

基礎論文

3 自由度可動式タッチスクリーンを用いた マルチタッチ力覚提示装置

高中 駿^{*1} 矢野 博明^{*1} 岩田 洋夫^{*1}

3DOF Multitouch Haptic Interface with Movable Touchscreen

Shun Takanaka^{*1}, Hiroaki Yano^{*1}, Hiroo Iwata^{*1}

Abstract --- This paper describes the development of a multitouch haptic interface equipped with a movable touchscreen. When the relative position of two of a user's fingertips is fixed on a touchscreen, the fingers can be considered a hand-shaped rigid object. In such situations, a reaction force can be exerted on each finger using a three-degrees of freedom (3DOF) haptic interface. In this study, a prototype 3DOF haptic interface system comprising a touchscreen, a 6-axis force sensor, an X-Y stage, and a capstan drive system was developed. The developed system estimates the input force from fingers by using sensor data and each finger's position. And, the system generates reaction forces from virtual objects to the user's fingertips by controlling the static frictional force between each of the user's fingertips and the screen. The system enables users to perceive the shape of two-dimensional virtual objects displayed on the screen. Moreover, users can deform elastic virtual objects, and feel their rigidity through the interface. The effectivity of the prototype system was confirmed through some evaluation experiments.

Keywords: virtual reality, haptic interface, touchscreen, shearing force, multitouch

1 はじめに

我々は普段の生活において、実物体に複数の指で触れて物体の性質を知覚し、それを移動・変形することで、様々な作業を行っている。近年、デジタルデータに対して素手で直接映像内の物体を操作することができるインタフェースとしてタッチパネルインタフェースが普及し、実世界とは異なるピンチングなど独特の操作も受け入れられている。一方で、精密な作業が難しく、また指の下に隠れたバーチャル物体の性質を知ることも難しい。これに対して力覚フィードバックを付加することでより正確で直感的な操作の実現が期待できる。特に複数指でのインタラクションは、物体の移動や回転が直感的に行えるため有用性が高いと考えられる。また、現実世界では様々な大きさの物体を自由な方向から触ることができる。VR空間でも力覚を付与したインタフェースとして様々な大きさの物体が表現可能、かつ素手の複数指で自由な方向から物体を操作できることが望ましい。

本研究では、実物大の物体を表示し、複数指で直接触れるようにするにはどうすればいいかという問題に対して、各指を独立して動かせるフルスペックの力覚提示装置でなくとも複数指を使った力覚付き作業環境を提供可能な手法として、タッチスクリーンを遭遇型のように

動かし、かつ摩擦によるせん断力を用いる手法を提案する。特に、複数指でスクリーン上の映像を触ったとき、指がスクリーン表面で滑らず、各指の相対距離が変わらなければ、複数指はタッチスクリーンと一体となり、タッチスクリーンを Fig. 1 のように 6 自由度の機構で動かしたとき、Roudaut ら[1]と同様のせん断力提示や、また Kim ら[2]、Sinclair ら[3]と同様に遭遇型の力覚提示が可能になる。しかしながら、6 自由度の協調制御は複雑であるため、本研究では対象とする動作を Fig. 1 の x-y 平面内の動作に限定して、3 自由度力覚提示装置(Fig. 2)を開発し、本システムを用いて剛体の操作や弾性体の硬さ弁別などを可能にした[4,5,6,7]。ただし、タッチスクリーンを用いて素手の複数指で直に VR 物体とインタラクションすることを可能とした本システムにおいて、複

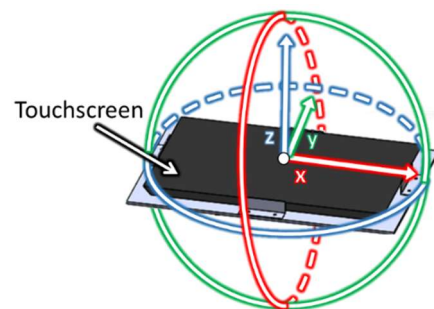


図 1 タッチスクリーンの 6 自由度の動き

Fig. 1 6DOF movement of touchscreen

^{*1} 筑波大学

^{*1} University of Tsukuba

数指の相対位置が変わる方向の提示力は同一となる制約がある。このような制約においても可能な2指でのVR物体とのインタラクションを想定した被験者実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

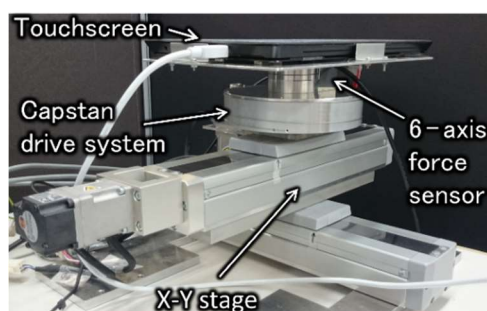


図2 プロトタイプシステムの外観

Fig. 2 Overview of prototype system

2 先行研究

タッチスクリーンを用いた先行研究は多く行われている。Bau ら[8]は、電気刺激を制御することで素手の複数指に対する触覚提示を可能にした。しかしながら、複数指に異なる触覚提示はできなかった。Nakamura ら[9]は各指の静電摩擦力を制御することで、複数指に同時に異なる反力を提示することを可能にした。また、静電摩擦力や超音波振動、電気刺激の制御は提示力が弱いなどの問題があるため、Roudaut ら[1]や、Erik ら[10]、Norieda ら[11]のようにせん断力制御を行い、大きな力の提示を可能にした。さらに、タッチスクリーンを遭遇型のように動かすことで力覚提示を行う研究も行われている。1章で述べたようにKim ら[2]はタッチスクリーンを揺動させることで、Sinclair ら[3]は鉛直方向に動かすことでタッチスクリーンに映る3次元物体からの反力生成を可能にした。しかしながら、これらのタッチスクリーンを用いた研究で素手の複数指に大きな反力を生成可能にしているシステムはない。先行研究では複数指への反力提示が可能であっても、指先のデバイスによる映像の遮蔽や弱い反力生成しかできないなどの問題がある。また、素手の指先に大きな反力を生成できても、それらは全て複数指に対してではない。本研究は摩擦力を用いてせん断力を指先に提示するだけでなく、後述するように提示力ベクトルの方向に制約があるものの、素手の2本指に対して別々の力を提示する手法を提案し、想定されるアプリケーションで2指での作業を想定した実験を行い、本手法の有効性を検証した点で有用性があると言える。

