



# 先端伸縮型仮想物体接触デバイス ExtickTouch の拡張 -平面方向へのブレーキ機構の導入-

ExtickTouch Plus: A Telescopic Pen-like Device with a Braking Mechanism in the Plane Direction

林佑一<sup>1)</sup>, Christian Arzate Cruz<sup>2)</sup>, 柴田史久<sup>1)</sup>, 木村朝子<sup>1)</sup>

Yuichi HAYASHI, Christian Arzate Cruz, Fumihisa SHIBATA and Asako KIMURA

1) 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)

2) 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

**概要:** 我々は、仮想物体に触れた際に得られる接触感を再現するデバイス「ExtickTouch」の研究・開発を行ってきた。これは仮想物体の表面に合わせてデバイス先端が伸縮することで接触感を提示することができる。しかし、既開発のデバイスでは伸縮方向にしか力が提示できないため、仮想物体に対して側面から接触することができないという問題があった。そこで本稿では、デバイスの平面方向への移動に対して抵抗を発生させるブレーキ機構を導入し、仮想物体に対して側面から接触した際の接触感を腕全体に提示可能な手法を提案した。

**キーワード:** デバイス, 触力覚, 接触感

## 1. はじめに

市販の HMD を用いた VR (Virtual reality; 人工現実感) 体験には、把持して利用できるハンドヘルド型のデバイスが用いられることが多く、主に振動を用いて触覚の提示が行われている[1]。また、同様に把持して用いることが可能なデバイス[1]-[3] や手に装着するデバイス[4]-[6]が、多数提案・開発されてきた。このようなデバイスは、ユーザの動きに対する制限が少ないという利点がある一方で、触覚の提示箇所はデバイスと指との接触位置のみに留まり、実物体に触れたときのように腕全体に力覚を提示することはできない。

また、現実に近い力覚を提示可能にしたデバイス[7]、[8]も同様に多数提案・開発されてきたが、機構全体が大きく、容易に動かさないため、ユーザの作業範囲がデバイスの可動領域に限定されてしまう。

このように、把持するだけで手軽に利用できるデバイスと、現実に近い感覚を提示できるデバイスでは、2つの長所がトレードオフとなっていた。

そこで我々は、その両方の長所を活かした手法を提案し、この手法を実現するデバイス「ExtickTouch」の研究・開発を行ってきた[9]。ExtickTouch は、ユーザが仮想物体に触れた瞬間に、先端を伸縮させて実物体に接触するようにし、その反力を利用することでユーザに接触感を提示する。しかし、ExtickTouch はその構造上、デ

バイスの伸縮方向のみにしか力を提示できないため、それ以外への方向に接触感を提示することが困難であるという問題がある。

一方でデバイスの水平方向への移動に対する抵抗力を提示する手法も研究されている。Wintergerstらはタッチスクリーン上で水平方向の力を提示するペン型デバイスを開発した[10]。このデバイスは先端に鋼球を設置し、鋼球に電磁コイルを押し当て、鋼球の回転にブレーキをかけることで水平方向の力を提示することができる。

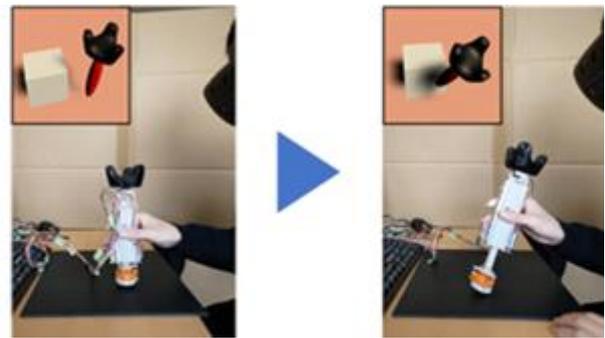
そこで、本稿でも同様に、ExtickTouch に水平方向へのブレーキ機構を導入する(図 1(a))。具体的には、仮想物体と接触した際にブレーキをかけることで仮想物体との接触感を表現する(図 1(b))。これにより、垂直方向・水平方向両方の接触感を提示可能となり、ExtickTouch の表現力を向上させることが期待できる。

## 2. システム構成

提案手法に基づき、作製したデバイスを図 2 に示す。デバイス後端には VR 空間内での位置を取得するための VIVE Tracker が設置されている。デバイスはブレーキ部、先端支持部、外装から構成されおり、いずれも 3D プリンタで PLA 樹脂を用いて作製した。先端支持部とブレーキ部は外装に設置された 2 個のリニアアクチュエータ (Alps 社製, モータ N フェーダ, RSA0N11M9A0K) によって



