



触診 AI のためのつまみ触察 — 振動方向/周波数の解析による硬さ識別 —

Pinching Palpation for Robotic Palpation AI
- Hardness Discrimination by Analysis of Vibration Direction/Frequency -

竹田隼¹⁾, 加藤史洋²⁾, 岩田浩康³⁾
Hayato TAKEDA, Fumihiko K., and Hiroyasu IWATA

- 1) 早稲田大学大学院 (〒162-0042 東京都新宿区早稲田町 27, falcon-t8864@akane.waseda.jp)
2) 早稲田大学 (〒162-0042 東京都新宿区早稲田町 27, phyro21@gmail.com)
3) 早稲田大学 (〒162-0042 東京都新宿区早稲田町 27, jubi@waseda.jp)

概要: 触診は患部に直接触れることで、非侵襲かつ短時間で疾患の推定を行うことができる医療行為である。触診手技は師匠から弟子に経験を通して伝えられるスキルであり、自律ロボットによる再現は実現されていない。本研究では、2 指ロボットハンドで腫瘍を模したファントムの硬さ識別を行った。ファントムをつまんだ状態で直接振動を与え、振動伝搬を解析することで高い精度で硬さ識別を可能とした。さらに与える振動の向きや周波数を変更し、分析することで触診における振動の要件を明らかとした。

キーワード: 触診, ロボット, 振動伝搬, 周波数解析

1. はじめに

医師は診察において身体の健康状態を把握するために、問診、視診、触診、聴診、打診の 5 種のフィジカルアセスメントを行う [1]。なかでも触診は、患部に直接触れることで、患部の状態を把握する手技である。特に、皮膚は皮下組織を含むと体重の約 16% を占めており、体内と外界とを隔てる人体最大の臓器である [2]。触診によって皮膚の状態をモニタリングすることは患者の健康を把握するための重要な情報であるといえる。しかし、触診は経験を通じて師匠から弟子へと受け継がれる技術であり、触診の定量化や自律型ロボットによる再現は実現されていない。本研究は、医師の触診動作を再現する 2 指ロボットハンドを用いて、皮膚科の診断における重要な判断材料である硬さの識別を行う。特に、振動伝搬による識別精度の向上手法について論じる。

2. 関連研究

2.1 振動伝搬を用いた生体硬さに関する研究

生体の硬さ測定手法として表面波の伝わる速度を用いる手法が提案されている [3]。生体の硬さによって振動伝搬に違いが出ることから、コンニャクやレバー、鶏肉などの生体材料に対して正弦波を与え、周波数一位相遅れ特性を分析している。生体の硬さ識別に振動伝搬を用いることが

効果的であることが示唆されている。

2.2 触診柔らかさを識別する簡易ロボットシステム

皮膚科の触診において、柔らかさと表面性状は重要な判断材料である [4]。力を印加するロボットシステムを構築し、力センサの波形を機械学習に用いて柔らかさや表面性状の判定をする手法が提案されている [5]。この研究では、医師へのヒアリングから触診においてベンチマークとなる柔らかさの異なる材料を 15 種類選定している。ロボットシステムは単一アクチュエータによる押し込みを行う単触子と、振動の伝搬特性を取得する双触子からなる。単触子のエンドエフェクタに触原色原理 [6] に基づく触覚センサ [7][8] を搭載し、センサから取得した力と加速度の波形から材料の柔らかさを医師が診断に用いる 5 段階に分類している。先行研究では、試料として 13 種類の形状の異なる食材などを利用している。識別におけるパラメータとして柔らかさや表面性状だけでなく、形状などの情報も利用している可能性がある。本研究では、特に柔らかさに着目し、より最適な振動伝搬のアプローチ手法を検討する。

2.3 医師の触診動作を再現する 2 指ロボットハンド

皮膚科医師は触診において、5 種類の触診動作を用いることで患部状態を識別している [9]。この触診動作を再現す

るロボットハンドとして 2 指のロボットハンドを提案している[10]. 各指が回内外方向に回転することで, 2 指が平行と対向の 2 種類の位置関係を両立している. 自由度は各指屈曲, 回内外, 並進の 3 自由度であり, ハンド全体で 6 自由度となっている (図 1)

