

仮想物体への指挿入感提示方式の考案と試作デバイス開発

Development of Haptic Device Providing Virtual Tactile Sensation of Finger Insertion into Flexible Object

佐野洋平, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行
Yohei Sano, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, and Hideyuki Tamura

立命館大学大学院 情報理工学研究科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Abstract: In recent years, there is a growing interest in developing haptic device to help users perceive virtual objects. However, many of the previous studies focused on perceiving the shape or the texture of the virtual objects. In this study, we propose a haptic device to provide virtual tactile sensation of finger insertion into objects. The device combines pressure and vibration stimulation based on the user's finger movement. We conducted an experiment to verify whether our device can give tactile sensation of finger insertion or not. The results confirmed that users were able to perceive tactile sensation of finger insertion by using our device.

Key Words: Haptic device, Virtual Reality, Wearable interface

1. はじめに

触力覚提示技術の進歩により, 視覚や聴覚に対して情報提示を行うだけでなく, 触知覚を積極的に活用する研究が増加している. 特に人工現実感 (Virtual Reality; VR) 分野では, 医療分野における手術シミュレーションや建築・都市計画での景観シミュレーションなど, 体験者が仮想物体とインタラクションを行う際に, 触力覚情報を積極的に活用する例が多く見られる[1][2].

代表的な触力覚装置である PHAMToM[5]や SPIDER[2]は, 仮想物体の形状や硬さ, 重さ, 素材など多様な触感を提示できる. しかし, このような据え置き型の触力覚装置は大がかりなものが多く, VR 空間で体験者の行動を制限してしまうという問題がある. これに対して, 物体との接触感覚や重さや質感など, 提示可能な触力覚の種類を限定することで, 体験者に直接装着可能なサイズとする, 触力覚提示デバイスに関する研究も進められている[3][4].

これまで様々な触感を提示可能な装着型触力覚提示デバイスが提案されてきたが, 柔軟物体の内部に直接触れる感覚を提示する触力覚提示デバイスはあまり見られない. 液体や粒子といった柔軟な物体は触れることで形状が変化し, 触れている手指をさらに押し込むことで手指が物体内部へと入り込む. この際に, 手指にかかる摩擦や圧迫といった刺激を触力覚デバイスにより提示することで, 手指を柔軟物体に挿入する感覚が得られると考えられる.

本研究では, 柔軟物体の内部へ指を挿入する際の触感を提示する手法として, 振動刺激および圧迫刺激を提示する機構を提案・設計する. また, 設計した機構を備えたデバイスを試作し, 提案手法により指が柔軟物体に入り込む感

覚を提示可能であるか確認する実験を行う.

2. 設計と実装

2.1 提示手法の検討

人は指に受ける刺激を皮膚感覚と深部感覚から知覚する. 皮膚感覚とは皮膚に点在するマイスナー小体, パチニ小体, ルフィニ小体といった受容器によって知覚する触覚や圧覚などの感覚である. もう一方の深部感覚とは筋紡錘や腱紡錘などの受容器によって知覚する身体の部位の位置覚や運動覚, 抵抗覚などの感覚である. 実際に柔軟物体に指を挿入する際には, 指と物体との接触面に生じる摩擦感, 周囲の物体によって指が受ける圧覚などが, これらの受容器により知覚されていると考えられる. そこで本研究では, 指に対して摩擦感および圧覚の提示を行うことで, 柔軟物体内部へ指を挿入する感覚の提示を試みる.

摩擦感の提示手法には, PHAMToM などを用いて直接, 指腹部に接線力を提示する方法や[5], 振動刺激によって生じる皮膚感覚を利用する方法[6]などが存在するが, 本研究では装着型のデバイスを指向しているため, 振動によって指腹部の皮膚に対して摩擦感を提示する手法を採用する.

圧覚の知覚には主にルフィニ小体, パチニ小体が関わっていると考えられている. これらの受容器は皮膚変形を伴う刺激に対して反応を示す. そこで, 指の皮膚に対して周囲から指の皮膚内部方向に圧迫刺激を生じさせることで, 皮膚変形を伴った圧覚提示が可能であると考えられる.

