

ヒトとの柔軟な接触インタラクションを実現するタッチロボットの開発

代表研究者

永野 光

京都工芸繊維大学 繊維学系 准教授

1 はじめに

少子高齢化の急速な進行に伴い、介護や看護の現場では深刻な担い手不足が生じており、その解消や介護者の身体的・精神的負担の軽減への期待から、ヒトに直接触れて働くケアロボットの研究が国内外で盛んに進められている。食事や入浴、移乗の介助に代表される医療・看護・介護の行為、あるいは接客やコミュニケーションの場面など、身体的接触を本質的に伴う行為のロボット化が広く望まれている。こうした行為を担うロボットには、対象であるヒトに不快感や恐怖感を与えず、むしろ安心感や心地よさを感じさせる「ヒトらしいタッチ」を実現することが求められる。

触れ合いは、ヒトの情動やコミュニケーションにおいて中心的な役割を果たす。近年の触覚神経科学では、皮膚をなでるようなゆっくりとした優しい接触が、識別的な触覚情報を伝える有髄のA β 線維とは別に、無髄のC触覚（CT）線維と呼ばれる求心性線維によって符号化され、情動的な快さの知覚に深く関与することが示されている[4][5]。すなわち「心地よい接触」は、単に皮膚を変形させる物理的刺激ではなく、接触の速度や圧、滑らかさといった力学的条件に強く依存する知覚現象である。ロボットによってこの心地よさを再現できれば、ケアの質の向上のみならず、ヒトとロボットの情動的な関係構築にも大きく寄与すると考えられる[3]。

しかし、これまでのタッチロボットの研究の多くは、ヒトに近い触感を持つ柔らかな外装の付与や体温の模倣[1][2]など、接触面の受動的・静的な性質を再現することに主眼が置かれてきた。これらは「触れられたときの感触」の改善には寄与するものの、再現される触れ方そのものは単純であり、ヒトどうしの接触のように、触れられて心地よいと感じられるほどの接触の質には至っていないのが現状である。

申請者は、こうした課題の背景には、従来のロボットが接触の「表面」のみに着目し、接触中に生じる力の動的な変動を扱う「身体構造」を顧みてこなかった点があると考えた。ヒトの指は、硬い骨格と柔らかい皮膚・皮下組織、そして複数の関節からなる「柔と剛が複合した身体構造」を有している。申請者は、この柔剛複合構造こそが、対象との接触において力の変動を吸収し、滑らかで適応的な接触を生み出している本質的な要素であると着想した。指が物体表面をなぞるとき、関節は外力に応じて受動的にたわみ、皮膚や皮下組織は接触面に倣って変形する。この力学的な「やわらかさ」が、接触面の微小な凹凸や運動の不整合を吸収し、引っかかりのない一様な接触を実現していると考えられる。

本研究では、この着想に基づき、ヒト指の柔軟性と剛性を併せ持つ身体構造に着目したタッチロボットを開発し、「ロボットの身体が柔軟であることは、ヒトとの接触の心地よさを高めるのか」という問いに正面から取り組んだ。この問いに直接答えるため、全関節を柔軟にしたソフトフィンガ（柔軟モデル）と、外形・接触面・質量分布を同一に保ちながら全関節を機械的に固定して剛としたフィンガ（剛モデル）を用意し、両者がヒトの前腕をなぞった際の心地よさを比較する被験者実験を行った。両モデルは「身体の柔軟性の有無」のみが異なるため、柔軟性が心地よさに与える効果を、他の要因と交絡させることなく切り分けて評価できる。

ヒトと柔らかく接するための要素技術としては、これまでに柔軟な人工皮膚や、剛性を能動的に変化させる可変剛性機構、空気圧などで駆動するソフトアクチュエータといった技術が提案されてきた[1][2]。しかし、これらの多くは接触面の柔らかさや見かけの再現に重点を置くか、あるいは高度な力制御と組み合わせ用いられることを前提としており、「身体構造そのものが備える受動的な柔軟性」が、ヒトに知覚される接触の心地よさに直接どの程度寄与するのかは、体系的に検証されてこなかった。本研究は、この点を、柔軟性以外の条件をそろえた対照実験によって定量的に検証する点に新規性がある。加えて、VASによる絶対評価・一対比較・自由記述という複数の指標を併用し、得られる結論の頑健性を確かめた点も本研究の特徴である。