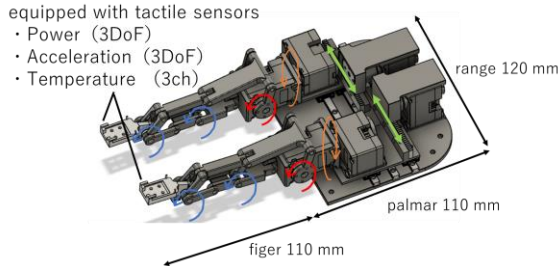


図 1: 2 指ロボットハンド (赤: 屈曲, 橙: 回内外, 緑: 並進, 青: 受動関節)

3. 平行する 2 指による硬さ識別実験

先行研究 2.2 の課題として試料の形状があげられる. 硬さ特徴を得ているとしているが, 試料ごとに形状が異なり, 形状特徴で識別していた可能性がある. そこで, 図 2 のように中央部に直径 20mm の球状の疑似腫瘍 (人肌のゲル (エラストマーゲル)) を硬さ 5 段階 (アスカーC 硬度 0,2,5,8,16), 周りを人肌のゲル (エラストマーゲル, アスカーC 硬度 7) を 80×40×7 mm で埋めた触診ファントムを作成した. 硬さのみを段階的に変更し, 他の特徴量を統一することで硬さでの識別が可能か検証する.

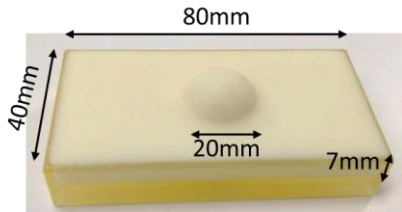


図 2 硬さの異なる触診ファントム (アスカーC 硬度 0,2,5,8,16) 図はアスカーC 硬度 5

3.1 実験概要

2.3 のロボットハンドを用いて硬さの識別を行った. ロボットハンドの 2 指のうち片方は触覚センサ[7][8]を搭載し, 力を 1000Hz 振動を 1600Hz で取得している. また, 片方は振動子 (HAPTIC Reactor[11]) を搭載している. 実験の手順は, ①触覚センサを搭載した指で触診ファントム中央部を 2mm 押し込む. ②振動子を搭載した指で 100Hz の振動を与える. ③200ms 後, 指を離す. 以上①~③を 800 回繰り返す. この時の力と振動の波形を短時間フーリエ変換 (STFT) により画像化し, AlexNet を用いて転移学習した. 800 枚のうち 700 枚を学習, 100 枚を評価に用いる. 振動を与えた場合と振動を与えずに押し込みのみをした場合の 2 条件で実験を行った. システムの構成図を図 4 に示す.

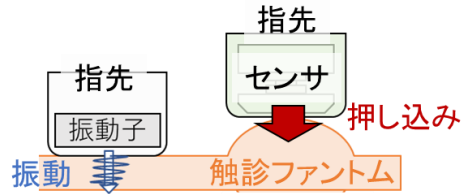


図 3 押し込みと振動伝搬のイメージ図

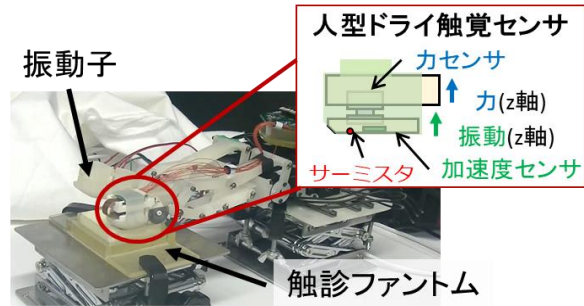


図 4 振動伝搬による試験のシステム構成図

3.2 結果

振動なし/ありの 2 条件を 12 回ずつ学習し, 識別精度を比較した結果を図 5 に示す. また, 先行研究における 15 種類の食材を用いて直動アクチュエータからなるロボットシステムにおける精度との比較を表 1 に示す. 結果として振動あり識別精度 92.0%, 振動なしが 55.0%だった.