(a) ExtickTouch



(b) 伸縮による接触感提示の様子

図1 デバイスの概観

それぞれ独立に伸縮する。このアクチュエータは可動域が 10cm で、位置を 1024 段階で指定することができ、速度を 256 段階で変更することができる。先端支持部とブレーキの駆動タイミングと停止位置の制御は Arduino で行っており、VR 空間内に配置されている仮想物体とデバイスの接触位置に基づいて先端支持部とブレーキ部を前後に駆動させ、伸縮を実現している。

デバイスの制御および VR 空間描写用 PC は CPU Intel Core i7-8700, メモリ 16GB, GPU NVIDIA GeForce RTX 3060, Windows 10 Pro PC を使用した。VR 空間の構築には Unity 2019.4.11f1 (64bit), VR 空間の観察には VIVE Pro 2 を用いた。VR 空間の提示および伸縮距離の算出、デバイス先端部の駆動は毎秒 120 フレームで行っている。

### 3. 接触感提示方法

#### 3.1 伸縮による接触感提示

ExtickTouch では、デバイスを伸縮させて机や床などの実物体に接触させ、この時に生じた反力を利用する。具体的には、VR 空間内で仮想物体とデバイスが接触した際に、実世界では机や壁などの実物体と接触するようにデバイスを伸縮させる。この時に生じる反力を仮想物体への接触感としてユーザに提示する。



図2 デバイスの機構

#### 3.2 伸縮位置制御モデル

ExtickTouch では、仮想物体とデバイスの接触位置  $p_d$  と、デバイスの方向ベクトルと地面の交点  $p_c$  からデバイスの伸縮距離  $d$  を算出する (図 3)。求めた伸縮距離  $d$  までモータを回転させて伸縮を行うが、モータの回転速度が急激に変化すると滑らかな表面をなぞる動作などでユーザに違和感を与えてしまうため、伸縮距離  $d$  に応じてモータの回転速度  $v$  を設定することで、回転速度の急激な変化を防ぐという手法を利用する [9]。具体的には伸縮距離が大きい場合はモータの回転速度を上げることで瞬時に伸縮を行い、伸縮距離が小さい場合はモータの回転速度を下げる。現在のフレームでのモータ回転速度  $v$  を次式 (1), (2) によって決定する。

$$v = \alpha \cdot v_{max} + (1 - \alpha) \cdot v_{min} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{d}{l_{max}} \quad (2)$$

$v_{max}$  をモータの最高速度、 $v_{min}$  を最低速度、 $l_{max}$  をデバイス伸縮部の最大の長さ、 $d$  を伸縮距離とする。

#### 3.3 ブレーキによる接触感提示

提案手法では、さらにデバイスの水平方向への移動に抵抗を発生させることでデバイスが仮想物体側面に接触した際の接触感を提示する。具体的には、デバイス先端に内蔵した球と、実物体 (ゴムマット) との摩擦を利用する。ExtickTouch が仮想物体とぶつからなければ、デバイス先端の球は実物体上をスムーズに転がり続けるが、仮想物体とぶつかると、ブレーキ機構により先端部分の球の回転を止め、球とゴムマット間に摩擦力を発生させる。これによりデバイス全体の動きに抵抗を発生させる。

- (黄色矢印) : デバイスの方向ベクトル
  - (赤) : 仮想物体との接触位置  $P_d$
  - (青) : 方向ベクトルと地面との接触位置  $P_c$
- 伸縮距離  $d = |P_d - P_c|$

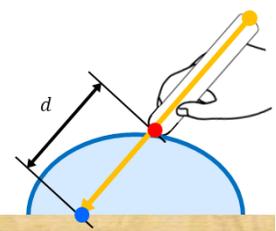


図3 伸縮距離の算出

### 3.4 ブレーキ機構構成

ブレーキ機構はデバイス外装に設置されたリニアアクチュエータ、先端支持部に取り付けられた球とそれに押し付けるブレーキ部によって構成される。球はブレーキが押し付けられた時に力加わるため、位置が変わらないように十分に固定する必要があり、かつブレーキが解除されている場合には滑らかに回転する必要がある。そこで、球をボールベアリングによって支持する構造とした。ボールベアリングは球をはさんで上下に3個ずつ配置され、これにより球は自由に回転することができる状態で位置を固定される(図4)。また、ブレーキ部は中空構造である先端支持部の内側を通して球に接触する。これは先端支持部にブレーキ機構を全て搭載すると、その重量により伸縮機構の動作を妨げるため、先端支持部に設置する部品を最小限にする必要があるためである。