本報告では、まずヒト指の柔剛特性を模倣するソフトフィンガの設計・製作と基礎特性評価について述べ、次いでこれを用いた心地よさ評価実験の方法と結果を示す。最後に、得られた知見の意義と今後の展望をまとめる。

2 ヒト指の柔剛特性を模倣するソフトフィンガの構築

2-1 設計コンセプト

ヒト指は、基節・中節・末節の三つの剛体節が、中手指節関節および指節間関節を介して直列に連結された多関節構造を有し、各関節は筋や腱による能動的な制御と、靱帯や軟部組織に由来する受動的なコンプライアンスの双方を併せ持つ。物体をなぞる際の力の吸収や接触面への倣いには、このうち受動的な柔軟性が重要な役割を果たすと考えられる。本研究では、接触インタラクションにおいて本質的と考えられる「多関節による受動的な柔軟性」と、各節が形状を保つための「節そのものの剛性」との複合に着目し、これを模倣するソフトフィンガを設計した。

設計方針は、(i) ヒト指と同様に、剛体節が関節を介して直列に連結された複数自由度の関節構造を備えること、(ii) 各関節が外部からの接触力に応じて受動的に変形し、制御を介さずに接触力の変動を吸収できること、(iii) 接触面の形状や質量分布を柔軟条件と剛条件で同一に保てるよう、関節の固定によって柔軟性のみを除去できる構造とすること、の三点を中心とした。特に、能動的な力制御に頼らず、身体構造そのものが備える受動的な柔軟性に着目した点が本設計の特徴であり、これにより制御に伴う遅れの影響を受けずに、接触力の急峻な変動を吸収できることを狙った。

2-2 製作とセンサ配置

製作したソフトフィンガは、掌側に近い側から順に、基節・中節・末節に相当する三つの剛体節で構成される(図1)。骨格に相当する剛体部は、造形自由度が高く試作を反復しやすいフィラメント積層方式(FDM)の3Dプリンタで造形し、必要な剛性と軽量性を両立させた。各関節には、ねじりばねを組み込んだ受動回転機構を設け、回転軸をジョイントシャフトで支持することで、一自由度のなめらかな回転を許容した。ねじりばねの反力により、外力が除かれると関節が原点姿勢へ復帰する特性を与え、接触時には関節が接触力に応じて受動的にたわむことで、接触力の急峻な変動を機械的に吸収する構造とした。ばね定数は、前腕のなぞり動作で想定される接触力の範囲で関節が適度にたわむよう、予備的な試作と力計測に基づいて選定した。

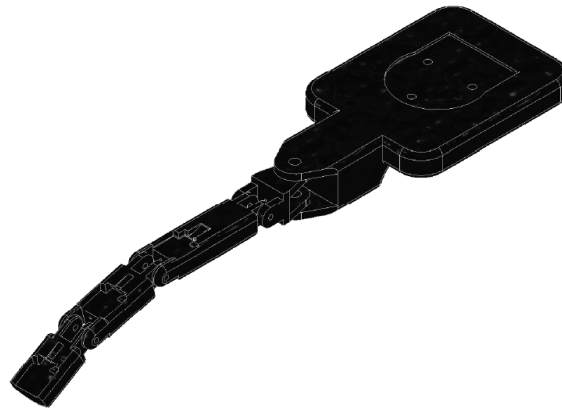


図1 ソフトフィンガ

また、接触中に生じる高周波の振動成分を取得するため、小型の加速度センサを各節に1個ずつ、計3個分散して配置した。これにより、関節ごとのたわみに伴う振動の伝播や、接触面で生じる微細な振動を、節ごとに分離して計測できるようにした。製作したフィンガは、7自由度ロボットアーム(xArm7, UFACTORY社)の手先に取り付け、ヒトの上肢の動作範囲を再現可能ななぞり動作系を構築した(図2)。ロボットアームを用いることで、なぞりの速度・経路・接触力を高い再現性で制御でき、被験者間・条件間で接触条件を厳密に統制することが可能となった。



