

[研究助成 (A)]

人体模倣ソフト触覚センサネットワークによる ヒトと同様に高度な触知覚能力の実現

2251026



研究代表者
(助成金受領者)

京都工芸繊維大学
大学院工芸科学研究科

准教授 永 野 光

[研究の目的]

本研究の目的は、ヒトが柔らかな身体と能動的な接触を用いて素材を識別する仕組みを、ロボットフィンガを用いた構成論的実験により明らかにし、ヒトと同様に高度な触知覚能力を持つ人体模倣ソフト触覚センサネットワークの設計指針を得ることである。

従来の触覚センサ研究では、接触力、圧力分布、振動などを高精度に計測するデバイス開発が進められてきた。一方で、ヒトの触知覚はセンサに相当する受容器だけで成立するのではなく、皮膚、骨格、関節、筋腱系、探索動作が一体となって接触信号を生成する能動的過程である。そのため、ロボットがヒトと同様に素材を識別し、触感や質感を共有するためには、センサ素子の高性能化に加え、身体構造が触覚情報をどのように変調するかを理解する必要がある。

申請時には、多層柔軟皮膚と複数種の機械受容器を模したセンサ群、およびそれらを時空間的に統合する情報処理モデルの構築を掲げた。本年度はその基盤として、皮膚以外の身体的特性である関節自由度に着目し、身体柔軟性がなぞり時の接触振動と素材識別性能に及ぼす影響を調べた。関節条件のみを変えたロボットフィンガを用いることで、ヒト実験では分離が難しい身体構造の効果を、構成論的に検証することを目指した。

具体的には、関節自由度の異なる複数のロボットフィンガを製作し、接触力となぞり速度

を統制した条件で素材をなぞらせ、身体各部に分散配置した加速度センサにより接触振動を計測した。得られた信号から周波数特徴量およびセンサ間特徴量を抽出し、機械学習により素材識別性能を評価した。これにより、身体構造、探索動作、センサ配置を一体として設計するための基礎知見を得ることを目標とした。

[研究の内容、成果]

1. 関節自由度を分離して操作できるロボットフィンガの製作

ヒト指は、骨格などの硬組織と、皮膚・筋・腱などの軟部組織が統合された多組織系であり、対象物への能動的接触において柔軟性と安定性を両立している。本研究では、図1に示すように、この身体性のうち関節自由度に着目し、末節、中節、基節の3リンクからなるヒト指模倣ロボットフィンガを製作した。骨格部は3D

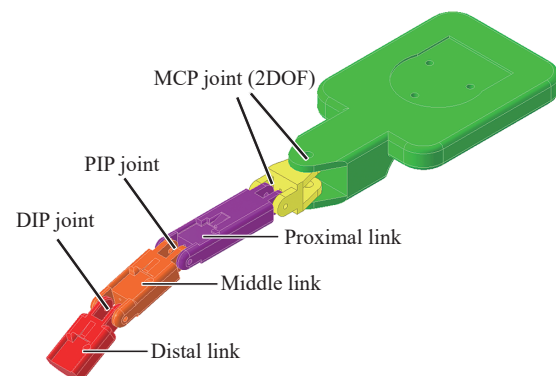


図1 関節自由度を変更可能なロボットフィンガの構造

プリント部材で構成し、各関節には受動回転機構と復元ばねを導入した。

ロボットフィンガには、DIP 関節と PIP 関節に屈曲・伸展方向の 1 自由度、MCP 関節に屈曲・伸展および外転・内転方向の 2 自由度を設定した。なぞり動作中に生じる接触振動を計測するため、図 2 に示すように、末節、中節、基節の各リンクに 3 軸加速度センサを 1 基ずつ搭載し、接触点近傍だけでなく身体各部に伝達される振動を同時計測できる構成とした。

比較条件として、全関節可動の Full-4DoF、全関節固定の Rigid-0DoF、MCP 関節の特定方向のみを拘束または開放した MCP-FE-3DoF および MCP-AA-3DoF の 4 種類を作成した。骨格形状、質量、ばね、センサ構成は共通とし、関節の固定条件のみを変えることで、関節自由度が接触振動の生成・伝達および素材識別性能に与える影響を分離して評価できる実験系とした。

実験では、xArm7 ロボットアームの先端に 6 軸力覚センサを介してロボットフィンガを取り付け、対象素材に対する押付力を計測・制御した。これにより、接触力、なぞり速度、動作軌道を一定に保ちながら、関節条件の違いに由来する接触振動の差を比較できるようにした。この実験系は、人体模倣ソフト触覚センサネッ

