

# 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

小倉 歩<sup>1,a)</sup> 伊藤 弘大<sup>1,b)</sup> 吉田 成朗<sup>2,c)</sup> 田中 一敏<sup>2,d)</sup> 伊藤 雄一<sup>1,e)</sup>

**概要:** 私たちは生活の中で、日常的に箸やペンに代表される「棒状物体」を操作している。手から得られる微細な感触の変化を知覚することで、巧みな棒状物体の操作を可能にしているとともに、棒状物体の先端で触れる対象物を間接的に感じ取ることができる。本研究ではそうした手で把持する棒状物体によるインタラクションに着目し、動的に硬軟変化する関節を備えた棒状デバイスである“Transtiff”を提案する。一般的に曲げることができない棒状の物体に対し、Transtiffでは操作する棒の硬さを変化して知覚させることで、棒状物体の特性やそれを介して触れる対象物の硬さが変化したかのように感じさせることを狙う。本デバイスは人工筋肉の機構を採用し、小型のモータを利用したピストン機構によって、柔軟なチューブの中で液体への圧力を制御することで、関節の硬軟制御を行う。デバイスの性能評価として、硬度測定実験と剛性測定実験を実施した。その結果、Transtiffの硬度は一般的な輪ゴムからタイヤ程度の硬さまで変化し、剛性は特定の条件で最大4.33倍に増加することを確認した。また、本デバイスを用いたアプリケーションを実装し、デモンストレーションを実施した結果、Transtiffがペンやブラシに類似した触覚を提供できることが分かった。

## 1. はじめに

人々は日常的に、箸やペンに代表される「棒状物体」を手で操作して生活している。人間の手の感覚を司る脳の領域は他の人体部位に比べて大きく、細かな情報を処理することを得意としている [1]。こうした処理基盤をもとに、手から得られる感触の変化を知覚することで、人間は巧みな棒状物体の操作を可能にしている [2]。この際、棒を把持したときの感覚は操作体験に大きく影響を与えることから、把持感覚を制御する技術によって、触覚体験を拡張することができると思われる。

近年はバーチャルリアリティ (VR) 技術の進展に伴い、視聴覚にとどまらない感覚提示として触覚提示の研究が盛んに行われている。特にバーチャル空間上のオブジェクトに直接手で触れるような感覚を生み出すためのデバイスが数多く提案されている [3-9]。デバイスが提示する感覚は、オブジェクトの大きさ・形状・重量・テクスチャ・硬さなど多岐に渡り、目的ごとに異なる要素を提示している。こ

の内、硬さの知覚は、数種類の知覚原理に基づいて行われており、ある程度の硬さのものを触るときは、対象物を押したときのたわみ具合と反発力を感覚として受容し、硬さとして知覚するとされている [10]。そのため、動的な硬さの変化を実現するのは難しく、既存の力触覚デバイスの多くは、装着や設置を必要とするものや、複雑な機構を持つものが多い。

そこで本研究では、既存の研究 [3-9, 11-13] と異なり、ユーザの手や指に直接触覚を提示せず、簡素な機構でデバイス自身の硬さを変化させることで、間接的にユーザの知覚する触覚を変え、デバイスの使用感そのものを変化させることを目指す。これに向けて、動的に硬さが変わる関節を適用した棒状インタフェースを提案する。硬軟変化する関節は、人工筋肉の機構を採用し、小型のモータを利用したピストン機構によって、柔軟なチューブの中で液体の圧力を制御することで実現する。この機構を適用したインタフェースを作成し、操作する棒の硬さを変化させ、あたかも違うオブジェクトを把持しているかのような感覚を再現する。

本稿では、棒先端の関節が動的に硬軟変化する触覚インタフェース「Transtiff」を実装する。硬度変化・剛性変化の計測実験を実施し、Transtiffの硬軟変化に関して、物性および変形の観点から評価する。また、作成した本デバイ

<sup>1</sup> 青山学院大学 大学院理工学研究科

<sup>2</sup> オムロン サイニックス株式会社

a) ayumu.ogura@x-lab.team

b) kodai.ito@it.aoyama.ac.jp

c) shigeo.yoshida@sinicx.com

d) kazutoshi.tanaka@sinicx.com

e) itoh@it.aoyama.ac.jp

ス用のアプリケーションについて説明し、当アプリの体験者から得られた意見について述べる。

## 2. 関連研究

本章では、2.1 節で手掌部への触覚変化を対象とした既存のデバイスについて述べ、本研究と同様の「棒状インタフェース」に関する多くの検討がなされていることを説明する。一方で2.2 節では、我々の新たなアプローチである、硬軟変化関節を備えたデバイスの実装に使用した、ソフトアクチュエータ・人工筋肉に関する要素技術を紹介する。

### 2.1 手掌部への触覚変化を対象とするデバイス

人間の手に触覚体験を提供する研究は数多く行われている。手全体への触覚提示を可能とするグローブ型のデバイス [3, 4] や、手掌部への出力を主としたハンドヘルド型デバイス [5-7] など、アプローチは多岐に渡る。最新のグローブ型デバイスとして、近年 HaptX 社が“HaptX Gloves G1” [4] を公開している。手掌部に均一に配置された空気圧式アクチュエータと、外骨格内のワイヤーを制御することで、バーチャル空間上のオブジェクトに直接触れるかのような体験ができる。一方で、グローブ型デバイスは手掌部全体に触覚を提示できるものの、身体への装着が必要となる。

