

Haptic Turntable: 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

高橋直人^{†1} 小川剛史^{†2}

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時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

NAOTO TAKAHASHI^{†1} TAKEFUMI OGAWA^{†2}

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が多く発売され、誰でも容易に人工現実感(Virtual Reality: VR)を体験できるようになってきた。バーチャル空間(Virtual Environment: VE)の中で物体を操作する際に、その物体からの力触覚を感じることができなければ、VEの没入感が失われてしまうため、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[1-8]が盛んに行われている。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触覚フィードバックのシステムは、綿密な位置合わせが必要な反面、比較的安価で、その機構は非常にシンプルである。この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、本来与えられていない感覚の生起や、異なる刺激強度に感じ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によって、空間的に異なる位置にある複数のバーチャル物体を掴む際の触覚フィードバックを、一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。本稿では以後、これをリターゲティング操作と表す。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あるため、バーチャル物体からの応力は静的である。このシステムでは現実物体が固定されており、移動することはできないので、把持時に力覚および抵抗感を提示することができない。例えば、静止状態のバーチャル物体の把持だけでなく、テーブルトップを運動中のバーチャル物体の把持においては、把持時にバーチャル物体は静止し、同時に運動方向と同じ方向に力覚を期待するが、

^{†1} 東京大学大学院学際情報学府
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,
The University of Tokyo

^{†2} 東京大学情報基盤センター

Information Technology Center, The University of Tokyo

Haptic Retargeting ではこれを実現できない。その結果、プレゼンスを損なってしまうことが懸念される。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対する力覚を提示することができるが、前述のデメリットが大きい。そこで提案システムでは、アクティブ型のシステムにリターゲットング操作を行うことで、このデメリットを低減できると考えた。しかし、リターゲットング操作を行うことでプレゼンスを損なってしまうことが分かっている[6]。したがって、提案システム実現のために必要な要件は以下の通りである。

- 提示デバイス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。
- リターゲットング操作によるプレゼンスを損なわないこと。

本稿では、テーブルトップにおける重要なインタラクションであるリーチングと把持運動に注目した力触覚ディスプレイ、Haptic Turntable を提案する。提案システムでは把持用の現実物体を円盤の円周上に配置し、これを時計回り (Clockwise: CW) あるいは反時計回り (Counter Clockwise: CCW) 方向へ回転させ、回転運動によるトルクをバーチャル物体の把持時における力覚フィードバックとして用いることで yaw 方向の力覚提示が行えると考えた。しかしある yaw 方向の力覚提示に対し、現実物体の位置は CW, CCW の回転より 2 点に限られてしまう。そこで、リターゲットング操作を組み合わせ、VE のテーブルトップにおける任意点においても任意 yaw 方向の力覚提示が行えると考えた。本稿では、提案システムの実装および被験者実験による提案システムの評価について述べる。

2. 関連研究

2.1 力触覚ディスプレイ

佐藤らの提案した 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盛んに行われている。SensAble Technologies 社の開発した PHANTOM[11]は、アクティブ型の力覚提示インターフェースである。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一つであったが、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で用いられる以前から VE におけるロコモーションインタフェースで活用されてきた。例えば VE の中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 はユーザが頭部を回転させた時に、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[14]。松本らは、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 を提案している[1]。

2.3 ハプティックリターゲットング

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ットング操作を用いて、より簡単に操作しやすいシステム Erg-O を提案している[5]。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

3.1 力触覚提示ディスプレイ

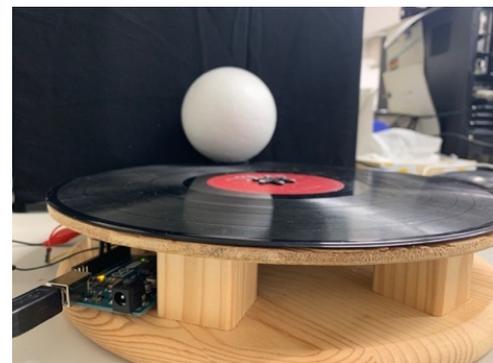


図 1 提案ディスプレイ

提案システムの力触覚提示ディスプレイは、ターンテーブル型デバイスである。このディスプレイは、把持動作に特化したディスプレイであるため、これまで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]も利用しない。力触覚提示用の現実物体とサーボモータおよび制御マイコンのみのシンプルな機構である。提案ディスプレイを図 1 に示す。

