This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 30 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2025 年 9 月）

つまみ動作における把持位置計測による触覚解像度分布の進化的意義検討

Evolutionary significance of tactile acuity distribution based on measurement of grasping position during pinching movements

祖父江迪瑠 [1)]，溝口泉 [1)]，梶本裕之 [1)]
Michiru SOBUE, Izumi MIZOGUCHI, Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 情報理工学研究科（〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {sobue, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp）

概要：人の指における触覚解像度は、指先の関節部は低く、末端部は高く、その間はほぼ線形に変化する。この分布は、細かな物体を拾い上げるような精密な動作に対応する進化の結果と考えられる。細かい対象物ほど指先末端での操作が求められることから、先端部における触覚解像度が高く発達した可能性がある。本研究ではこの仮説を検証するため、サイズの異なる物体のつまみ動作時の接触位置とその分布を計測した。

キーワード：触覚、感覚・知覚、指先、触覚解像度

1. はじめに

人の指先における触覚解像度は、関節側から指先端部に向かってほぼ線形に向上し、指側面部では指腹部の約半分にとどまることが明らかにされている[1](図 1)。一方で、「人がなぜそのような解像度分布を獲得するに至ったのか」については、依然として十分に解明されていない。

そこで本研究では、「人にとって指先で地面に落ちたものを拾いあげることが極めて重要であり、その際に物体の大きさに応じて異なる把持位置や方法を使い分ける必要があったため、指先の解像度分布が進化的に獲得されたのではないか」という仮説を立てた。具体的には、小さいものほど指先端部でつまみ、大きいものほど指腹部でつまむ動作が自然であるために、指先端部が指腹部よりも高い解像度を持つ必要があったということである。

本研究はこの仮説を検証するため、サイズを系統的に変化させた対象物を用いて、被験者のつまみ動作中における接触位置を高精度に計測した。具体的には、インクを塗布した物体を被験者につまんでもらい、インクが付着した指先をカメラで撮影した後、画像認識により黒インク領域を抽出することで、指先の接触位置を正確に特定する手法を採用した。これにより、物体のサイズと把持位置分布の特徴を明らかにした。

本研究によって得られた知見は、ヒトの触覚システムの進化的適応メカニズムに対する基礎的理解を深めることに加え、遠隔操作やリモートマニピュレーションを伴う触覚提示装置の設計指針を与えるという応用的観点においても重要である。

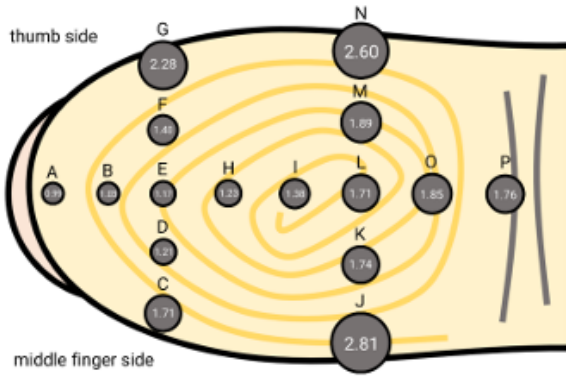

図 1. 人差し指指先の触覚解像度分布[1]

2. 関連研究

日常生活における様々な把持動作の使用頻度に関するデータを分析した結果、精密把持を含む多様なタスクでは、親指、人差し指、中指の指先が特に重要であることが示され、教育的な文脈での小さな物体の精密操作においては、人差し指と親指を対象とする 2 本指インターフェースで十分に対応可能であると報告されている[2]。また、探索および操作タスクでは指先が最も頻繁に使用される領域であり[3]、その中でも親指は把持時間の 98%から 99%に関与し、次いで人差し指、中指が重要な役割を担うことが明らかになっている[4]。加えて、指先は手の他部位と比較して受容器の密度が 2 倍以上高く、特に皮膚の変形や静的力に反応する FA I および SA I が 70%以上を占めている[5]。こうした神経資源の偏在は、効率的符号化理論の観点から

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

説明されることがある[6]。すなわち、限られた神経資源を最も刺激頻度が高く、かつ受容器密度の高い部位に優先的に配分することで、皮質表現領域が拡大し、高い触覚解像度が実現されるというものである。しかしながら、この理論は指腹と指先端部を区別せずに扱っており、指腹よりも指先端部で受容器密度がさらに高いという知見[5]には言及していない。そのため、触覚解像度が関節側から指先端部に向かってほぼ線形に向上するという分布特性を説明するには不十分である。

