

# 単一モータで動作する巻物型触覚提示装置

太田裕紀<sup>1)</sup>, 平尾悠太郎<sup>1)</sup>, Perusquía-Hernández Monica<sup>1)</sup>, 内山英昭<sup>1)</sup>, 清川清<sup>1)</sup>

Hiroki OTA, Yutaro HIRAO, Monica Perusquía-Hernández, Hideaki UCHIYAMA, and Kiyoshi KIYOKAWA

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5, {ota.hiroki.oc6, yutaro.hirao, m.perusquia, hideaki.uchiyama, kiyo}@is.naist.jp)

**概要:** 巻物は一連のシート上に様々な情報を配置できる。また、シートを巻き取ることによって巻物の太さが増える。これらの性質に着想を得た触覚提示装置を提案する。提案する装置は巻物と同様に、2つの軸とシートを備える。予めシート上に配置された穴や物体を把持部へと移動させることで、単一のモータのみを用いて多様な触覚を提示する。提示可能な触覚の例として、質感、柔らかさ、大きさ、形状などが挙げられる。大きさと形状の提示機能に着目して実験を行った結果、ユーザは装置が提示する大きさや形状を弁別可能であることが明らかになった。

**キーワード:** 巻物型触覚提示装置, ウェアラブル, VR

## 1. はじめに

身の回りの物体に触れたときに感じられる触覚刺激は、私達が物体を自然に操作することを助ける。触覚刺激は現実の物体に限らず、Head-mounted display (HMD) を使用した Virtual Reality (VR) 環境でも重要である。バーチャル物体の触覚刺激を提示することで、バーチャル物体をより自然に操作することが可能となり、VR 体験の現実感が補強される [2]。

VR 体験と併用する触覚提示手法として広く用いられているのは振動子を用いた手法である。バーチャル物体とインタラクションを行う際にコントローラが振動することで、触覚的な手掛りを提示する。しかし、振動子は一般的に出力が低い。また、現実の物体に触れたときに感じられる幾何学的特性 (大きさ・形状) や材料特性 (表面粗さ, 柔らかさ, 熱的品質) などを再現することは難しい。

そこで、より広範な触覚刺激の提示を目的とした触覚提示装置やシステムが数多く提案されている [3]。例として、指先の相対位置を固定することでバーチャル物体の幾何学的特性を提示する方法 [1] や、指先に触れる材質を変化させることで材料特性を提示する方法 [4] などがある。

しかしながら、こういった装置は主に幾何学的特性と材料特性のいずれか 1 つを提示することに特化している。幾何学的特性と材料特性の両者を提示するために、複数の装置や機構を組み合わせることも可能だが、その場合装置が複雑化するという問題がある。

そこで本研究では、単純な機構でありながら複数種類の触覚刺激を提示できる装置を開発し、装置が提示する触覚刺激の有効性を調査する。この触覚提示装置は巻物に着想を得た特徴的な機構を有する。この機構は単一のモータのみで動作する。布や紙上に複数の絵や情報を配置・提示できる巻物と同様に、シート上に配置された様々な触覚刺激

をユーザに提示することができる。以下に本研究の主な貢献を示す。

- 幾何学的特性と材料特性の提示が可能な巻物型触覚提示装置の提案
- 大きさと形状の提示機能における有効性の調査

## 2. 巻物型触覚提示装置

巻物に着想を得た機構による触覚提示の概念図を図 1 に示す。まず、図 1 A に示すように、軸周りの太さが変化することで、様々な太さの円筒形の物体を提示する。次に、図 1 B に示すように、シート上に配置された穴の端部を用いて指先の相対位置を拘束することで、直方体などを把持した感覚を提示する。また、図 1 C に示すように、シートの張力を変化させることで柔らかさを提示する。最後に、図 1 D に示すように、シート状に配置された材質を指先に移動させることで、表面粗さや熱的品質などの材料特性を提示する。