3.3 考察

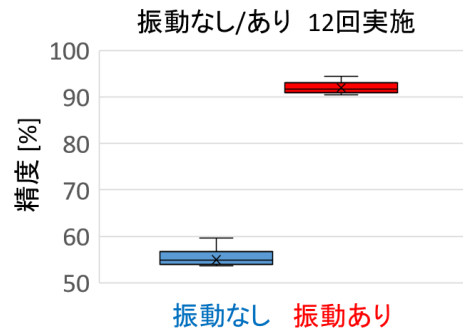


図 5 硬さ識別精度 (青: 振動なし, 赤: 振動あり)

表 1 振動伝搬による食材 (先行研究) と触診ファントムにおける硬さ識別精度の比較

[%]	5 段階触診ファントム	15 種試料 (先行研究)
振動なし	55.0	96.7
振動あり	92.0	97.7

先行研究における振動ありが 97.7%であり, 触診ファントムを用いたことで識別精度が 5.7%低下した. したがって, 先行研究では硬さ以外の特徴量からも識別していたことが確認された. 一方で振動ありが振動なしに比べて 37.0%識別精度が高かった. これは先行研究[5]におけるおいて振動伝搬の取得は非常に効果的であることが示唆された.

4. 対向する2指による硬さ識別実験

3の実験において振動伝搬による有効性が確認されたが、先行研究に比べて精度が5.7%低下している。皮膚科医師は触診において硬さを1指による押し込みだけでなく、2指を用いたつまみ触察によって識別していることからロボットハンドでも2指によるつまみ動作が必要と考えられる。そこで2指を用いたつまみ動作・つまんだ状態での振動伝搬によって識別精度が向上するか検証する。

4.1 実験概要

3の実験で用いたロボットハンド・触診ファントムを用いる。実験の手順は、①触診ファントム中央部を、触覚センサを搭載した指と振動子を搭載した指の2指でつまむ。2指を対向した状態と45°傾いた斜め方向からつまむ状態の2条件でつまむ(図6)。②振動子を搭載した指で100Hzの振動を与える。③200ms後、指を離す。以上①~③を800回繰り返す。この時の力と振動の波形を短時間フーリエ変換(STFT)により画像化し、AlexNetを用いて転移学習した。800枚のうち700枚を学習、100枚を評価に用いる。

4.2 結果

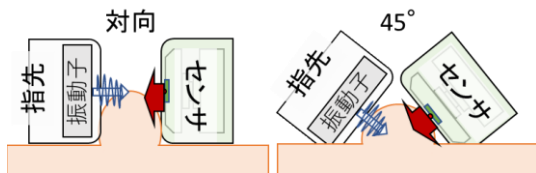


図6 2指の対向, 45°斜めつまみのイメージ図
斜めつまみにおける実験の様子

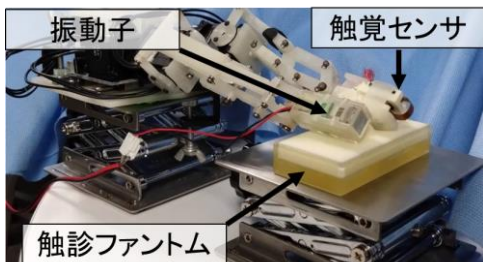


図7 2指の対向, 45°つまみにおける実験概要図 (図は45°斜めつまみ時)

