

# ExtickTouchにおける視触覚の錯覚に基づく接触位置リダイレクション

宮内 陽太<sup>1,a)</sup> 中村 文彦<sup>1</sup> 片岡 佑太<sup>1</sup> 柴田 史久<sup>1</sup> 木村 朝子<sup>1,b)</sup> 森 尚平<sup>2</sup>

**概要：**バーチャル空間におけるスケッチでは、バーチャル物体からの触覚フィードバックが不可欠であり、特に、描画面から得られる反力はパフォーマンスの向上や疲労の改善に効果的である。我々はこれまでに描画面からの反力を得るアプローチとして、ユーザの把持したペン自体の伸縮によってペン先と物理物体を接触させるアプローチを提案してきた。しかし、本手法では、ペンの伸縮可能距離によって、触覚提示可能な空間が限定される制約があった。この制約を克服するために、本研究では、ペンを把持しているユーザの手の位置を視覚的にずれた位置に提示するハンドリダイレクションを我々のアプローチに導入することで、触覚提示可能な空間の拡張を試みる。

## 1. はじめに

デザインや教育などの分野で Virtual reality (VR) を活用したスケッチが利用されている。VR 空間でスケッチを行う場合、ディスプレイの位置による制約を受けずに自由な位置に線を描くことが可能になる一方で、描画対象となる表面に対応する物理的な実体が存在しないため、触覚フィードバックが得られない課題がある。この課題に対処するため、多くの VR 対応スタイルスは、描画面への接触時に振動フィードバックを提示する機能を搭載している。しかし、描画面からの反力が存在しないため、長時間の仕様においてはユーザの疲労を誘発しやすい。

描画面からの反力を得るアプローチとして、物理物体の表面位置にバーチャル物体の表面を一致させる手法が存在する。この手法により、スケッチのパフォーマンスや作業負荷を軽減することが示されている一方で [1]、物理物体の位置に依存するため、バーチャル物体を任意の位置に移動させることが困難である。描画面からの反力を得る別のアプローチとして、物理物体の表面をバーチャル物体の表面位置に移動させることで、遭遇型触覚を提示する手法が提案されている。物理物体の移動には、ロボット [2] などが活用されており、触覚提示可能な空間を動的に拡張できる。しかし、ユーザとロボットが同一空間に存在することによる安全性の問題、携帯性の低さ、及び、物体駆動用の高価なロボットの必要性といった課題がある。

そこで、本研究グループでは、安全・高携帯性・低コストで触覚提示を実現するために、ユーザが把持しているペン自体を駆動させ、物理物体と接触させることで、遭遇型触覚を提示するアプローチ”Pen Meets Desk”を提案し、アプローチを実現するデバイス ExtickTouch の開発を行ってきた [3][4]。この手法では、ペンがバーチャル物体に接触した際に、バーチャル物体と物理物体との距離に応じてペンを伸縮させることで、ペン先と物理物体を接触させる。これにより、実物体からの反力を利用した遭遇型触覚フィードバックを提示でき、物理物体の配置に起因する触覚提示範囲の制約を緩和している。また、描画面を駆動させるロボットなどが不要であるため、安全性と高い携帯性を有し、低コストで実現可能である。一方で、ExtickTouch では、ペンの伸縮可能な距離に物理的な制約があるため、ドローイングが可能な範囲が限定的である。

本研究では、ペンの伸縮可能な距離による物理的な制約を克服するため、バーチャル環境におけるペンを把持したユーザの手の位置をずらすハンドリダイレクションを組み合わせた手法を提案する。触覚提示にハンドリダイレクションを組み合わせた先行研究では、ロボットを用いて触覚提示可能な空間の拡張 [5] や、バーチャルキャンバスのサイズの拡張 [6] が可能なことが示されている。これらの知見を踏まえ、我々は、ハンドリダイレクションとペンの駆動による遭遇型触覚の提示を組み合わせることで、ドローイング可能な空間の拡張を目指す。

<sup>1</sup> Ritsumeikan University, Japan

<sup>2</sup> University of Stuttgart, Germany

a) is0637rp@ed.ritsumei.ac.jp

b) asa@is.ritsumei.ac.jp

## 2. 提案手法

### 2.1 力覚フィードバックによる触感提示

ExtickTouch は、VR 空間における仮想物体との接触感を提示するデバイスである。具体的には、ユーザは Extick-Touch を手に持った状態で VR 空間でユーザが仮想物体に接触した際、その接触位置に同期させてデバイスを伸縮させる。この動作により、デバイスは現実世界の机や壁などの実物体に接触する。この実物体との接触時に生じる反力を、仮想物体への力覚フィードバックとしてユーザに提示する仕組みである。この方式の採用により、ユーザの動作範囲を大幅に制限することなく、リアルな接触感の提示を実現する。

