

TouchMorph：剛性変化インタフェースと 実物体プロップを用いたバーチャルオブジェクトの 形状と硬軟の再現

小松 遼也^{1,a)} 上堀 まい^{1,2,b)} 大津 耕陽^{3,c)} 吉田 成朗^{4,d)} 田中 一敏^{4,e)} 伊藤 雄一^{3,f)}

概要：

本研究では、VR 環境においてバーチャルオブジェクト (VO) の形状と硬軟を再現する触覚提示システム “TouchMorph” を提案する。TouchMorph は、多様な形状の VO を模して用意した実物体プロップに、剛性が変化可能なスタイラス型インタフェースを介して触れることで、硬軟が不変の実物体プロップであっても様々な硬軟を表現できる。また、ターンテーブルを用いて触れる実物体プロップを切り替えることで、VO の形状に応じた触覚提示を可能にする。本稿では、まず提案手法を説明し、次にインタフェースを用いた触覚知覚に関するユーザ評価実験について紹介する。結果として、インタフェースの異なる剛性設定が、ユーザの硬軟知覚と一貫して対応することを確認した。さらに、VO の形状や視覚的変形を操作した評価実験では、実物体プロップと視触覚の整合により、形状の知覚しやすさと現実性が向上することが示された。以上より、TouchMorph は、少数の実物体プロップとスタイラス型インタフェースの剛性制御を組み合わせることで、多様な硬軟を表現できる新たな触覚提示システムの枠組みであることを示した。

1. はじめに

日常生活において、我々は箸やペン、スタイラスなどの棒状の道具を介して物体に触れている。このとき、人は道具そのものだけでなく、道具を介して触れる物体の性質も知覚している。道具を介した触覚は、道具に触れている皮膚を通じた触覚と同様に処理される [1]。この特性を踏まえ、道具を介した触覚をバーチャルリアリティ (VR) 技術に応用する研究が進められており、ユーザが VR 環境での物体とのインタラクションをリアルに体験できるようにするための方法が模索されている。

これまでの VR 研究を通して、視覚および聴覚による提示によって高い臨場感を提示できる一方で、触覚の再現は依然として課題が残されている。触覚研究においては、VR 環境内のバーチャルオブジェクト (VO) に模した実物体

(実物体プロップ) を用意することで、その触覚を提供する手法が色々と提案されている [2-8]。しかし、VO の形状と硬軟の双方を、実物体プロップを通じて再現することは依然として難しい。特に、ユーザが触れる VO の硬軟を、実物体プロップを用いて再現することは技術的に困難である。これは、従来の VR 環境では、実物体プロップの硬軟は一定であり、ユーザが異なる硬軟の VO に触れても、硬軟触覚の違いを忠実に再現することができないからである。その結果、形状は提示できても、硬軟の違いを十分に表現できない場合がある。この制約を克服するためには、VR 環境内で VO の形状に対応した物理的な接触境界を確保しつつ、弾性のような硬軟の特性に応じた触覚フィードバックを動的に生成する方法が必要である。

そこで本研究では、ユーザが VR 環境内で多様な形状および硬軟を持つ VO とインタラクションできるシステム “TouchMorph” を提案する。TouchMorph は、人工筋肉機構を利用してスタイラスの関節の硬軟を制御できるスタイラス型の触覚インタフェース “Transtiff” を用いて実現する [9-12]。Transtiff ではスタイラス自体の硬軟を変化させることで、スタイラスを介して触れる物体の硬軟触覚が変化したように感じさせることができる。本システム “TouchMorph” は、VO の形状に合わせた複数種類の実物体プロップを搭載したターンテーブルと、この剛性変化ス

¹ 青山学院大学 大学院理工学研究科

² 日本学術振興会 特別研究員

³ 青山学院大学 理工学部

⁴ オムロン サイニックス株式会社

a) ryoya.komatsu@x-lab.team

b) mai.kamihori@x-lab.team

c) otsu.kouyou@it.aoyama.ac.jp

d) shigeo.yoshida@sinicx.com

e) kazutoshi.tanaka@sinicx.com

f) itoh@it.aoyama.ac.jp

スタイラスを組み合わせて構成される。ヘッドマウントディスプレイ（HMD）に表示する VO に連動して対応する実物体プロップを切り替えることで、VO の形状と硬軟の触覚フィードバックを可能とする。

本稿では、TouchMorph の設計と実装の詳細を述べ、ユーザ評価実験を通じて、スタイラス剛性制御と実物体プロップによる提示面条件の組み合わせが知覚に与える影響を報告する。そして、実物体プロップの動的な切り替えとスタイラスの剛性制御を組み合わせる本手法が、VR 環境における物体の形状と硬軟の知覚に与える影響について報告する。なお、本稿で紹介するユーザ実験は、青山学院大学の倫理審査委員会の承認（承認番号：H22-008）を受けて実施した。

2. 関連研究

本章では、実物体プロップによる形状提示手法、スタイラス型インタフェースによる触覚提示手法、棒状ツールを介した触覚知覚と視触覚統合の観点から関連研究を整理し、本研究の位置づけを明確にする。

2.1 実物体プロップによる形状提示手法

VR 環境内で VO の形状を物理的に提示する試みとして、VO の形状を模した実物体プロップを用いる手法が提案されている [13–15]。これらの手法は、ユーザが VO の輪郭や大きさを触覚的に確かめることを可能にする。例えば、Yixian らの提案する “ZoomWalls” [13] では、複数の自律ロボットを用いることで VR 環境内の壁の触覚を提示している。これにより、HMD を装着して歩行する際に、VR 環境上の境界を越えることなく体験に没入できる。Hoshikawa らが提案している “RedirectedDoors” [14] は、VR 環境における視覚・触覚を伴うドア開閉りダイレクト技術であり、空間規模 VR 体験に必要な物理的空間を効率的に圧縮する能力において有望性を示している。Gomi らが提案している “InflatableBots” [15] は、移動ロボットとファン駆動式インフレーター構造を組み合わせしており、これにより大規模な安全で拡張性・展開性に優れた触覚インタラクションを実現している。

これらの実物体プロップを用いた研究はスケール感のある触覚提示に有利であるが、複数形状・硬さをカバーするためには多数の実物体プロップや大掛かりな切り替え機構が必要になる点が課題である。本研究では、実物体プロップでは形状を再現し、硬軟の質感はスタイラス側の剛性制御で表現するという手法を用いることで、少数の実物体プロップで多様な触覚体験を実現することを目指す。