ハンドヘルド型デバイスの開発も盛んであり、Teng らは、手掌部のエアバッグを、バーチャル空間上のオブジェクトと同様の形状に膨らませることで把持感を提示する“PuPoP” [5] を提案している。Sun らの提案する“PaCaPa” [6] では、バーチャル空間上の棒でオブジェクトに触れた時の感覚を、実際に把持しているデバイスが開くことによる手のひらと指への圧力変化によって提示する。これにより、バーチャルオブジェクトに対する大きさ・形・硬さの知覚を可能にしている。また、Heo らの提案する“Thor’s Hammer” [7] は、プロペラの推進力を利用することで、3 次元的な力覚フィードバックを実現している。これらのデバイスは、いずれもバーチャル空間におけるオブジェクト形状や接触感覚・力覚の再現を目的としており、手掌部への触覚提示が VR 体験の質を向上させることを示している。

本研究との関連が深い触覚提示に棒状デバイスを用いる研究では、特にペン型デバイスとしての実装が多く見られる。3D Systems 社が販売する“Touch X” [8] は、PC 画面上に表示されているオブジェクトに触れた際の反力を、ペンの部分から力覚フィードバックとして出力することができる。一方で、デバイスが設置型であるためペンの可動域に制約が生じるという課題を持つ。Kyung らは、デバイスに内蔵された数種類のバイブレータとスピーカからのフィードバックによって直感的な操作を可能にする“wUbi-pen” [11] を提案している。このデバイスでは、振

動・衝撃・圧力・音の提示をしており、硬軟感覚の再現はしていない。Chen らの“MH-Pen” [12] は、ペン型デバイスの内部に磁気粘性流体（MR 流体）アクチュエータを内蔵し、コイルの磁界制御によって流体の剛性を制御することで、ペンの押し込み動作に対する知覚を変化させている。内蔵されたボイスコイルモータとリニアモータにより振動フィードバックも可能であり、タッチパネルでの触覚インタラクションに適している。このデバイスではペンを軸方向に押し込んだ際の硬軟感覚が変化するものの、径方向には変化しないため、ペンが曲がっているような感覚の再現は難しい。液体を利用したペン型デバイスとして Xu らは“Hydrauio” [13] を提案しており、人差し指に触れている水袋の剛性を制御することで、指腹へ触覚を提示している。提示部位は人差し指に限定されてしまうものの、流体ベースの触覚インタフェースの有用性を示している。Fellion らは柔軟に曲がるスタイラスである“FlexStylus” [14] を提案し、デバイスの曲がり具合に応じてストロークの描画を変化させるシステムを実現している。しかし、動的な硬軟変化機構は備えておらず、デバイスを硬くすることはできない。

また、本研究の応用と関連の深いペン型デバイスとして、Liu らは、粒子の密度によって状態変化する現象であるジャミング転移を用いたペンインタフェース“FlexStroke” [15] を提案している。デバイスの先端で空気圧を制御することでジャミング転移を起こし、中国筆・油筆・クレヨンの触覚感覚を再現できる。この研究では、デバイスの先端そのものを硬軟変化させており、本来の画材と非常に近い使用感を再現できるものの、応用先としてはペイントアプリケーションについてしか述べられていない。また、空気圧制御のため外部にコンプレッサが必要となる。これに対し本研究では、棒軸上の関節が硬軟変化することで、実際には棒先端自体の材質は変化していないのに道具の使用感が変化するため、ペン（ペイント）以外の棒状物体への応用も考えられる。また、硬軟制御には内部の流体のみを用いるため、予めデバイスに液体を充填する必要があるものの、外部コンプレッサを必要としないという点で構成が大きく異なる。

ペン型以外の棒状デバイスも研究されている。例えば、Kato らの“HapSticks” [9] は箸型のデバイスであり、箸の中央部に取り付けられたモータによってトルクを制御することで把持感覚を変化させ、バーチャル空間上で掴んでいるものの重量感を再現している。

棒状の道具を使用する前提で、ディスプレイ自体がユーザーに触覚をフィードバックをする研究もされている。Tsujiita らは、手術トレーニングのための皮膚組織表面を再現したディスプレイを提案している [16]。ディスプレイ内に MR 流体を配置し、電磁コイルとモータを用いて局所的に平面の硬軟を変化させることで、ユーザーが手術器具でディスプ

レイに触れる感触を変化させている。Watanabeらは、ペンデバイスでディスプレイに筆記する際に、仮想の筆先を表示することで「書き味」を再現し、疑似的な触覚変化を生成するシステム“FlexibleBrush”を提案している [17]。このように、使用する場面が限定的な場合は、ディスプレイ自体がフィードバックを行うシステムを用意することで、効果的に触覚を提示できる。

以上のように、デバイスを介して触覚を提示するデバイスはいくつも提案されている。しかし、身体への装着が必要、デバイスが設置型になる、もしくは外部機器の接続を必要とする、使用部品が多く構成が複雑になるといった課題が挙げられる。また、既存の硬軟提示を行う棒状デバイスに関しても、曲げ方向への硬軟提示ができないものや、硬軟変化が棒の先端全体に及ぶことで応用先が限定されてしまうといった問題がある。これに対し我々は、棒を介した触覚拡張においては、多くの出力装置を搭載せずとも、棒軸の一部の硬さが変わるだけで大きな触覚の変化が得られると考えた。そして、硬さが効率的に変化する要素技術として、ソフトアクチュエータ・人工筋肉に注目した。

## 2.2 ソフトアクチュエータ・人工筋肉

ソフトロボティクス技術の発展に伴い、柔軟な剛性変化が可能な関節の研究が進んでいる [18]。特に、空気圧によってアクチュエータの伸縮や屈曲を制御する手法はよく用いられており、ロボットハンドや [19]、パワーアシストデバイスなどに利用されている [20, 21]。これらの空気圧アクチュエータは、人工筋肉としても応用されることが多く [22]、2層のチューブ内で流体を加圧することにより軸方向に収縮する“マッキベン型人工筋肉” [23–26]、チューブの軸方向に繊維を配置することで人工筋としての収縮率を上昇させた“ワルシャワ型人工筋肉” [27]、蛇腹構造のゴムフィンガに対して空気圧制御を行うことで湾曲動作する“ニューマティックフィンガ” [28] など、様々な機構が提案されている。