ブレーキ部の球との接触部にはゴムを設置することで、ブレーキ部と球が接触している時に滑らないようにしている。また、球の接触する実物体としてゴムマットを利用する。これは球の回転を止めた時に接触感提示に十分な大きさの摩擦力を発生させることが可能なためである。

### 3.5 ブレーキ制御

VR空間内で仮想物体側面とデバイスが接触している間、デバイス先端の球にブレーキ部を接触させ、球の回転を止める(図5)。仮想物体側面とデバイスの接触はUnityのCollider機能を用いて検知し、この際ブレーキ部を伸ばす方向にモータを回転させることで球にブレーキ部を接触させる。一方、仮想物体側面とデバイスが接触していない間は、球とブレーキ部が接触しないように一定の間隔を保ってブレーキ部を伸縮させる。具体的には、先端支持部の伸縮位置とブレーキ部の伸縮位置を比較し、2つの位置の差が閾値を超えている場合、閾値内に収まるようにブレーキ部を伸縮させる。例えば、先端支持部に対してブレーキ部が閾値を超えて伸びている場合はブレーキ部を縮めることでブレーキ部と球の接触を防ぐ。これにより、ブレーキ部は先端支持部に追従して伸縮しながら、任意のタイミングで球にブレーキをかけ、デバイスの水平方向への移動に抵抗を発生させることが可能となる。

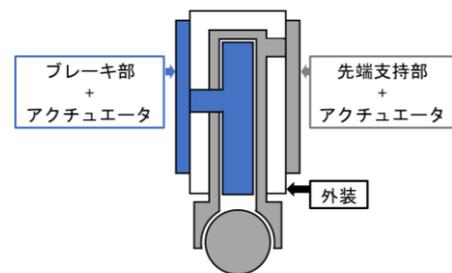


図4 球の支持部

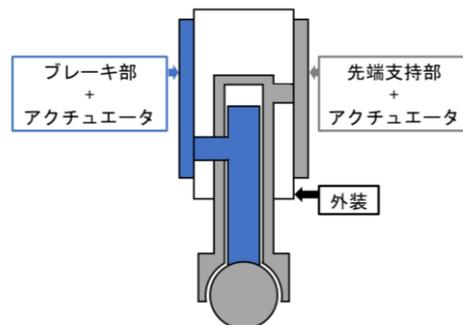
## 4. パイロットスタディ

今回作製したデバイスを用いて4名の参加者に図6に示す仮想物体に触れさせ、コメントの聴取を行った。参加者(N=4, 年齢21-22歳, 男性4名)はいずれも情報系の大学生で、VRの使用経験があった。デバイスの使い方と機能を説明した後、3種類の体験を行った。1つ目は伸縮機構のみを動作させた状態で仮想物体に触れる体験である。これは作製したデバイスが伸縮機構による接触感提示を行うことができるか確認するために行った。2つ目はブレーキ機構のみを動作させた状態で仮想物体に触れる体験である。これは作製したデバイスのブレーキ機構が仮想物体側面への接触感を提示できるか確認するために行った。3つ目は伸縮機構とブレーキ機構を両方動作させた状態で仮想物体に触れる体験である。

各体験の後、ユーザーエクスペリエンスと接触時の臨場感について調査するため、自由回答式の質問を実施した。



(a) 図1(b)左の非接触時の状態



(b) 図1(b)右の接触時の状態

図5 デバイスの構造

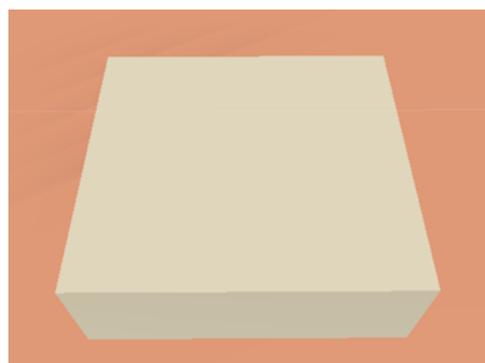


図6 提示した仮想物体

## 5. 結果と考察

1つ目の体験では、肯定的なコメントとして「仮想物体との接触感があった」という回答が得られた。特に仮想物体上面を触ったときに強く感じられるという意見があった。一方、否定的なコメントとして「デバイスを傾けられる角度に制限を感じる」というものがあった。