2.2 スタイラス型インタフェースによる硬軟提示手法

VO の硬軟を提示する研究として、スタイラス型インタフェースによる多様な手法が提案されている [16]。接地型

の力覚提示装置 “Touch X” [17] は、アーム型の機構の先端にあるスタイラスを通じて VO の反力を提示する。他にも、手持ち型のデバイスでは、スタイラスの主軸方向の長さ変化を用いて、押し込んだ際の力覚的な手応えを提示する手法が提案されている [18,19]。また、振動や摩擦、温度といった複数の感覚を統合し、表面の触り心地や質感の違いを提示する研究も行われている [20,21]。

これらの研究が VO が持つ物理特性を力覚提示によって再現するのに対し、スタイラス自体の物理特性を変化させることで硬軟を知覚させる手法も提案されている。“FlexStroke” [22] は先端のジャミング遷移を用いて剛性を変化させ、筆記具の感触を再現する。“VnStylus” [23] は、先端のコンプライアンスを可変とし、VO の触覚レンダリングを向上させる。これに対し、我々は、人工筋肉機構によりスタイラス関節の曲げ剛性を連続的に制御する “Transtiff” を提案している [9–12]。本研究は、Transtiff の剛性制御技術を応用し、実物体プロップと組み合わせることで、より豊かな触覚表現を目指すものである。

2.3 棒状ツールを介した触覚知覚と視触覚統合

棒状ツールを介した触覚知覚の特性は、心理物理学の分野で古くから検証されている。LaMotte らは、スタイラス越しでも柔軟物体の硬軟弁別が可能であり、特にタッピング動作が識別精度を高めることを示している [24]。また、剛体ツール越しの粗さ弁別 [25] や、箸型デバイスによる重量弁別 [26] など、ツールを介した様々な知覚特性が報告されている。これらの研究は、ツールを介しても物体の物理特性がある程度、知覚可能であることを示している。

一方で、硬軟知覚は触覚情報のみならず、視覚刺激からも強い影響を受ける。Pseudo-stiffness の研究では、視覚的な変形量が触覚的な硬軟の知覚を変化させることが示されている [27]。スタイラスを用いた状況においても、視覚刺激と触覚刺激が不一致な場合にはストール様の干渉が生じ、反応時間の遅延や知覚の揺らぎが報告されている [28]。本研究では、スタイラスの剛性制御と VO の視覚的な変形提示を組み合わせ、視触覚情報が統合した硬軟知覚を提供することで、ユーザが複数の VO の形状および硬軟を体験できるシステムの構築を目指す。

3. 提案手法

本章では、TouchMorph の設計・実装およびそのシステム構成について述べる。TouchMorph は、VR 環境内で VO の形状と硬軟を再現するシステムであり、スタイラス型インタフェース（Transtiff）を使用して剛性制御を行う。本システムでは、複数の形状を持つ実物体プロップとスタイラスの剛性制御を組み合わせ、ユーザに硬軟知覚を提供する。



図 1 ターンテーブルに設置された実物体プロップと剛性変化インタフェース (Transtiff) から構成される TouchMorph の外観

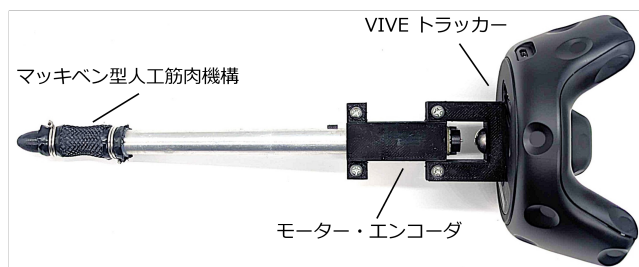


図 2 Transtiff (関節長 15 mm) と VIVE トラッカーの外観

3.1 TouchMorph のシステム構成

図 1 に TouchMorph の外観を示す。TouchMorph は、ターンテーブルに配置された複数の 3D プリント実物体プロップと、スタイラス型インタフェースである Transtiff を用いて構成する。実物体プロップは、直方体 (10 cm × 10 cm × 5 cm)、円錐 (10 cm × 10 cm × 10 cm)、および球体 (10 cm × 10 cm × 5 cm の半球) から構成され、ユーザは VR 環境内でこれらのプロップに触れることができる。各プロップは直径 40 cm のターンテーブル上に設置され、ユーザが選択した VO の形状に合わせて実物体プロップが切り替えられる。

図 2 に示す Transtiff は、スタイラスの剛性を制御できるインタフェースで、スタイラスの先端部の剛性を変化させることにより、硬軟知覚を操作する。本研究では、このスタイラスの剛性制御を使用して、VO の硬軟を物理的に再現する。本システムは、HMD を用いて VR 環境内に VO を提示し、ユーザはスタイラスを使用して実物体プロップに触れることによって、VO の形状と硬軟を知覚できる。このシステムでは、スタイラスの剛性と実物体プロップの形状変更により、VO の形状と硬軟を一貫して表現できる。

3.2 実物体プロップとスタイラスの連携

TouchMorph では、実物体プロップの形状選択とスタイラスの剛性制御が連携して動作することにより、ユーザに多様な形状に対する硬軟知覚を提供する。ターンテーブル

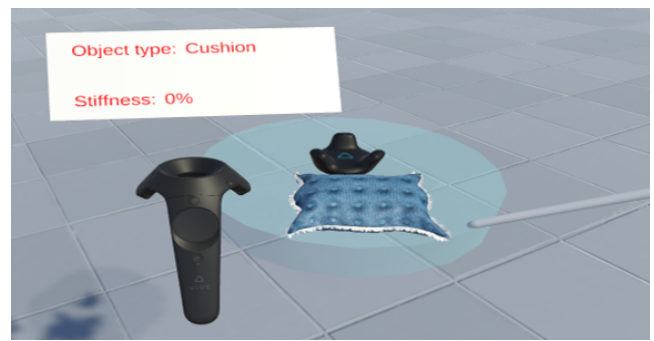


図 3 複数種類の形状の VO の硬軟触覚を体験できる TouchMorph アプリケーション

上のプロップは、ユーザが選択した VO の形状に合わせて切り替えられ、その形状に対応する剛性設定が Transtiff に適用される。これにより、ユーザは異なる形状を持つ VO と物理的にインタラクションしているかのような感覚を得ることができる。