また、空気圧を用いたソフトアクチュエータと、2.1節で前述したジャミング転移を組み合わせた提案もされている。Wallらは、レイヤージャミング（重ね合わせたシートに対するジャミング転移）を用いることで、剛性が大きく変化するソフトアクチュエータを提案している [29]。これにより、従来の手法よりも効率的に硬軟変化が可能なソフトアクチュエータを実現している。一方で、この手法ではアクチュエータの屈曲する方向が、シート面と対向する方向に限定されてしまい、シート面と平行な方向には曲がりづらい。

近年では、機能性材料の持つ特徴を利用するソフトアクチュエータも多く開発されている。Haoらは、低融点合金（LMPA）を埋め込み、ヒータで液体-固体の状態変化を起こすことで、従来よりも剛性の変化幅が大きいアク

チュエータを提案している [30]。Zhangらは、形状記憶ポリマー（SMP）をアクチュエータに埋め込むことにより、温度制御でポリマーの剛性を変化させ、耐荷重を向上させている [31]。また、磁界の強度によって剛性が変化する流体であるMR流体 [32] もよく利用されている。大場らは、圧縮ばねの周りに満たしたMR流体にかかる磁界を制御することで、ばねの保持力を変化させ、やわらかい動作を実現する直動型関節を提案している [33]。しかし、これらの機能性材料を用いた手法に関しては、入手や管理が難しく、容易に使用できないという難点がある。

以上のように、柔軟な剛性変化関節を実現しようとする研究は多い。レイヤージャミングを用いた手法では、関節が曲がる方向が限定されてしまい、触覚デバイスとして制限が生じてしまう。また、機能性材料を用いた手法に関しては、入手や管理が難しいという難点がある。これらの点から、単純な流体操作のみで実現できるソフトアクチュエータの構造が、触覚デバイスへの応用に適していると考えられる。そこで本研究では、本節で紹介した、流体を利用した人工筋肉として一般的な“マッキベン型人工筋肉”の機構を、小型の触覚デバイスの機構として応用する。これにより、前述した課題に捕らわれない簡素な機構かつ多くの棒状物体に応用可能な硬軟変化インタフェースの実装を目指す。

## 3. Transtiff

### 3.1 デバイスの概要

図1にデバイスの概要を示す。本提案では、チューブ（関節）部分の硬軟を制御することで、デバイスで触れたものの硬さに対する感覚を変化させることを目標としている。

人間が普段利用している棒状物体は多岐に渡るが、使用頻度が高く、ある程度径が大きくても違和感なく使用できるという点から、ペン型のデバイスを作成することにした。ペンのように、軽い・持ちやすいといった特性を損ねず、ユーザが知覚する硬軟感覚の変化を目指す。

### 3.2 プロトタイプの実装

作成したデバイスのプロトタイプ要件について説明する。図2にデバイスの構成を示す。作成したプロトタイプは、全長が16.8 mm、重量が43 g、持ち手の径が10 mmとなった。構造は大きく分けて、硬軟が変化する関節部、関節部にかかる圧力を制御するピストン部、ピストンを駆動させるモータ部、モータを制御する制御基板から構成される。制御基板の詳細については3.3節に示す。

デバイス内部では、エンコーダ付きモータ（DCモータ、GA12-N20, 100 rpm）に接続された送りねじが回転することでナットが直線的に移動し、取り付けられたピストンの往復運動が可能となっている。これにより、シリンダに留まっていた液体が加圧されることでシリコンチューブ方向

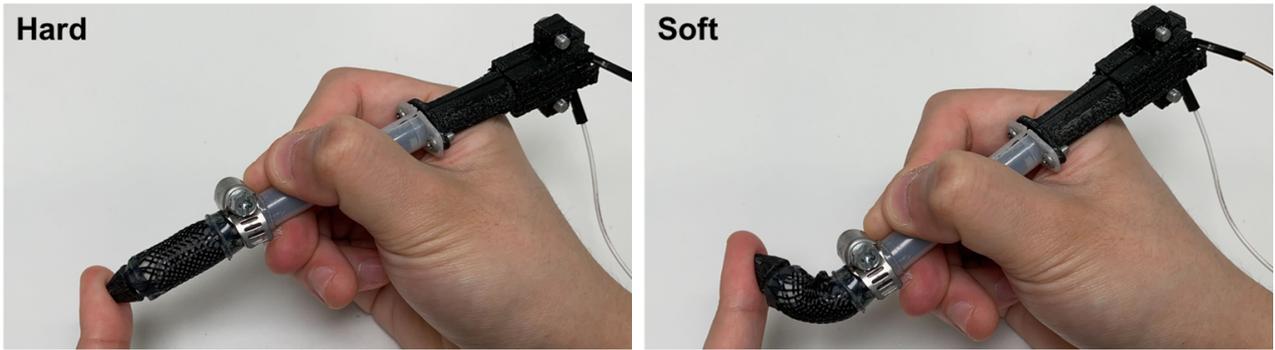


図 1 Transtiff (左：硬い状態, 右：柔らかい状態)

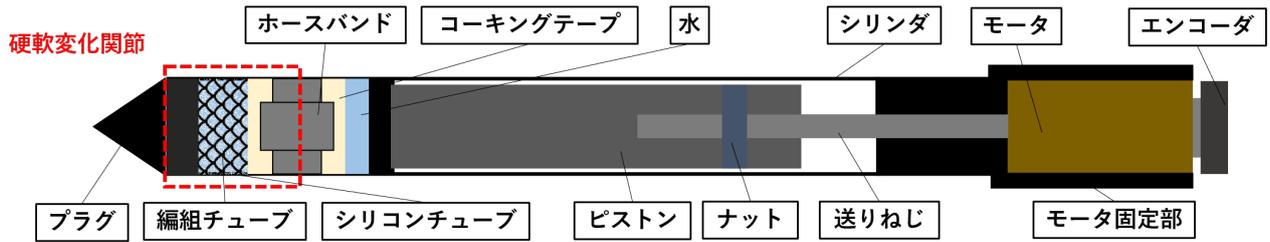


図 2 デバイスの構成

(関節部)に押し出される。関節部はマッキベン型人工筋肉の機構を備えており、内側がシリコンチューブ、外側がポリエステル製編組チューブの2層構造で構成されている。ピストンにより関節部で水を加圧すると、シリコンチューブは径方向へ膨張しようとする。しかし、外側の編組チューブが膨張を押しさえつけるため、軸方向への収縮が起き、関節全体の剛性が増加する。図3に剛性が増加するメカニズムを示す。