アクチュエータに 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 30cm)中心にモータを固定し、さらにスペーサの上にレコード用台座(直径 30cm)を設置した。サーボホーンにはレコード(直径 30cm)をマウントできるように改造した。レコード円周上に力覚提示用の現実物体(素ボール・直径 10cm)を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。サーボモータには 12W の電力を供給し、吊り測りで現実物体からのトルクを計測したところ最大 0.50[kg・m]であった。

3.2 VE のシステム実装

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にて論じる。

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、提案ディスプレイの現実物体までは台座を含めた 6cm の差があるため、バーチャルハンドが把持位置に到達した時に、6cm 上昇するように併せて実装した。Unity Assets for Leap Motion Orion Beta(ver.4.4.0)における、再描画イベントを上書きし、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 提案ディスプレイとの通信

提案ディスプレイの制御マイコン(Arduino)と Unity 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。サーボモータは PWM 制御であり、サーボモータの仕様から、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、提案ディスプレイではフィードバックサーボを用いており、サーボモータの現在角度が取得できるため、これを監視モータ角度と定義する。要求モータ角度と監視モータ角度との差を計算し、差をなくす回転方向へ連続回転させ、閾値に達した時点で停止させた。Arduino から Unity へは、常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。

3.3 システム状態とアーキテクチャ

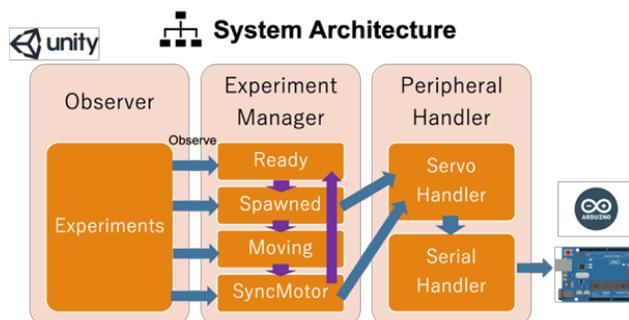


図 2 システム状態とアーキテクチャ

VE のシステムは以下の 4 つの状態を定義し、状態遷移は図 2 の紫矢印で示した。

- 1) Ready
システムを立ち上げた時の初期状態。
- 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。
- 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時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時、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、提案ディスプレイ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スクリプトは 4 状態の変化を常に監視するオブザーバパターンにて実装を行った。

3.4 現実物体の位置選択法

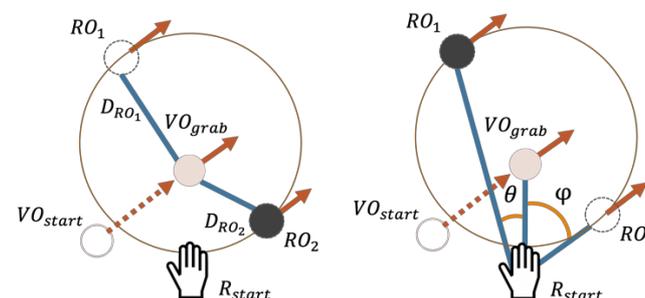


図 3 位置選択法によるリターゲティング操作
 (奥側方向を 0 度、力覚提示角度: 45 度)
 左: Shorter Distance 右: Closer Angle

提案ディスプレイは、円の接線方向に等しい yaw 方向 0~360 度の力覚提示が可能であることが期待される。さらに、サーボモータは CW・CCW 回転が行えるため、ある力覚提示角度に対して、現実物体は 2 つの候補位置を取ることができる。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、不快感を与えてしまう[8]ことがわかっているため、これらの問題を解決する 2 手法を提案する。

