

スマートフォンをエンドエフェクターに用いる 力覚インタフェースの開発

村石 辰徳^{1,a)} 川喜田 裕之^{1,2} 大久保 貴博¹ 田島 寛之¹ 赤羽 克仁¹ 佐藤 誠¹

概要: 従来の力覚インタフェースは、VR 空間における力覚が発生する箇所 (以下、力覚ポインター) の見たと力覚がユーザに対して作用する効果器 (以下、エンドエフェクター) との位置が離れており、バーチャルリアリティ (VR) 体験としては臨場感に欠ける一面があった。この問題を解決し、さらには力覚インタフェースの普及を目的として、我々は力覚ポインターを表示するスマートフォンをエンドエフェクターとして用いる力覚インタフェースを開発した。VR 体験の主観評価実験を行い、本インタフェースが既存の手法よりもユーザに臨場感を与えられることを確認した。

A Haptic Interface Using a Smart Phone as the End Effector

TATSUNORI MURAISHI^{1,a)} HIROYUKI KAWAKITA^{1,2} TAKAHIRO OKUBO¹ HIROYUKI TAJIMA¹
KATSUHITO AKAHANE¹ MAKOTO SATO¹

Abstract: For experience with virtual reality, conventional haptic interfaces have the problem with lack of presence because the displaying position where force occurs in virtual space, called a haptic pointer, and the real position where the user feel the force, called an end effector, are separated. To solve the problem and to spread haptic interfaces, we developed a haptic interface using a smart phone as the end effector displaying a haptic pointer. We conducted comparative experiments with subjective evaluation. As a result, we confirmed that the proposed interface gave the user presence more than a conventional method.

1. はじめに

SPIDAR[1], [2] や Phantom[3] といった力覚インタフェースは、コンピュータの直感的な 3 次元入出力装置であると同時にバーチャルリアリティ (VR) 体験のためのインタフェースとして利用されてきた。VR 体験においては、バーチャルオブジェクトの存在感といった人工的な体験を体験者にいかに違和感なく提示できるかが重要である。一方で、現行の力覚インタフェースはコンピュータの入出力装置という側面が強く、パーソナルコンピュータにおけるディスプレイとマウスの関係と同様に、ディスプレイと力覚インタフェースが装置として分離しているものが多い。

そのため、VR 空間における力覚が発生する場所 (以下、力覚ポインター) と、バーチャルオブジェクトに触れた場合等の力が作用する効果器 (以下、エンドエフェクター) との位置が一致しておらず、VR 体験として直感的とはいえない面があった。また、力覚提示を伴うシステムは一般に用途が限定されるため、その特殊性が一般家庭への普及の妨げとなることが考えられる。そこで我々は、VR 体験のリアリティ向上と一般家庭への普及を目的として、力覚ポインターとエンドエフェクターとの位置を一致させた汎用的な力覚インタフェースを開発したので報告する。

2. 要求条件とアプローチ

前章を踏まえ、我々は VR 体験の力覚インタフェースの要求条件を次のように設定した。

- (1) 力覚発生を表示とエンドエフェクターとの位置を一致させること

¹ 東京工業大学 精密工学研究所
Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology

² NHK 放送技術研究所
NHK Science & Technology Research Labs.

^{a)} mmm.muraishi@hi.pi.titech.ac.jp

- (2) 3次元空間において自由度の高い力が発生できること
- (3) 多様な VR 体験に適用できる汎用性を有すること
- (4) 普段は VR 体験以外の用途にも幅広く活用できること

2.1 関連研究

上記の要求条件をもとに、従来研究について概観する。要求条件 (1) を満たす力覚インタフェースは、これまで複数の研究がある。

田村ら [4] は、タッチパネル型タブレット端末の前面にパネル平面内で力覚を提示する SPIDAR-mouse[5] を装着した SPIDAR-tablet を開発した。また、類似する取り組みとして、則枝ら [6] はタブレット端末のタッチパネルの前面に駆動型パネルを取り付けることにより力覚を提示した。これらは、操作性向上を目的としたものであるが、力覚の表示とエンドエフェクターとの位置を一致させることが可能である。しかしながら、力覚表現はタブレット端末のパネル平面内に閉じており 3 次元空間の表現に乏しく、VR 体験のリアリティには限界がある。

