルのなす角をそれぞれ θ_1, θ_2 と定義したとき, 角度が小さい方の候補位置である R_1 を現実物体の位置と選択する.

これによりリーチング時におけるバーチャルハンドとリアルハンドの動きの不一致を軽減できると考えた.

4. 予備実験: 提案ディスプレイによる力覚方向の知覚

4.1 実験目的

提案ディスプレイは, ターンテーブルに平行な平面内における任意の方向への力覚提示が可能である. 本実験では, 提案ディスプレイで提示した力覚方向を被験者が正しく知覚できるかどうかを調査した.

4.2 実験内容

目隠しをした被験者に提案ディスプレイの現実物体を把持させ, 8 方向 (奥, 右奥, 右, 右手前, 手前, 左手前, 左, 左奥) からランダムに選択した 1 方向への力覚を 2 秒間提示した. 力覚の提示が完了した後, 被験者が知覚した力の方向を回答させた. 実験中は, 被験者の右肩の位置から 50 cm 前方の机の上に現実物体がつけに配置されるようデバイス位置を変更して, 腕の体性感覚から力の提示方向を判断できないよう配慮した. 被験者は 20 代男性 3 名で, 全員右利きであった.

4.3 実験結果

被験者の知覚した角度を知覚角度, 力覚提示角度と知覚

角度の差の絶対値を誤差角度と定義する．8方向の力覚提示を行ったので，1方向の誤差が22.5度以下であれば，力覚提示角度を知覚できているといえる．結果，8方向すべてにおいて平均誤差角度22.5度以下であること確認した．

5. 実験1：競合領域での現実物体の位置選択

5.1 実験目的

3.3節で述べた2つの位置選択法それぞれについて，バーチャル物体の把持位置によって R_1 ， R_2 どちらが選択されるかを考える．SD法では，線分 R_1R_2 の垂直二等分線が R_1 または R_2 を選択する境界線となる．この境界線を b_{dist} と表す．一方，CA法では，角 $R_1H_{start}R_2$ の二等分線が境界線となり， b_{angle} と表す．各境界線に対し，把持位置が R_1 の存在する領域にあれば各選択法は R_1 を選ぶ．この領域を R_1 領域と表し，同様に R_2 が存在する領域を R_2 領域と表す．図4に境界線と領域を示した．

提案システムにおける現実物体の選択手法として，上記の2手法を実装することを考えると，選択される現実物体の把持位置が異なる，競合領域における選択法を決定する必要がある．実験1では，この競合領域についてSD法，CA法のどちらの選択法を支持するか被験者実験を行い，明らかにする．

5.2 実験設定および競合領域

図5に実験設定を示す．実験では，リーチング開始位置 H_{start} から50cm先にターンテーブルの中心 C がくるようにデバイスを設置し，力覚提示角度を被験者の正面に対して右45度とした．このときの現実物体の把持候補位置は R_1 ， R_2 となり，競合領域は被験者からみて b_{dist} ， b_{angle} の交点 P よりも遠くにある競合領域Aと，交点 P よりも被験者側にある競合領域Bが存在する．被験者がVEで把持するバーチャル物体の位置 V_a および V_b は b_{dist} ， b_{angle} のなす角の二等分線上で，交点 P から15cmの位置に設定した．

なお，バーチャル物体の把持位置を交点 P から，より離れた位置に設定することも可能であるが，実際に腕が届く

範囲よりも大きく離れた場所のバーチャル物体を把持しようとした際，被験者のリアルハンドとバーチャルハンドの距離が大きくなることで，バーチャルハンドを自身の手と認識することが困難となり，自己所有感が低下することが，著者らの事前の実験[8]で明らかになっている．本実験では，バーチャルハンドの自己所有感低下が引き起こす違和感に影響されないよう，交点 P からの距離を15cmとしている．

5.3 実験内容

実験は，被験者にHMDを装着させ，VEで行う．小部屋内の中心にテーブルを配置し，この上でバーチャル物体が運動する．実験者の操作によってバーチャル物体が生成され，把持位置が赤い印として表示される．被験者には，ボールが赤い印までゆっくりと動くので，スタートといったらリーチング始点からゆっくりと赤い印まで手を伸ばし，上からボールを把持するように指示した．把持後，再びリーチング始点に手を戻すまでを1試行とした．実験中に被験者の見るVEの例を図6に示す．