今回のプロトタイプの実装では、チューブの硬度変化する部分の長さは15 mmになるように設計した。これは、一般的にペンを把持した際の先端から指までの距離を参考に設定した。チューブの両末端は、液体の漏出を防ぐために、先端側にはペン先部品との接続が可能なネジ製のプラグの挿入、シリンダ側にはコーキングテープを巻きつけた上にホースバンドで締め付けをしている。シリンダやモータは一般的に市販されているものを使用し、ピストンやモータ固定部品は3Dプリンタを利用して自作した。

### 3.3 硬軟の制御手法

Transtiff では、関節部の硬軟を変化させるため、制御基板を介してピストン運動の方向と移動距離を制御している。制御基板はデバイス制御の中心となるマイコン (ESP32-DevKitC) と、モータの回転方向を変化させるためのモータドライバ (東芝製 TA7291P) から構成される。ユーザはタブレット端末 (Apple 製 iPad Pro) 上に Unity で実装したアプリケーションからピストンを操作することができ、マイコンとタブレットの間で Bluetooth 通信することで、指示を送信している。ピストン運動の方向は、モータ

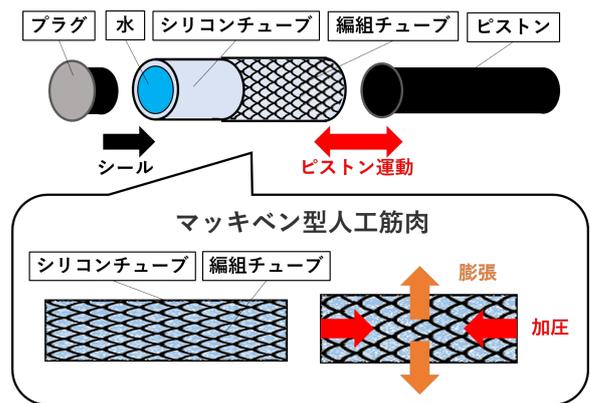


図 3 剛性増加のメカニズム

タの回転方向を切り替えることで制御している。一方で、ピストン運動の移動距離は、モータに取り付けられたエンコーダによって回転数を測定し、指定した回転数に到達するまでモータを駆動させる手法を取ることで、任意の距離分移動するよう制御する。図4に Transtiff のシステム構成を示す。

## 4. 性能評価

Transtiff の硬軟が実際に変化しているかを定量的に調査するため、2種類の測定実験を実施した。本章では、硬度および剛性測定のために実施した実験について述べ、測定結果から硬軟変化を評価する。

### 4.1 硬度変化の計測実験

本実験では、Transtiff の硬軟変化機構による、硬度の変化の度合いに関して定量的に評価することを目的として、

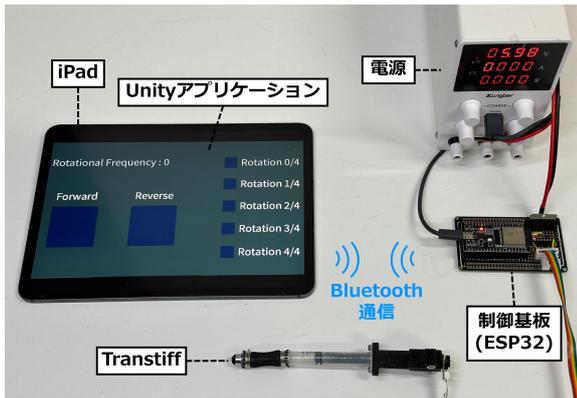


図 4 システム構成

硬度計（デュロメータ）を用いて Transtiff の関節部の硬度を測定した。これにより、本来主観的な感覚でしか得られない、硬い/軟らかいという感覚的な値を客観的に評価する。

#### 4.1.1 実験手順

実験手順として、Transtiff を台座に固定した状態で、関節部中央にデュロメータの測定針を合わせて測定した。測定には、JIS K 6253-1997, “加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法”の規格を参照し、タイプ A のデュロメータを 5 回押し込んだ際の中央値を測定値として記録した。デュロメータは、試料に測定針を押し込み、針の押し込み深さを硬度として 0 ~ 90 の値で取得することができる。また、硬度は相対的な硬さの差を示すものであるため単位を持たず、値が 0 に近いほど軟らかく、90 に近いほど硬い物体であることを示す。

今回は測定にあたり、Transtiff のピストンの押し込み量を変化させた。実験に用いた Transtiff は、定格電圧 (6 V) で駆動したモータでピストンを一定以上押し込もうとすると、モータのトルクが流体の加圧に必要な力に及ばず、ピストンが停止する挙動を示すため、この状態を「最大まで加圧した状態」と定義する。一切加圧してない状態から、最大まで加圧した状態を等間隔で分けるため、モータの回転数を揃えてピストンを移動させて、「加圧 0 %」「加圧 25 %」「加圧 50 %」「加圧 75 %」「加圧 100 %」の 5 条件を設け、各条件での値を測定した。図 5 に測定の様子を示す。