図 2 ロボットセンサシステム

2-3 基礎特性評価

構築したソフトフィンガの基礎特性として、関節剛性とセンサの振動応答特性を評価した。関節剛性については、関節角を段階的に変化させながら、それに対して生じる反力（復元トルク）の関係を計測した。その結果、受動回転機構は、本研究で想定したなぞり動作の関節角範囲において、関節角に対しておおむね線形に近い復元特性を示すことが確認された。これは、接触力に対して関節が予測可能なたわみを生じ、過度に硬すぎず柔らかすぎない、適度なコンプライアンスを備えていることを意味する。

センサについては、既知の振動入力に対する各節の加速度応答を確認し、接触に伴う振動成分を十分な帯域で取得できることを確かめた。以上の基礎特性評価により、製作したフィンガが、接触力を受動的に吸収する柔剛複合構造という設計意図を満たし、かつ後述する心地よさ評価実験において接触条件を安定に再現できるものであることを確認した。なお、柔軟条件と剛条件は、この同一のフィンガの関節を固定するかどうかのみで切り替えられるため、ここで確認した接触面性状や質量分布は両条件で共通である。このことは、後述する心地よさの比較において、柔軟性以外の要因が結果に与える影響を排除するうえで重要な前提となる。

3 ヒトを対象とする心地よさ評価実験

3-1 目的と仮説

本実験の目的は、ロボットの身体の柔軟性が、ヒトとの接触の心地よさに与える効果を、定量的かつ多角的に明らかにすることである。第2章で述べた3関節ソフトフィンガについて、全関節が受動的に柔軟な状態（柔軟モデル）と、全関節を機械的に固定して剛とした状態（剛モデル）の二条件を用意し、両モデルがヒトの前腕をなぞった際に生じる心地よさを比較した。前述のとおり、両条件は接触面の形状・質量分布・なぞり動作を等価に保ち、「身体の柔軟性の有無」のみが異なるよう統制されている。したがって、両条件間に心地よさの差が認められれば、それは身体の柔軟性に起因すると解釈できる。

本実験の仮説は、「柔軟モデルは剛モデルに比べ、接触の心地よさを高める」とした。この仮説は、受動的な柔軟性が接触力の変動を吸収し、より滑らかで一様な接触を生み出すことによって、ヒトに知覚される心地よさが向上するという作業仮説に基づくものである。

3-2 実験装置と条件

実験には、3関節ソフトフィンガを搭載した7自由度ロボットアーム（xArm7）を用いた（図2）。柔軟条件では、各関節のねじりばね受動回転機構をそのまま用い、全関節が接触力に応じて受動的にたわむ状態とした。剛条件では、同一のフィンガの全関節を機械的に固定し、幾何形状・接触面・質量分布を柔軟条件と等価に保ったまま、関節の受動変形のみを排した状態とした。これにより、見た目や接触面の形状ではなく、「身体の柔軟性の有無」のみが二条件間で異なるように統制した。同一個体のフィンガを固定の有無のみで

切り替えるため、両条件の接触面性状は厳密に一致しており、柔軟性以外の要因が交絡することを最小限に抑えている。

接触動作は、参加者の前腕掌側を近位から遠位へ向けて一定速度（3 cm/s）でなぞるストローク接触とし、1 試行あたり 5 往復を行った。なぞり速度は、心地よい接触の知覚に関与するとされる CT 求心性線維が選好する速度域（おおむね 1～10 cm/s）を参考に設定した[4][5]。この速度域でのなぞりは、ヒトどうしの優しいなで動作に近く、情動的な心地よさを最も引き出しやすいとされる。目標法線力は 0.4 N とし、ロボットアームの力制御により、接触中を通じて一定に保つようにした。これにより、接触力の平均値を条件間でそろえ、柔軟性の有無に起因する力の「変動」のみが心地よさに影響するように配慮した。