### 2.2 リダイレクション導入による力覚提示可能範囲の拡張

バーチャル環境でのバーチャルの手の位置を、実環境でのユーザの手の位置から視覚的にずらすハンドリダイレクションにより、ユーザの弁別閾以下の微細な操作を利用した場合、VR 空間における手の操作と知覚の自由度を向上することを示唆している。本研究では、ExtickTouch の伸縮限界を超える触感再現をリダイレクション技術によって可能にする手法を提案する。ExtickTouch は伸縮可能な範囲内で仮想物体の形状を再現することが可能である。しかし、仮想物体が大きい場合、その仮想物体の表面と実物体の間の距離が広くなり形状の再現ができない。この時、VR 空間内のデバイスの高さを仮想物体の表面にに触れる高さへ補正し、同時にデバイスの伸縮を行う。

## 3. 実装

### 3.1 システム構成

本システムは、伸縮可能なペン型デバイス ExtickTouch と、VR アプリケーションとモーションキャプチャを実行するコンピュータによって構成された。コンピュータにはマイクロコンピュータ (Arduino Uno Rev3, Arduino LCC) と HMD (Meta Quest 3, Meta) が USB ケーブルで接続されていた。

デバイスと HMD のトラッキングには、モーションキャプチャ (OptiTrack) を使用した。本研究で使用したモーションキャプチャは、複数の赤外線カメラによって反射マーカの 3 次元座標と姿勢を計測するシステムである。デバイスと HMD には複数の反射型マーカを取り付けられており、モーションキャプチャがそれぞれの位置姿勢を計測し、計測結果を VR アプリケーションに送信した。

デバイスの伸縮機構は、Arduino Uno (Arduino LCC 製) と Motor Shield Rev3 (Arduino LCC 製) を用いて制御され、256 段階で指定された電圧が Pulse Width Modulation (PWM) 信号としてモータに出力される。



図 1: ExtickTouch

### 3.2 デバイス構成

作成したデバイスを図 1 に示す。デバイスにはリニアアクチュエータ (L16-140, Actuonix Motion Devices) を用い、ペン先、把持部、マーカー装着部を 3D プリンタで PLA 樹脂を用いて作製した。アクチュエータのストローク長は 140.00mm であり、最大伸縮速度は 32.0mm/s である。動的負荷力 (推力) は 50.0N 15, 最大静的負荷力 (静止保持力) は 250.0N である。位置制御のため、フィードバックタイプにはポテンシオメータが搭載されており、これによりアクチュエータの伸縮位置を検出可能である。ただし、その精度は  $\pm 0.50\text{mm}$  である。また、位置姿勢計測のためのマーカーを計 4 個装着した。

### 3.3 ペンの伸縮制御

力覚を提示する適切なタイミングとは、デバイスが仮想物体と接触すると同時に、デバイス先端が実物体 (床面) と接触する状態を指す。本システムではこの状態を実現するためにデバイスの伸縮を制御する。

制御フローとして、ExtickTouch の伸縮方向への方向ベクトル  $\vec{v}$  と仮想物体との交点  $P_{virtual}$ 、および同ベクトルと VR 空間の床面との交点  $P_{real}$  を求める (図 2)。ここで、床面は実空間と VR 空間で同一の位置に配置されると仮定する。

この算出過程において、ベクトル  $\vec{v}$  が床面と交点を持たない場合、デバイスを伸縮させても床面との接触は不可能であると判定し、以降の伸縮処理は行わない。

床面交点  $P_{real}$  が存在する場合、次に 2 つの交点  $P_{virtual}$  と  $P_{real}$  間の距離  $D$  を計算し、この距離がデバイスの伸縮可能な最大長  $L_{max}$  以内であるかを判定する。すなわち、

$$D = \|P_{virtual} - P_{real}\| \quad (1)$$

を算出し、 $D \leq L_{max}$  の条件を満たすかを確認する。

この距離  $D$  が伸縮可能な長さ以内であれば伸縮処理を実行する。この処理を繰り返すことで、デバイス先端が仮想物体と接触すると同時に実空間の床面に接触し、ユーザ