図 3 に示す TouchMorph アプリケーションでは、直方体形状の VO にはクッション、サンドイッチ、ストーンゴーレムといった異なる硬軟を再現し、円錐形状の VO には帽子、三角コーン、イカを、球形状の VO にはスポンジボール、オレンジ、タコといった物体をそれぞれ割り当てた。これにより、ユーザは VO の見た目と一致する硬軟触覚を知覚できる。現状のシステム構成では、剛性切替に約 30 秒、プロップの回転に約 8 秒の時間を要する。剛性切替およびプロップ回転に遅延が発生するため、これらの遷移をユーザにとって自然に感じさせるために、切替中に煙のエフェクトを表示する演出を行い、体験の連続性を保つ設計を採用している。遅延を最小限に抑えつつ、スムーズな体験を提供できるよう調整を行っている。

また、ユーザ操作に応じて、PC からの指示で剛性レベルの選択や微調整を行い、スタイラスの剛性制御が VR 環境内で適切に反映されるようになっている。これにより、物理的なプロップの形状は最小限のセットで維持しながら、VO の硬軟や形状を多様に表現できる。

4. インタフェースによる触覚知覚に関するユーザ評価

本実験では、TouchMorph で用いるインタフェース (Transtiff) が、VO の硬軟に基づく触覚フィードバックを正確に再現できるかどうかを評価する。物体の材質特性に基づく剛性の変化に対して、インタフェースが適切に触覚を再現できるかを確認することを目的とする。

4.1 実験環境と条件

実験には、21 歳から 24 歳の 12 名 (男性 7 名、女性 5 名) が参加した (平均年齢 22.4 歳、標準偏差 1.0)。本実験では、剛性レベルが広範囲に渡って制御可能な関節長

10 mm および 15 mm のインタフェースを使用した。インタフェースは、最小・中間・最大剛性の3条件で設定した。VOは、最も硬いテニスボール、中間の硬軟を持つプラスチックボール（ポリ塩化ビニル製を想定）、最も軟らかいスポンジボールを用意した。とりわけ、本実験は Transtiff の異なる関節長（10 mm・15 mm）が、硬軟知覚に与える影響を比較することを主目的としている。提示される刺激に対して、実験参加者が3つの選択肢の中から最も近い硬軟のVOを選択する形式を採用しており、結果として3択課題となっている。この課題形式では偶然正答する確率が33.3%となる制約があるが、関節長の違いによって生じる硬軟知覚の相対的な傾向を比較するという目的に対しては十分に機能すると判断した。

本研究で用いた剛性レベルは、スタイラス内部のピストン位置により定義した。最大剛性は、モータがピストンを駆動できる最大移動量に達した状態（モータ停止位置）とし、最小剛性はピストンを駆動させず加圧を行わない状態とした。中間剛性は、最大から最小までの移動範囲を5等分し、その中間剛性に相当する位置を算出し設定した。また、視覚的な変形提示については、VOの種類に関わらず同一の変形率を適用した。押し込み量に応じてVOの変形が比例的に変化するように設定し、各剛性レベルとの対応が一貫するよう調整した。これらの設定により、剛性提示および視覚変形提示の条件を統一し、実験の再現性を確保した。

インタフェースの剛性が再現された物体の変形と適切に対応していることを確認するため、事前にフォースゲージを使用してVOの剛性を測定・校正するテストを実施した。これに基づき、テニスボールをインタフェースの最大剛性、プラスチックボールを中間剛性、スポンジボールを最小剛性に相当するものとして選択した。

次に、VR環境を構築し、スタイラスで押すとVOが変形するように設定した。本実験では、各VO（テニスボール、プラスチックボール、スポンジボール）に対して、インタフェースの最小・中間・最大の3種類の剛性レベルをすべて提示し、その違いを比較できるようにした。また、事前に各VOの現実の変形特性を測定し、テニスボールが最大剛性、プラスチックボールが中間剛性、スポンジボールが最小剛性に最も近い物性を示すことを確認した。各VOの見た目の変形は統一した条件で評価した。実験で使った実物体は直径70mmの3Dプリントされた球体で、VIVEトラッカーに接続されており、選択したVOの実際のボールのサイズに一致する。

4.2 実験手順

実験の環境およびVOについては、図4に示す。参加者はHMD（VIVE Pro 2）を装着し、利き手でインタフェースを三脚把握I型 [29] で把持する。本研究で用いた三脚把



図4 左：評価に使用したVO。右：ユーザがインタフェースを使って3Dプリントされた球体に触れている様子

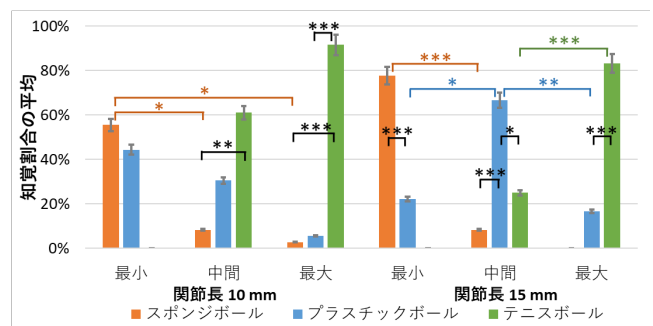


図5 実験で使用した異なる素材に対する知覚割合。括弧内は統計的に有意な差を示す (*: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .001$)。エラーバーは95%信頼区間を示す。

握I型とは、示指・中指・母指の3指で細長い物体を支持する把握様式であり、筆記具などの操作において一般的に用いられる把握形態である。インタフェースで球体の上部を押し込むことで触覚フィードバックを得る。

各参加者は、インタフェースの関節長2条件と剛性3条件、それぞれ3回の試行を行い、合計18回の試行を実施した。各試行では、参加者は「テニスボール」「プラスチックボール」「スポンジボール」の3つの中から、スタイラスの剛性に最も合致するVOを選択する。回答は口頭で行った。最後に、自由回答形式のアンケートを実施した。

試行の提示順序はランダムに設定した。聴覚の手がかりを排除するため、参加者にはHMDを介してホワイトノイズを聞かせた。また、VIVEコントローラを片手に持たせ、ボタンによりVOを切り替える操作を行った。

4.3 実験結果

各実験条件において、参加者が最も適したVOを選択した知覚割合を算出した。本実験では、剛性条件が選択反応に与える影響を評価するため、二項ロジスティック混合モデル (binomial GLMM) を用いた。従属変数は各試行に