徳井ら [7] は、ディスプレイ前方で任意の 3 次元形状の透明な弾性体をタッチパネルの代わりに用いた 3 次元タンジブルインタフェースを開発した。このインタフェースでは、ディスプレイを指で変形させられた弾性体越しにステレオカメラで撮影することにより、ディスプレイ内のバーチャルオブジェクトとの 3 次元インタラクションを可能とする。しかしながら、弾性体の形状や弾性率はアプリケーションごとに変えられるものの、汎用的な VR 体験のインタフェースとしては可変性に乏しい。また、このインタフェースでは指から弾性体への力に対する反作用という形で力覚提示は可能であるが、任意の力覚を発生させることはできず、柔軟な VR 体験を設定することができない。

野間ら [8] は、没入型 VR 環境における力覚提示機能を備えた可搬ディスプレイをマニピュレータとして用いたインタフェースを開発した。このインタフェースでは、VR 環境のバーチャルオブジェクトをユーザが把持するディスプレイ越しに見ることができ、任意のバーチャルオブジェクトを掴んで操作を行う際、操作反力をユーザに提示することができる。しかしながら、このインタフェースは力覚提示手法としてディスプレイを支持するアームの関節部分にモータを組み込んでいるが、回転に関する操作反力が提示できないなど、力覚表現の自由度や可変性に乏しい。また、10 年以上前の技術であるため装置も大がかりであり、汎用性を持たせるためには再デザインが必要である。

2.2 アプローチ

上記の要求条件 (1) および (4) から、力覚提示装置のエンドエフェクターとして表示機能を有する既存のデバイスを用いる方法を考える。エンドエフェクターとして利用できそうな小型なディスプレイといえばスマートフォンやタブ



図 1 外観

Fig. 1 Appearance

レット端末が考えられる。我が国では、スマートフォンは世帯普及率が約 5 割に達し [10]、軽量化も進んでいる [11]。一方、タブレット端末は、世帯普及率が 15% 程度 [10] であることや、重量やサイズから、今回はスマートフォンをエンドエフェクターとして用いることを検討することにした。

スマートフォンであれば、計算能力も高く各種センサーも搭載しているため、要求条件 (3) のような多様なアプリケーションを作成することに向いている。ただし、要求条件 (2) のような力覚インタフェースとするためには、スマートフォンに対して自由度の高い力を伝える仕組みが必要である。これには [1], [2] のような糸を使う方法と [3], [8] のようなアームを使う方法が考えられる。要求条件 (4) を考慮すれば、将来的にこの仕組みをスマートフォンガジェット [12] として提供する方法が有望と考えられるため、より収納性が高く操作範囲の設定が容易な糸を使った方式が理想的である。そこで、今回は SPIDAR を利用し、スマートフォンをエンドエフェクターとして用いた力覚インタフェースを開発した。

3. 提案システム

3.1 ハードウェア構成

前述したアプローチを踏まえ制作したデバイスを図 1 に示す。

デバイスはスマートフォンとそのケース、PC、モータドライバ、フレーム、モータ、糸を用いて構成される。8 個のモータが各端に取り付けられた直方体フレームの中央にスマートフォンケースを配置する。スマートフォンケースは 8 本の糸で各モータに接続される。各モータはモータドライバにより PWM 駆動しケースにはめられたスマートフォンに対して 6 自由の力覚を与える。モータドライバは

USB2.0 により PC と接続され、各モータに付属するロータリエンコーダのカウントとモータのトルク指令値のやりとりを行う。

3.2 ソフトウェア構成

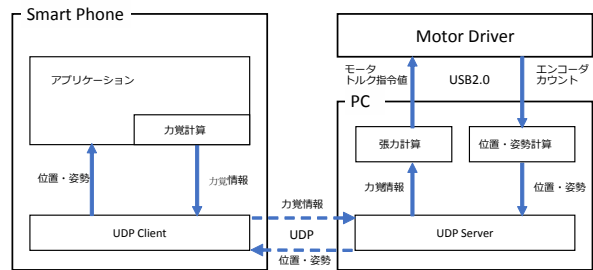


図 2 システム構成
Fig. 2 System Configuration

システム構成を図 2 に示す。近年のスマートフォンは計算能力が高く、複雑な VR アプリケーションが実行可能である。一方、SPIDAR の制御 (位置・姿勢計算、張力計算) 等は一定の間隔で高速に行う必要があるため、モータドライバとの通信遅れや他の処理による計算遅れのない環境で実行するべきである。したがって、スマートフォンはアプリケーションを実行し PC では SPIDAR の制御を行う。また、両者はユーザの操作の妨げにならないように無線通信で UDP により接続した。アプリケーションは PC で計算されたスマートフォンの位置・姿勢情報を受け取り反映する。そして、力覚情報を生成し PC に送信する。送信された力覚情報は各モータのトルク (糸の張力) に変換される。将来的には、SPIDAR の制御を行う PC の代わりに組み込み CPU を用いることで、可搬性のあるスマートフォンがジェットとしての運用が可能であり、普及に繋がると考えられる。