3 提案手法

本研究の目的であるタッチスクリーンを用いた素手の複数指への力覚提示、かつ実物大の物体の表現を可

能にするための手法をここで提案する。先行研究ではスクリーンの上に用意したフィルムを動かすことでせん断力提示を行っていたが、本章ではスクリーン自体を動かすことによるせん断力提示を提案する。

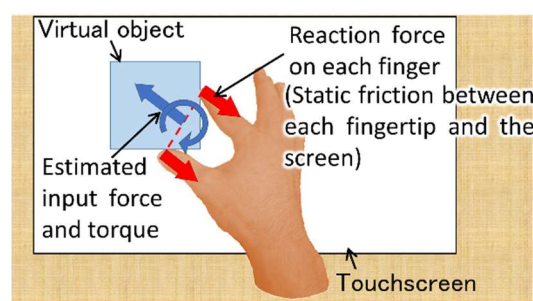
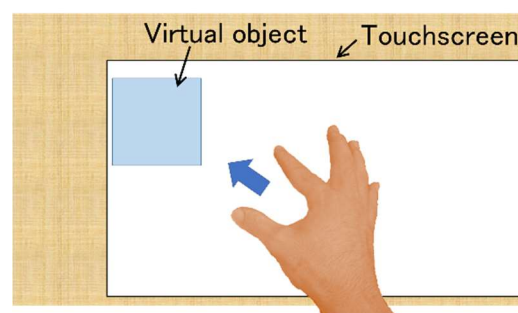


図3 力覚提示手法

Fig. 3 Haptic rendering method

3.1 バーチャル空間の生成

タッチスクリーン自体を動かすことでタッチスクリーンのサイズに依存しない物体の表現が可能になる。Fig. 3のようにタッチスクリーンがアクチュエータによって実空間上で移動した時、バーチャル物体が実空間上で同一の座標に留まるように描画する。バーチャル物体がスクリーンサイズを超えて描画しきれない部分があったとしても、スクリーンを動かすことでその部分があるべき場所に表示され、全体を把握することができる。このようにすることで実物大の物体がそこにあるように表現することが可能になる。

3.2 力覚提示方法

本研究では、スクリーンに素手で触ったとき、指先とスクリーン間の摩擦力を制御することで映像物体からの反力を生成できると考えた。具体的には、指先でスクリーンにせん断力を加えたとき、指がスクリーン上を滑らなければ指先とスクリーンの間に静止摩擦力が発生する。これに対して入力方向にスクリーンを動かせば静止摩擦力は軽減される。このように指がスクリーン上で滑らないとき、スクリーンの速度を制御することで指先に加わる摩擦力を制御することができる。この摩擦力を提示物体か

らの反力として利用することにした。また、物体と複数指の接触を考えたとき、指の相対位置が変わらなければ複数指を一塊の物体とみなすことが出来る(Fig. 3)。手を一塊の剛体と見なした場合、物体に接触した際の手及びスクリーンの動きは平面運動に限定すれば並進 2 自由度、回転 1 自由度で表現できる。すなわち手が物体に干渉した際にこれらを制御することで、物体に接触したような反力を提示できるため、並進 2 自由度、回転 1 自由度のアクチュエータのみで複数指に反力を提示できると考えられる。並進と回転を組合せることでスクリーンと接触している複数の指に手の瞬間中心との相対位置関係に応じた速度や、力を提示できる。ただし、Fig. 3 のように 2 本の指を想定した時、両指を結ぶ直線に平行な方向には別々の力は原理的に生成できない。なぜなら、両指とスクリーンは剛体という前提のため、並進と回転を組合せても相対位置が変わる方向に別々の速度を与えることはできないからである。しかしながら、本システムの用途を、物体を押したり、ねじったりするような操作に限定すれば、物体からの反力は両指を結ぶ直線に対して垂直方向に働くことが多いと考えられる。さらに平行に力を加える場合も操作対象の VR 物体が剛体であれば各指に同じ反力が加わってもあまり違和感は生じないと考えられる。また、人間がスクリーンに自然に指先を載せると、となり合う指の指先同士を結ぶ直線是一直線にはならない。一方でバーチャル空間の物体は直線的なものが多く、指先群とバーチャル物体表面との接触は 2 点接触が比較的多くなると考えられる。したがって、バーチャル物体と接触している指 2 つについて異なる力覚提示を行うことができれば、移動・回転などの基本的な操作が可能と言える。これらのことから、本研究では 3 自由度のアクチュエータの上にタッチスクリーンを載せ、スクリーンと 2 本指を一体として速度制御することで、両指のスクリーンとの接触位置を結ぶ方向は同じ反力のみとなるが、それと直交する方向は両指に異なる力ベクトルを提示するシステムを開発した。

4 プロトタイプシステム

4.1 ハードウェア設計

本システムは Fig. 2 のように、下から X-Y ステージ、capstan drive 方式を用いた減速比 10:1 の回転機構、6 軸力覚センサ(レプトリノ社の PFS055YA251U6)、タッチスクリーン(Microsoft 社の Surface Pro2)の順に取り付けた構成とした。スクリーン表面には、指が滑らないようにある程度摩擦を持った 0.5 mm 厚のゲルシート(エクシールコーポレーションのハイパーゲルシート硬度 70)を貼り付けた。タッチスクリーンでは、ユーザの指の位置の取得及び X-Y ステージと回転機構の制御のための入出力計算処理を行った。スクリーン直下に取り付けた力センサでは、指がスクリーンに加える力を検出し、物体との