3.4.1 Shorter Distance

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、Shorter Distance による現実物体の選択を表している。バーチャル物体が VO_start から直線運動し、

VO_{grab} にて把持される時、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 RO_1 におけるCW回転または、候補位置 RO_2 におけるCCW回転である。 VO_{grab} と RO_1, RO_2 それぞれの距離を D_{RO_1}, D_{RO_2} と定義した時、距離が短い方の候補位置である RO_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。

3.4.2 Closer Angle

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、Closer Angleによる現実物体の選択を3.4.1のShorter Distance同様のバーチャル物体の運動方向および把持位置と共に表している。リーチング始点 R_{start} から VO_{grab} へのベクトルと、 R_{start} から候補位置 RO_1, RO_2 へのベクトルのなす角をそれぞれ θ, φ と定義した時、角度が小さい方の候補位置である RO_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の方向知覚

4.1 実験目的

提案ディスプレイは、yaw方向に0~360度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正しく知覚できるかどうかを調査した。

4.2 実験内容

提案ディスプレイ上の現実物体を、目隠しをした状態で被験者に把持させた後、ターンテーブルを2秒間回転し、奥、右奥、右、右手前、手前、左手前、左、左奥の8方向の中から知覚した力の方向を回答させた。実験中は、現実物体の位置を統制して、腕の体性感覚から力の提示方向を判断できないようし、上記の8パターンをランダムに提示した。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なったので、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

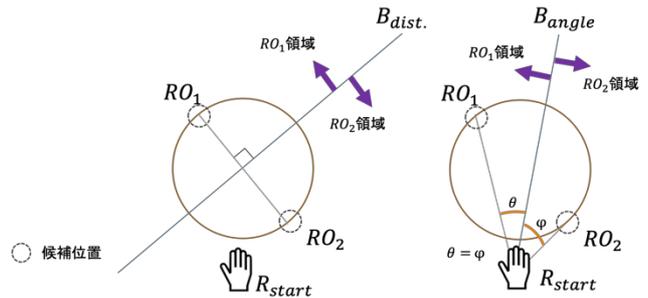


図4 各選択法における RO_1 領域と RO_2 領域と境界線
 (奥側方向を0度、力覚提示角度: 45度)

左: Shorter Distance 右: Closer Angle

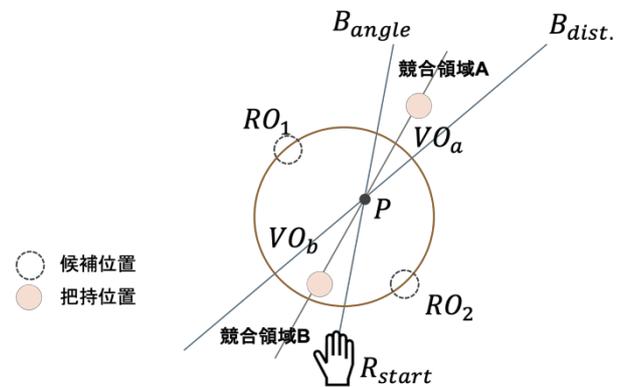


図5 競合領域およびバーチャル物体の位置
 (奥側方向を0度、力覚提示角度: 45度)

5.1 実験目的

3.4で紹介した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 RO_1, RO_2 どちらに選択されるかを考える。

Shorter Distanceについては、線分 RO_1RO_2 の垂直二等分線が RO_1 または RO_2 を選択する境界線であり $B_{dist.}$ と表す。Closer Angleについては、角 $RO_1R_{start}RO_2$ の二等分線がこの境界線であり、 B_{angle} と表す。境界線に対し、把持位置が RO_1 の存在する領域にあれば各選択法は RO_1 を選ぶ。この領域を RO_1 領域と表し、同様に RO_2 が存在する領域を RO_2 領域と表す。図4にそれぞれの境界線と領域を示した。