アプリケーション開発環境には様々なプラットフォーム向けに開発が可能な Unity4 を使い、様々なアプリケーションで活用するために SPIDAR システムと接続するためのプラグインを作成した。

4. 評価と考察

4.1 評価実験

提案システムの臨場感と操作性を調査するために、主観評価実験を行った。スマートフォンの向こう側の VR 空間にゴリラの置物がありそれを一人称視点で触るアプリケーション (図 3) を被験者に体験してもらい、従来のようにディスプレイ (力覚ポインターを表示する場所) とエンドエフェクターが離れている固定手法 (図 4)、スマートフォンを持って動かす把持手法 (図 5)、2 つの手法について比較してもらった。固定手法では、スマートフォンをフレーム上部中央に固定し、エンドエフェクターとしてはスマー

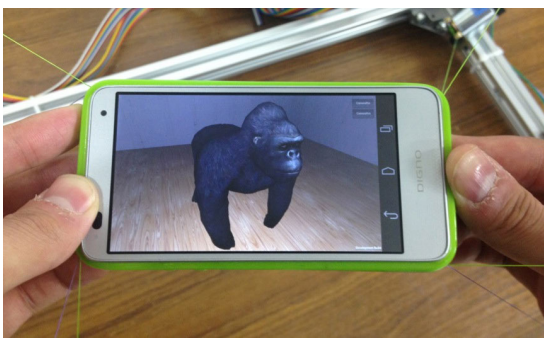


図 3 実験アプリケーション
Fig. 3 Application

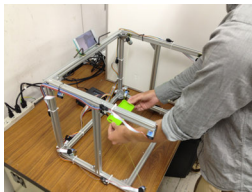


図 4 固定手法
Fig. 4 Fixed Display Method

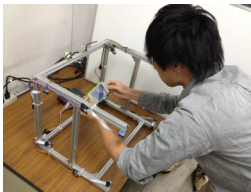


図 5 把持手法
Fig. 5 Gripped Display Method

表 1 質問項目

Table 1 Questionnaire

1.	目の前にゴリラの置物があるように感じられたのはどちらですか。
2.	迫力があつたのはどちらですか。
3.	バーチャル空間に入り込んでいる感じがしたのはどちらでしたか。
4.	触りたいところにすぐ触れた方はどちらでしたか。

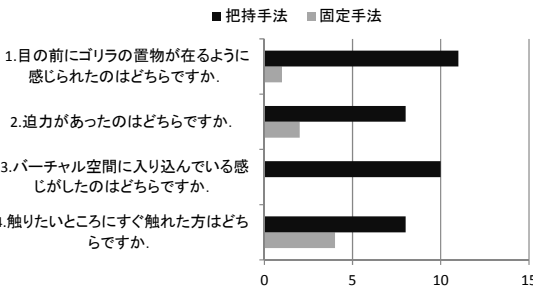


図 6 主観評価結果
Fig. 6 Result of Experiment

トフォンケースを用いた。その後、臨場感・操作性に関する項目 (表 1) について、固定手法、把持手法、どちらも可、どちらも不可の 4 択に答えてもらった。

4.2 結果と考察

学生 11 人に対して評価実験を行った。質問した項目毎にチェックが得られた手法に対して 1 点を加え、どちらも可と答えた場合は両方の手法に 1 点を加え、どちらも不可と答えた場合は加点をしない。結果を図 6 に示す。