接触状況に応じて X-Y ステージと回転機構を用いてスクリーン自体を動かして、スクリーンと接触している指先に反力を提示する。各モータには Panasonic 製の MSMD5AZP1S を使い、X-Y ステージの直動スライダに IAI 製の RCS2-SA7C-N-8-200-SP(リード 8 mm)を用いた。X-Y ステージの可動範囲は x, y 方向ともに約 206 mm である。また、速度制御モードで動作させ、指令速度 0 の時のスクリーンの最大静止摩擦力は約 10~15 N で一般的な力覚提示装置の最大提示力と同程度以上であった。個人差はあるが、これ以上のせん断力が働くと指がスクリーンの上で滑り、正確な反力提示が困難となった。

4.2 ソフトウェア設計

バーチャル物体とのインタラクションでは、ユーザの指がどの場所にどのような力を加えているのかを検出する必要がある。場所はタッチスクリーンで検出できる。1 本指でスクリーンに力を加えた場合、ユーザが加えた並進力 \vec{F}_a と力覚センサで検出した並進力 \vec{F} は一致する。2 本指の場合は、本来であればそれぞれ 2 軸の力センサが必要となるが指先になんらかのセンサの取り付けが必要となる。ここではタッチパネルに素手で触ることを目的としているため、スクリーン直下の力センサのみで対応することを考えた。この時、本来 2 指それぞれに 2 自由度の力ベクトルが得られる必要があるが、手を剛体と仮定しているため並進 2 自由度 + 回転 1 自由度が分かれば良い。そこで、スクリーン直下の力センサのデータとタッチ位置データをもとに両指の midpoint に加わる並進力と回転力を次のように算出した。並進力 \vec{F}_a は力センサの値と同値となる。ユーザの意図した回転力を M_a 、力センサの回転力を M 、 \vec{F}_a の作用点とディスプレイ回転軸のズレによるモーメントを M_F とすると図 3 に示すように $M = M_F + M_a$ となるため、 M_a は式(2)のように求められる。

$$\vec{F}_a = \vec{F} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} M_a &= M - M_F \\ &= M - \vec{F}_a \times \vec{L} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 \vec{L} は 2 本指の midpoint から力覚センサまでの距離

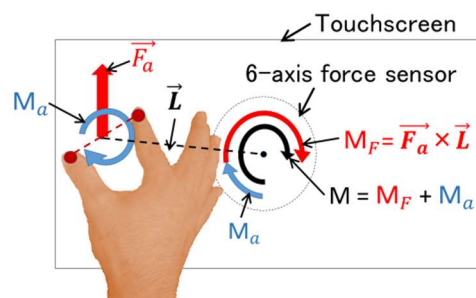


図 4.2 本指の midpoint に加わる回転力の推定

Fig.4 Estimation of an input torque

ベクトルである。この結果をもとにそれぞれの指の力はこれらの力を2等分して求めることができる。

一方で出力に関しては、2指それぞれに発生させる力ベクトルから、2指を結ぶ方向のベクトルとそれと直交するベクトルに分け、前者は \vec{F}_t として X-Y ステージの並進力ベクトルに加算する。後者については両指の midpoint における \vec{F}_f 、 M_f に変換し、両指の midpoint での目標速度指令値として以下の様に計算を行った。

$$\vec{V}_t = a(\vec{F}_f + \vec{F}_t)$$

$$\omega_t = fM_f \quad (4)$$

なお、 a 、 r は比例定数であり、本研究では目標力との対応関係の実測値から 30.7 mm/s/N, 60.0 rpm/N/mm をそれぞれ用いた。

次に、両指の midpoint に並進速度 \vec{V}_t 、回転速度 ω_t を出力することを考える。本システムの構造上、回転機構はスクリーン中央を回転させるため、スクリーン中央が回転速度 ω で回転するとき、両指の midpoint はスクリーン中央から見ると並進速度 $-\vec{L} \cdot \omega$ を持つ。このスクリーン中央の回転によって生じる両指の midpoint の並進速度を打ち消すことができれば、両指の midpoint を中心にスクリーンを回転

させることができる。従って、2 本指の midpoint を回転中心位置として回転速度 ω_t を与える場合は、スクリーン中央を回転速度 ω_t で回転させ、かつスクリーン中央に並進速度 $\vec{L} \cdot \omega$ を与えればよい。これらのことから、スクリーン中央の並進速度 \vec{V} 、回転速度 ω を次のように与えるようにした。

$$\omega = \omega_t \quad (3)$$

$$\vec{V} = \vec{V}_t + \vec{L} \cdot \omega_t \quad (4)$$

プログラムは C++ 言語で記述し、力覚と視覚の2つのスレッドに分けて非同期に処理を行った。力覚スレッドは力センサの計測、VR 物体との干渉計算及び速度指令値の出力を行い、視覚スレッドでは指先接触位置計測及び画面レンダリングを行なった。視覚スレッドはデバイスドライバの仕様で画面の垂直同期信号とは同期できなかったため視覚提示及びタッチ位置計測は 493 Hz(弾性体一つの時)から 637 Hz(剛体一つの時)で動作させた(論文執筆時点では対応ドライバが公開されたが実験には間に合わなかった)。また、メモリアクセスのタイミングの問題等が考えられるアクチュエータの振動が発生したため、試行錯誤の結果、力覚スレッドは 56 Hz(弾性体一つの時)から 70 Hz(剛体一つの時)で動作させた。力センサの計測速度の例として 150 gf の錘を静かにスクリーンに載せた時の鉛直下向きの力の測定値の時間変化を Fig. 5 に示す。また、アクチュエータの目標速度を 133 mm/s のステップ入力とした時の反応の様子を Fig. 6 に示す。0.1 秒弱で 3.2 N の力出力となりスクリーン上で滑らないように動かす動作には十分追従可能と言える。

5 システム評価実験

本システムは、タッチスクリーンを用いて素手の2指で直に VR 物体とインタラクションすることを可能とするものである。手はスクリーンに対して剛体接地を前提とするため、2指を結ぶ方向には同じ力しか提示できないが、それと直交する方向には別々の力を提示可能である。システムの基本性能の検証及びこのようなシステムのア

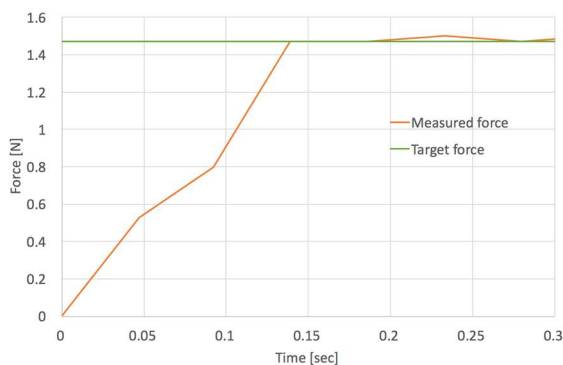


図 5 典型的な力センサの応答

Fig. 5 Typical time series variance of measured force.