において各 VO が選択されたか否かを表す二値反応，固定効果は剛性条件，ランダム効果は参加者を対象としたランダム切片とした．推定には glmmTMB パッケージ (family = binomial, logit link) を用いた．図 5 に結果を示す．

まず，関節長 10 mm における結果を示す．関節長 10 mm では，剛性が最大のときに「テニスボール」と選択した割合が最も高く，剛性が中間のときも「テニスボール」が最も高かった．また，剛性が最小のときには「スポンジボール」と選択する割合が最も高かった．

次に，関節長 15 mm における結果を示す．関節長 15 mm では，剛性が最大のときに「テニスボール」と選択した割合が最も高く，中間のときには「プラスチックボール」が，最小のときには「スポンジボール」が最も高かった．

関節長 10 mm における多重比較の結果を示す．剛性が最大のときに「テニスボール」と選択した割合と「プラスチックボール」や「スポンジボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .001$)．剛性が中間のときに「テニスボール」と選択した割合と「スポンジボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .01$)．剛性が最小のときに「スポンジボール」と選択した割合と，剛性が最大と中間のときに「スポンジボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .05$)．

関節長 15 mm における多重比較の結果を示す．剛性が最大のときに「テニスボール」と選択した割合と「プラスチックボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .001$)．また，剛性が最大のときに「テニスボール」と選択した割合と，剛性が中間のときに「テニスボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .001$)．剛性が中間のときに「プラスチックボール」と選択した割合と「テニスボール」と選択した割合には有意に差があり ($p < .05$)，「プラスチックボール」と選択した割合と「スポンジボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .001$)．また，剛性が中間のときに「プラスチックボール」と選択した割合と，剛性が最大のときに「プラスチックボール」と選択した割合には有意に差があり ($p < .01$)，剛性が中間のときに「プラスチックボール」と選択した割合と，剛性が最小のときに「プラスチックボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .05$)．剛性が最小のときに「スポンジボール」と選択した割合と「プラスチックボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .001$)．また，剛性が最小のときに「スポンジボール」と選択した割合と，剛性が中間のときに「スポンジボール」と選択した割合には有意に差があった ($p < .001$)．

4.4 考察

関節長 10 mm のとき，インタフェースの剛性が最大または中間のときに「テニスボール」と選択された割合が高く，剛性が最小のときには「プラスチックボール」ではな

く「スポンジボール」と選択される割合が高くなった．これらの結果は，関節長 10 mm のインタフェースでは，剛性を変えても VO に対応した触覚フィードバックが十分に得られていないことを示している．この理由として，関節長が短いため，VO を十分に凹ませることができず，触覚を感じにくくなった可能性がある．

一方，関節長 15 mm では，剛性が最大のときに「テニスボール」，中間のときに「プラスチックボール」，最小のときに「スポンジボール」が最も多く選択された．これらの結果から，関節長 15 mm では VO を十分に凹ませることができ，インタフェースの剛性設定により適切な触覚フィードバックが得られたと考えられる．そのため TouchMorph では関節長 15 mm のインタフェースを使用する．

5. 形状が異なる場合での剛性知覚の評価実験

本章では，提示面や見た目の変形度，形状が異なる場合でも，知覚される硬軟が再現されるかを検証する TouchMorph の有効性の実験について述べる．

5.1 実験設計

本実験では，実物体プロップにより VO の形状や見た目を切り替えつつ，剛性変化可能なインタフェースを用いることで，多様な形状の VO の硬軟知覚が再現可能であるかを検証する．これにより，TouchMorph の有効性を明らかにすることを目的とする．提示面は「平面提示」と「実物体プロップ提示 (ターンテーブル上オブジェクト提示)」の 2 条件とし，視覚と触覚の組み合わせである提示モダリティは「視覚のみ変化」「触覚のみ変化」「視触覚の変化」の 3 条件とした．これらの組み合わせにより下記に示す 6 条件を設けた．

- 条件 A：平面提示 × 視覚のみ変化：インタフェース＝最硬固定，見た目変形＝無 → 小 → 大 (各形状)．
- 条件 B：平面提示 × 触覚のみ変化：インタフェース＝硬 → 中 → 軟，見た目変形＝無 (各形状)．
- 条件 C：平面提示 × 視触覚の整合：インタフェースの硬 → 中 → 軟に合わせて見た目変形＝無 → 小 → 大 (各形状)．
- 条件 D：ターンテーブル提示 × 視覚のみ変化：インタフェース＝最硬固定，見た目変形＝無 → 小 → 大 (各形状)．
- 条件 E：ターンテーブル提示 × 触覚のみ変化：インタフェース＝硬 → 中 → 軟，見た目変形＝無 (各形状)．
- 条件 F：ターンテーブル提示 × 視触覚の整合：インタフェースの硬 → 中 → 軟に合わせて見た目変形＝無 → 小 → 大 (各形状)．

図 6 に平面提示のときの実験の様子を示す．平面条件では，ターンテーブル上のプロップ未設置部に位置する平坦な面を物理的な接触対象とした．この平面位置に対応する



図 6 平面提示のときの実験の様子

ように、VR 環境上にも同一位置に VO を提示し、参加者は物理的には平面を触れながら、視覚的には VO のみを変形する状況となるように構成した。この設定により、プロップを用いない場合の提示面が知覚に与える影響を評価できるようにした。

本実験では、各条件につき 3 形状（直方体・円錐・球）の物体を用意し、異なる設定の TouchMorph を利用して物体に触れてもらい印象評価を依頼した。実験参加者には VO の見た目の変形は無 → 小 → 大の順番で触れさせ、1 つの形状の物体に触れる際にはインタフェースが最大 → 中間 → 最小剛性の順番で触れさせた。実験では各条件あたり 3 試行実施し、実験参加者は 54 回の試行を実施した。VO の見た目の変形を図 7 に示す。各条件終了時に 7 段階のリッカート尺度（1 = 全くそう思わない～7 = 非常に思う）で「形状の知覚しやすさ」と「現実性」を評価する。「形状の知覚しやすさ」は、提示手法がどの程度形状を判断しやすいと感じられるかを評価するための主観的指標として設定したものであり、形状の識別正答率を直接測定することを目的とはしていない。また、「現実性」は柔らかさの知覚に限定した評価ではなく、スタイラス剛性、視覚的変形、物理プロップ提示が組み合わさった際に、実験参加者が実際の物体に触れているかのように感じられるかという物体性を含む総合的なリアリティを測るための項目として用いた。実験参加者は 21 歳から 23 歳の 10 名（男性 7 名、女性 3 名）が参加した（平均年齢 22.2 歳、標準偏差 0.9）。