#### 4.1.2 結果・考察

表 1 に測定結果を示す。結果より、関節部の条件を「加圧 0 %」から「加圧 100 %」まで変化させると、硬度は 12 ~ 67 の範囲で増加した。一般的に、タイプ A デュロメータにおいて、硬度 10 ~ 20 は輪ゴム程度の硬さ、硬度 60 ~ 70 はタイヤ程度の硬さとされているため [34]、Transtiff では上記の物体の硬度を動的に再現することが可能である。今回の測定において、「加圧 0 %」「加圧 25 %」条件間の値の差が、他条件間の差よりも大きかった。これは、「加圧 0 %」条件では、ピストンが後退することによって関節部内部が



図 5 硬度測定実験

表 1 測定した硬度の中央値

| 測定対象     | 測定結果の中央値 |
|----------|----------|
| 加圧 0 %   | 12       |
| 加圧 25 %  | 31       |
| 加圧 50 %  | 45       |
| 加圧 75 %  | 57       |
| 加圧 100 % | 67       |

減圧された状態になり、シリコンチューブと編組チューブの間に隙間ができることで、他の条件と比較して低い測定値が出たと考えられる。

## 4.2 剛性変化の計測実験

本実験では、Transtiff の硬軟変化機構による、剛性の変化の度合いに関して定量的に評価することを目的として、フォースゲージを用いて Transtiff の関節部を曲げるのに必要な力（曲げ剛性）の測定・評価をした。

#### 4.2.1 実験手順

関節の曲げ剛性を定量的に測定するため、フォースゲージを用いた実験環境を作成した。図 6 に実験環境を示す。デジタルフォースゲージ（最大荷重 20 N、最小分解能 0.01 N）と、台座に固定した Transtiff の先端を接続し、計測スタンドを用いて垂直に降下させたときのフォースゲージの値を、Transtiff を曲げるのにかかった力、即ち曲げ剛性として取得する。今回利用する計測スタンドは、ハンドルを回すことで上下に移動し、基準点からの移動距離が 0.01 mm 刻みで分かる。これにより、各条件において、フォースゲージを同じ距離移動させたときの曲げ剛性を比較することができる。

実験の条件は 4.1.1 項と同様に 5 段階でピストンの押し込み量を変化させた Transtiff に対し、2.5 mm 間隔で 0 mm から 15.0 mm にかけてフォースゲージを降下させた際の値（6 点）を各 5 回取得し、その平均値を測定値として記

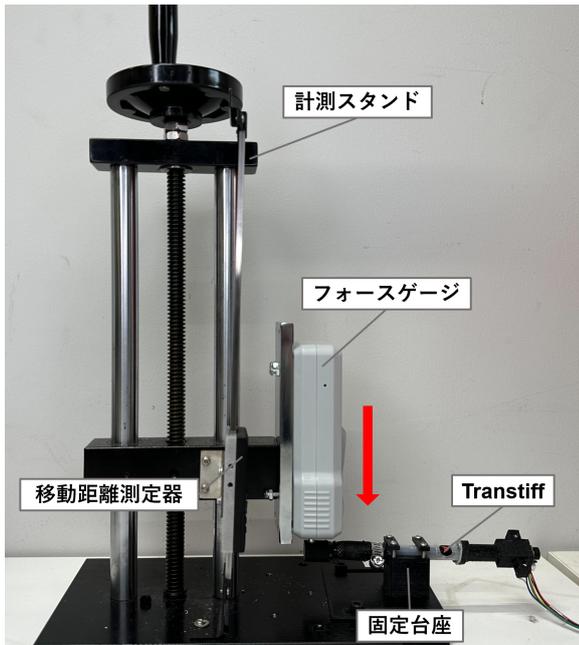


図 6 剛性測定実験

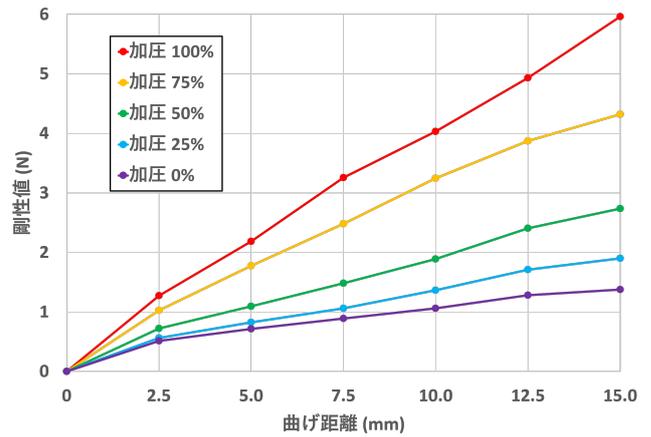


図 7 各曲げ距離における測定した曲げ剛性の平均値

録した。

#### 4.2.2 結果・考察

図 7 に測定結果を示す。結果より、関節部の条件を「加圧 0 %」から「加圧 100 %」まで変化させるにつれて、曲げ剛性値が増加した。特に、曲げ距離が 15.0 mm のとき、「加圧 0 %」条件では  $1.38 \pm 2.60 \times 10^{-4}$  N, 「加圧 100 %」条件では  $5.96 \pm 5.12 \times 10^{-3}$  N が得られ、最も柔らかい状態から最も硬い状態に移行することで、関節部の剛性が 4.33 倍に増加した。

本実験では、人間の棒を介した硬軟知覚において、曲げるのに必要な力が大きく寄与すると考え、剛性の 1 つである曲げ剛性を選択して測定した。しかし、剛性は曲げ剛性以外にも、変形の種類に応じて軸剛性、せん断剛性が挙げられ、これらが人間の知覚に対して与える影響も検証する必要がある。

以上より、Transtiff の硬軟関節は、物性（硬度）のみならず、外力による変形に対する強度（剛性）も変化することが分かった。人間は、物体を押しした際のたわみ具合と反発力という 2 要素を、硬さ知覚の指標としている [10]。そして、硬度および剛性の変化は、この 2 要素の変化に大きく寄与する。このことより、Transtiff が硬さの変わる触覚デバイスとしての要件を満たしていることが確認できた。