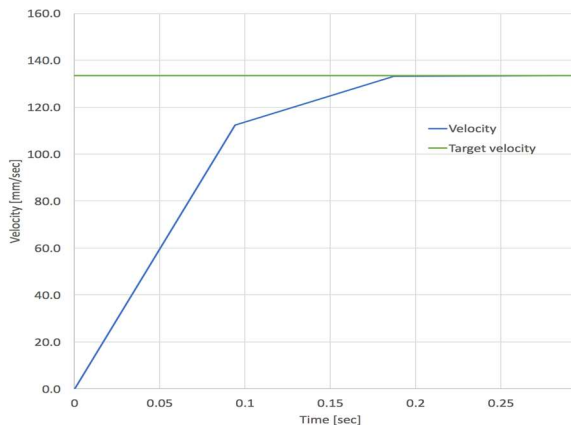


図 6 典型的な速度応答

Fig. 6 Typical time series variance of velocity response.

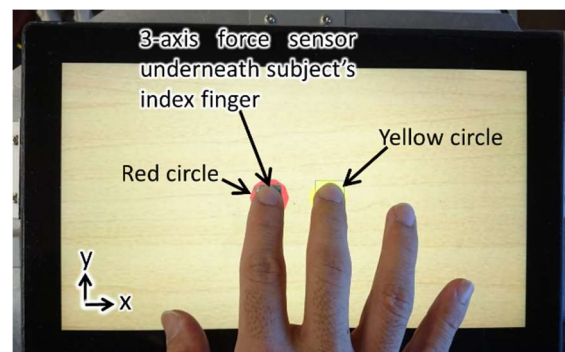


図 7 実験 1 の様子

Fig. 7 Overview of experiment 1

アプリケーションを想定した被験者実験を行い、提案手法の有効性を検証した。

5.1 実験 1: 反力提示実験

5.1.1 実験方法

本システムは、スクリーンの並進速度と回転速度を制御することで2本の指先に反力生成を行うシステムである。ここでは機能検証として本装置で両指に発生するせん断力を計測した。被験者には、Fig. 7 のように赤円と黄円の中心に右手の人差し指と中指を載せるように指示した。予備実験から、自然に手を広げたときの人差し指と中指のおおよその距離は 30 mm であったため、赤円と黄円の座標はそれぞれ(-15, 0)、(15, 0)とした。本システムは入力と反力に従い、スクリーンが動く。入力が0の時、反力の大きさに従いスクリーンが速度を持つので、それに対して被験者が入力を与えることでスクリーンを可能な限り初期位置で静止させるように指示した。なお初期位置とは各指が赤円と黄円の中心にある状態のことであり、スクリーンが移動してしまうとその分指が円からずれるようにした。指が円よりも外に出た瞬間を実験終了とした。反力提示の方法は、

- **方法 1:** 前方並進反力のみによる反力提示
- **方法 2:** 指の midpoint を回転中心とし、反時計回り回転反力のみによる反力提示
- **方法 3:** 指の midpoint を回転中心とし、前方並進反力及び反時計回り回転反力を組み合わせた反力提示
- **方法 4:** 人差し指を回転中心とし、前方並進反力と反時計回り回転反力を組み合わせた反力提示

の 4 種類について計測した。本システムは原理的に指先同士を結んだ直線方向に各指先に対して別々の反力を提示できないため、赤円と黄円を結ぶ直線に対して垂直方向、すなわち y 方向のみの反力生成を評価した。また、Fig. 5 の状態で指の midpoint を中心に反時計回りの回転反力を加えたとなると、人差し指に y 負方向、中指に y 正方向の反力が加わる。方法 1 と方法 2 では、反力目標値を並進反力、回転反力によって時間に比例して徐々に上げていき、方法 3 と方法 4 では、並進反力を 3 N まで時間に比例して徐々に上げ、そこから被験者が耐えられるまで回転力による反力を徐々に足し合わせた。また、各指の力の計測は本システムに構成されている 6 軸力センサのみではできないため、本実験では人差し指とスクリーンの間に 3 軸力覚センサ(タッチエンス株式会社の TSSI0D10C10)を設置した。中指の反力はスクリーン下の力センサと3軸力覚センサの差分から求めた。

5.1.2 実験結果

20 代の男性 10 人に対して本実験を行い、各指の目標反力、実際に各指に加わった反力の平均値、及び標準誤差を Fig. 8～Fig. 11 に示す。Fig. 10 では回転中心を

各指の midpoint としたため、3 N からそれぞれに逆方向に回転による反力が足し合わされた。Fig. 11 では人差し指を回転中心としたため、人差し指には回転による反力

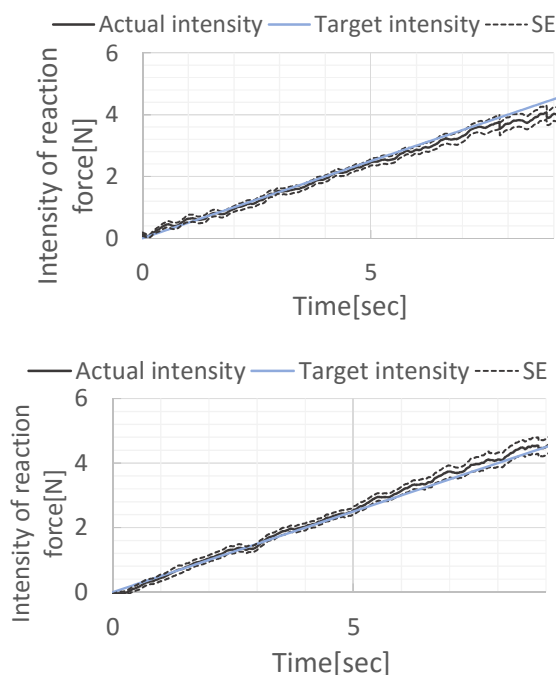


図 8 方法 1 における目標値と実際の反力(人差し指: 上、中指: 下)