どの項目についても把持手法の点数が高い結果となった。

したがって、把持手法は固定手法に比べリアリティの高い手法であると考えられる。質問 1, 4 の結果と「把持手法は距離感が掴みやすい」という意見が得られたことから、把持手法は特に VR 環境の物体の位置を把握しやすい手法であると考えられる。質問 4 は VR 体験よりもコンピュータの入出力装置としての評価を意図した質問であるが、把持手法は質問 1, 3 よりも得点が低く、固定手法にも 4 点加えられている。把持手法は、スマートフォンに正対しようと操作に合わせて頭を動かすことが多いため、操作によってはその動作が煩わしい場合もありえる。したがって、操作性という観点では固定手法にも利点があると考えられる。また、フレームに視界を遮られる、被験者がフレームに接触しそうになることや糸が気になるという意見が得られたことから、より自由に VR 世界を見渡すにはモータの配置を再検討する必要があると考える。さらに、このシステムを用い実現したいことを被験者に聞いてみたところ、AR(拡張現実感) 技術を用いたアプリケーションがしてみたいという意見を多く得られた。スマートフォンに付属するカメラを用いたアプリケーションの発展が考えられる。

以上を踏まえ、提案システムの特徴を以下のように列挙する。

- VR 空間内の距離感を把握しやすい。
- AR のように実空間と VR 空間のスケールを重ね合わせられる。
- スマートフォンの計算資源や機能が使える。
- ユーザの慣れ親しんだ端末が使える。

これを受けて次の章では具体的なアプリケーション例を提案する。

5. アプリケーション例

本章では、提案システムの特徴を活かしたアプリケーション例をいくつか挙げる。これらの例は本研究の方向性の一端を示すもので、実装により検証を行った訳ではない。

5.1 ゲームの力覚インタラクション

VR 体験の中でも、特に力覚を使ったインタラクションが求められるアプリケーションとしては、ゲームコンテンツが挙げられる。スマートフォンの既存のゲームに力覚入出力を加えたものや今回のシステムならではのゲームが考えられる。

探索ゲーム

スマートフォンのカメラを使った既存の AR アプリケーションの発展版として、エンドエフェクターであるスマートフォンをバーチャル世界を見るための窓として捉え、実空間を捕らえるように VR 世界を探索し、バーチャルな壁やモンスター等による障害を乗り越えて目的地までたどり着くゲームが考えられる。スマートフォンが壁にぶつかった時や、モンスターからの攻撃を受けた時の衝撃を力覚提

示することで高い臨場感が得られる。

探索系ゲームの派生として、運動神経が問われるゲームを作ることができる。例えば、いわゆる「イライラ棒」のような、スマートフォンを動かして指定時間内に迷路状の通路内を壁等の障害物にぶつからないように進めるゲームが考えられる。このとき、力覚提示をうまく利用して、壁にひっぱられるような力を出したりすることで新しい感覚のトラップを作ることでもある。

ハプティックノベル

既存のインタラクティブなデジタルノベルに対して、力覚提示を加えたものが考えられる。ノベル系ゲームに限らず、従来の映像コンテンツの演出として「画面を揺らす」などの演出があったが、力覚提示により本当に画面を揺らすことで新しい体験を提供することができる。特にホラー系のコンテンツでは、ユーザの意図しない動きとしての力覚が恐怖感を増すことが想像できる。

アナログアクションゲーム

ジェンガ [13] のような実空間上のアナログな配置が意味を持つゲームは、繊細な力覚提示が重要な意味を持つため、本システムのような高いリアリティが求められる。同様のゲームとしては玉転がしゲーム [14]、将棋崩し [15] などがある。

ドライブシミュレータ

近年のレースゲームでは、ゲーム機械で運転席に相当する椅子が揺れる [16] などの力覚提示があったが、スマートフォンに対する力覚提示による一風変わった体験を提供することができる。具体的には、車の傾きの再現や重力加速度に相当する力覚提示を行うことで、擬似的な臨場感が得られると考えられる。同様のゲームとしてはフライトシミュレータが考えられる。

ハプティック金魚すくい

探索系ゲームのようにエンドエフェクターであるスマートフォンを覗き窓として利用するだけでなく、ポイと呼ばれる金魚をすくう道具として利用することで、本システム独自の体験を提供する。具体的には、ポイの少し手前にバーチャルカメラがあるイメージでポイ越しにバーチャル世界を覗き込み、すくい上げた金魚が画面上で跳ねるとその跳ねた時に伝わる揺れを力覚として提示する。同様なゲームコンテンツとして釣りにも応用できる。