3-3 参加者と手続き

健康成人 20 名（男性 10 名、女性 10 名、平均年齢 22.6 ± 2.1 歳）が実験に参加した。実験は参加者内（within-subjects）計画とし、各参加者が柔軟条件と剛条件の双方を経験した。条件の提示順序は、順序効果や慣れの影響を相殺するため、参加者間でカウンタバランスした。参加者には、接触部位以外の視覚・聴覚情報が心地よさの評価に与える影響を抑えるため、アイマスクとヘッドホンを着用させ、フィンガの外観やロボットの動作音といった手がかりから条件を推測できないようにした。

各条件の接触提示の後に心地よさの評価を求め、前の条件で生じた感覚が残らないよう、条件間には十分な休息を設けた。実験に先立ち、参加者には実験の手順と目的の概要を説明したうえで、皮膚の状態や接触に対する不快感の有無を確認した。本実験は所属機関の倫理手続きに準じて実施し、全参加者から書面によるインフォームドコンセントを得た。参加者には、実験中はいつでも中止できることを事前に伝えた。

3-4 心地よさの評価方法

本実験では、接触によって生じる主観的な快適さ・快さの程度を「心地よさ」と操作的に定義し、これを評価対象とした。心地よさは多面的な情動的経験であるが、本研究では「その接触をどの程度心地よいと感じたか」という快の主観的強度に焦点を絞り、これを定量的に測定することとした。評価には、長さ 100 mm の Visual Analogue Scale（VAS）を用いた。VAS の左端（0）に「全く心地よくない」、右端（100）に「非常に心地よい」のアンカーを置き、参加者は自身が感じた心地よさに対応する位置に印を付け、左端からの距離（0～100）を心地よさ得点とした。VAS は、「やや心地よい」「かなり心地よい」といった段階の粗い数段階尺度に比べて、微小な差を連続量として表現でき、繰り返し測定にも適することから、本研究の主たる評価指標として採用した。

各条件について、5 往復のストロークからなる接触提示を 1 ブロックとし、ブロックごとに心地よさを回答させた。これを各条件あたり 3 ブロック繰り返し、その平均を当該条件の心地よさ得点とした。3 回の繰り返しにより、単発の提示では避けにくい偶発的なばらつきの影響を低減し、より安定した評価値を得ることを意図した。

さらに、VAS による絶対評価に加えて、二条件を直接続けて提示し、「どちらがより心地よかったか」を選択させる一対比較を行った。一対比較は、二条件の相対的な優劣を直接的かつ鋭敏に捉えることができ、絶対評価を補完する指標となる。加えて、各条件について心地よさを感じた、あるいは感じなかった理由を自由記述で回答させ、定量評価の背後にある知覚の質的な手がかりを得た。これらにより、絶対評価（VAS）、相対評価（一対比較）、言語化（自由記述）という三つの観点から、心地よさを多角的に捉えることを意図した。異なる方法で一貫した結果が得られれば、結論の頑健性が高まると考えたためである。

3-5 結果

心地よさの VAS 得点（平均±標準偏差）は、柔軟モデルで 72.4 ± 11.3 、剛モデルで 47.8 ± 14.6 であり、柔軟モデルが剛モデルを有意に上回った（対応のある t 検定、 $t(19)=6.82$, $p<0.001$ ）。条件ごとの得点分布および個人ごとの変化を図 3 に示す。効果量は Cohen の $d=1.52$ と大きく、身体の柔軟性が心地よさに与える効果は、統計的有意性のみならず実質的な大きさの観点からも顕著であった。両条件の差（柔軟-剛）の平均は 24.6 点であり、これは VAS の全幅 100 点に対して約 4 分の 1 に相当する大きな改善である。柔軟モデルの得点が 72.4 点と尺度の上端寄りに分布したのに対し、剛モデルは 47.8 点と中央付近にとどまっており、柔軟性の付与が心地よさを「不快でも快でもない」水準から「明確に心地よい」水準へと引き上げたことを示している。