Fig.8 Target intensity and actual intensity of reaction force in method 1 (index finger: top, middle finger: bottom)

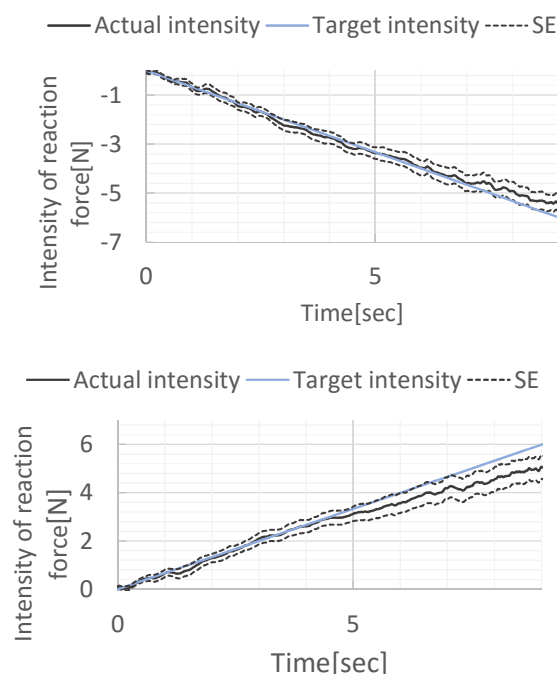


図 9 方法 2 における目標値と実際の反力(人差し指: 上、中指: 下)

Fig.9 Target intensity and actual intensity of reaction force in method 2 (index finger: top, middle finger: bottom)

は足し合わされなかった。Fig.8～Fig.11 のグラフを見るとおよそ目標値に追従していることがわかる。特に Fig.8 で示した並進反力のみの場合には目標値と等しい反力が提示された。また、Fig.9 で示した回転反力のみ

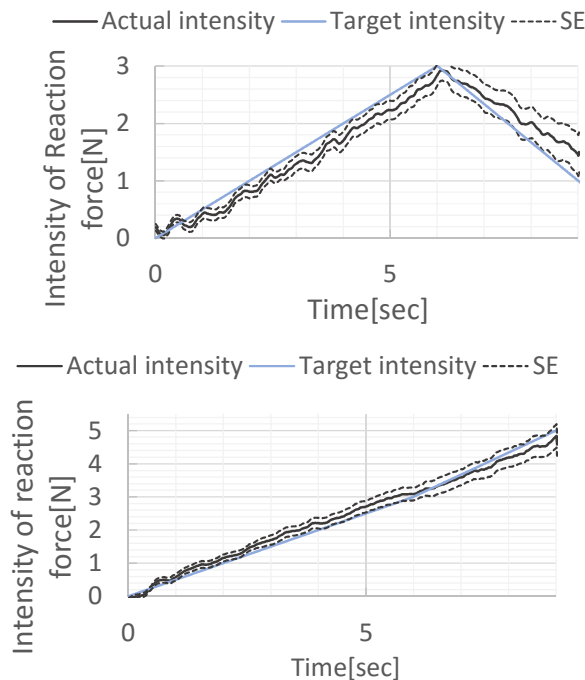


図 10 方法 3 における目標値と実際の反力(人差し指: 上、中指: 下)

Fig.10 Target intensity and actual intensity of reaction force in method 3 (index finger: top, middle finger: bottom)

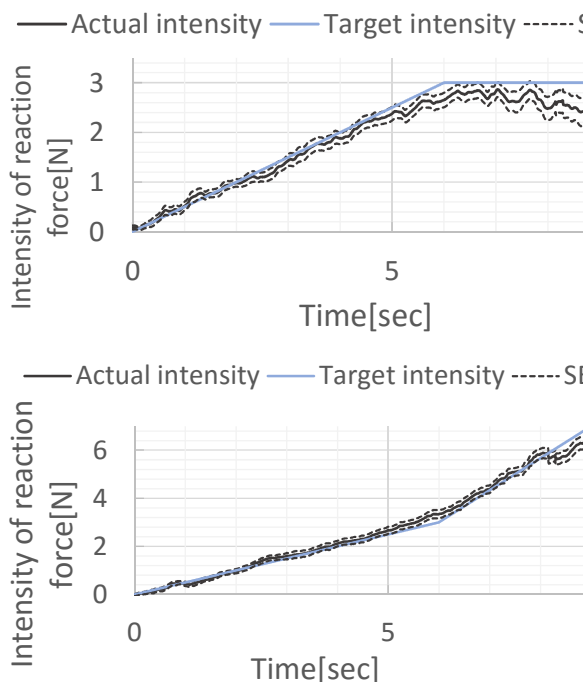


図 11 方法 4 における目標値と実際の反力(人差し指: 上、中指: 下)

Fig.11 Target intensity and actual intensity of reaction force in method 4 (index finger: top, middle finger: bottom)

の場合も目標値にほとんど一致しており、最大各指 6N ほどの反力提示が可能と言える。

また、並進と回転を組合せた場合では回転力を足し合わせてから人差し指での反力の誤差が大きくなった。手全体で y 負方向の力をかけながら、人差し指と中指を時計回りに回転させようとする、人差し指は y 正方向、中指は y 負方向に力を上昇させる必要がある。人間の手の構造上、中指は指の関節を屈曲させて y 負方向の力を調整しやすいが、人差し指は伸展した状態のため y 正方向への力は手首の回転力が主となる。しかしながら手首の回転可動範囲の限界のため、目標値との誤差が生じたと考えられる。しかしながら、目標値との誤差はあるものの、人差し指に関しても目標値に追従していることがわかる。一方で、中指に関しては、反力の目標値に一致した。なお、5秒を超えたあたりから小さめの反力とな流傾向にあった。これは主に指の滑りや疲労が原因と考えられる。