評価法は，VEの現実感・操作性・触覚に関する質問と，提案システムが重視しているリアルハンドの位置・動きに関する質問を1（まったく感じない・まったく良くない・まったく合っていない）から5（とても感じる・とても良い・とても合っている）のリッカート尺度で答えさせた．

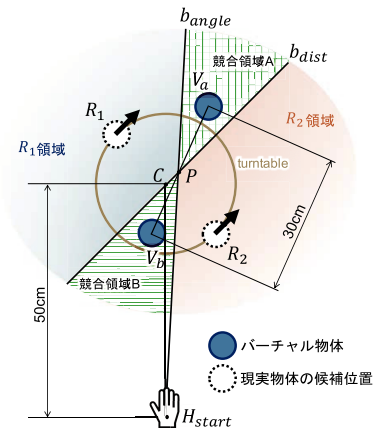


図5 実験設定

Fig. 5 Configuration of experiment 1.

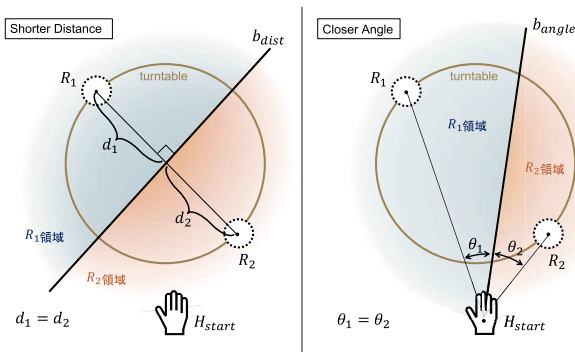


図4 各選択法における R_1 領域および R_2 領域

Fig. 4 R_1 and R_2 area.



図6 被験者の見るVEの例

Fig. 6 The example of subjects' view.

具体的な質問内容は以下のとおりである。

- 現実と同じように感じましたか (現実感)。
- リーチングと把持の操作性が良かったですか (操作性)。
- オブジェクトを掴んだ感じは良かったですか (触覚)。
- 現実の手と VE 内での手の位置は合っていましたか (位置)。
- VE 内の手の動きは自然でしたか (動き)。

上記の質問を行うこと、提案ディスプレイによる現実物体の回転と、リターゲットング操作によってバーチャルハンドがリアルハンドとは少し異なる動きをすることを、あらかじめ実験前に被験者に伝えた。把持後に回転を止め、リーチング開始地点に手を戻したときに上記の質問を行った。

また、リターゲットング操作による把持不可能および、把持タイミングが合わなかったことによる把持不可能の場合は把持ができるまで再試行を行い、この場合再試行の回数を記録した。被験者には把持ができるまで試行を行わせ、把持ができた試行の後のみ上記の質問について答えさせた。このとき、すべての試行における総合評価をするようにあわせて指示した。最高評価である 5 を定義するために、実験の前にリターゲットング操作なしでのリーチングおよび把持動作を 10 回試行させ、この感覚を最高評価の 5 とするように指示した。リーチング時から把持までの間、ハンドトラッキングによるリアルハンドの位置をつねに記録した。

各競合領域において SD 法もしくは CA 法を適用し、各被験者につき計 4 通りを実施した。実験は完全無作為法で行った。被験者は右利きの 20 代男女 10 名で行った。

5.4 実験結果

競合領域 A, B における主観評価の結果をそれぞれ図 7, 図 8 に、各競合領域における再試行回数を図 9 に示す。競合領域 A の結果において、2つの選択法に対する対応のある t 検定を行ったところ、主観評価では、すべての質問項目 (現実感・操作感・触覚・手の位置・手の動き) に関して有意差は認められなかった ($p > .1$)。一方、再試行回

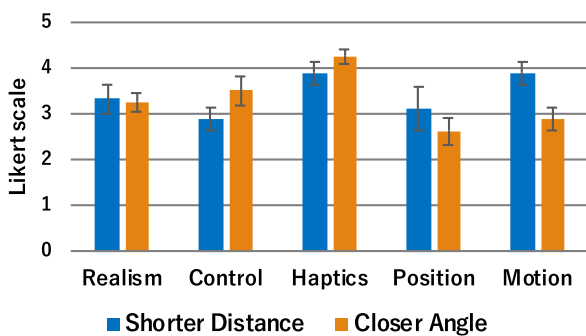


図 7 競合領域 A における各パラメータの平均スコア
Fig. 7 Average scores of parameters in collision area A.