5.2 実験環境と手順

実験では HMD（VIVE Pro 2）、インタフェース（関節長 15mm、VIVE Tracker 付）、ターンテーブル（直方体・円錐・球の 3D プリント製プロップ、VIVE Tracker 付）を用いる。VO の見た目の変形度は無／小／大の 3 段階を設定する。インタフェースの剛性は 3 条件（軟・中・硬）を設定し、「視覚のみ変化」条件では最硬固定とする。

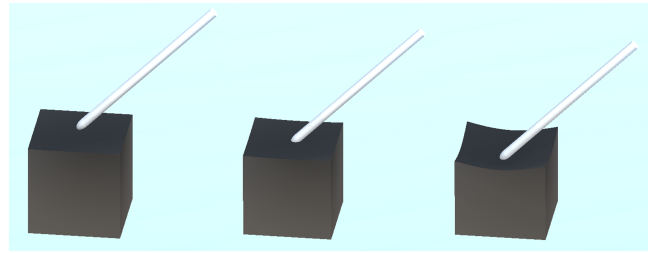


図 7 VO の見た目の変形、左から無・小・大

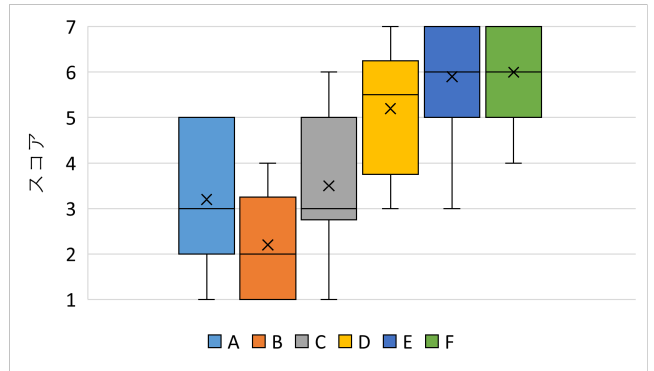


図 8 「形状の知覚しやすさ」の各条件における結果。各条件（A～F）における評価値の分布を箱ひげ図で示している。箱はデータの中央 50% を表し、箱の中の横線は中央値を示す。箱内に描かれた×印は平均値を表す。ひげは、箱の長さの 1.5 倍の範囲内にある最大値および最小値を示している。

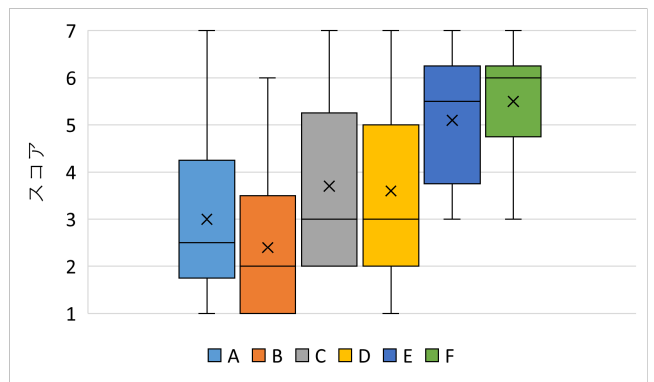


図 9 「現実性」の各条件における結果。図 8 と同様の箱ひげ図で示す。

手順は次の通りである。参加者に実験説明と同意取得を行い、HMD の装着・位置校正の後、インタフェースによる触知操作の練習を行う。本試行では前述の 6 条件をランダムに実施し、各条件内では実物体プロップを直方体、円錐、球の順に提示する。各形状において、条件に応じて「硬／無変形 → 中／小変形 → 軟／大変形」の順で 3 刺激を提示する。各条件終了時に主観評価を記入し、全条件終了後に自由記述により感想を尋ねた。

5.3 実験結果

本実験では、6 条件（A～F）ごとに 10 名の評価値を集計し、7 段階のリッカート尺度の中央値を算出した。条件

の定義は前章の実験設計に従う (A: 平面 × 視覚のみ, B: 平面 × 触覚のみ, C: 平面 × 視触覚整合, D: プロップ × 視覚のみ, E: プロップ × 触覚のみ, F: プロップ × 視触覚整合).

図 8 に「形状の知覚しやすさ」の結果を示す. 平面提示 (A, B, C) から実物体プロップ提示 (D, E, F) への切替で, 同一の視覚と触覚の組み合わせにおいて中央値の上昇が確認できた. 条件 F (6.0) および E (6.0) が最も高く, 次いで D (5.5) であり, 平面提示は B (2.0) が最も低く, 次いで A (3.0), C (3.0) であった. 条件 B および C は四分位範囲が広く, 評価の個人差が大きい. 一方で, E および F は四分位範囲が狭く評価が安定しており, F は中央値において評価が高くばらつきが最も少ない. また, A および D は中程度のばらつきを示している.

図 9 に「現実性」の結果を示す. 「形状の知覚しやすさ」と同様に, 実物体プロップ提示で中央値が上昇した. 条件 F (6.0) が最も高く, 次いで E (5.5), D (3.0), C (3.0), A (2.5) となり, B (2.0) が低い値となった. 条件 B および C が四分位範囲が広く, 評価の個人差が大きい. 一方で, E および F では四分位範囲が狭く評価が安定している. また, A および D は中程度のばらつきを示している. これらの結果から, 実物体プロップ提示条件 (D~F) は, 平面提示条件 (A~C) に比べて評価のばらつきが小さく, 知覚の安定性が高い傾向がある.

提示面 (平面/実物体プロップ) と提示モダリティ (視覚のみ/触覚のみ/視触覚整合) を要因とする 2 要因解析を行った. 順序尺度データに対する解析として, Aligned Rank Transform (ART) [30] を用いた分散分析を実施した. 「形状の知覚しやすさ」について分散分析を行った結果, 提示面の主効果が有意であった ($F(1, 45) = 90.11, p < .001$). 一方で, 提示モダリティの主効果は有意ではなかった ($F(2, 45) = 1.66, p = .20$). 事後比較として, 推定周辺平均に基づくペアワイズ比較を行い, Bonferroni 法で補正した. その結果, 形状の知覚しやすさにおいても, 実物体プロップ提示条件は平面提示条件より有意に高い評価を示した ($p < .0001$). 同様に「現実性」について ART 分散分析を行った結果, 提示面の主効果が有意であった ($F(1, 45) = 29.76, p < .001$). また, 提示モダリティの主効果も有意であり ($F(2, 45) = 6.46, p = .003$), さらに提示面と提示モダリティの交互作用も有意であった ($F(2, 45) = 4.23, p = .021$). 事後比較の結果, 提示面について, 実物体プロップ提示条件が平面提示条件よりも有意に高い評価を示した ($p < .0001$).