2手法を提案システムに取り入れることを考えると、それぞれが競合する領域の選択法について考える必要がある。この領域を競合領域と定義する。実験1では、この競合領域についてShorter Distance, Closer Angleのどちらの選択法を支持するか被験者実験行い、明らかにする。

5.2 競合領域と把持位置

$B_{dist.}, B_{angle}$ の交点を P とする。競合領域は交点 P を境に2つの領域に分けられる。図5のようにこれを競合領域A,

競合領域 B とした。また、各領域が最大になるように力覚提示角度は yaw 方向 45 度を提示角度とした。

把持位置 VO_a および VO_b は、図 5 のように 2 つの境界線におけるなす角の二等分線上かつ、交点 P から 15cm の位置に設定した。

5.3 実験内容



図 6 バーチャル物体(白)と把持位置(赤)

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、スタートと言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て、上からボールを把持してください」と指示した。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。バーチャル物体および把持位置を図 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(全く感じない・全く良くない・全く合っていない)から 5(とても感じる・とても良い・とても合っている)の Likert 尺度で答えさせた。具体的な質問内容は以下の通りである。

- どの程度、現実と同じように感じましたか(現実感).
- どの程度、リーチングと把持の操作性が良かったですか(操作性).
- どの程度、掴んだ感じは良かったですか(触覚).
- どの程度、現実の手と位置が合っていましたか(位置).
- どの程度、現実の手と動きが合っていましたか(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、リターゲティ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、リーチング始点に手を戻した時に上記の質問を行った。

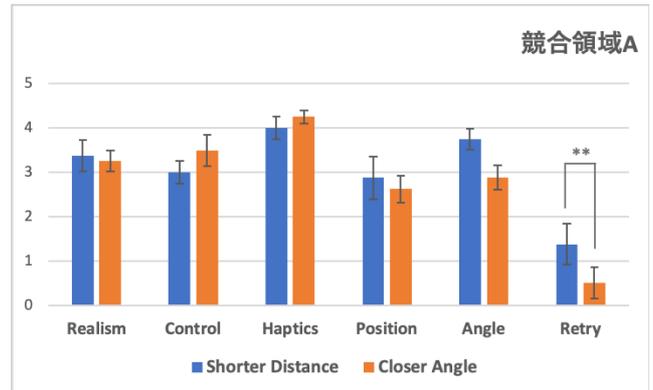
また、リターゲティング操作による把持不可能および、把持タイミングが合わなかったことによる把持不可能の場合は把持ができるまで再試行を行い、この場合再試行の回

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併せて指示した。

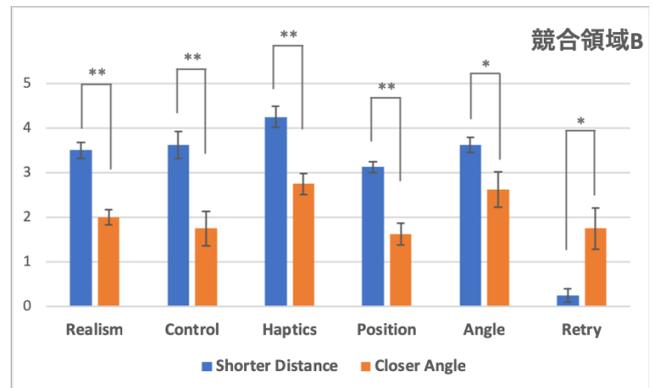
最高評価である 5 を定義するために、実験の前にリターゲティング操作なしでのリーチングおよび把持動作を 10 回試行させ、この感覚を最高評価の 5 とするように指示した。

試行パターンは、競合領域 A、B それぞれにおいて、Shorter Distance, Closer Angle で 4 パターンを行った。実験は完全無作為法で行った。被験者は右利きの 20 代男性 8 名で行った。