数に関しては有意差が認められた ($p < .01$)。手の位置に関しては SD 法が CA 法よりも高くなったが、有意差は認められなかった ($p > .1$)。手の動きに関するスコアは、手の動きの不快感を軽減することが期待される CA 法ではなく、SD 法の平均スコアが高くなったが、有意差は認められなかった ($p > .5$)。同様に、競合領域 B の結果に対して対応のある t 検定を行ったところ、手の動きについて有意差が認められ ($p < .05$)、特に現実感・操作感・触覚・手の位置・再試行回数に関しては有意水準 1% で差が認められた。

5.5 考察

競合領域 A の結果について論じる。再試行回数に関しては有意水準 1% で差が認められたが、質問項目に関しては有意差は認められなかった。被験者にはあらかじめ、再試行した場合はすべての試行における総合評価をするように指示したが、被験者に対する指示項目が多かったことによって、把持可能である最後の試行のみで評価してしまった可能性または、すべての試行の総合評価を行うことができなかつた可能性が考えられる。図 10 の上側は、競合領域 A におけるリアルハンドの移動軌跡である。SD 法における軌跡の終端位置に注目を見ると、その位置は疎らである。これは、把持のタイミングが合わず、現実物体が少し移動

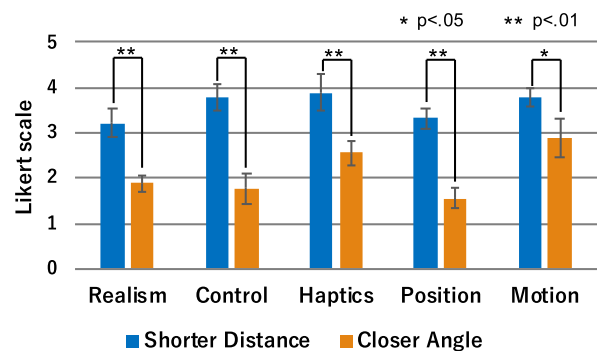


図 8 競合領域 B における各パラメータの平均スコア
Fig. 8 Average scores of parameters in collision area B.

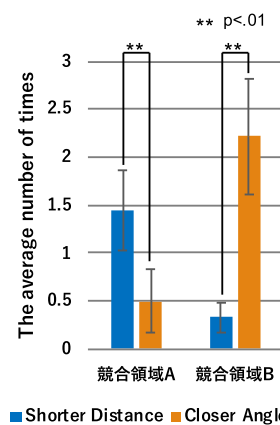


図 9 競合領域における再試行回数
Fig. 9 Average number of retry.