さらに、人差し指の親指側側面も重要な接触領域として注目されている。この領域は親指の腹と人差し指の側面で物体を挟む Lateral Pinch に用いられ、単一の把持動作にしか関連しないにもかかわらず、2 番目に使用頻度の高い表面であることが報告されている[7]。一方で、人差し指の先端部では、中指側側面の方が親指側側面よりも高い触覚解像度を示しており[1]、単に使用頻度の高さだけではこの解像度分布を説明しきれないことが示唆される。

把持動作において指がどのように使われているかを明らかにする研究は、主にロボティクスの分野で多く行われてきた。典型的には反射マーカーを用いたモーションキャプチャを用いて指の関節モーメントを決定する手法が用いられる[8]。しかしこの方法を我々の目的に利用しようとすると、指皮膚の接触位置を正確に推定することが困難である。また、グローブ型[9][10]の高精度な触覚センサも提案されているが、素手本来の自然なつまみ動作を妨げることから、本研究の実験には適していないと考えられる。

これに対し、指腹を覆わずに把持時の力や接触を検出する手法も数多く提案されている。力の大きさや方向[11][12]、エッジ方向や大まかな接触位置[13]を検出する手法がある。しかし、これらはいずれも接触位置を高解像度かつ精密に計測することを主眼としておらず、微小物体の把持位置解析には不十分である。

また、手と物体との接触時に物体に温度分布が「転写」されることを利用して物体上の把持位置を推定する手法も報告されている[14]。しかし、この手法は物体側の把持位置を特定するものであり、指先のどの部位で把持したかを明らかにするには不適である。

3. 実験

3.1 実験セットアップ

実験には黒インクが塗布された円柱状のステンレス棒を用いた。被験者がこの棒をつまみ上げることにより指先にインクが付着するため、それをカメラで複数方向から撮影することで把持位置を計測した。インクとしては一般的なシャチハタ製のスタンプ台を使用した。ステンレス棒の長さは 50 mm、直径は 1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0 mm の計 6 種類とした（図 2）。各ステンレス棒の質量は直径の小さいものから順に 0.30g、0.68g、1.21g、2.72g、4.93g、7.71g であった。なお、インク塗布による滑りを抑制するため、ステンレス棒の表面を紙やすり（#240）で研磨した。

図 2. 使用したステンレス棒
（左から直径 1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0 mm）

3.2 実験手順

実験参加者は 11 名（男性 6 名、女性 5 名、21 歳～24 歳）であり、つけ爪をしておらず、爪が伸びていない者とした。実験の前段階として、参加者には各直径のステンレス棒をつまむ練習を行ってもらった。その際、つまみ方について、「棒の中心を把持すること」「一回でつまみ上げること」「つまみ上げたら棒を放し、指の上で転がさないこと」の 3 点を指示した。

実験開始前に、汗の影響を防ぐため参加者の指をエタノールで拭いた。その後、参加者は、平坦な机上に置かれた黒インク塗布済みのステンレス棒を右手でつまみ上げ（図 3）、その後すぐに棒を放した。その後、人差し指と親指を正面（指紋のある方）から撮影した（図 3）。撮影後、エタノールやせっけんを用いて指先に付着したインクを完全に落とした。この手順を 1 試行とし、1 条件あたり 5 回繰り返すことで計 30 回繰り返した。

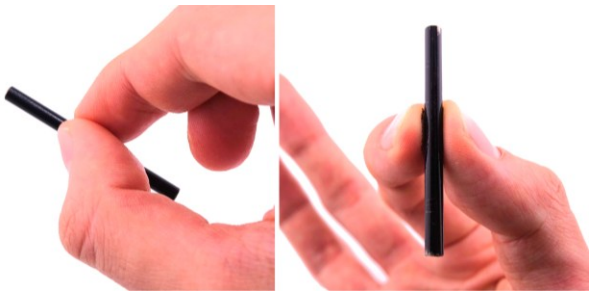

図 3. インクが付着したステンレス棒をつまむ様子

3.3 把持位置の検出方法

本研究では、画像から黒インクの付着位置を高精度に検出し、指先での把持位置を比較可能にするため、以下の手順を採用した。まず、被験者には白背景かつ均一照明下で、ガイドラインに沿って親指と人差し指をカメラレンズに対して中央かつ垂直に配置して撮影を行った。次に、取得した画像の画素値をスケーリングして明度を均一化し、照明ムラに起因する誤検出を抑制した。その後、HSV 色空間の V（明度）成分を用いて閾値処理を行い、暗い影領域を除去するマスクを作成した上で画像を二値化し、指全体のシルエットを抽出した。続いて、指輪郭内に残った黒イン