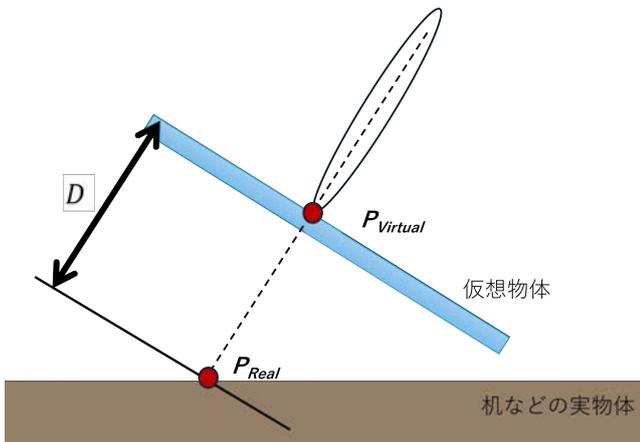
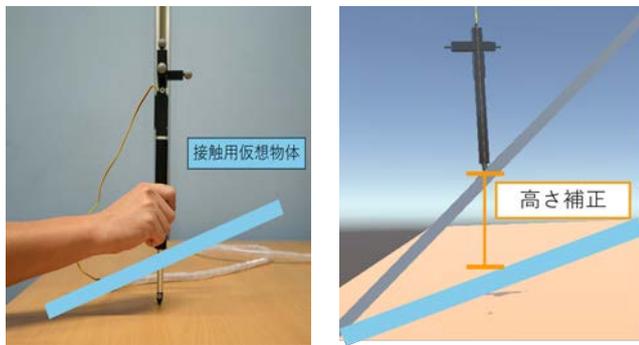


図 2: 伸縮距離計算



(a) 現実空間のデバイス (b) 仮想空間のデバイス

図 3: リダイレクションの様子

に力覚を提示することが可能となる。

### 3.4 リダイレクションによる位置補正

VR 空間において、デバイスが実際に接触する床面などの実物体に対応する仮想物体（以下、接触用仮想物体）を透明に設定し、その上部にユーザーが目視する他の仮想物体を配置する。

本補正処理では、節 3.3 で述べた伸縮距離の計算と同様に、デバイスの伸縮方向への方向ベクトル  $\vec{v}$  とその反対方向へのベクトル  $-\vec{v}$  を計算し、接触用仮想物体との接触判定を行う。

デバイスのペン先が接触用仮想物体と接触する際、デバイスの高さ座標 ( $y$  座標など) を、接触用仮想物体の表面に触れるように補正する。この高さ補正により、伸縮によって生じるデバイス先端の現実の位置の変動に合わせ、VR 空間における目視位置を変更し、実空間と VR 空間の整合性を維持する。

## 4. おわりに

本研究では、ペン自体を伸縮させることによる遭遇型触覚の提示にハンドリダイレクションを組み合わせることで、ドローイング可能な空間の拡張を狙う手法を提案した。

我々はこれまでにペンの伸縮による ExtickTouch によってバーチャル平面に線を描いている際に、バーチャルペンの位置を実環境の位置から高さ方向にずらすことで、実際の平面の傾斜とは異なる傾斜の平面に線を描くことが可能なシステムを構築した。今後は、提案手法による力覚提示可能範囲の拡張効果と、視覚情報補正を伴うリダイレクションがユーザの体験に与える影響について、評価実験を行い、明らかにしたい。

## 参考文献

- [1] Florian Kern, Peter Kullmann, Elisabeth Ganal, Kristof Korwisi, René Stingl, Florian Niebling, and Marc Erich Latoschik. Off-the-shelf stylus: Using xr devices for hand-writing and sketching on physically aligned virtual surfaces. *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 2, pp. 1–20, 2021.
- [2] Ryota Gomi, Kazuki Takashima, Yuki Onishi, Kazuyuki Fujita, and Yoshifumi Kitamura. Ubisurface: A robotic touch surface for supporting mid-air planar interactions in room-scale vr. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 7, No. ISS, pp. 376–397, nov 2023.
- [3] 片岡敬志郎, 山本拓也, 大槻麻衣, 柴田史久, 木村朝子. ExtickTouch: 仮想物体への接触感を提示する先端伸縮型デバイスの開発. 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), pp. 1–6.
- [4] Fumihiko Nakamura, Yuki Takanaga, Hinata Miyauchi, Yuta Kataoka, Shohei Mori, Fumihisa Shibata, and Asako Kimura. Pen meets desk: Above-surface drawing with encountered-type haptics using an extendable pen. *Journal of Information Processing*, Vol. 34, No. 1, pp. 29–38, 2026.
- [5] Eric J. Gonzalez, Parastoo Abtahi, and Sean Follmer. Reach+: Extending the reachability of encountered-type haptics devices through dynamic redirection in vr. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20*, p. 236–248, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [6] Kumpei Ogawa, Kazuyuki Fujita, Kazuki Takashima, and Yoshifumi Kitamura. Redirected Drawing: Expanding the Perceived Canvas Size in VR. In *2025 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 494–504. IEEE, 2025.