サイエンス系シミュレーション

地球ゴマ [17] によるジャイロ効果の学習など、力覚インタラクションを利用するサイエンス系学習教材にすることができる。

5.2 新しいメディア

以上は VR 体験に関する論考であるが、提案システムはディスプレイが動くというこれまでにはなかった特徴もあるため、新しいメディアとしてのアプリケーションも期待

できる。

テレカメラビジョン

テレビジョン放送やネットワークを使ったストリーミング放送などにおいて、提案システムを受信端末として想定した放送が考えられる。例えば、放送局等の映像配信者は、ドラマや舞台等の映像コンテンツを1つのカメラで撮影し、カメラのパン(左右振り)やチルト(上下振り)といったカメラパラメータを映像音声コンテンツのメタデータとして併せて伝送する。受信側では視聴者がエンドエフェクターのスマートフォンで映像音声コンテンツを視聴するが、このときスマートフォンが受信したカメラパラメータに従って動く。このように、カメラの向きが変わると表示する向きも変わるメディアとして利用することができる。

ハプティックテレビ電話

上記のテレカメラビジョンの受信インタフェースを送受信で用いてテレビ電話のような通信を行う。自分のスマートフォンを動かすと相手のスマートフォンが同じ動きをすることにより、従来のテレビ電話よりもインタラクティブな臨場感を作り出すことが出来ると考えられる。

6. おわりに

VR体験のリアリティ向上と普及を目的として、VR体験のための力覚インタフェースに求められる要求条件を示し、スマートフォンをエンドエフェクターとして用いる力覚インタフェースを開発した。主観評価により既存の力覚インタフェースとの比較実験を行い、提案するインタフェースの方がより臨場感を感じられることを示した。提案システムには実空間とVR空間のスケールを重ね合わせられるといった特徴があり、それらの特徴を活かしたアプリケーション例を具体的に考案した。今回のシステムではスマートフォンを常に把持する形態としたが、把持していないとスマートフォンの重量によりスマートフォンが沈み込んでしまう問題がある。アプリケーションの拡充のために、今後はスマートフォンが立体的に移動し、ユーザが把持しない形態のVR体験も研究対象としたい。

参考文献

- [1] 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J74-D-2, No. 7, pp. 887-894, 1991
- [2] 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
- [3] T. H. Massie and J. K. Salisbury: The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects, in Proc. 3rd Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 295-300, 1994
- [4] 田村理乃, 村山 淳, 平田幸広, 佐藤 誠: タッチパネルのための力覚インタフェース SPIDAR-tablet とその力覚計算方法の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, pp. 363-3466, 2011

- [5] 佐藤 誠, 一色 正晴, 林 理平, 赤羽 克仁: Open Source Interface, Spidar-mouse について, HCG シンポジウム (電子情報通信学会), C6-2, 2009
- [6] 則枝 真, 佐藤 誠: パネル駆動型力覚提示タッチパネルとその力覚制御手法の提案, 情報処理学会インタラクショナル 2012, 2012
- [7] 徳井 太郎, 佐藤 俊樹, 横谷 知昂, 小池 英樹: Photoelastic Touch を拡張したやわらかな 3 次元タンジブルインタフェースの提案, 第 17 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2009) 論文集, 2009
- [8] 野間春生, 宮里 勉, 中津良平: 可搬ディスプレイを用いた仮想物体操作のための力覚インタフェース, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-2, pp. 906-917, 1998
- [9] MSN 産経ニュース “スマホの世帯普及率 5 割に タブレットも 15 % が保有、総務省調査”, <http://sankei.jp.msn.com/economy/news/130614/biz13061417550024-n1.htm>
- [10] ソフトバンク “世界最軽量の防水スマートフォン「DIGNOR R 202K」 発売”, <http://www.softbank.jp/mobile/info/personal/news/product/20130705a/>
- [11] NAVER まとめ “便利！ やりすぎ？ iPhone と合体するガジェットいろいろ”, <http://matome.naver.jp/odai/2134685053060937401>
- [12] ジェンガ, <http://www.takaratomy.co.jp/products/jenga/>
- [13] 玉転がしゲーム, http://woodcraft.kagayamokuzai.jp/2009/12/blog-post_7646.html
- [14] 将棋崩し, <http://nanapi.jp/60332/>
- [15] VISIONRACER D-BOX VR3, <http://www.firebox.com/product/4862/VisionRacer-D-Box-VR3>
- [16] 地球ゴマ, <http://www.aibsc.jp/nsj/02syoun/110801.01/print.shtml>