実際に柔軟物体へ指を挿入する際には, 指の動きに応じて, 連続的に摩擦感および圧覚が提示される. 本提案手法でも, 振動刺激による摩擦感提示と, 圧迫刺激による圧覚の提示を適宜制御する必要がある.

2.2 デバイスの設計と実装

柔軟物体へ指を挿入する際に生じる摩擦感および圧覚を提示する手法として、図 1, 2 に示す機構を提案する。指腹部の皮膚に対して摩擦感を提示するために、振動モータを並置し振動刺激を与える（図 1）。また指への圧覚提示には、図 2 に示すような、サーボモータにより紐を牽引し、指の周囲に向かって垂直方向の力を発生させる。

多数のサーボモータをデバイスに搭載するとデバイスが大型となり重量も増加するため、搭載するサーボモータは少ないことが望ましい。しかし手指における二点弁別閾は 2~3mm であり [7]、少数のサーボモータでは、それぞれのサーボモータおよび紐の間隔が、手指における二点弁別閾よりも広くなる。そのため、直接手指に紐を用いて刺激を与えると、刺激をそれぞれ独立した刺激として認識してしまう。そこで本機構では、ジェリーキャストというエポキシ樹脂から成る、柔軟性を持つ物体を指の周囲に装着し、その上から紐による圧迫を行うことで皮膚にかかる圧力を分散させ、少数のサーボモータで手指全体に圧迫刺激を与える。

これらの提案機構に基づき、図 3 に示すデバイスを設計した。本デバイスは SAVOX 社製のサーボモータ (SC-1251MG) 3つ、ジェリーキャスト、紐、TPC 社製の振動モータ (FM34F) 3つにより構成する。振動刺激の提示に用いる振動子は、指先、第 1 関節と第 2 関節の間、指の根本の 3 箇所配置する（図 1）。

この設計を元に、試作したデバイスを図 4 に示す。ユーザは筒状に成形されたジェリーキャスト内に指を入れた状態でデバイスを利用する。デバイス側部には圧覚を提示するためのサーボモータ、ジェリーキャストと外装の間には摩擦感を提示するための振動モータが設置されており、これらの駆動を制御することで、挿入感を提示する。例えば、指を柔軟物体に挿入する感覚を提示する場合には、指先から指の付け根に向かって、サーボモータ、振動モータを順に駆動する。

3. 実験目的と実験環境

3.1 実験目的

実装した挿入感提示デバイスを用いて、摩擦感および圧覚の提示を行うことで、柔軟物体に指を挿入する感覚を提示可能であるか確認する。

加えて、人の触力覚は視覚からの影響を受けることが知られている [8][9][10] ことから、本研究でも、指の動きに合わせて仮想物体が変形する、といった視覚刺激の有無が挿入時の触感に影響を及ぼすか確認する。

実験は摩擦感のみ、圧覚のみ、摩擦感と圧覚を同時に与えた場合の 3 つの条件について行い、実験後それぞれの結果を比較する。

3.2 実験環境

実験で利用するシステムの構成を図 5 に示す。被験者は Head Mounted Display (HMD) (Canon 社製 VH-2002) を装着し、VR 環境下で実験を行う。仮想物体の描画（ステレオ

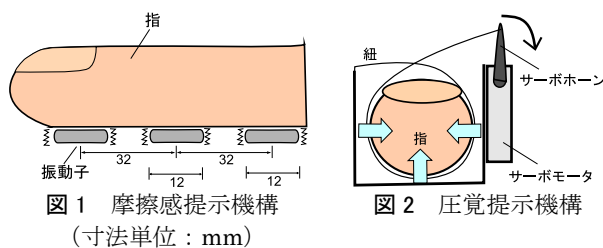


図 1 摩擦感提示機構 (寸法単位: mm)

図 2 圧覚提示機構

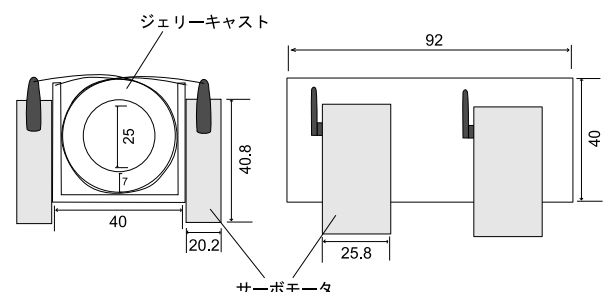


図 3 デバイス構成図 (寸法単位: mm)