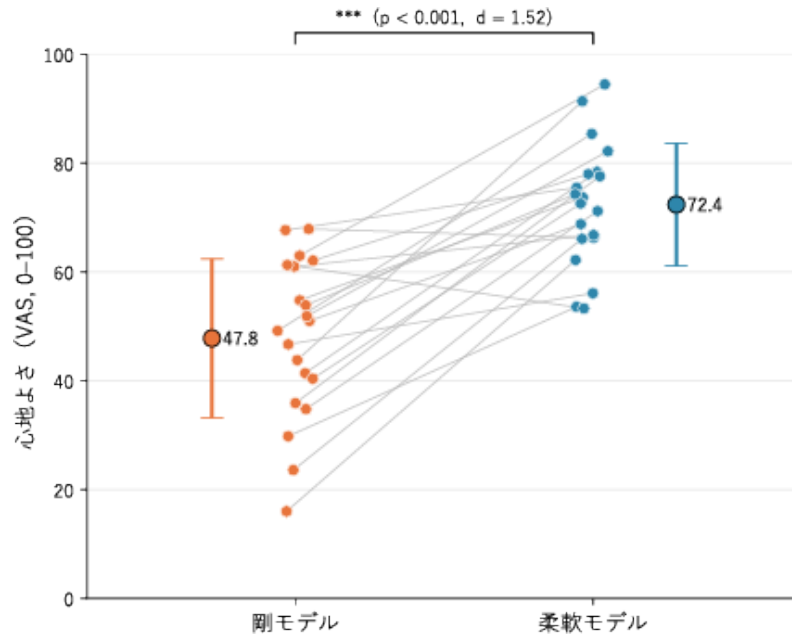


図3 心地よさのVAS得点

この傾向は個人差を超えて一貫していた。20名中18名が柔軟モデルに対してより高い心地よさ得点を与え、一対比較においても20名中18名が柔軟モデルを「より心地よい」と選択した。二つの指標で柔軟モデルを選好した参加者がいずれも18名で一致したことは、絶対評価と相対評価が整合していることを裏づける。残る2名は二条件の差が小さく明確な選好を示さなかったが、剛モデルを柔軟モデルより明確に好んだ参加者は一人もいなかった。

また、各条件3ブロックの繰り返しにおける得点のばらつきは小さく、参加者が各条件の心地よさを安定して評価していたことがうかがえた。これは、観察された条件間の差が、偶発的なばらつきではなく、柔軟性の有無を反映した一貫した知覚差であることを支持する。なお、性別による心地よさ得点の差は認められず、柔軟性による心地よさの向上は、参加者の属性によらず共通して観察される効果であると考えられる。

自由記述においても、定量評価と整合する傾向が明確に得られた。柔軟モデルに対しては、「なめらか」「やさしく触れられている」「ひっかかりがない」「人の手のよう」といった肯定的な表現が多く挙げられた。これらは、接触が滑らかで連続的であり、ヒトどうしの優しい接触に近いものとして知覚されたことを示している。一方、剛モデルに対しては、「硬い」「ひっかかる感じがする」「機械的」「少し痛い・くすぐったい」といった表現が多く、接触の不自然さや不快感、さらには軽い痛みやくすぐったさといった侵害的・防御的な感覚を示す記述が目立った。

これらの言語的手がかりは、VAS および一対比較で得られた定量的な結果を裏づけるとともに、その背後にある知覚の質を具体的に示している。すなわち、柔軟モデルの高い心地よさは、接触の滑らかさや引っかかりのなさに支えられており、逆に剛モデルの低い評価は、接触面で生じる引っかかりや力の不連続な伝達に起因していることが示唆される。

3-6 考察

本実験の結果は、ロボットの身体が柔軟であることが、ヒトとの接触の心地よさを明確に高めることを示している。柔軟モデルは剛モデルに対し、VAS による絶対評価、一対比較による相対評価、自由記述による言語化のいずれにおいても一貫して高く評価された。この三つの観点にわたる一貫性は、得られた効果が特定の評価方法や指標に依存しない、頑健なものであることを強く支持する。また、効果量が大きく、かつ大多数の参加者で同方向の結果が得られたことから、この効果は一部の参加者に限られた偶発的なものではなく、身体の柔軟性に内在する一般的な性質に由来すると考えられる。