## 5. 実装したアプリケーションとデモンストレーションの実施および評価

### 5.1 アプリケーションの概要

Transtiff の応用の一つとして、ペイントアプリケーションを作成した。このアプリケーションでは、Transtiff の硬軟を変化させることで実際の画材に近い感覚を再現し、現

実の絵画のように、描きたい内容に応じてペンやブラシなどを使い分けられるような体験を提供する。これにより、硬いペンの感覚しか感じられない既存のスタイラスに対し、ブラシのような柔らかい筆記体験を加えることができ、デバイスを持ち換えることなく、多様な画材の触覚体験が可能となる。また、従来研究の 1 つである“FlexStylus” [14] では、柔軟なスタイラスペンが特定の入力タスクに好意的な影響を与えることを示しており、このことから、スタイラスの硬軟が変化するという当アプリケーションの特徴に有用性を見出すことができる。

図 8 に実装したアプリケーションを示す。Transtiff をペン（加圧 100 %）とブラシ（加圧 0 %）の 2 状態で切り替えられるように設定しており、ユーザは GUI 上のボタン操作によって状態を切り替えることができる。また、モータの駆動を任意で停止するボタンも配置しているため、状態を切り替えている最中に停止ボタンを押すことで、好みの硬さを選択することができる。

### 5.2 実施環境

国際会議の展示発表（ACM SIGGRAPH 2023）において、当アプリケーションのデモンストレーションを実施した [35]。約 200 名の来場者が当アプリを体験し、了承が得られた参加者に対してはアンケートに回答してもらった。内容として、「Transtiff を使用する際の利点」「Transtiff を使用する際の不利点」「どのような状況で Transtiff を使用したいか」「想定されるアプリケーション」の 4 項目に関して、自由回答で質問を行った。

### 5.3 結果

Transtiff を使用する際の利点に関しては、「本当にペンとブラシを使っているように感じた」「デバイスがコンパクト」といった意見が得られた。不利点に関しては、「硬さが増える際の時間が長く感じる」「硬さが増える際のモータの振動が気になる」といった意見が得られた。使用

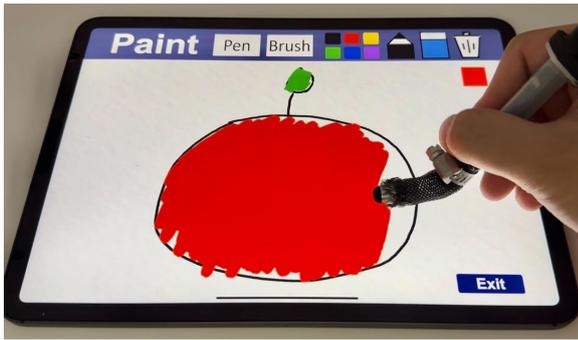


図 8 作成したアプリケーション

したい状況および想定アプリケーションについては重複した回答が多く見られ、「書道/絵画の練習用アプリ」「XR コンテンツとしての応用」等が挙げられた。全体を通して、回答者の多くは Transtiff によって異なる触覚を感じたと回答する人が多く、Transtiff を用いたアプリケーションの有用性を確認することができた。

## 6. 議論・展望

### 6.1 硬軟の変化速度

現在の Transtiff では、最も軟らかい/硬い状態から最も硬い/軟らかい状態まで変化させる際に、15 秒程度の時間を要する。5.3 節で述べたように、アプリケーションを体験する場面では、この点を気にする体験者が複数見られた。この問題を解決するために、最適なモータおよび回転速度などを選定する必要がある。

現在使用しているモータは、プロトタイプの実験にあたって予備実験を行った際、30 rpm, 50 rpm, 100 rpm の 3 種類のモータを比較して、水を加圧するのに十分なトルクが出るのに加えて、最も速く駆動する点から 100 rpm のものを選択した。そのため、現在使用しているモータよりも高 rpm なモータの検討が必要である。一般に、モータによって生成されるトルクと rpm の値 (回転速度) はトレードオフであるため、今後はより高 rpm のモータを用いて複数プロトタイプを実装し、ピストンが問題なく動作するモータの中で、最も早く駆動するものを最適なモータとして選択する予定である。これにより、より高速な硬軟変化を実現できる。

### 6.2 使用する流体

現在の Transtiff では、関節部への加圧に用いる流体として水を選択している。これは、人工筋肉の作動流体として水を選択した先行研究 [24] がある点と、液漏れを起こした際に他の電子機器に与える影響が少ないためである。しかし、一般的なマッキベン型人工筋肉の多くは空気圧 [25] か油圧 [26] を用いるものが多い。空気圧を用いるものは、機体が軽量になり、流体漏れを起こしても安全であるという利点がある。一方で、油圧を用いるものは、液漏れした際

のリスクは高いものの、油は空気よりも体積弾性率が高い点から、加圧による膨張の割合が高く、空気圧よりもエネルギー効率の高い手法とされている。Transtiff は構造上、ピストン駆動による容積変化で圧力を操作して剛性を変化させるため、内部に使用する流体は、気体よりも密度が高い液体が適している。そして、油は水と比較して耐腐食性や潤滑性に優れる。以上の点より、Transtiff の作動流体としてより最適なのは油であることが考えられる。今後は、液漏れに強くなる処理を Transtiff に施した上で作動流体を水から油に変更することで、より高効率な硬軟変化の実現について検討する必要がある。

### 6.3 棒に対する人間の硬軟知覚

本稿では、実装した Transtiff の硬度・剛性が増加したことを定量的に示しているが、実際に使用したユーザが、どの程度硬さの変化を感じられているかの厳密な検証はできていない。それに加え、「把持した棒の硬さ変化における人間の知覚」に関する知見は非常に乏しい。そのため、人間の棒の硬軟知覚に関する定性的な調査が必要だと考える。どの程度棒の硬さが変われば硬くなった/軟らかくなったと感じるかを明らかにするため、今後は心理実験を実施し、Transtiff の更なる理想的なデザインパラメータの取得を目指す。