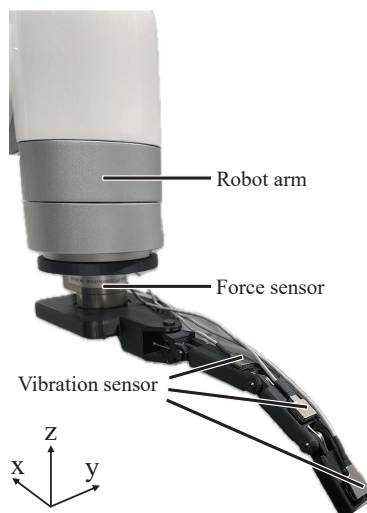


図 2 ロボットフィンガに搭載したセンサ構成

トワークの評価基盤として、今後の多層皮膚や多種受容器モデルの導入にも拡張可能である。

2. 基礎的な素材識別実験による関節条件の評価

素材識別実験は、図 3 に示す実験系を用いて実施した。まず、関節固定条件のみを変えた 4 種のロボットフィンガを用い、cork, metal, silicone, wood の 4 種類の素材を対象として基礎的な素材識別実験を行った。各素材をなぞる際の接触力は 3 N, なぞり速度は 12 mm/s とし、各素材 50 回の試行を実施した。加速度信号は 48 kHz で取得し、ロボットの始動・停止時に生じる過渡応答を除いた定常区間を解析対象とした。

解析では、短時間フーリエ変換により 50-8000 Hz 帯域の時間-周波数特徴量を算出し、0.2 秒セグメントごとに周波数ビンの平均パワーを特徴ベクトルとした。3つの加速度センサの特徴量を連結したうえで、RBF カーネル SVM に入力し、交差検証により素材識別性能を評価した。同一試行由来のセグメントが学習データと評価データに同時に含まれないようにし、汎化性能を過大評価しない手順を採用した。

その結果、4 素材を対象とした基礎実験では、いずれのモデルも高い識別精度を示したが、性能には関節条件による差が認められた。Full-4DoF は 98%, Rigid-0DoF は 95%, MCP-FE-3DoF は 98%, MCP-AA-3DoF は 99% の正答率

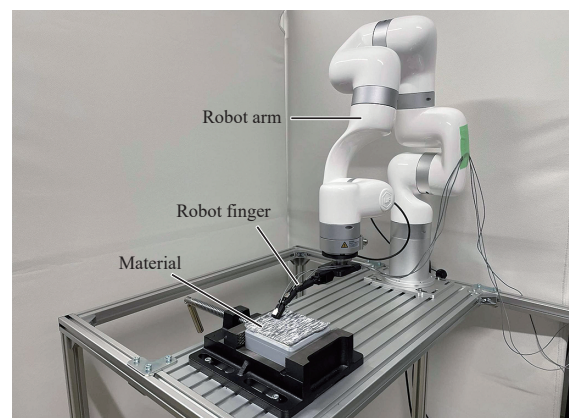


図 3 素材なぞり実験の全体セットアップ

となり、全関節固定モデルでは cork と wood の混同が相対的に増加した。一方、MCP 関節の特定自由度を有するモデルでは誤分類が抑制され、剛性と自由度の配分が素材識別に影響することが示された。

この結果は、単純に関節自由度を増やす、あるいは剛体化するという二分法では、素材識別に適した身体構造を説明できないことを示している。柔軟性は対象物表面への受動的適応を高める一方、姿勢変動や振動減衰を生じさせる可能性がある。したがって、素材識別に有効な触覚情報を得るには、接触状態の安定性と振動伝達特性の両方を考慮した剛性分布が重要である。

3. センサ位置と身体各部の役割の分析

次に、身体各部に分散配置したセンサがどのような役割を担うかを調べるため、末節、中節、基節の各センサを単独で用いた素材識別性能を比較した。末節センサは接触面に近いため、素材表面の微細な凹凸や摩擦変化に由来する振動を直接的に捉えやすい。一方で、接触姿勢や局所的な滑りの変化にも敏感であり、試行間の接触状態のわずかな違いの影響を受けやすい傾向が見られた。

中節および基節センサは接触点から離れているものの、指全体を伝搬する振動を比較的安定に取得でき、ロバストな情報源として機能した。特に、全関節可動モデルでは末節および中節の単独センサでも高い識別性能が得られたが、基節では一部素材間の混同が増加した。全関節固定モデルでは、いずれのセンサ位置でも cork の再現率が低下し、関節の固定により木質系素材の差が振動特徴として分離されにくくなる可能性が示された。

この結果は、触覚センサを接触点近傍に集積するだけでなく、身体各部に分散配置し、身体を介して変調された情報を利用することの有効性を示している。ヒト指の機械受容器は皮膚内に空間的に分布し、接触点から離れた部位にも力学的情報が伝わる。本研究のロボットフィン

ガでも、複数リンクに分散した加速度センサが相補的な情報を提供し、素材識別を支えることが確認された。

4. 16 種布素材およびなぞり方向への拡張

さらに、対象を 16 種類の布素材へ拡張し、さらに横方向および縦方向の 2 種類のなぞり方向を設定した。各素材に対して同一の押付力 3 N、なぞり速度 12 mm/s を適用し、指モデル、なぞり方向、素材の組合せごとに接触振動データを取得した。各条件で 100 回の試行を行い、取得した 6 秒間の信号のうち始動・停止を除いた 4 秒間を定常区間として解析した。