これらのことから、手の骨格構造に起因して力がかけにくい姿勢はあるものの、スクリーンの並進と回転及び回転中心を組合せることで 2 本の指に別々の反力を生成できたとと言える。

5.2 実験 2: 物体操作実験

5.2.1 実験方法

物体の操作において複数指を用いることで移動と回転が効率的に行えると考えられる。本システムはスクリーンにタッチしている間には指の間隔を変更できない。そのような場合でも図12のように VR 物体の隣り合う辺に指を押し当てて移動回転することで、1本指の時と比べて操作性が向上すると考えられる。そこで 20 代の男女 10 人 (男性 9 人、女性 1 人) の被験者に、Fig. 12 のように黒い線の枠の中に一辺 5 cm の正方形を移動させて収めるという操作を行わせた。物体と接触した際の反力はペナルティ法を用いて計算した。被験者は全員右利きであり、操作も右手で行わせた。今回、枠の一辺の長さは正方形のそれよりも 0.4 cm 長いものを用いた。このマージンは予備実験から被験者が枠の中に物体が収まっていな

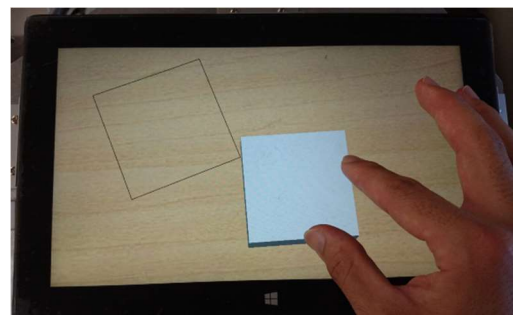


図 12 実験 2 の様子

Fig.12 Overview of experiment 3

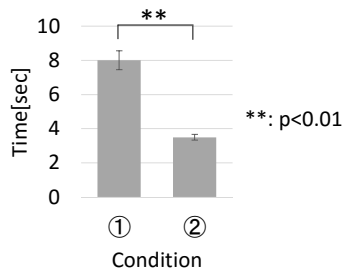


図 13 平均操作完了時間

Fig. 13 Average end time of the operation by using two different methods

いことが視覚的にわかるおおよそ最小の値であったからである。被験者には、人差し指のみを用いる場合(条件①)と、人差し指と親指を用いる場合(条件②)を4つの箇所に対して5試行ずつ移動操作を行わせ、それらの操作完了時間を計測した。4つの箇所とは正方形の中心が座標(5, 5)、(5, -5)、(-5, -5)、(-5, 5)であり、正方形の角度はランダムに決定した。なお、この座標値の単位はcmである。

5.2.2 実験結果

平均操作完了時間をまとめた結果をFig. 13に示す。エラーバーは標準誤差である。条件を要因とする一元配置の分散分析を行った。条件の主効果は $F(1, 798) = 187.7095$, $p < 0.001$ となり、条件の違いによる有意差があった。「**」は1%水準で有意差があったことを表している。また、平均操作完了時間は条件②の方が早かった。これらのことから本システムにおいても姿勢を調整しやすい2本の指での操作の方が物を運ぶような操作において操作性に優れていると言える。

5.3 実験3: 物体探索実験

5.3.1 実験方法

本システムは触診シミュレータに応用することが考えられる。このようなアプリケーションでは、視覚的に見えない物体内部にある硬いしこりや骨、異物などを探索するタスクが考えられる。効率よく全体像を把握するために、2本指の接触情報からその間の形状を補間して知覚することによる物体の状態を認識する動作があり得る。本システムでもそのようなことが可能であることを確認する実験を行なった。Fig. 14のように視覚的に場所の特定できない角度の異なる2種類の円柱に接触した時、どちらの円柱の角度が大きいかを被験者に答えさせた。この弁別を人差し指のみを用いる場合(条件①)と人差し指と中指を用いる場合(条件②)の2条件で行った。被験者にはx軸を基準値0準と考えて個々の円柱の角度を回答させた。また、角度は30さ、28さ、25さ、20さ、15さのうち2種類を選び、各組合せについて3試行ずつ行った。ただし、組合せは1試行ずつ異なるものをラ

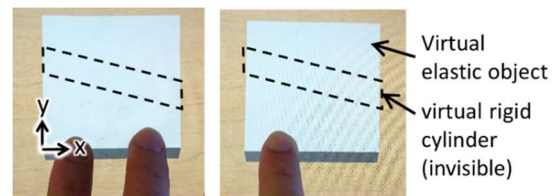


図 14 2本指で円柱探索を行う様子(左)、1本指で円柱探索を行う様子(右)

Fig. 14 Overview of searching rigid cylinder with two fingers (left) and with a finger (right)

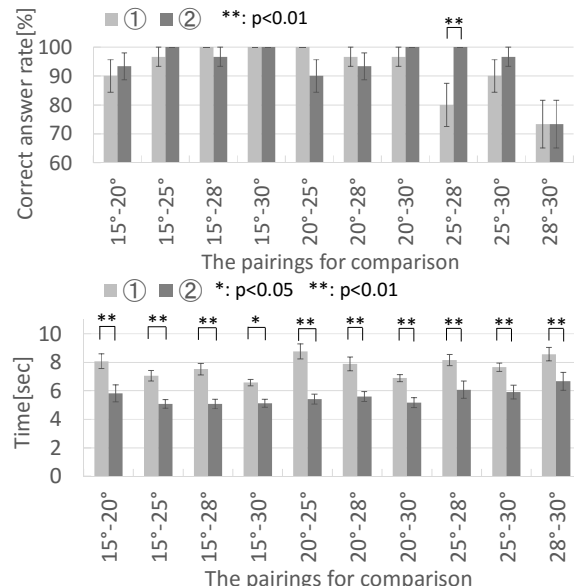


図 15 各組合せにおける平均正答率(上)、各組合せにおける平均回答時間(上)

Fig. 15 Average percentage of correct answers (top) and average time of answer (bottom) in each pair