### 6.4 応用アプリケーション

Transtiff を用いたアプリケーションとして、5 章で作成したものの以外の応用も考えられる。例として、タブレットの画面上に表示されている物体の触覚を再現する体験が挙げられる。金属のような硬いものに触るときは Transtiff を硬く、スポンジのような軟らかいものに触るときは Transtiff を軟らかくすることで、あたかも直接その物体に触れているかのような感覚をユーザに与え、より直感的な情報提示が可能になる。

タブレット以外への応用も多岐に渡る。例として、HMD を装着させての VR アプリケーションが考えられる。HMD による視覚情報と、Transtiff による触覚情報を組み合わせることで、クロスモーダル知覚 [36] が発揮され、実際には硬い物体に触れているのに、触れている物体自体を軟らかく感じるような体験ができる。これにより、Transtiff を介することで、バーチャル空間内での様々な物体への接触体験が可能になる。

また、ここまで述べたアプリケーションは、いずれも Transtiff の硬軟を変化させた後で物体に触れることを想定していたが、物体に触れながら硬軟を変化させることで、応用の範囲を広げることができる。Transtiff を硬い状態から徐々に軟らかくすることによる、物体を押し込んでいる感覚の再現や、硬軟を高速で切り替えることによる凹凸感の提示など、多くの応用が考えられる。現在の Transtiff は 6.1

節で述べた、硬軟の切り替え速度の課題を要するものの、この点を解決することで、より高度なアプリケーションを実装することができる。

## 6.5 ペン型以外への応用

本稿では、Transtiffの一形態として、日常的に使用頻度の高いペン型のプロトタイプを実装したが、他の棒状物体に対しても、硬軟関節を挿入して触覚を変化させる機構が応用できる。例えば、箸の先端の硬さを制御することで、掴んでいる食品の大きさ・重さ・硬さを通常とは異なる感覚で提示し、食体験を変化させることができると考えられる。このように、Transtiffの機構を応用することで、既存の棒インタラクションを更に拡張できると考えられる。

## 7. まとめ

本研究では、関節の硬軟を変化させることで、手掌部から感じる感覚を変化させる棒状触覚デバイス Transtiff を提案した。Transtiff は、小型のモータを利用したピストン機構と、マッキベン型人工筋肉を採用した2層のチューブ構造を備えることで、モータの回転方向の変化のみで硬軟を制御する。これにより、デバイスが大型になる・複雑な機構が必要・特殊な素材を用いるといった従来研究の課題に捕らわれない、簡素な構造かつ小型の把持型触覚デバイスを実現した。

そして、実装したプロトタイプを用いて、硬度変化・剛性変化の計測実験を実施し、Transtiffの硬軟変化を定量的に評価した。その結果、硬度計測実験では、Transtiffの関節部の硬度が一般的な輪ゴムからタイヤ程度の範囲で変化することが分かった。剛性計測実験では、関節部を15 mm 曲げるのに必要な剛性が、最大4.33倍に増加することが分かった。

また、作成したペイントアプリケーションを、展示発表で体験してもらった結果、Transtiffが実際のペンやブラシのような、異なる画材を使用する際の触覚を提供するとの意見が多数得られ、本デバイスの有用性が確認できた。

直近の課題としては、最適なモータの選択による硬軟変化速度の改善、作動流体を油に変更することによるピストン駆動の効率化が挙げられる。上記を解決することで、Transtiffで対象に触れている間にもスムーズな硬軟変化が可能になり、アプリケーションの幅を大きく広げることができる。今後は、Transtiffによる、高度なペンインタラクションを備えたアプリケーションや、VRを用いてバーチャルオブジェクトのリアルな接触感を提供するアプリケーションの実装を目指す。また、棒の硬軟知覚に関する心理実験を実施することで、人間の硬さ感覚に関する知見を獲得し、Transtiffの理想的なデザインパラメータを取得する。

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] Stafford, T. and Webb, M.: *Mind hacks: Tips & tricks for using your brain*, O'Reilly Media, Inc. (2004).
- [2] Napier, J. R.: THE PREHENSILE MOVEMENTS OF THE HUMAN HAND, *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, Vol. 38-B, No. 4, pp. 902–913 (online), DOI: 10.1302/0301-620X.38B4.902 (1956).
- [3] 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).
- [4] HaptX: HAPTIX GLOVES G1, HaptX (online), available from (<https://haptx.com/>) (accessed 2023-09-18).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 3DSystems: Touch X, 3D Systems (online), available from (<https://ja.3dsystems.com/haptics-devices/touch-x/>) (accessed 2023-09-18).
- [9] Kato, G., Kuroda, Y., Nisky, I., Kiyokawa, K. and Take-mura, 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).
- [10] 岡本正吾: 触力覚による柔らかさ・硬さ知覚, システム/制御/情報, Vol. 64, No. 4, pp. 121–125 (オンライン), DOI: 10.11509/isciesci.64.4.121 (2020).
- [11] Kyung, K.-U. and Lee, J.-Y.: wUbi-Pen: Windows Graphical User Interface Interacting with Haptic Feedback Stylus, *ACM SIGGRAPH 2008 New Tech Demos*, SIGGRAPH '08, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/1401615.1401657 (2008).
- [12] Chen, D., Song, A., Tian, L., Yu, Y. and Zhu, L.: MH-Pen: A Pen-Type Multi-Mode Haptic Interface for Touch Screens Interaction, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 11, No. 4, pp. 555–567 (online), DOI: 10.1109/TOH.2018.2826551 (2018).
- [13] Xu, S., Wu, Z., Wang, S., Fan, R. and Lin, N.: Hydrauio: Extending Interaction Space on the Pen through Hydraulic Sensing and Haptic Output, *Adjunct Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Inter-*