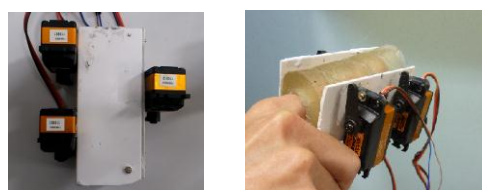


図 4 デバイスの外観

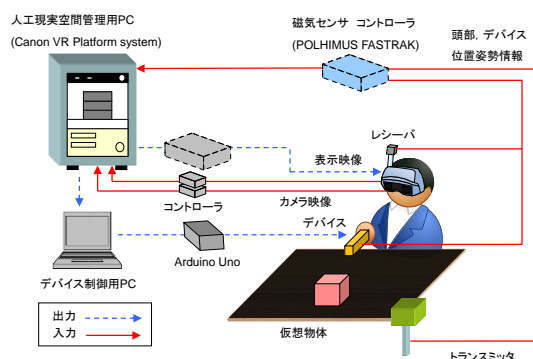


図 5 システム構成

画像)は、3次元映像生成兼 VR 空間管理用 PC により行い、被験者は仮想物体を両眼立体視することができる。被験者の頭部および指先 (デバイス) の位置姿勢検出には Polhemus 社製磁気センサ 3SPACE FASTRAK を使用する。磁気センサによって得られた位置姿勢情報よりデバイスと仮想物体間の距離を算出することで、指が仮想物体に挿入された距離を取得する。この値に応じて AVR マイクロコントローラを備えたコントロールボード (Arduino Uno) からモータを制御し、振動刺激と圧迫刺激の提示を行う。また、デバイス制御用 PC には松下電器産業製 (現: パナソニック) Let'sNoteR5 を用いる。

4. 実験

4.1 実験方法

被験者は右手人差し指に挿入感提示デバイスを装着し、仮想物体に指が挿入された量に応じて、人差し指に振動刺激と圧迫刺激を提示する。被験者の正面には幅 250mm、高さ 250mm、奥行き 250mm の仮想物体 (図 6) が提示

され、被験者には仮想物体に対して指を押し込む動作を行わせる (図 7)。

実験では、指と仮想物体が接触した際に、指の位置と動きに応じて、デバイスに搭載された振動子が振動する。具体的には、指が仮想物体へ 32mm 挿入される毎に、第 1 関節と第 2 関節の間の振動子、指の付け根の振動子の順に全ての振動子が振動する。ただし指を静止させた状態では指が仮想物体に挿入された状態でも振動刺激の提示は行われない。圧迫刺激も同様に、指の位置と動きに応じて、指先に位置するサーボモータから指の根本に位置するサーボモータが、順次作動する。

視覚刺激としては、視覚刺激の有無による知覚の変化を確認するため、「目を閉じ、視覚刺激を見ない場合 (視覚刺激なし)」「図 6 (a) の仮想物体は提示されるが指を挿入しても仮想物体が変形しない場合 (アニメーションなし)」「図 6 (b) のように指を挿入すると仮想物体が変形する場合 (アニメーションあり)」の 3 つの条件について実験を行う。

デバイスによって提示される挿入感と実際の挿入感を比較するため、指を挿入できる程度の切り込みを入れた、円の直径 40mm×奥行き 75mm の円柱状のジェリーキャストを標準刺激として用いる。被験者は目を閉じた状態で実物体に対し指を挿入する。この際に指が受けた感覚を標準刺激とし、デバイスによって提示される感覚を比較刺激とする。標準刺激と比較刺激を比較して「異なる感覚として感じた」を 1、「少なからず、似た感覚に感じた」を 2、「同様の感覚として感じた」を 3 として回答させる。