5.4 考察

本実験の結果から, 条件 E および F が他の条件に比べて高い評価を示す傾向があり, これらの条件の違いが参加者の知覚に強い影響を与える可能性があることが示された.

実物体プロップの有無が結果に影響していることが明らかになった. 特に, 同一の視覚と触覚の組み合わせ条件において, 実物体プロップ提示 (D~F) は平面提示条件 (A~C) に比べて, 中央値が向上している. 「形状の知覚しやすさ」では, 中央値が視覚のみ変化条件 (A-D) で 2.5 向上し, 触覚のみ変化条件 (B-E) で 4.0 向上し, 視触覚整合条件 (C-F) で 3.0 向上した. 「現実性」では, 中央値が視覚のみ変化条件で 0.5 向上し, 触覚のみ変化条件で 3.5 向上し, 視触覚整合条件で 3.0 向上した. この結果は, 実物体プロップを触覚的な物理境界として用いることで, 対象物の形状や輪郭といった視覚情報と触覚情報の整合性が高まり, 知覚の安定性が向上したと考える.

次に, 視覚と触覚の組み合わせ条件の違いに着目すると, 実物体プロップ提示下での評価の中央値は一貫して F (視触覚整合) \geq E (触覚のみ) $>$ D (視覚のみ) となった. 「形状の知覚しやすさ」は F (6.0), E (6.0), D (5.5) と高く, 「現実性」も F (6.0), E (5.5) が D (3.0) を大きく上回った. すなわち, 剛性提示 (触覚) に視覚変形を整合させることは, 現実性の増強に有効である一方, 形状の識別という課題に関しては, 触覚のみ (E) でも最大評価値に到達している. このことは, TouchMorph の設計において, 実物体プロップとスタイラス剛性制御の組み合わせが重要であり, 視覚整合は主に触覚体験のリアリティ向上に寄与することを示している.

一方, 平面提示 (A~C) の比較から, 触覚のみ (B) の評価中央値が最も低い (形状の知覚しやすさ: 2.0, 現実性: 2.0) ことを確認した. これは, 接触境界が平面であるため触覚手がかりが不明瞭になり, スタイラス剛性の違いが硬軟の知覚に結びつきにくいことを示唆している. また, 視触覚整合 (C) は視覚のみ (A) と触覚のみ (B) を上回り, 平面提示下でも感覚の整合が一定の効果を持つことがわかる. ただし, これらの中央値は条件 F と比較して低く, 本実験の結果では提案手法である実物体プロップとインタフェースによる剛性制御の組み合わせが最も優れていた.

ART を用いた 2 要因解析の結果から, 両評価指標において提示面の効果が明確に確認された. 特に, 「形状の知覚しやすさ」および「現実性」の双方において, 実物体プロップ提示は平面提示に比べて有意に高い評価を与えることが示された. この結果は, 実物体プロップが触覚的な物理境界として機能し, 視覚と触覚の情報が整合しやすくなることを定量的に示すものである. また, 「形状の知覚しやすさ」では提示モダリティの主効果は確認されず, 形状把握においては主に実物体プロップの有無が最も大きな影響を与えていることが示された. 一方で, 「現実性」においては提示面と提示モダリティの交互作用が有意であったことから, 視触覚整合条件 (F) が実物体プロップ提示下で特に効果的に機能していることが示される.

本実験で得られた結果は、提示目的や実装上の制約に応じて提示条件を選択するための設計指針として整理できる。プロップ提示が可能な環境では、触覚手がかりが明確に得られることから、視触覚を整合させた条件 (F) が形状識別や実在感の向上に寄与する。一方、平面提示のように物理的境界を提示できない環境では、触覚単独の効果が弱まり、視覚変形を併用する条件 (C) が相対的に有効となる。

6. 議論・展望

本節では、提案手法の有効性を踏まえ、設計指針・実物体プロップ設計・運用上の制約という観点から議論し、今後の展望を述べる。

6.1 スタイラス剛性と関節長の設計指針

本研究では、スタイラス側の曲げ剛性を操作することで、VOの硬軟知覚を段階的に制御できることを示した。一方で関節長にはトレードオフが存在する。関節長を短くすれば最大剛性は高くなるが曲げ変位は小さくなり、関節長を長くすれば最大剛性は低下するが曲げ変位は大きくなる。曲げ変位はVOの凹み量に強く寄与するため、再現したい素材やサイズに応じて関節長を切り替える設計が望ましい。今後は、関節ユニットのモジュール化と着脱により、素材ごと・タスクごとの最適関節長を迅速に構成できるようにすること、および剛性条件(軟・中・硬)の細分化と視覚変形の最適化を同時に制御するシステムの導入が有効である。さらに、エッジ接触時に局所的に軟化させて曲面のように感じさせるような剛性の時間変化を利用した錯覚もVR体験の没入感の向上に寄与する可能性があり、リアルタイム制御の設計空間を広げる余地がある。

6.2 実物体プロップ形状と接触安定性：円錐の滑りと形状拡張

TouchMorphでは実物体プロップとして直方体・円錐・球を用いたが、円錐は接触面積が小さく、接触力に対する接線成分が増えるため滑りが生じやすいという課題があった。この問題に対しては、実物体プロップ表面に高摩擦コーティング(ゴムライニングや微細な凹凸加工)を施す、円錐の角やエッジを丸めて接触面を安定させる、プロップの向きを制御して接触角度を浅く保つ方法などの手段が考えられる。また、今後は実物体プロップの形状を視覚的に錯覚させる手法や、物理的にプロップの形状を変形する手法を開発することが重要である。例えば、円柱、くさび、トーラス、曲面などを追加し、シーンごとに最小限のプロップで最大の形状を再現できるようにデバイス設計を行う。その際、プロップの選択とスタイラス剛性の組み合わせを最適化することで、滑りを減らし、知覚の一貫性を保つことができると考える。