これらのインタラクションを実現するための機構を備え

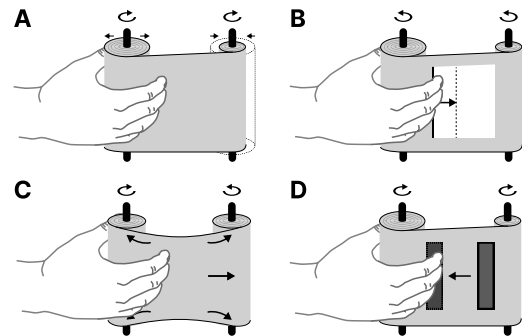


図 1: (A) 軸の回転による太さの変化, (B) 穴の端部による指先の拘束, (C) 張力の変化による柔らかさ提示, (D) 材質の移動による質感提示

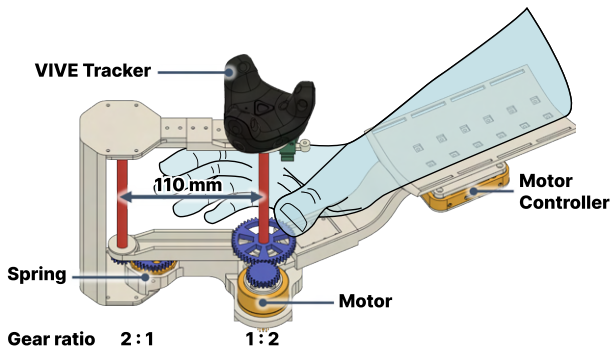


図 2: 試作における各部の構成

た装置を開発した。装置の概要を図 2 に示す。提案装置は巻物部、駆動部品、固定部品という 3 つの要素から構成される。それぞれの要素について個別に詳説する。

### 2.1 巻物部

巻物部は 2 つの軸とシートによって構成される。軸は直径 10 mm、高さ 110 mm の円筒形であり、駆動部の動力を伝達するための歯車と、固定用の回転軸受を備える。シートは厚さ 1 mm、高さ 100 mm、幅 1000 mm の長方形である。このシートの寸法から、シートの巻数は最大で 14 回となる。このときの軸周りの直径は 38 mm である。シートの材質としては、「EVA フォーム」、「シリコンゴム」、「フェルト」、「塩化ビニル樹脂」などの素材を検討した。軽量かつ柔軟でありながら、弾性や可塑性が低いことから、EVA フォームを採用した。

### 2.2 駆動部品

提案装置は 2 種類の駆動部品を用いる。1 つは軸を能動的に駆動するモータであり、もう 1 つはシートに張力を与えるゼンマイバネ (バネ定数 0.41 Nmm) である。能動的に制御する駆動部品が単一のモータのみであることは、提案装置の大きな特徴である。モータは、14bit 磁気式ロータリーエンコーダを内蔵したアウターロータモータ (KM-1S-M4021TS) を選定した。モータの最大回転速度は 720 rpm、最大トルクは 0.1 Nm である。モータの回転は歯車によって 0.5 倍に減速され、手側の軸へと伝わる。

### 2.3 固定部品

巻物部と駆動部を前腕に固定するためにベルクロテープを使用した。これにより、ユーザは装置を完全に手放すことができる。固定部品と駆動部品を繋ぐジョイントは 1 軸の回転自由度を有し、ユーザの手と巻物部のなす角度を調整可能である。また、巻物部は取り外し可能となっており、異なる種類のシートに簡単に取り替えられる。巻物部や駆動部を除く各部品は 3D プリンタで製作した。

## 3. 装置の動作

### 3.1 大きさ提示

大きさの提示方法を図 3 に示す。提案装置は 2 種類の方法でバーチャル物体の大きさを再現する。1 つ目は、図 3 A に示すように軸周りの直径を変化させる方法である。最小