ンダムな順番で提示した。被験者は20代の男女10人(男性9人、女性1人)の被験者である。物体と接触した際の反力はペナルティ法を用いて計算した。

5.3.2 実験結果

本実験の平均正答率及び平均回答時間をFig. 15に示す。各グラフのエラーバーは標準誤差である。正答率について条件と組合せを要因とする二元配置の分散分析を行った。条件の主効果は $F(1, 580) = 1.0482$, $p = 0.3064$ 、組合せの主効果は $F(9, 580) = 6.2762$, $p < 0.001$ となり、比べる角度の組合せによって正答率に有意差があった。また、回答時間について条件と組合せを要因とする二元配置の分散分析を行った。条件の主効果は $F(1, 580) = 123.3936$, $p < 0.001$ 、組合せの主効果は $F(9, 580) = 3.5918$, $p < 0.001$ となり、条件の違い、組合せの違いによって有意差があった。次に正答率において、組合せの各水準における条件の多重比較検定(Scheffeの方法)を行った結果、25°と28°を比較する場合に条件による有意

差があった。また回答時間において、組合せの各水準における条件の多重比較検定 (Scheffe の方法) を行った結果、全ての組合せで条件による有意差があった。Fig. 9 の「**」は 1 %水準の有意差を、「*」5 %水準で有意差があったペアを表す。

Fig.15(top)に示すように正答率について多重比較検定の結果では 25°と 28°比較時のみ有意差があった。これは比較する角度差が 5°以上、あるいは 2°以下なら条件による正答率の差はなく、角度差 3°程度なら 2 本指を用いた方が正確に弁別できると言える。また、Fig. 15 (bottom)に示すように回答時間は条件②の方が全ての弁別において有意に早かったと言える。これらのことから、本システムにおいても複数指で物体を捉えた方が物体の角度情報を正確に早く判断できると言える。

5.4 実験 4: 硬度分布知覚実験

5.4.1 実験方法

本システムはスクリーンに触れている間はスクリーン上での相対位置は変更しないことを前提にしているが、2本指それぞれに異なる力を提示できることから、場所によって硬さの異なる物体を提示することも可能である。これは前述の触診シミュレータでも部分的に硬さの異なる物体を触知覚できることを意味する。そこで2指での硬さの違いを知覚する実験によって本手法の有効性を検証した。20代の男女10人(男性9人、女性1人)の被験者に硬さの異なる2つのバーチャル物体に触らせ、どちらが硬いか答えさせた。この時2種類の触り方を指示した。一つは右手の人差し指で2つの物体を交互に触る方法(条件①)、もう一つは Fig. 16 のように人差し指と中指で2つの物体に同時に触る方法(条件②)であり、それぞれ3試行ずつ行なわせた。物体と接触した際の反力はペナルティ法を用いて計算した。

5.4.2 実験結果

2つの物体は Fig. 17 (left)のような弾性もつ物体を用意し、判断時間の平均を Fig. 17 (right)に示す。グラフのエラーバーは標準誤差である。条件を要因とする一元配置の分散分析を行った。条件の主効果は $F(1,58) = 24.3839$, $p < 0.001$ となり、条件の違いによる有意差があった。Fig. 21 (right)の「**」は 1 %水準で有意差があることを表している。また、どちらの条件の時でも正答率は 100 %であった。これらのことから、反力に大きな差が出る場合の硬さ知覚において2本の指を使う方が有意に早く判断できたとと言える。

6 考察

タッチスクリーンを用いた力覚提示装置の先行研究では、素手の複数指に対して力覚提示可能なシステムはなかった。本研究ではスクリーンにタッチしている間は手が剛体であることを前提として3自由度のアクチュエ



図 16 2本の指で硬さの異なる2つの物体に触る様子

Fig.16 Overview of discrimination with two fingers

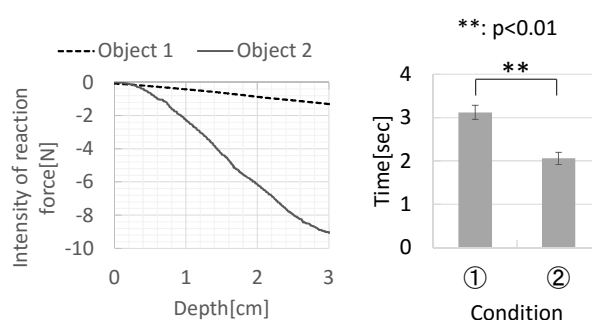


図 17 弾性体の押し込み量と反力の関係(左)、硬さの判断時間(右)

Fig.17 The relationship of amount of deformation and intensity of reaction force (left), average time of

ータのみを用いて素手の2指へ、両者を結ぶ方向の力は同一になるという制約があるものの、それと直交する方向には別々の力覚提示が、実現可能であることを示した。本システムは指の相対位置が変化する方向の力ベクトルは提示できない制約があるが、それと直交する方向は異なる反力を提示することができる。それを意識して VR 物体表面に対して指から加えるベクトルが垂直な方向になるよう持ち直すことで評価実験のような物体の状態認識・操作が可能である。実験の被験者からは、本手法は映像物体に接触した時に指だけでなく手全体が動くため、腕や手首の関節角度などの身体情報から物体情報を得やすいという感想もあった。また、剛体を把持している際は指の相対位置は変わらないが、把持動作による指先への反力と同じ方向に各指先に摩擦力が発生するため違和感はありませんという意見もあった。このように、本システムは制約があるものの、各指が独立して動かせるフルスペックの力覚提示装置でなくとも2本指を使った力覚付き作業環境を提供可能と言える。本手法は既存の3自由度平面力覚提示装置にも適用可能である。さらに、3本以上の指を揃えて一塊の物体のようにスクリーンに触った場合もその塊とバーチャル物体とのインタラクションとして本システムで力覚提示可能と考えられる。その意味で本論文ではマルチタッチとした。