分類には、0.2 秒ごとの周波数特徴量、Z-score 標準化、RBF カーネル SVM を用い、10 分割の層化グループ交差検証で評価した。横方向なぞりでは、Full-4DoF が 72.1%，Rigid-0DoF が 60.2%，MCP-FE-3DoF が 69.1%，MCP-AA-3DoF が 76.4% の平均正答率を示した。この条件では、MCP-AA-3DoF が最も高く、全関節固定モデルが最も低い結果となった。

一方、縦方向なぞりでは、Full-4DoF が 45.5%，Rigid-0DoF が 64.1%，MCP-FE-3DoF が 57.0%，MCP-AA-3DoF が 63.2% となり、横方向とは異なる順位を示した。全関節可動モデルは縦方向で大きく性能が低下し、全関節固定モデルおよび MCP-AA-3DoF が高い性能を示した。このことから、有効な関節条件は指モデル単体で決まるのではなく、探索方向との組合せによって決まることが明らかになった。

統計解析では、横方向なぞりと縦方向なぞりのいずれにおいても指モデル間に有意な主効果が認められた。横方向ではすべての指モデル間に有意差が見られたのに対し、縦方向では Rigid-0DoF と MCP-AA-3DoF の間には有意差が認められなかった。すなわち、横方向では一部の自由度を残す構造が有効である一方、縦方向では高い構造的剛性が接触振動を安定に取得する上で有利に働く可能性が示された。

5. 接触振動特微量から見た機構的要因

識別性能の差を力学的に解釈するため、分類用の STFT 特微量とは別に、接触振動信号から時間領域特微量、周波数領域特微量、ケプストラム特微量、およびセンサ間特微量を算出した。具体的には、RMS、ピーク振幅、ゼロ交差率、尖度、帯域別パワー、スペクトル重心、ピーク周波数、スペクトル平坦度、MFCC、センサ間相関、平均コヒーレンスなどを用いた。

Random Forest による特微量重要度解析の結果、横方向および縦方向のいずれにおいても、多くのモデルで 50-100 Hz 帯域の Band Power が上位特微量として現れた。このことは、布素材をなぞる際に生じる比較的低周波の振動エネルギーが、素材識別に強く関与することを示している。また、100-200 Hz 帯域や 800-2000 Hz 帯域のパワーも一部条件で上位となり、素材表面の繊維構造や摩擦変動が複数の周波数帯域に反映されることが示唆された。

一方で、関節条件によって重要となる特微量の種類は異なった。MCP-FE-3DoF では、センサ間コヒーレンスが上位に現れ、単一センサで観測される振動強度だけでなく、指節間の周波数的関連性が識別に関与する可能性が示された。また、MCP-AA-3DoF では、Band Power に加えて RMS、MFCC、相関係数などが上位となり、振幅情報、スペクトル包絡、波形類似性を含む複数の情報が利用されていると考えられた。

以上より、関節自由度は単に接触の柔らかさを変えるだけでなく、振動の発生、減衰、伝達経路、およびセンサ間の情報関係を変化させることが分かった。これは、身体構造そのものが触覚信号を時空間的に変換する物理的な情報処理系として働く可能性を示す。申請時に掲げた「皮膚・センサ構成を物理リザバとして活用する」という考え方に対し、本年度の成果は、関

節自由度や剛性分布も含めた身体全体を情報処理資源として捉える重要性を示した。

6. まとめ

本研究では、ヒト指模倣ロボットフィンガを用いて、身体柔軟性が素材識別に与える影響を定量的に検証する基盤を構築できた。得られた成果は、人体模倣ソフト触覚センサネットワークにおいて、センサ素子や皮膚材料だけでなく、関節自由度、剛性分布、センサ配置、探索動作を統合的に設計する必要があることを示している。特に、多自由度化や柔軟化が常に識別性能の向上に直結するわけではないという結果は、ロボット触覚設計における重要な知見である。

今後は、関節を固定・可動の二値条件として扱うだけでなく、可変剛性機構を導入して剛性の大きさを連続的に変化させる。これにより、接触面への受動的適応と振動伝達の安定性の間に存在するトレードオフを定量化する。また、関節角度、接触力分布、接触面積、指節間の振動伝達関数を同時に計測し、識別性能差を生じさせる力学的要因をより直接的に明らかにする。

これらの成果は、ロボットが人と同様に素材を識別し、触感や質感を共有するための基盤技術につながる。将来的には、遠隔操作ロボット、義手、介護・医療支援機器、柔軟物操作ロボットなどにおいて、対象物との接触状態をより豊かに理解する触覚システムの設計に貢献できる。本研究で得た身体構造と探索動作を一体として扱う視点は、「人間と機械の調和」を支える触覚インターフェース設計の基礎となる。

〔成果の発表、論文など〕

1. 岩村 翔馬, 永野 光, 野中 哲士: 身体性触覚知覚の構成論的理解: ロボットの関節自由度が素材識別に及ぼす影響, 第 26 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2025 年 12 月)