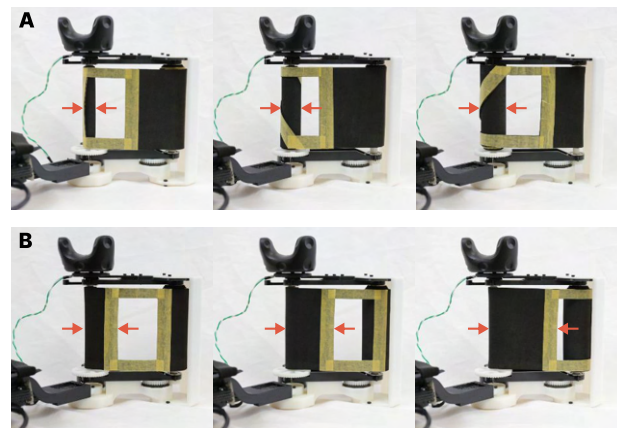


図 3: 2 種類の大きさ提示手法

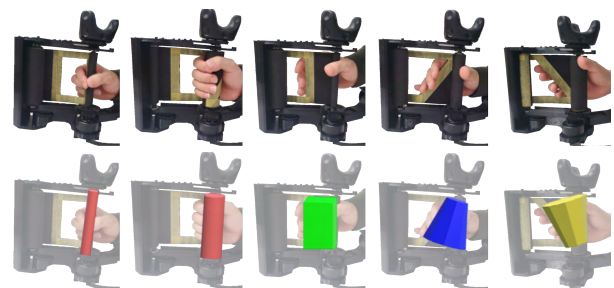


図 4: 穴の形状と提示するバーチャル物体の形状

で太さ 10 mm、最大で太さ 38 mm を提示することが可能である。2 つ目は、図 3 B に示すようにシート上に配置した穴の端部で指先を拘束する方法である。親指と他の指の距離が変化することで、異なる大きさを提示する。最大で 100 mm 程度の大きさを提示することができる。

### 3.2 形状提示

形状の提示方法を図 4 に示す。提案装置は、シート上に配置する穴の形状によって指の相対位置を拘束することで、複数種類の 3 次元形状を表現する。表現可能なバーチャル物体の具体例としては、ペン、ボトル、箱、フラスコ、カップなどが挙げられる。現在、シートの幅を 1000 mm としているため、実用的に配置可能な穴の種類は最大で 5 種類である。

### 3.3 柔らかさ提示

シートの張力を変化させることで、柔らかさを提示することができる。モータには「停止」命令を実行する機能が搭載されており、この命令を受信したモータは磁気ブレーキとして機能する。このとき、シートの張力はゼンマイのトルクと軸周りの太さ (プリー比) にそれぞれ比例する。また、ゼンマイのトルクと軸周りの太さは軸の回転数に比例するので、シートの張力は軸の回転数の 2 乗に比例する。したがって、モータを指定角度に回転させて停止命令を送信することで、柔らかさを提示することができる。

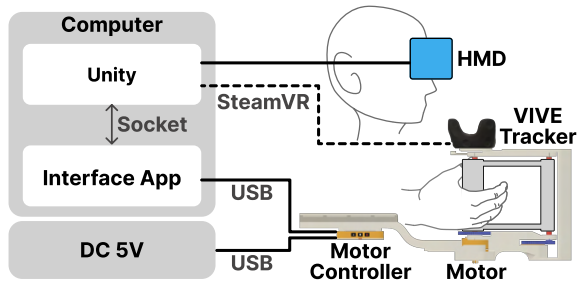


図 5: システム全体の構成

### 3.4 質感提示

シート上に配置した材質を手元に移動させることで、ユーザの手に触れる質感を変化させることができる。配置可能な材質は薄片に限られるが、アルミ箔を配置することで金属の質感を提示することや、紙やすりを配置することで異なる表面粗さの質感を提示することが可能である。

## 4. システムとアプリケーション

### 4.1 システム

システム全体の構成を図 5 に示す。システムは大きく分けて 2 つの要素で構成される。1 つは Unity で構築されたインタラクション機能であり、もう 1 つが Python 言語で記述されたインタフェースアプリである。Unity で構築されたインタラクション部分では、VIVE Tracker (3.0) を介して装置の位置と姿勢を取得し、HMD である VIVE Pro に描画された映像へと反映している。また、装置とバーチャル物体の位置に応じて、あらかじめ設定されたモータの回転角度をインタフェースアプリへと送信している。インタフェースアプリとの通信にはソケット通信を使用している。