柔軟性が心地よさを高めた要因として、受動的な関節の柔軟性が接触の質に与える力学的な作用が考えられる。剛い身体では、接触面の微小な凹凸や、なぞり中に生じる姿勢のわずかな不整合、あるいは速度や法線力のわずかな揺らぎが、接触力の急峻な変動としてほとんど減衰されずにヒトの皮膚に伝わる。こうし

た不連続で予測しにくい力の変動は、触覚的な「引っかかり」や「機械的な硬さ」として知覚され、ときに軽い痛みやくすぐったさを誘発して心地よさを損なうと考えられる。

これに対し柔軟な身体では、各関節が接触力に応じて受動的にたわむことで、こうした力の変動が機械的に吸収・平滑化され、滑らかで様な接触が生まれる。その結果、皮膚に伝わる刺激はより連続的で予測可能なものとなり、CT線維が選好するような優しいなで接触に近づくことで、情動的な心地よさが高まると解釈できる。自由記述において柔軟モデルが「なめらか」「引っかかりがない」と評され、剛モデルが「引っかかる」「硬い」と評されたことは、この力学的な解釈とよく整合する。

受動的な柔軟性のもう一つの利点は、その即応性にある。制御アルゴリズムによる能動的な力制御では、力やトルクの計測、制御則の演算、アクチュエータの駆動という一連の過程に不可避の時間遅れが伴うため、接触面で瞬間的に生じる急峻な力の変動に対して、遅れなく追従することは原理的に難しい。むしろ、制御帯域を超える高周波の変動に対しては、能動制御がかえって不安定化や違和感を生む場合さえある。

これに対し、身体そのものが備える受動的な柔軟性は、物理現象として力の変動が生じたその瞬間に、遅れなく変形してエネルギーを吸収できる。すなわち、受動的な柔軟性は「無限に速い力制御」に近い役割を、計算を介さずに担うといえる。本結果は、心地よいタッチの実現において、制御アルゴリズムだけでなく、身体そのものの柔軟性、すなわちメカニカルなコンプライアンスが本質的な役割を果たすことを、定量的な根拠とともに示すものである。これは、ヒトに触れるケアロボットの設計指針として、制御の高度化のみに頼るのではなく、身体の柔軟性を積極的に取り入れることの有効性を示す、実践的に重要な知見である。

こうした考え方は、本研究で対象とした指型のなぞり接触に限らず、ヒトと物理的に接触する多くのロボットに通じる。近年、柔らかい素材や受動的なコンプライアンスを積極的に活用するソフトロボティクスの研究が進展しているが、本結果は、そうした身体の柔軟性が、安全性や把持の適応性のみならず、ヒトに与える接触の心地よさという情動的な価値にも寄与しうることを、被験者実験に基づいて定量的に示すものである。身体の柔軟性は、これまで主に安全性や機構の単純化の観点から論じられてきたが、本研究はそこに「情動的な心地よさ」という新たな設計上の価値を加えるものといえる。

3-7 本実験の限界

本実験にはいくつかの限界がある。第一に、接触部位を前腕掌側に限定しており、手・肩・背中など感受性や皮膚特性の異なる他の部位や、包み込み・軽叩・把持などより複雑な接触動作への一般化は、今後の課題である。第二に、参加者は比較的若年の健康成人に限られており、加齢に伴い皮膚特性や触覚感受性が変化する高齢者や、要介護者など実応用で想定される対象への拡張が必要である。第三に、本実験における剛条件は関節を完全に固定したものであり、柔軟性を有無の二値として扱っている。柔軟性の程度を連続的に変化させた場合に、心地よさが最大となる最適な剛性が存在するか否か、また接触部位や動作に応じて最適点が異なるか否かについては、さらなる検討を要する。第四に、本実験ではなぞり速度と目標法線力を一定に統制しており、これらの接触条件と柔軟性との相互作用については、本実験の枠組みでは評価していない。これらの点は、本研究で得られた知見を実際のケアロボットへ展開する際に取り組みべき重要な課題である。