対向と45°傾いた斜め方向からつまむ状態、3の実験(平行状態)における実験結果を比較した結果を図7、表2に示す。各条件12回ずつ学習し、識別精度を比較した。

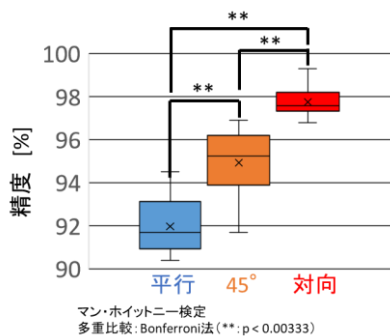


図7 2指の位置関係による硬さ識別精度の比較

表2 2指対向, 45°斜めつまみによる硬さ識別精度の比較

[%]	平行	45°	対向
振動なし	55.0	68.1	72.8
振動あり	92.0	94.9	98.1

4.3 考察

4.3.1 つまみ触察による精度向上

2指が平行した状態で振動を与えた時に比べて2指を対向することで6.1%精度が向上した。対向することで腫瘍部に直接的に振動を与えることが可能となり、識別精度が向上したと考えられる。また、2指が対向振動ありにおける各硬さの識別結果を表3に示す。表3から誤識別の割合が最も高かったのが硬度5と硬度8であり、2.0%程度であった。ほかにも1%程度の誤識別が存在するが隣接する硬さまでのご識別が多い。誤識別が発生した場合でも近い柔らかさに識別していることから、振動を直接的に与え振動伝搬を用いることで柔らかさ識別が可能であることが示唆された。

表3 2指対向振動ありの識別結果 (12回平均)

[%]	硬度0	硬度2	硬度5	硬度8	硬度16	再現率
硬度0	99.8	0	0	0.2	0	99.8
硬度2	0.2	99.0	0.1	0.7	0	99.0
硬度5	0	0	97.2	2.1	0.7	97.2
硬度8	0.4	0	2.0	96.6	1.0	96.6
硬度16	0	0.1	1.1	1.0	97.9	97.9
適合率	99.4	99.9	96.8	96.1	98.3	

4.3.2 振動を与える向き

45°方向からの斜めつまみでの識別精度は94.9%であった。平行状態と比較すると2.9%精度が高い一方で、対向状態と比較すると3.2%低い。要因として振動の方向が考えられる。本研究において、先行研究[5]と同様に振動子で横波を与え、加速度センサで縦波として測定をしている。しかし、指の向きを変更している本研究では特に斜め45°での押し込みにおいて適切な向きでの振動伝搬が測定できていない可能性がある(図8左)。そこで追加実験としてセンサでの取得方向を90°回転し横波として取得する。

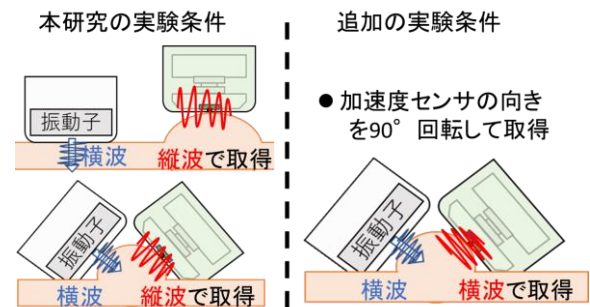


図8 振動の測定方向による検討のイメージ図

触診ファントムはアスカーC硬度5を利用した。そのほかの実験条件は4.での実験と同様である。

縦波として取得した結果(4.における結果)と横波とし

表 4 振動の測定方向における識別精度の比較

[%]	縦波 (4. 実験)	横波 (追加実験)
識別精度	94.9	97.9

て取得した結果(追加実験)を比較したものを表4に示す。各条件12回ずつ学習し、識別精度を比較した。

加速度センサの取得方向を変更(横波取得)にすることで精度が3.0%向上した。対向時の識別精度98.1%と0.2%差となり、同等の識別精度を実現している。2指が平行時、対向時、45°方向からのつまみすべてにおいて与えた振動に対して90°傾いた向きの加速度を取得することで精度が向上することが確認された。つまむことが困難な隆起していない埋没した腫瘍に対しても斜め方向からのつまみによる硬さ識別の可能性が示唆された。

4.3.3 周波数における影響

本研究では、先行研究[5]と同様に触診ファントムに100Hzの振動を与えることで硬さの識別を行った。しかし、硬さ識別において精度が向上する周波数帯が存在する可能性がある。そこで4.における対向の実験条件において異なる周波数の振動(100, 300, 500, 700, 1000 Hz)を与えた状態での硬さ識別精度の比較を行う。触診ファントムはアスカーC硬度5を利用した。振動の周波数以外の条件は4.と同様である。