被験者は 20 代の学生 5 名、実験手順は以下の通り。

- (1) HMD とデバイスを装着せず、目を閉じた状態で、実物体 (ジェリーキャスト) に指を挿入し、その触感を標準刺激として記憶する
- (2) 右手左指に試作デバイスを装着し、仮想物体に指を押し込み、その触感を、比較刺激として記憶する
- (3) 標準刺激と比較刺激を比較し 3 段階で回答させる

触力覚に対しては、振動刺激のみ、圧迫刺激のみ、振動刺激と圧迫刺激を同時に与えた場合の 3 条件、視覚に対しても、視覚刺激なし、アニメーションなし、アニメーションありの 3 条件を組み合わせた計 9 種類の条件について被験者毎にランダムな順番で (1)～(3) を繰り返す。

4.2 結果と考察

振動刺激のみ提示した結果を表 1 に、圧迫刺激のみ提示した結果を表 2 に、振動刺激と圧迫刺激の両方を提示した結果を表 3 に示す。表 1 より、視覚刺激なしの場合には 5 人、アニメーションなしの場合には 4 人の被験者が、比較刺激は標準刺激と異なると回答した。しかし、アニメーションありの場合は全ての被験者が標準刺激と比較刺激を、少なからず似た感覚であると回答した。このことから、視覚刺激の有無、特に仮想物体のアニメーションが振動刺激の知覚に影響を与えており、指の動きに応じて視覚刺激が変化することで指が物体に挿入する感覚をより強く知覚させることが示された。しかし実験後に聴取した意見では

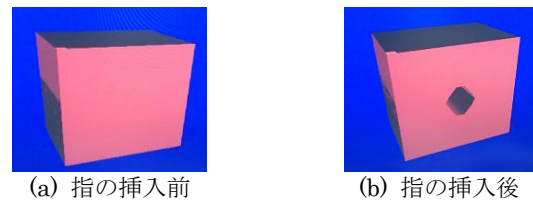


図 6 HMD に提示するアニメーション



図 7 実験風景

表 1 実験結果 (摩擦感刺激のみ)

	視覚刺激なし	アニメーションなし	アニメーションあり
被験者 1	1	1	2
被験者 2	1	1	2
被験者 3	1	1	2
被験者 4	1	2	2
被験者 5	1	1	2

表 2 実験結果 (圧覚刺激のみ)

	視覚刺激なし	アニメーションなし	アニメーションあり
被験者 1	3	3	3
被験者 2	2	2	2
被験者 3	3	3	3
被験者 4	2	2	3
被験者 5	2	3	3

表 3 実験結果 (摩擦刺激と圧覚刺激)

	視覚刺激なし	アニメーションなし	アニメーションあり
被験者 1	2	2	2
被験者 2	2	2	2
被験者 3	3	3	3
被験者 4	2	2	2
被験者 5	2	2	2

「標準刺激で知覚する摩擦とは異なり、振動として感じた」という回答もあり、本デバイスによる指腹部への振動刺激では物体に指を挿入する感覚を強めることは可能であるが、摩擦感そのものは提示できていないことが分かった。

表 2 では、いずれの条件においても、全ての被験者が標準刺激と同様、または少なからず似ている感覚がデバイスにより提示されたと回答した。この結果から、圧迫刺激を提示することで物体に指を挿入する感覚を提示できていることが分かる。また「アニメーションを提示した際には、標準刺激と非常に近い感覚だった」というコメントが得られ、アニメーションの提示によって 5 名中 4 名の被験者が比較刺激を標準刺激と同様の感覚と回答した。

表 3 では、すべての被験者が、視覚刺激およびアニメー

ションの有無に拘わらず、標準刺激と同様、または少なからず似ている感覚が得られたと回答した。しかし、圧迫刺激のみの提示と比べると、比較刺激を標準刺激と同様の感覚であると回答した被験者は減少した。被験者からは「振動刺激を知覚できない」「振動刺激が邪魔をしているように感じる」というコメントも得られたことから、指腹部への圧迫刺激により振動刺激を知覚しにくくなる可能性がある。また、視覚刺激の有無に拘わらず、全ての被験者の回答に変化は見られなかった。更に「視覚刺激によって知覚に変化はあるが、標準刺激と同様の刺激とは言えない」という意見が得られた。これらの結果から、振動刺激と圧迫刺激を同時に提示した場合においては、視覚刺激の提示による挿入感への影響は小さいといえる。