- face Software and Technology*, UIST '20 Adjunct, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 43–45 (online), DOI: 10.1145/3379350.3416180 (2020).
- [14] Fellion, N., Pietrzak, T. and Girouard, A.: FlexStylus: Leveraging Bend Input for Pen Interaction, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 375–385 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126597 (2017).
- [15] 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, p. 23–24 (online), DOI: 10.1145/2508468.2514935 (2013).
- [16] Tsujita, T., Ohara, M., Sase, K., Konno, A., Nakayama, M., Abe, K. and Uchiyama, M.: Development of a haptic interface using MR fluid for displaying cutting forces of soft tissues, pp. 1044–1049 (online), DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225109 (2012).
- [17] Watanabe, K. and Yasumura, M.: FlexibleBrush: A realistic brush stroke experience with a virtual nib, *UIST*, Vol. 7, pp. 47–48 (2007).
- [18] 望山 洋, ハサンモデル, 矢木啓介, 鈴木健嗣: スマートメカニクス: ロボット関節における柔と剛の融合, *日本ロボット学会誌*, Vol. 38, No. 10, pp. 926–933 (オンライン), DOI: 10.7210/jrsj.38.926 (2020).
- [19] Abundance, S., Teeple, C. B. and Wood, R. J.: A Dexterous Soft Robotic Hand for Delicate In-Hand Manipulation, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 4, pp. 5502–5509 (online), DOI: 10.1109/LRA.2020.3007411 (2020).
- [20] 佐々木大輔, 則次俊郎, 山本裕司, 高岩昌弘: 空気圧ゴム人工筋を用いたパワーアシストグローブの開発, *日本ロボット学会誌*, Vol. 24, No. 5, pp. 640–646 (オンライン), DOI: 10.7210/jrsj.24.640 (2006).
- [21] Yap, H. K., Lim, J. H., Nasrallah, F., Goh, J. C. H. and Yeow, R. C. H.: A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 4967–4972 (online), DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139889 (2015).
- [22] 鈴森康一: アクチュエータ技術から見たソフトロボティクス, *日本ロボット学会誌*, Vol. 37, No. 1, pp. 26–29 (オンライン), DOI: 10.7210/jrsj.37.26 (2019).
- [23] Tondou, B.: Modelling of the McKibben artificial muscle: A review, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 3, pp. 225–253 (online), DOI: 10.1177/1045389X11435435 (2012).
- [24] Zhang, Z., Hou, J., Ning, D., Gong, X. and Gong, Y.: Modeling and experiments on the drive characteristics of high-strength water hydraulic artificial muscles, *Smart Materials and Structures*, Vol. 26, No. 5, p. 055023 (online), DOI: 10.1088/1361-665x/aa6a7a (2017).
- [25] Schulte, H. F.: The characteristics of the McKibben artificial muscle, (online), available from (<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:56578299>) (1961).
- [26] Meller, M., Chipka, J., Volkov, A., Bryant, M. and Garcia, E.: Improving actuation efficiency through variable recruitment hydraulic McKibben muscles: modeling, orderly recruitment control, and experiments, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 11, No. 6, p. 065004 (online), DOI: 10.1088/1748-3190/11/6/065004 (2016).
- [27] 松下 繁: ゴム人工筋製作法ノート, 計測と制御, Vol. 7, No. 12, pp. 946–952 (オンライン), DOI: 10.11499/sicejl1962.7.946 (1968).
- [28] 篠原 隆, 堂田周治郎, 松下尚史: 湾曲型空気圧ソフトアクチュエータの開発と応用, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 71, No. 711, pp. 3167–3173 (オンライン), DOI: 10.1299/kikaic.71.3167 (2005).
- [29] Wall, V., Deimel, R. and Brock, O.: Selective stiffening of soft actuators based on jamming, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 252–257 (online), DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139008 (2015).
- [30] Hao, Y., Wang, T., Xie, Z., Sun, W., Liu, Z., Fang, X., Yang, M. and Wen, L.: A eutectic-alloy-infused soft actuator with sensing, tunable degrees of freedom, and stiffness properties, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 28, No. 2, p. 024004 (online), DOI: 10.1088/1361-6439/aa9d0e (2018).
- [31] Zhang, Y.-F., Zhang, N., Hingorani, H., Ding, N., Wang, D., Yuan, C., Zhang, B., Gu, G. and Ge, Q.: Fast-Response, Stiffness-Tunable Soft Actuator by Hybrid Multimaterial 3D Printing, *Advanced Functional Materials*, Vol. 29, No. 15, p. 1806698 (online), DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201806698> (2019).
- [32] de Vicente, J., Klingenberg, D. J. and Hidalgo-Alvarez, R.: Magnetorheological fluids: a review, *Soft Matter*, Vol. 7, pp. 3701–3710 (online), DOI: 10.1039/C0SM01221A (2011).
- [33] Ohba, T., Kadone, H. and Suzuki, K.: An elastic link mechanism integrated with a magnetorheological fluid for elbow orthotics, *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2789–2794 (online), DOI: 10.1109/IROS.2012.6385612 (2012).
- [34] Smooth-On, I.: Durometer Shore Hardness Scale, Smooth-On, Inc. (online), available from (<https://www.smooth-on.com/page/durometer-shore-hardness-scale/>) (accessed 2023-10-09).
- [35] 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).
- [36] Moody, L., Waterworth, A., Arthur, J. G., McCarthy, A. D., Harley, P. J. and Smallwood, R. H.: Beyond the visuals: tactile augmentation and sensory enhancement in an arthroscopy simulator, *Virtual reality*, Vol. 13, pp. 59–68 (online), DOI: 10.1007/s10055-008-0106-x (2009).