4 まとめと今後の展望

本研究では、ヒト指の柔軟性と剛性を併せ持つ身体構造に着目し、ヒトと柔軟に接するタッチロボットを開発した。3つの受動回転関節を備えるソフトフィンガを製作して7自由度ロボットアームに搭載し、全関節を柔軟にしたモデルと、外形・接触面・質量分布を同一に保ちながら全関節を剛にしたモデルを用意して、両者がヒトの前腕をなぞった際の心地よさを比較する被験者実験を行った。その結果、柔軟モデルは剛モデルに比べて接触の心地よさを有意に高めることを、VASによる絶対評価・一対比較による相対評価・自由記述による言語化という三つの観点から一貫して示した。効果量も大きく、この効果は個人差を超えて頑健に観察された。身体の受動的な柔軟性が接触力の変動を吸収し、遅れなく滑らかで様な接触を生み出すことが、この心地よさの向上の背景にあると考えられる。

本成果は、ヒトに触れるケアロボットをはじめ、身体的接触を伴うロボットの設計において、身体の柔軟性が接触の心地よさの向上に有効であることを、定量的な根拠とともに示すものである。従来主流であった接触面の性状の模倣や、制御アルゴリズムによる力制御の高度化に加えて、身体構造そのものに受動的な柔軟性を組み込むという設計の方向性が、心地よいタッチの実現に大きく寄与しうることを本研究は示唆す

る.

今後は、接触部位や接触動作の多様化、高齢者や要介護者を含む幅広い対象への展開、そして柔軟性の程度と心地よさの関係の精緻な解明を進めることで、本知見を実際のケアロボットの設計へと展開していきたい。あわせて、本研究で構築した加速度センサによる接触振動の計測系を活用し、心地よさの主観評価と接触時の物理量との対応を明らかにすることで[6]、心地よいタッチを定量的に設計・評価するための指針の確立を目指す。身体柔軟性を積極的に活用したタッチロボットは、ヒトに寄り添い、安心感と心地よさを提供する次世代のケア技術の基盤となることが期待される。

末筆ながら、本研究の遂行にあたり多大なご支援を賜りました公益財団法人電気通信普及財団に深く感謝申し上げます。

【参考文献】

- [1] S. Ueno et al., "Development of a Soft Robotic Skin for Human-Robot Affective Contact," IEEE ROBIO, 2019.
- [2] 石倉ほか, ヒトの体温を模倣する接触提示システムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH), 2020.
- [3] M. Rognon et al., "Mediating Social Touch through Wearable and Robotic Interfaces," IEEE Transactions on Haptics, vol. 15, no. 1, 2022.
- [4] L. S. Löken, J. Wessberg, I. Morrison, F. McGlone, and H. Olausson, "Coding of Pleasant Touch by Unmyelinated Afferents in Humans," Nature Neuroscience, vol. 12, no. 5, pp. 547-548, 2009.
- [5] F. McGlone, J. Wessberg, and H. Olausson, "Discriminative and Affective Touch: Sensing and Feeling," Neuron, vol. 82, no. 4, pp. 737-755, 2014.
- [6] H. Nagano, N. Saito, K. Matsumori, T. Kazama, M. Konyo, and Y. Yokokohji, "On the Analysis of Tactile Sensation Based on Time Measurement: An Experimental Case Study on the Interaction Between Skin and Lotion," IEEE Transactions on Haptics, vol. 16, no. 2, pp. 339-344, 2023.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
なし	なし	なし

本研究の成果は、触覚分野の主要な国際会議である IEEE World Haptics Conference 2027 での発表を計画している。さらに研究を発展させたいと、その成果を査読付き学術論文誌 IEEE Transactions on Haptics に論文として投稿することを予定している。(いずれも本報告時点では発表前である。)