以上の結果をまとめると、

- (1) 圧迫刺激と比較すると、振動刺激の提示は指が物体に挿入される感覚の提示に有効でない
- (2) 指の動きに応じて圧迫刺激を提示することで、指が物体に挿入される感覚が提示できる
- (3) 圧迫刺激と振動刺激を同時に提示した場合、圧迫刺激のみの提示と比較して、実際の挿入感とは異なるものであると感じられる

(1)(2)より、提案手法に従って圧迫刺激を提示することで、被験者に指が物体に挿入される感覚の提示が可能であるとわかった。また(3)より、提案手法において振動刺激の提示は必要ないといえる。(3)の結果は、圧迫刺激の提示による指腹部の皮膚変形によって振動刺激が知覚されにくくなったことが原因と考えられる。振動刺激が知覚されにくくなったことで、振動刺激が摩擦感として知覚されず、被験者が違和感を覚えたのではないかと考えられる。

5. むすび

本研究では、柔軟な物体の内部に指を挿入する感覚の提示手法を検討し、デバイスを試作した。また試作したデバイスを用いて実験を行い、検討手法によって物体内部に指を挿入する感覚を提示可能であるか確認した。具体的には、振動刺激のみ、圧迫刺激のみ、振動刺激と圧迫刺激を同時に提示の3つの条件において、実物体に指を挿入した時に生じる感覚を標準刺激、デバイスによって提示する感覚を比較刺激として、それぞれを比較し、検討手法によって柔軟物体に指を挿入する感覚を提示可能であるか確認する実験を行った。被験者には標準刺激と比較刺激を比較した際の感覚の違いについて3段階で回答させた。また視覚刺激として、指の動きに応じて仮想物体が変形するアニメーションを提示し、視覚刺激なし、アニメーションなし/ありの3つの条件において、視覚刺激が挿入感に影響を及ぼすか確認した。今回、標準刺激としてジェリーキャストを用いたが、今後は他の素材でも同様の回答が得られるのか実験を行う。加えて、指の周囲に装着する素材や硬度の違いによって知覚する感覚に差異が生じる可能性がある。そ

こで、素材や硬度を変更した際に、どのような影響が見られるか確認を行う。また今回の結果より、視覚刺激を変えて被験者の知覚にも影響を及ぼすことが判明した。そこでテクスチャの変更やアニメーション提示の変更といった視覚刺激の変更が、挿入感に与える影響に違いが見られるのかについても実験を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、科研費・基盤研究B「複合現実型視覚刺激が及ぼす触印象に関する研究」による。

参考文献

- [1] G. Bianchi *et al.*: “High precision augmented reality haptics,” *Proc. EuroHaptics 2006*, pp. 169 - 178, 2006.
- [2] 木野仁 他: “シリアルリンク機構/パラレルワイヤ駆動システムによる力覚呈示装置の開発”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1 pp. 3 - 8, 2002.
- [3] 南澤孝太 他: “バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 15 - 23, 2008.
- [4] 鈴木隆裕 他: “把持型デバイスを用いた振動による柔らかさ提示”, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 29, pp. 1 - 8, 2011.
- [5] 川崎晴久 他: “多指ハプティックインターフェイスを用いた物体把持における摩擦力の呈示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No 1, pp. 39 - 45, 2006.
- [6] 昆陽雅司 他: “振動刺激を用いた疑似力覚の呈示”, 第15回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 314 - 317, 2010.
- [7] A. B. Valbo *et al.*: “The tactile sensory innervation of the glabrous skin of the human hand,” *Active touch*, pp. 29 - 54, 1978.
- [8] 平野有一 他: “Dent-Softness Illusion: 複合現実型視覚刺激による硬さ知覚への影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No. 2, pp. 271 - 278, 2011.
- [9] 木村朝子 他: “Shape-COG Illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 261 - 269, 2011.
- [10] 佐々木博 他: “力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 795 - 802, 2000.