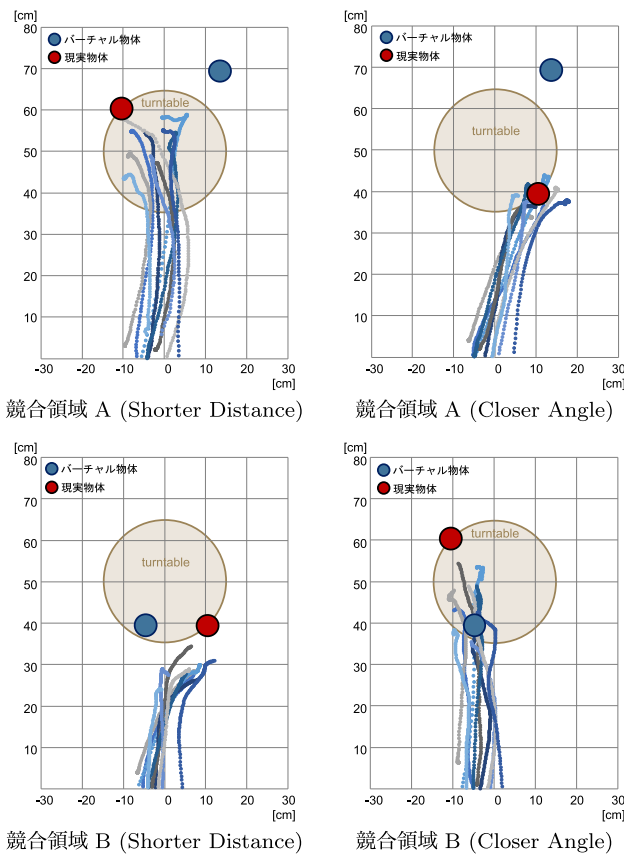


図 10 被験者のリアルハンドの移動軌跡
 Fig. 10 The loci of subjects' real hands.

した後に把持を行ったことが原因であると考えられる。また、終端ではリーチングの方向が大きく変化しており、これはリターゲットング操作に対し被験者が視覚情報を優先するため、リーチング方向を修正したと考えられる。これは Body Warping を用いた先行研究 [6] と同様の結果であり、修正動作はバーチャル物体の存在感を低下させる原因となる。以上のことから、競合領域 A では CA 法の方が把持しやすいと考えられる。

次に、競合領域 B の結果について論じる。すべての質問項目において、有意水準 5% で SD 法のスコアが有意に高く、SD 法が支持される結果となった。把持不可能による平均再試行回数も、SD 法が CA 法よりも有意に少なかった。図 10 の下側は、競合領域 B におけるリアルハンドの移動軌跡である。CA 法における軌跡の終端においても競合領域 A における SD 法と同様に修正動作が確認された。以上のことから競合領域 B では SD 法が支持されたと考えられる。

競合領域 A では CA 法が支持され、競合領域 B では SD 法が支持された理由として、現実物体とバーチャル物体の位置関係が寄与していると考えられる。著者らの事前検証 [8] においても、現実物体よりもリーチング始点に近いバーチャル物体の把持は難しく、現実物体よりも遠い位置に配置したバーチャル物体の把持は容易であることが示唆

されている。実験 1 の結果においても、それぞれ支持された選択法による現実物体とバーチャル物体も同様の位置関係が見られた。

6. 実験 2：力覚方向のリダイレクション

視覚優位の原理によるリダイレクションを用いることで、知覚方向を変化させる研究がなされている [6], [14]。そこで、提案システムによる力覚の提示方向に関してもリダイレクションを用いることで、バーチャル運動方向と、実際に与える力覚提示方向が少し異なる方向であっても、バーチャル物体の運動方向の力覚刺激として正しく知覚できると考えた。これによりリターゲットング操作における違和感が軽減されると考えられる。実験 2 では、どの程度の異なる方向であってもリダイレクションが可能であるか、主観的等価値 (point of subjective equality: PSE) を推定する。

6.1 実験 2-1

6.1.1 実験目的

実験 1 では、力覚提示方向とバーチャル物体の移動方向は等しかったが、実験 2 では力覚提示角度を数度変更する。この変更した角度を調整角と定義する。

調整角の大きさの変化による PSE を検討する前に、バーチャル物体の移動方向が調整角の大きさに影響を受けるか、あるいは相互作用があるか調査する必要がある。バーチャル物体の移動方向によって PSE が変化する場合、結果が異なってしまう可能性があるからである。

6.1.2 実験内容

実験 1 と同様に VE で、リーチングと把持動作を被験者に行わせた。デバイスの配置も実験 1 と同様とし、リーチング開始位置の前方 50 cm 地点にターンテーブルの中心が位置するようにした。なお、被験者には実験の趣旨および、バーチャル物体の移動方向と力覚提示方向が異なる場合があることをあらかじめ伝えた。ボールを把持した際に VE 内で見たボールの運動方向とボールを把持した手で実際感じる力の方向が異なると感じた場合に、その角度を -180 度 (CCW) から 180 度 (CW) の間で 1 度刻みで答えさせた。なお、視覚的なボールの運動方向と実際感じた力の方向が一致している場合には、 0 度と答えるように指示した。

バーチャル物体の移動方向は手前から奥 (0 度)、左から右 (90 度)、奥から手前 (180 度)、右から左 (270 度) の 4 パターンであり、把持位置は提案デバイスの中心位置に統制した。調整角は CCW 回転の -90 度、 -60 度、 -30 度と 0 度、CW 回転の $+30$ 度、 $+60$ 度、 $+90$ 度の 7 パターンとし、バーチャル物体の移動方向と合わせて計 28 パターンをランダムな順序で被験者に提示した。

事前の検討において、力覚の知覚方向を答えることが困難であったため、バーチャル物体を把持した際に角度の指



図 11 実験風景

Fig. 11 Overview of experiment 2.