2つ目の体験では、肯定的なコメントとして「仮想物体側面への接触感があった」というものがあった。また、これに関連して「ブレーキ力は接触感を提示するために十分な大きさの力だった」という意見も得られた。一方、否定的なコメントとしては「デバイスの角度を自由に換えられるため、ブレーキがかかっても仮想物体にめり込んでしまう」という意見があった。

3つ目の体験では、肯定的なコメントとして「仮想物体側面、上面ともに接触感があった」「仮想物体に乗り上げる動作より仮想物体上面から床に落ちる時のほうがリアルだった」という意見が得られた。一方、「デバイスの伸縮が断続的に起こる」という否定的なコメントもあった。特に仮想物体側面をなぞる動作で感じるというコメントが多かった。また、「デバイスが重く連続して使用すると疲れる」という意見もあった。

以上のコメントから、作製したデバイスは伸縮機構、ブレーキ機構による接触感提示ができていたことが確認できた。また、伸縮機構とブレーキ機構を組み合わせたことにより仮想物体の上面と側面の両方への接触感を提示できることも確認できた。

## 6. 本デバイスの限界と今後の課題

本デバイスには、傾けられる角度に制限があるという限界がある。現在は12度以上傾けると球付近の部品が接触してしまい、これにより意図せず摩擦が発生し接触感の提示を妨げてしまう。この問題はデバイス先端の設計を見直し、傾けられる角度を大きくすることで緩和できると考える。同様にデバイスの重量の大きさに関しても使用するリニアアクチュエータの変更やVIVE Trackerの代わりとなる位置情報取得手段を用いることで軽量化ができると考える。また、デバイスの伸縮が断続的に起こるという問題については、デバイス制御の改善で解決できると考える。デバイスが傾くことで仮想物体にめり込むという問題に関しては、提案手法での解決は困難であり、本手法の限界である。

## 7. むすび

本稿では ExtickTouch の表現力を向上させることを目的とし、伸縮機構に組み合わせられる平面方向へのブレーキ機構の提案、および提案手法を用いたデバイスの試作を行った。また、本デバイスの接触感提示による表現

力を評価するために、パイロットスタディを実施した(N=4)。その結果、本デバイスはVR空間において、仮想物体の側面に触れるという体験に有効であることが示され、VR空間内の仮想物体に触れる体験を拡張するのに有効であることが示唆された。

今後の課題として、提案デバイスの性能評価実験の実施と伸縮制御の改善による提示感覚の向上が挙げられる。

本研究は科研費・基盤研究(B) 20H04235 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] E. Whitmire et al.: "Haptic Revolver: Touch, Shear, Texture, and Shape Rendering on a Reconfigurable Virtual Reality Controller," Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, paper. 86 (2018)
- [2] H. Benko et al.: "Normaltouch and texturetouch: High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers," Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 717 - 728 (2016)
- [3] S. Kamuro et al.: "An ungrounded pen-shaped kinesthetic display: Device construction and applications," In IEEE World Haptics Conference (WHC) 2011, pp. 557 - 562 (2011)
- [4] I. Choi et al.: "Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality," in IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 986-993 (2016)
- [5] I. Choi et al.: "Grabity: A wearable haptic interface for simulating weight and grasping in virtual reality," Proc. 30th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 119-130 (2017)
- [6] I. Choi et al.: "CLAW: A multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality," Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, paper. 654 (2018)
- [7] "Phantom Premium Haptic Devices."  
<https://www.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium> (accessed Jun. 30, 2022).
- [8] M. Sato, "SPIDAR and virtual reality," Proc. of the 5th Biannual World Automation Congress, pp. 17-23(2002)
- [9] 片岡 他: 先端伸縮型仮想物体接触デバイス ExtickTouch の評価, 日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究会, MR2021-5, Vol. 24, No. 1, pp. 1 - 6 (2021)
- [10] Wintergerst et al.: "Reflective Haptics: Enhancing Stylus-Based Interactions on Touch Screens," EuroHaptics 2010, pp. 360 - 366 (2010)