6.3 運用制約とリアルタイム化に向けた設計

6.3.1 実験設計上の制約

第5章の実験の設計においては、提示面(平面/プロップ)と視触覚整合の効果を検証することを主目的とし、条件数を過度に増加させることなく、円滑な実験進行を確保するため、基本的な実験デザインを採用した。そのため、視覚・触覚の両方を固定したベースライン条件や提示順のランダム化、不整合条件の導入は行わず、方法的な制約が存在する。この設計方針により、結果の一般化には一定の制約が残るものの、本研究の目的である提示面と視触覚整合の影響を比較検証するうえでは、必要な検証可能性は十分に確保されていると判断した。今後は、より多様な条件設定を導入することで、結果の再現性および一般化可能性を一層高めることが求められる。

6.3.2 システム運用上の制約

現在の実装では、剛性の切り替えやプロップの回転によって体験の連続性が途切れる可能性がある。現状では演出によってその遷移を自然に見せているが、今後は次の操作を予測してあらかじめ剛性を設定する仕組みや、似た形状・硬軟の間で素早く切り替えられる構造を導入することが求められる。例えば、ユーザが次に選択するであろう形状や硬軟を予測し、遷移を前もって設定しておくことで、タスク設計の段階でも切り替えが起こりにくい流れを作り、よりスムーズでリアルタイム性の高い体験を実現できると考えられる。また、内部圧力や曲げ量を計測して制御に反映させることで、剛性の再現精度と切り替え速度の両立が期待できる。さらに、長時間の使用を想定した場合、ユーザが感じる疲労や不快感を最小限に抑えるため、デバイスの重心を手元側に寄せたり、グリップ径を調整したりすることが重要である。特に、長時間の操作においては、重量が均等に分散されていないと手首や腕に負担がかかり、使用感が悪化する可能性がある。このため、質量分布の最適化は、今後の重要な課題であり、ユーザが快適に使用できるようデバイスの形状や質量設計を改善することが求められる。

本手法の運用においては、プロップ形状による接触安定性や、剛性切替およびプロップ切替に伴う遅延が条件選択に影響する。例えば、円錐プロップは滑りが生じやすいため、視覚変形を併用する条件の方が知覚が安定する可能性が高い。一方、切替遅延が大きい環境では、剛性切替やプロップ切替を必要としない視覚のみを変化させる条件を選ぶことで、提示の途切れによる没入感の低下を抑えられる。このように、提示面や整合性だけでなく、プロップの扱いやすさと切替負荷も考慮することで、利用環境に応じた適切な条件選択が可能となる。

6.4 応用可能性と想定シナリオ

本手法は、実物体プロップによる形状提示とスタイラス

剛性制御による硬軟提示を同時に行え、かつ第5章の評価でプロップ提示の有効性が確認されたことから、形状と硬軟の双方が重要となる作業に応用可能であると考えられる。例えば、医療や製造分野における触診や素材判別のトレーニングにおいて、異なる硬軟や形状を少数のプロップで効率的に提示できる点は有用である。また、デザイナーが複数の素材感や変形特性を比較しながら造形を行うプロダクトデザイン支援においても、スタイラスの剛性制御を併用する本方式は、試作物を物理的に作らずに質感を評価するための一手法となり得る。これらの応用可能性は、本システムが多様な作業環境に適応していることを示している。

以上より、TouchMorphは本研究で扱ったプリミティブな形状において、基準プロップとスタイラス剛性の組み合わせが形状と硬軟の提示に有効であることを確認した。しかし、他の形状への適用には、今後さらなる検証が必要である。今後は、関節モジュールの交換可能化や、様々な形状に対応できるプロップセットの拡張、摩擦制御による接触の安定化、高速で剛性を切り替える実時間制御を統合する予定である。また、シーンに応じて最適なプロップと設定を選べるようにし、ユーザの操作に応じて適切なフィードバックを自動的に調整できる仕組みを提供することで、より汎用的な柔軟な触覚インタラクション基盤を実現する。

7. まとめ

本研究では、剛性変化スタイラス Transtiff と実物体プロップを統合した触覚提示システム TouchMorph を開発し、VOの硬軟と形状の再現を実現した。評価実験の結果、Transtiffの剛性制御がユーザの硬軟知覚に対応し、触覚的なリアリティを高めることが示された。また、実物体プロップの有無と視触覚の整合性が知覚に与える影響を分析した結果、プロップの提示が形状の知覚を安定させ、視触覚整合が実在感の向上に寄与することが確認できた。これらの成果は、物理的制約を最小限に抑えながら多様な硬軟を提示できる汎用的な触覚インタラクション手法の可能性を示している。今後は、関節モジュールの交換化や実物体プロップ形状の拡張、剛性切替の高速化およびリアルタイム制御の導入を進め、実時間で多様な物体特性を提示できる触覚体験基盤への発展を目指す。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP22K18424 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Miller, L. E., Fabio, C., Ravenda, V., Bahmad, S., Koun, E., Salemme, R., Luauté, J., Bolognini, N., Hayward, V. and Farne, A.: Somatosensory cortex efficiently processes touch located beyond the body, *Current Biology*, Vol. 29, No. 24, pp. 4276–4283 (2019).
- [2] Perret, J. and Vander Poorten, E.: Touching Virtual Reality: A Review of Haptic Gloves, *ACTUATOR 2018; 16th International Conference on New Actuators*, pp. 1–5 (2018).
- [3] Teng, S.-Y., Kuo, T.-S., Wang, C., Chiang, C.-h., Huang, D.-Y., Chan, L. and Chen, B.-Y.: PuPoP: Pop-up Prop on Palm for Virtual Reality, *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 5–17 (online), DOI: 10.1145/3242587.3242628 (2018).
- [4] Murray, B. C. M., Peele, B. N., Xu, P., Spjut, J., Shapira, O., Luebke, D. and Shepherd, R. F.: A variable shape and variable stiffness controller for haptic virtual interactions, *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 264–269 (online), DOI: 10.1109/ROBOSOFT.2018.8404930 (2018).
- [5] Sun, Y., Yoshida, S., Narumi, T. and Hirose, M.: PaCaPa: A Handheld VR Device for Rendering Size, Shape, and Stiffness of Virtual Objects in Tool-Based Interactions, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300682 (2019).
- [6] Heo, S., Chung, C., Lee, G. and Wigdor, D.: Thor's Hammer: An Ungrounded Force Feedback Device Utilizing Propeller-Induced Propulsive Force, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–11 (online), DOI: 10.1145/3173574.3174099 (2018).
- [7] Kato, G., Kuroda, Y., Nisky, I., Kiyokawa, K. and Takemura, H.: HapSticks: Tool-Mediated Interaction with Grounding-Free Haptic Interface, *SIGGRAPH Asia 2015 Haptic Media And Contents Design*, SA '15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2818384.2818387 (2015).
- [8] Zenner, A. and Krüger, A.: Drag:on: A Virtual Reality Controller Providing Haptic Feedback Based on Drag and Weight Shift, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300441 (2019).
- [9] Ogura, A., Ito, K. and Itoh, Y.: Transtiff: A Stick Interface with Various Stiffness by Artificial Muscle Mechanism, *Adjunct Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22 Adjunct, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3526114.3558777 (2022).
- [10] Ogura, A., Ito, K., Yoshida, S., Tanaka, K. and Itoh, Y.: Transtiff: Haptic Interaction with a Stick Interface with Various Stiffness, *ACM SIGGRAPH 2023 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3588037.3595402 (2023).
- [11] 小倉 歩, 伊藤弘大, 吉田成朗, 田中一敏, 伊藤雄一: Transtiff: 人工筋肉機構による硬軟変化関節を備えた棒状触覚デバイスの提案, *インタラクション 2024*, pp. 41–49 (2024).
- [12] Komatsu, R., Ogura, A., Yoshida, S., Tanaka, K. and Yuichi, I.: Transtiff: A Stylus-shaped Interface for Rendering Perceived Stiffness of Virtual Objects via Stylus Stiffness Control, *2025 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 645–655 (online), DOI: 10.1109/VR59515.2025.00087 (2025).