標となるオブジェクトを VE に表示した。実験風景を図 11 に示す。被験者は 20 代男女 9 名で、全員右利きであった。

6.1.3 結果と考察

誤差角度について繰返しのある 2 元配置分散分析を行ったところ、調整角群の主効果 ($F(6, 224) = 5.72, p < .001$) で有意な差が認められた。一方、バーチャル物体の移動方向群 ($F(3, 224) = 0.920, p > .1$) および交互作用 ($F(18, 224) = 1.49, p > .1$) に関しては効果がみられなかった。さらに調整角群に関して多重比較を Scheffe の方法で行ったところ、0 度群と -60 度群 ($p < .05$) の組合せで有意差が認められた。

バーチャル物体の移動方向群および交互作用に有意差がなかったことから、バーチャル物体の移動方向による誤差角度の影響が有意であるとはいえなかった。調整角群内に関しては多重比較の結果、0 度群と比較して CCW 回転である -60 度群は誤差が大きいと考えられる。同じく 0 度群と比較して CCW 回転の $+60$ 度群には誤差が大きいとはいえなかった。調整角度の絶対値が小さいほど力覚提示方向を正しく知覚でき、マイナス方向 (CCW 回転方向) に大きいほどその方向を正しく知覚できないことが考えられる。

6.2 実験 2-2

6.2.1 実験目的

実験 2-2 では、実験 2-1 の結果を元に、調整角の大きさの変化による PSE を推定する。

6.2.2 実験内容

PSE の推定は極限法を用いた。実験 2-1 と同様にリーチングと把持動作を被験者に行わせた。バーチャル物体は右から左へ移動し、調整角度を 0 度から CW 回転および CCW 回転において、試行ごとに 10 度刻みで変化させた。極限法の上昇系では、バーチャル物体を把持した際にバーチャル物体の動きと手で知覚した力覚方向が異なると感じたら申告するように指示した。下降系では、バーチャル物体の動きと手で知覚した力覚方向が異なることを被験者が

確認した後、バーチャル物体の動きの方向に等しいと感じたら申告するように指示した。また、徐々に調整角度を変更すると把持位置が変更されてしまうため、体性感覚から異なる力覚方向と判断される可能性がある。そこで実験中は予備実験と同様に、被験者の右肩の位置から 50 cm 前方の机の上に現実物体がつねに配置されるようデバイスの位置を変更した。被験者は右利きの 20 代男性 10 名である。

6.2.3 実験結果

10 度刻みで実験を行っているため、記録した値から上昇系では 5 度を引き、下降系では 5 度足したものを分析データとして扱う。CW 群 ($M = 43.5, SD = 17.7, Mdn = 45.0$) と CCW 群 ($M = 44.0, SD = 17.9, Mdn = 45.0$) について対応のある t 検定を行ったところ、有意差は見られなかった ($p > .1$)。極限法の PSE は中央値をとるため、CW 群および CCW 群の PSE はともに 45 度程度であると推定できる。

7. おわりに

本論文では、モータの回転運動によるトルクとリターゲティング操作を組み合わせた力触覚提示システム Haptic Turntable を提案した。予備実験では、提案デバイスによる力覚方向を知覚できることを確認し、実験 1 では、2 つの現実物体選択法の競合領域について、どちらが支持されるのかを調査した。結果、競合領域 A は手の動きの違和感を低減する CA 法が支持され、競合領域 B は手の位置の違和感を低減する SD 法が支持された。実験 2 では、リターゲティング操作による違和感を低減するために、バーチャル物体の運動方向とは異なる方向に力覚提示したときの PSE を推定した。実験 2-1 では、まず、バーチャル物体の移動方向の調整角の大きさが影響を受けるか、あるいは相互作用があるかを調査した。対応のある 2 元配置分散分析および多重比較の結果、調整角群の主効果のみ有意差がみられ、バーチャル物体の移動方向の主効果および相互作用は確認できなかった。実験 2-2 では、極限法を用い、PSE を推定し、結果 PSE は CW・CCW 同様に 45 度程度と推測した。