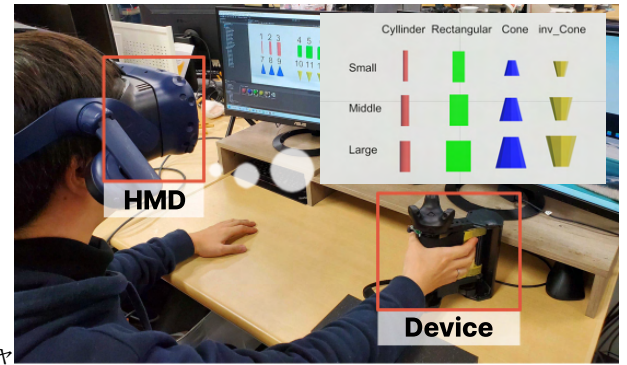
Python 言語で記述されたインタフェースアプリは Unity との通信とモータ制御指令の送信を行っている。モータの制御指令としては、位置制御やトルク制御などが可能である。基本的には位置制御機能を使用しており、Unity から送信された角度へとモータを回転させる指令をモータコントローラに送信している。

### 4.2 アプリケーション

装置のコンセプトと機能をテストするために、2 種類のシンプルなアプリケーションを作成した。1 つは大きさと形状の提示を行うアプリケーションであり、もう 1 つは質感の提示を行うアプリケーションである。

大きさと形状の提示を行うアプリケーションでは、VR シーン内で様々な 3 次元形状のバーチャル物体を掴み、移動することができる。このアプリケーションは、複数の穴が配置されたシートを装置にセットして体験する。

質感の提示を行うアプリケーションでは、VR シーン内で異なる色の平面に触れることができる。ユーザが手を近づけた面に応じて、異なる質感を提示する。このアプリケーションは、複数の材質が配置されたシートをセットして体験する。



バーチャ

図 6: 大きさと形状の再現性評価実験

## 5. 実験

### 5.1 参加者

実験には合計 8 人 (男性 6 人, 女性 2 人, 平均年齢:22.8 歳, SD=3.06) が参加した。すべての参加者は右利きだった。また、この実験は大学の倫理審査を通過して実施された。

### 5.2 実験設計

図 6 に示すように、VIVE Pro を HMD として用いて、参加者が研究用のバーチャル環境を観察できるようにした。参加者がデバイスに安定して触れることができるように、装置は机の上に置かれていた。また、手と装置の位置関係が大きく変化しないようにするため、バルクロテープを用いてユーザの前腕に対して装置を固定した。実験中、参加者は HMD によって装置を直接見ることは出来なかった。

研究用の仮想環境は Unity で作成した。HMD 上に 12 種類のオブジェクトが立体的に表示されており、参加者はすべてのオブジェクトを常に参照することができた。

### 5.3 刺激

3 種類の大きさ (small, middle, large) と 4 種類の形状 (円柱, 直方体, 円錐, コップ) の組み合わせ、合計 12 種類のオブジェクトを用いた。装置にセットしたシートは図のものと同様である。それぞれのオブジェクトの形状は装置が提示可能な形状のうち、最も単純なものである。円柱形状については軸周りの太さの変化によって大きさの違いを提示した。その他の形状については、穴の端部を移動させることで大きさの違いを提示した。

### 5.4 タスクと実験の流れ

まず、軸が回転して様々な形状を表現する様子を見せながら、装置の仕組みについて簡単に説明した。次に、指先で装置を持つ方法と研究の手順を説明した。本調査は各 12 試行からなる 2 セットで構成された。第 1 セットは、参加者に機器に慣れてもらうためのものである。このとき、回答 (レンダリングされた触覚と意図した形状の対応) を明らかにして、レンダリングされた触覚と HMD 上に描画した形状がどのぐらい一致しているかを 7 段階リッカート尺度で質問した。