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

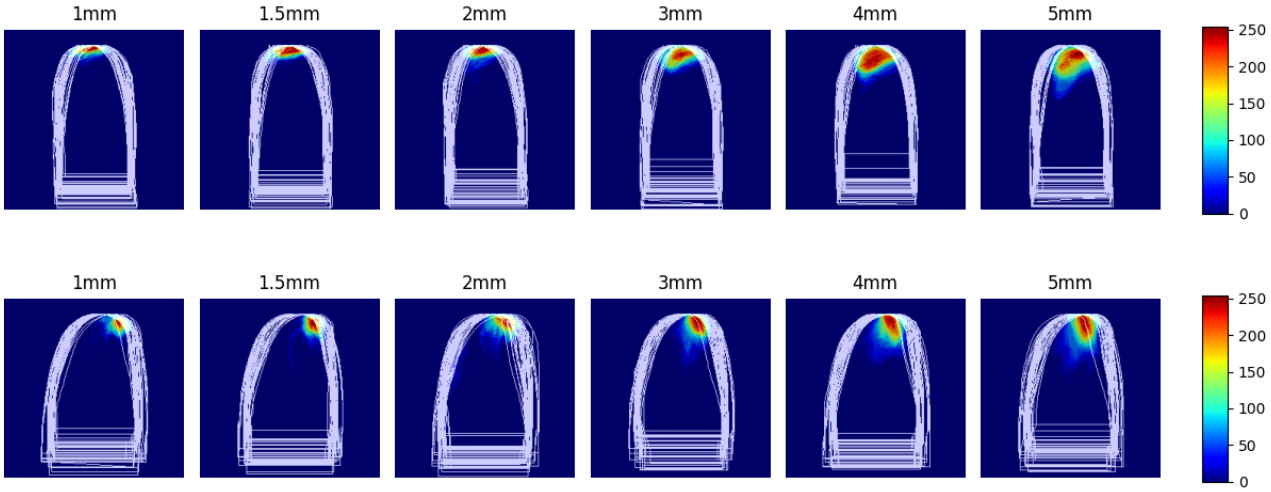

図 5. 指先への黒インク付着頻度累積ヒートマップ（(上）人差し指、（下）親指）

ク領域を HSV 閾値処理により抽出し、指先端を基準とした座標系にマッピングすることでヒートマップを作成した。この手法により、複数被験者間での把持位置を統一的に比較・可視化でき、影や輪郭欠損の影響を抑制しつつ、安定した把持位置検出を実現した（図 4)。

図 4. 画像処理の様子
（左）撮影後に明度を均一化した画像、（中央）指全体のシルエットを抽出、（右）黒インク領域を抽出

4. 実験結果

図 5 に示すヒートマップは、指輪郭先端を上端、左右中心を基準に統一した仮想座標系上において、指先への黒インク付着頻度を累積したものである。各サブプロットは異なる直径（左から 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、3.0 mm、4.0 mm、5.0 mm）のステンレス棒を把持した際のインク領域分布を示しており、白線は各被験者の指の輪郭、色はインク付着の相対的強度（濃度）を表す。色相は青から赤へと強度が増大する方向に対応し、赤色領域ほど多くの被験者あるいは試行でインクが付着した部位である。各ヒートマップは同一スケールで正規化されており、相対的な把持位置の傾向を直接比較可能である。縦軸は指先から指根方向への距離、横軸は左右方向を示し、被験者間の把持位置の偏りや径の違いに伴う把持パターンの変化を可視化している。

5. 考察

図 5 は人差し指及び親指における把持位置のヒートマップを示している。この結果から、人差し指と親指のいずれにおいても、物体のサイズが大きくなるにつれて把持位置が指腹方向へと移動することが明らかとなった。これは「人は小さい物ほど指先端部でつまみ、大きい物ほど指腹部でつまむ」という把持戦略をとることを示唆しており、触覚解像度が関節側から指先端部に向かってほぼ線形に向上するという先行研究の知見[1]を支持するものである。

また、人差し指では、把持対象物のサイズが大きくなるにつれて把持位置が指先端部の中指側へと移動する傾向が認められた。この傾向は、人差し指の触覚解像度分布において、先端部の中指側が親指側よりも高い解像度を有していたこと[1]の理由の一つとして考えられる。すなわち、人差し指では親指側よりも中指側を用いて把持する頻度が高いため、先端部の中指側においてより高い触覚解像度が発達したと推察される。

親指に関しては、物体のサイズにかかわらず常に外側で把持していることが明確に示された。一般に「2 本指での把持」のみを考えれば、親指の人差し指側を多く使用しているように思われ、実際に先行研究においても人差し指側の使用頻度が高いことが報告されている[7]。一方で本研究では、精密把持という限定された操作場面においては、むしろ親指の外側が積極的に使用されていることが明らかとなった。この結果は、親指の触覚解像度分布において、人差し指側よりも外側の方が高い解像度を示していたこと[1]を説明する有力な要因の一つと考えられる。すなわち、親指外側の高い解像度は、日常生活全般における使用頻度というよりも、精密把持という特定かつ重要な作業における使用頻度に基づき進化的に獲得された結果であると推察される。この解釈は、脳内の皮質表現が使用頻度に応じて可塑的に変化することを示す研究[15]や、手指の進化において、精密把持の発達が形態・機能の分化に大きく寄与したとする議論[16]とも一致している。