各周波数において12回ずつ学習し、識別精度を比較したものを表5に示す。

表 5 各周波数の振動伝搬における識別精度の比較

[%]	100Hz	300Hz	500Hz	700Hz	1000Hz
識別精度	98.1	96.5	92.0	95.9	93.3

結果として、100 Hzでの識別精度が一番高いことが明らかとなった。これは先行研究[3]において、筋肉材料では100 Hz前後の振動を与えることで位相遅れが発生するとしている。表5より触診ファントムにおいても筋肉材料と同様に100 Hz前後の振動が効果的であることが示唆された。実際に人間に対して触診を行う場合でも100 Hz前後の振動が効果的であると推測される。

5. 結論

2指ロボットハンドのうち片指で100 Hzの振動を与え、もう片指の触覚センサで振動伝搬を取得することによって皮膚科における診断に重要な役割を持つ硬さの識別が可能であることが示唆された。また、腫瘍に対して縦波を与え、90°直行した方向の加速度を取得することで精度が向上することが確認された。

謝辞

本研究は、JST【ムーンショット型研究開発事業グランド番号【JPMJMS2031】】の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Maeno, "Structure and Function of Finger Pad and Tactile Receptors," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 18, no. 6, pp. 772-775, Sep. 2000, doi: 10.7210/JRSJ.18.772.
- [2] H. Shimizu. "The New Dermatology 3rd ed." (in Japanese), 1-88, yamanakashoseki, (2005).
- [3] 神島海音, 加藤洋史, 半田匠, 岩田浩康, "遠隔触診システムの研究(第1報)～遠隔診療の調査と医師ヒアリングまとめ～," 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, vol. 26, 2021, Accessed: Dec. 09, 2021. [Online]. Available: <http://conference.vrsj.org/ac2021/program/doc/3D2-1.pdf>
- [4] 高屋治, 赤塚孝雄, "生体の硬さの臨床的測定法," 計測と制御, 1995, 14巻3号, p. 281-292, doi: 10.11499/sicej1962.14.281, Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicej1962/14/3/14_3_281/_article/-char/ja
- [5] F. Kato, T. Adachi, T. Handa, K. Kamishima and H. Iwata, "Palpation Robot System - Reproduction Method by Deep Neural Network of Skin Palpation Judgment Focusing on Softness Classification-," 2022 International Symposium on Measurement and Control in Robotics (ISMCR), 2022, pp. 1-8, doi: 10.1109/ISMCR56534.2022.9950593.
- [6] S. Tachi, Y. Inoue, F. Kato, "TELESAR VI: Telexistence Surrogate Anthropomorphic Robot VI", International Journal of Humanoid Robotics, vol.17, no.5, 2050 019,2020.
- [7] S. Tachi, K. Minamizawa, M. Furukawa et al. "Haptic media construction and utilization of human harmonized "tangible" information environment", Proceedings of the 23rd International Conference on Artificial Reality and Telexistence, vol. 54, no. 6, pp.140-150,2013.
- [8] F. Kato, Y. Inoue, and S. Tachi, "Study on Telexistence XCVIII-Haptic Primary Colors Sensing System for TELESAR VI," Special Interest Group on Telexistence All Rights Reserved, 2020.
- [9] 竹田隼, 加藤史洋, 神島海音, 岩田浩康 "触診ハンドに関する研究 —皮膚科医への触察ヒアリングと触察所作の分類—," ロボティクス・メカトロニクス講演会概要集 2023, 2PI-C11
- [10] 竹田隼, 加藤史洋, 神島海音, 岩田浩康 "医師の5種触察を再現する触診ハンドに関する研究—2指つまみ揺動を可能とする回内外・並進関節機構の設計—," 日本機械学会年次大会概要集, 2023, 4J1-02.
- [11] Haptic Reactor, ALPSALPINE, <https://tech.alpsalpine.com/j/info/haptic/hapticreactor/>