提案システムでは、机上平面内を移動するバーチャルオブジェクトを把持した際の任意方向の力触覚フィードバックを実現することを目的としていたが、机上であっても考えられるバーチャルオブジェクトの運動やバーチャルオブジェクトに対するインタラクションはさまざまである。たとえば、机上を弾むバーチャルオブジェクトを把持するのであれば、上下方向のリターゲティング操作や上下方向の力覚リダイレクションが可能であることを検証する必要がある。また、テーブルサッカーやエアホッケーのように近づいてくるオブジェクトを手を持った道具で跳ね返すような操作についても、今後、検討を進める予定である。

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

参考文献

- [1] Matsumoto, K., Ban, Y., Narumi, T., Yanase, Y., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo Haptic Interaction, *SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, No.20, pp.1–2 (2016).
- [2] Ikeda, Y., Tanaka, H.T., Noma, H., Matsumura, K. and Lopez-Gulliver, R.: Design of Virtual Tea Ceremony “Otemae” from Remote Place Using Haptic Retargeting, *2017 International Conference on Culture and Computing*, pp.112–117 (2017).
- [3] Cheng, L., Ofek, E., Holz, C., Benko, H. and Wilson, A.D.: Sparse Haptic Proxy: Touch Feedback in Virtual Environments Using a General Passive Prop, *Proc. 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3718–3728 (2017).
- [4] 伴 祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 手の動きの空間変調による形状知覚操作, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.17, No.4, pp.457–468 (2012).
- [5] Murillo, R.A.M., Subramanian, S. and Plasencia, D.M.: Erg-O: Ergonomic Optimization of Immersive Virtual Environments, *Proc. 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.759–771 (2017).
- [6] Azmandian, M., Hancock, M., Benko, H., Ofek, E. and Wilson, A.D.: Haptic Retargeting: Dynamic Repurposing of Passive Haptics for Enhanced Virtual Reality Experiences, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1968–1979 (2016).
- [7] Suhail, M., Sargunam, S.P., Han, D.T. and Ragan, E.D.: Redirected Reach in Virtual Reality: Enabling Natural Hand Interaction at Multiple Virtual Locations with Passive Haptics, *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp.245–246 (2017).
- [8] 高橋直人, 小川剛史: 視触覚 VR のためのリターゲット可能領域に関する一検討, *VR 学研報*, Vol.23, No.CS-2, pp.1–6 (2018).
- [9] 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, *信学論 D-2*, Vol.74, No.7, pp.887–894 (1991).
- [10] 金 時学, 長谷川晶一, 小池康晴, 佐藤 誠: 7 自由度力覚ディスプレイ SPIDAR-G の提案, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.7, No.3, pp.403–412 (2002).
- [11] Massie, T. and Salisbury, J.K.: The phantom haptic interface: A device for proving virtual objects, *Proc. ASME Winter Annual Meeting, Dynamic Sys. And Cont. Div.*, Vol.5, No.51, pp.295–300 (1994).
- [12] Zenner, A. and Krüger, A.: Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.23, No.4, pp.1285–1294 (2017).
- [13] Kohli, L.: Redirected Touching: Warping Space to Remap Passive Haptics, *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp.129–130 (2010).
- [14] Razzaque, S., Kohn, Z. and Whitton, M.C.: Redirected Walking, *Proc. EUROGRAPHICS*, No.37, pp.289–294 (2001).



小川 剛史 (正会員)

1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同研究科博士後期課程中退後、同大学サイバーメディアセンター助手。2007年東京大学情報基盤センター講師、2010年同准教授となり、現在に至る。拡張現実感、ヒューマンインタフェース、グループウェア等に関する研究に従事。博士（情報科学）。



高橋 直人

2017年早稲田大学人間科学部卒業。2019年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程修了。現在、NTTコミュニケーションズ株式会社勤務。