なお、本システムは VR 物体との素手でのインタラクションが可能であるが、VR 物体表面のエッジはスクリー

ン面の凹凸の提示が必要となるため困難である。これには皮膚感覚提示装置との組み合わせが必要である。また、弾性体に触るような感覚は、本システムで提示可能な深部感覚のほかに皮膚感覚の提示も加わるとより弾性体に接触した感覚があると考えられる。そのためには、繁田ら[12]のように指の接触面積の変化を行うことが一つの有効な解決策であると考えられる。関連して、スクリーン上でのフリックの様な指を滑らせることには対応していない。例えば一本指で指を滑らせながら操作している場合に適切な摩擦力が発生することや、弾性体を挟み込んで変形するなどの指同士の相対距離が変わるような動作が考えられる。これにはスリップを検出できるような高速高精度な2次元位置センサなど指先とスクリーンとの間の状況を検出し、併せて高速な摩擦力制御が行える機構が必要で、今後の課題と言える。

7 まとめ

本研究では、3 自由度のアクチュエータのみで、制約があるものの 1 本指あるいは同時に 2 本指へ別々のせん断力を与える手法を提案した。本手法は複数指に対して個別の力覚提示を行うのではなく、2本指に対して簡単な機構で力覚提示を実現できる点で有用性があると言える。プロトタイプシステムを用いた機能評価実験を通して基本性能を検証した。また、物体操作や探索・角度知覚、硬さ知覚における複数指の優位性も示唆され、本手法の有効性が示された。

本システムの応用分野として、CAD への応用が考えられる。現在 CAD は視覚的に直感的な操作が可能になっており、そこに力覚を付与することでより直感的な操作が可能になると考えられる。本システムを用いる場合、評価実験からもわかる通り 2 本指で物体操作を行えるというメリットがある。さらに組立作業を行う場合に、手や VR 物体が他の VR 物体を遮蔽して、その下でどのような干渉が起こっているか目視で確認できないことがある。例えば、はめ込み作業では、1 本指で行うと物体の姿勢の調節が難しいため、死角でどのような干渉が起きているのか反力から知覚しづらい。しかし、複数指で行う場合は物体の姿勢を調整しやすく、各指に加わる反力の違いからどのような干渉が起きているのかが知覚しやすくなる。別の応用としては、医療教育分野への応用が考えられる。例えばバーチャルな触診を考えたとき、弾性物体内部のしこりを指で押すようにして発見するような作業が想定される。本システムでは硬い部分と柔らかい部分の反力差を知覚できるため、触診の練習が可能になる。本システムは水平方向のせん断方向の反力提示を行っているが、6 自由度のアクチュエータを設ければ 3 次元の反力生成も可能になるため、立体的なバーチャル人体の触知覚への応用も可能と考えられる。最後に、本システムのハードウェアは頑強な要素部品の組

み合わせになっているため、メンテナンス性に優れており、本システムは少ないメンテナンスで長期間の体験を実現する目的に使用することも考えられる。AsiaHaptics2016 における 3 日間のデモ展示でも問題なく稼働した。博物館などで説明員が張り付かなくても大人数の人が長期間体験可能なインタラクティブ展示への応用も期待できる。

謝辞

実験に協力頂いた上野朝稔氏に感謝する。本研究の一部は科研費 26540096 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Roudaut, A., Rau, A., Sterz, C., Plauth, M., Lopes, P., Baudisch, P.: Gesture Output: Eyes-Free Output Using a Force Feedback Touch Surface; In *Proceedings of CHI 2013*.
- [2] Kim S., Han B., Seo J., Kwon D.: Haptic Interaction with Virtual Geometry on Robotic Touch Surface; In *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2014*, Article No.8.
- [3] Sinclair, M., Pahud, M., Benko, H.: TouchMover 2.0 - 3D Touchscreen with Force Feedback and Haptic Texture; In *Proceedings of Haptics Symposium 2014*.
- [4] Takanaka, S., Yano, H., Iwata, H.: Multitouch Haptic Interface with Movable Touch Screen; In *Proceedings of SIGGRAPH Asia 2015*, Haptic Media And Contents Design Article No. 13, (2015)
- [5] 高中駿, 矢野博明, 岩田洋夫:”可動式タッチスクリーンを用いたマルチタッチ力覚提示”, 第 20 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.152-155(2015)
- [6] 高中駿, 矢野博明, 岩田洋夫:”可動式タッチスクリーンを用いたマルチタッチ力覚提示装置による弾性体表現”, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 14A-05(2016)
- [7] Takanaka, S., Yano, H., Iwata, H.: 3DOF Multitouch Haptic Interface with Movable Touchscreen; In *Proceedings of Asia Haptics 2016*, 32A-1.
- [8] Bau, O., Poupyrev, I., Israr A., Harrison, C.: TeslaTouch: Electrovibration for Touch Surfaces; In *proceedings of UIST 2010*, pp.283-292.
- [9] Nakamura, T., Yamamoto, A.: Multi-finger Electrostatic Passive Haptic Feedback on a Visual Display; In *Proceeding of World Haptics Conference 2013*, IEEE, 2013, pp. 37-42.
- [10] Erik C. Chubb, J. Edward Colgate, Michael A. Peshkin: ShiverPaD: A Glass Haptic Surface That Produces Shear Force on a Bare Finger; In *proceedings of Transactions on Haptics*, IEEE, 2010, Volume: 3, Issue: 3, pp. 189 – 198.
- [11] Norieda, S., Sato, M.: A New Haptic Touch Panel Display with Optimum Control Approach; In *Proceedings of IPSJ Interaction 2012*.
- [12] 繁田悠, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城理: “皮膚接触面積の計測と制御による視触覚タッチ パネル”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3, pp.299-302,2011. (2017 年 3 月 13 日受付)

[著者紹介]

高中 駿（非会員）



2015 年筑波大学理工学群工学システム学類卒業。2017 年筑波大学大学院システム情報工学研究科博士前期課程修了。在学中は複数指への力覚提示に関する研究に従事。修士(工学)。

矢野博明（正会員）



1997 年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD)。1999 年筑波大学講師、2017 年より同大システム情報系教授。力覚提示、歩行感覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田洋夫（正会員）



1986 年東京大学大学院工学系研究科修了。同年筑波大学構造工学系助手。現在、筑波大学システム情報系教授。バーチャルリアリティ、特に力覚提示、歩行感覚提示、没入型ディスプレイの研究に従事。工学博士。