各セット 12 回の試行で参加者は装置がレンダリングする形状を予測した。試行が始まると、実験者はモータをコント

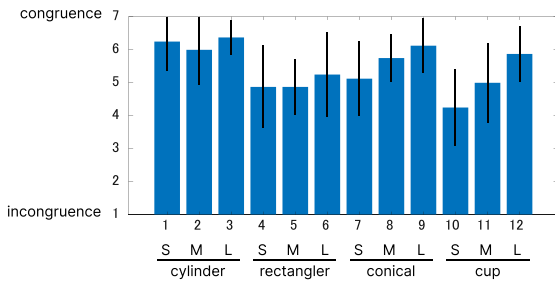


図 7: HMD に表示されたバーチャル物体と装置が提示する触覚の調和性

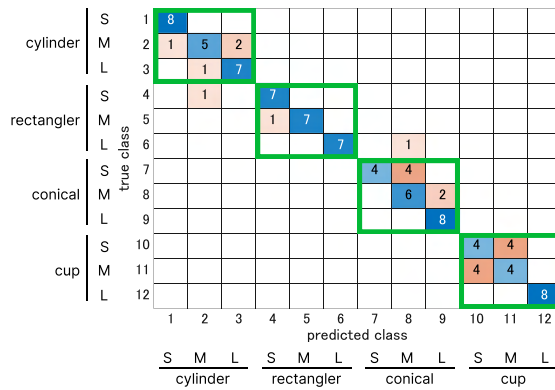


図 8: 提示した大きさ/形状と参加者が回答した大きさ/形状の混同行列 (緑枠内は同一形状)

ロールして大きさと形状を描画し、参加者に提示した。参加者は利き手でデバイスに触れ、彼らが予測した大きさと形状を答えた。

6. 実験結果

実験の第 1 セットで得られた結果を図 7 に示す。図 7 を見ると円柱の再現性が他の形状に比べて高い傾向が分かる。また、円錐とカップでは小さい場合の再現性が低く、大きい場合の再現性が高い傾向が見て取れる。

実験の第 2 セットで得られた混同行列を図 8 に示す。図中の数字は、各「真のオブジェクト」がレンダリングされたときの「予測されたオブジェクト」の総数を表す。したがって、最大数は被験者数と同じ 8 である。緑の枠は、その枠内が同じ形状であることを示している。つまり、形状について誤った回答は 2 例のみである。形状に関する正答率は 97.9% となった。

7. 考察

本研究で得られた結果は、開発した装置が様々な大きさと形状を提示可能であることを示している。実験の第 2 段階で実施したタスクでは、参加者は 78.1% の確率で大きさと形状の組み合わせを正しく識別した。形状に限れば正答率は 97.9% である。実験の第 1 段階で得られた評価では、円柱形状の再現性が他の形状の再現性に比べて高い傾向があった。これは他の形状が穴の縁で表現されているのに対して、

円柱は 3 次元形状として表現されているためであると考えられる。指の拘束による形状提示について、3 人の参加者が次のように言及した：「直方体などの形状も現実的だった。(P4)」、「直方体については親指が接している形状が丸いのが気になる。(P7)」、「穴の縁で提示された形状は薄いものを触っているようにも感じた。(P8)」

細い円柱を再現できていることは開発した装置の利点である。これはペンのようなバーチャル物体を操作するときには有用である。一方で、円錐やカップでは小さい大きさの再現性が低かった。P4 は次のようにコメントした：「円錐は大きさの違いが分かりにくかった。指を置く位置でも変わる。特に、小さい円錐について、バーチャル環境では幅だけでなく高さも小さいが、開発した装置では高さが再現されていない。」このように、開発した装置では高さ方向の再現が課題となる。

8. おわりに

本研究では、巻物に着想を得た特徴的な機構を有する触覚提示装置を開発した。また、提案装置が提示する複数の大きさと形状をユーザが弁別可能であるかを調査した。実験の結果、提案装置が提示する複数の大きさと形状をユーザが弁別可能であることを明らかにした。一方、小さい大きさの物体についてはその再現性が低いことが判明した。今後は、質感や柔らかさの提示と言った、大きさと形状以外の触覚提示機能についてもその有効性を調査する実験を予定している。

参考文献

- [1] I. Choi, E. Hawkes, D. Christensen, C. J. Ploch, and S. Follmer. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality. *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 986–993, 2016.
- [2] N. N. Mansor, M. H. JAMALUDDIN, and A. Z. SHUKOR. Concept and application of virtual reality haptic technology: A review. *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 95(14), 2017.
- [3] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives. *IEEE transactions on haptics*, 10(4):580–600, 2017.
- [4] E. Whitmire, H. Benko, C. Holz, E. Ofek, and M. Sinclair. Haptic revolver: Touch, shear, texture, and shape rendering on a reconfigurable virtual reality controller. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2018.