5.4 実験結果



(a) 競合領域 A における各パラメータの平均スコア



(b) 競合領域 B における各パラメータの平均スコア

図 7 実験 1 の結果(*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

エラーバーは標準誤差を表す

競合領域 A における結果を図 7 の(a)に示す。2 つの選択法に対し、対応のある t 検定を行ったところ、すべての質問項目(現実感・操作感・触覚・手の位置・手の動き)に関して有意差が認められなかった($p > 0.1$)が、再試行回数に関しては差が認められた($p < 0.01$)。手の位置に関しては Shorter Distance が Closer Angle よりも高かったが、有意差は認められなかった($p > 0.1$)。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 Closer Angle ではなく、Shorter Distance の平均スコアが高かったが、こちらについても有意差はなかった($p > 0.05$)。

競合領域 B における結果を図 7 の(b)に示す。競合領域 A 同様に対応のある t 検定を行ったところ、再試行回数に関して有意差が認められ($p < 0.05$)、特に現実感・操作感・触覚・手の位置に関しては有意水準 1%で差が認められた。

5.5 考察

まず競合領域 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%で差がみられたが、質問項目に関しては有意差がみられなかった。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った可能性が考えられる。把持不可能による平均再試行回数において、Closer Angle が Shorter Distance よりも有意に少ないことから、競合領域 A は Closer Angle 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 Shorter Distance のスコアが有意に高く、Shorter Distance が支持された。把持不可能による平均再試行回数においても、Shorter Distance が Closer Angle よりも有意に少ないことから、Shorter Distance が支持されたと考えられる。

競合領域 A は Closer Angle が支持され、競合領域 B は Shorter Distance 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。以前、筆者らのグループで行ったリターゲット可能領域に関する検討[8]において、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た。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操作における違和感が軽減されることが考えられる。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



図 8 実験 2-1 実験風景

実験 1 同様に VE にて、リーチングと把持動作を被験者に行わせた。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る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、把持位置は提案ディスプレイ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標となるオブジェクトを VE に表示した。実験風景を図 8 に示す。被験者は 20 代男性 8 名で、全員右利きだった。

6.1.3 実験結果と考察

誤差角度について繰り返しのある 2 元配置分散分析を行ったところ、調整角群の主効果($F(6, 196) = 6.41, p < 0.001$)が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($F(3, 196) = 0.958, p > 0.1$)および交互作用($F(18, 196) = 1.44, p > 0.1$)に関しては効果が見られなかった。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 -90 度群 ($p < 0.05$), 0 度群と -60 度群 ($p < 0.05$), +30 度群と -90 度群 ($p < 0.05$) の組み合わ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にあるとは言えなかった。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 -90 度群、-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 +90 度群、+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 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ことで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ないように現実物体の位置を統制した。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 度刻みで実験を行なっているため、記録した値から 5 度を引き、これ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 ($p > 0.1$)。極限法の PSE は中央値を取るため、CW 群および CCW 群の PSE は共に 45 度程度であると推定できる。

7. おわりに

本稿では、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覚ディスプレイ Haptic Turntable を提案した。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、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 Closer

Angle が支持され、競合領域 B は手の位置の違和感を低減する Shorter Distance 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時の 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が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 を推定した。結果、PSE は CW・CCW 同様に 45 度程度と推測した。

今後は本稿の実験結果を元に、テーブルトップを運動するバーチャルペットとのインタラクション (リーチング・把持動作) や手で打ち返す卓球ゲームなどのアプリケーションの開発およびその評価を考えている。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 16K00266 の助成を受けたものである。

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", Proceedings of the 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] Montano Murillo, R.A., Subramanian, S., and Martinez Plasencia, D., "Erg-O: Ergonomic Optimization of Immersive Virtual Environments", Proceedings of the 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", Proceedings of the 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 のためのリターゲティング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 S P I D A R 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] T. Massie and J. K. Salisbury, "The phantom haptic interface: A device for proving virtual objects", Proc. ASME Winter Annual Meeting, Dynamic Sys. And Cont. Div. 5(5 1), pp.295-300, 1994.
- [12] Zenner, A. and Kruger, A., "Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality", IEEE Transactions on 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] Razaque, S., Kohn Z., and Whitton, M.C., "Redirected Walking", Proceedings of EUROGRAPHICS, no. 37, pp. 289-294, 2001.