- [13] Yixian, Y., Takashima, K., Tang, A., Tanno, T., Fujita, K. and Kitamura, Y.: ZoomWalls: Dynamic Walls that Simulate Haptic Infrastructure for Room-scale VR World, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 223–235 (online), DOI: 10.1145/3379337.3415859 (2020).
- [14] Hoshikawa, Y., Fujita, K., Takashima, K., Fjeld, M. and Kitamura, Y.: RedirectedDoors+: Door-Opening Redirection with Dynamic Haptics in Room-Scale VR, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 30, No. 5, pp. 2276–2286 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2024.3372105 (2024).
- [15] Gomi, R., Suzuki, R., Takashima, K., Fujita, K. and Kitamura, Y.: InflatableBots: Inflatable Shape-Changing Mobile Robots for Large-Scale Encountered-Type Haptics in VR, *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3613904.3642069 (2024).
- [16] Wang, D., Ohnishi, K. and Xu, W.: Multimodal Haptic Display for Virtual Reality: A Survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 67, No. 1, pp. 610–623 (online), DOI: 10.1109/TIE.2019.2920602 (2020).
- [17] 3DSystems: Touch X, <https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x/> (Accessed:2024-04-28).
- [18] Withana, A., Kondo, M., Makino, Y., Kakehi, G., Sugimoto, M. and Inami, M.: ImpAct: Immersive haptic stylus to enable direct touch and manipulation for surface computing, *Comput. Entertain.*, Vol. 8, No. 2 (online), DOI: 10.1145/1899687.1899691 (2011).
- [19] Nagasaka, S., Uranishi, Y., Yoshimoto, S., Imura, M. and Oshiro, O.: Haptylus: haptic stylus for interaction with virtual objects behind a touch screen, *SIGGRAPH Asia 2014 Emerging Technologies*, SA '14, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/2669047.2669054 (2014).
- [20] Lee, J. C., Dietz, P. H., Leigh, D., Yerazunis, W. S. and Hudson, S. E.: Haptic pen: a tactile feedback stylus for touch screens, *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '04, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 291–294 (online), DOI: 10.1145/1029632.1029682 (2004).
- [21] Kodak, B. L. and Vardar, Y.: FeelPen: A Haptic Stylus Displaying Multimodal Texture Feels on Touchscreens, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 28, No. 5, pp. 2930–2940 (online), DOI: 10.1109/TMECH.2023.3264787 (2023).
- [22] Liu, X., Xia, H. and Gu, J.: FlexStroke: A Jamming Brush Tip Simulating Multiple Painting Tools on Digital Platform, *Adjunct Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13 Adjunct, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 23–24 (online), DOI: 10.1145/2508468.2514935 (2013).
- [23] Kara, O. C. and Patoglu, V.: VnStylus: A Haptic Stylus With Variable Tip Compliance, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 13, No. 4, pp. 777–790 (online), DOI: 10.1109/TOH.2020.2967694 (2020).
- [24] LaMotte, R. H.: Softness Discrimination With a Tool, *Journal of Neurophysiology*, Vol. 83, No. 4, pp. 1777–1786 (online), DOI: 10.1152/jn.2000.83.4.1777 (2000). PMID: 10758090.
- [25] Klatzky, R. L. and Lederman, S. J.: Tactile roughness perception with a rigid link interposed between skin and surface, *Perception & psychophysics*, Vol. 61, No. 4, pp. 591–607 (online), DOI: 10.3758/BF03205532 (1999).
- [26] Kato, G., Kuroda, Y., Nisky, I., Kiyokawa, K. and Takemura, H.: Design and Psychophysical Evaluation of the HapSticks: A Novel Non-Grounded Mechanism for Presenting Tool-Mediated Vertical Forces, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10, No. 3, pp. 338–349 (online), DOI: 10.1109/TOH.2016.2636824 (2017).
- [27] Weiss, Y., Villa, S., Schmidt, A., Mayer, S. and Müller, F.: Using Pseudo-Stiffness to Enrich the Haptic Experience in Virtual Reality, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3544548.3581223 (2023).
- [28] 石川遼太郎, 亀岡嵩幸, 蜂須 拓: ストループ課題に基づいたタッピングによる硬さ知覚における視触覚間の干渉効果の評価, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 28, No. 4, pp. 283–290 (オンライン), DOI: 10.18974/tvrsj.28.4.283 (2023).
- [29] KAMAKURA, N., OHMURA, M., ISHII, H., MITSUBOSHI, F. and MIURA, Y.: POSITIONAL PATTERNS FOR PREHENSION IN NORMAL HANDS, *The Japanese Journal of Rehabilitation Medicine*, Vol. 15, No. 2, pp. 65–82 (online), DOI: 10.2490/jjrm1963.15.65 (1978).
- [30] Wobbrock, J. O., Findlater, L., Gergle, D. and Higgins, J. J.: The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 143–146 (online), DOI: 10.1145/1978942.1978963 (2011).