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会

6. 結論

本研究は、人の指先における触覚解像度分布の進化的意義を検討することを目的として、インクを塗布したさまざまな直径のステンレス棒を被験者につまんでもらい、その把持位置を画像解析により検出する実験を行った。その結果、精密把持動作が触覚解像度分布の進化的意義を裏付ける一つの要因となることが示唆された。

一方で、本研究では把持対象物の長さは統一したものの、その重量は一定にしなかったため、物体の重量差が被験者の把持戦略に影響した可能性がある。また今回、指の正面方向のみから撮影したが、実際には爪近傍や側面部など、他の領域も把持に利用されていたと考えられる。今後は、さまざまな重量の物体を用意するとともに、指の先端部や側面部など複数方向から撮影・画像解析を行うことで、より詳細な把持位置の特徴や違いが明らかになることが期待される。

謝辞　本研究は JST A-STEP JPMJTR23RC、及び JSPS 科研費 JP24K21321 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] M. Sobue, S. Kato, I. Mizoguchi, and H. Kajimoto, “Measuring the Distribution of Tactile Acuity at the Index Finger and Thumb Fingertips,” IEEE Transactions on Haptics, pp. 1–9, 2025, doi: 10.1109/TOH.2025.3580707.

[2] S. P. Christodoulou, D. M. Garyfallidou, G. S. Ioannidis, and T. S. Papatheodorou, “Interactive education based on haptic technologies and educational testing of an innovative system,” International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET), vol. 3, no. 2, Art. no. 2, May 2008.

[3] C. L. Taylor and R. J. Schwarz, “The anatomy and mechanics of the human hand,” Artif Limbs, vol. 2, no. 2, pp. 22–35, May 1955.

[4] F. Gonzalez, F. Gosselin, and W. Bachta, “Analysis of Hand Contact Areas and Interaction Capabilities During Manipulation and Exploration,” IEEE Transactions on Haptics, vol. 7, no. 4, pp. 415–429, Oct. 2014, doi: 10.1109/TOH.2014.2321395.

[5] A. B. Vallbo and R. S. Johansson, “Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation,” Hum Neurobiol, vol. 3, no. 1, pp. 3–14, 1984.

[6] L. R. Edmondson, A. Jiménez Rodríguez, and H. P. Saal, “Expansion and contraction of resource allocation in sensory bottlenecks,” eLife, vol. 11, p. e70777, Aug. 2022, doi: 10.7554/eLife.70777.

[7] J. Z. Zheng, S. De La Rosa, and A. M. Dollar, “An investigation of grasp type and frequency in daily household and machine shop tasks,” in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2011, pp. 4169–4175. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980366.

[8] R. Nataraj and Z.-M. Li, “Integration of marker and force data to compute three-dimensional joint moments of the thumb and index finger digits during pinch,” Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, vol. 18, no. 6, pp. 592–606, Apr. 2015, doi: 10.1080/10255842.2013.820722.

[9] T. Sagisaka, Y. Ohmura, A. Nagakubo, K. Ozaki, and Y. Kuniyoshi, “Development and Applications of High-Density Tactile Sensing Glove,” in Haptics: Perception, Devices, Mobility, and Communication, P. Isokoski and J. Springare, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, pp. 445–456. doi: 10.1007/978-3-642-31401-8_40.

[10] P. Ruppel and J. Zhang, “Elastic Tactile Sensor Glove for Dexterous Teaching by Demonstration,” Sensors, vol. 24, no. 6, Art. no. 6, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24061912.

[11] K. Sakuma et al., “Wearable Nail Deformation Sensing for Behavioral and Biomechanical Monitoring and Human-Computer Interaction,” Sci Rep, vol. 8, no. 1, p. 18031, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41598-018-36834-x.

[12] N. Fallahinia and S. A. Mascaro, “Real-Time Tactile Grasp Force Sensing Using Fingernail Imaging via Deep Neural Networks,” IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 3, pp. 6558–6565, Jul. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3173751.

[13] S. Kon, K. Ushiyama, I. Mizoguchi, and H. Kajimoto, “Bare finger tactile sensing for edge orientation and contact position using excitation from fingernail,” Sci Rep, vol. 15, no. 1, p. 7453, Mar. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-91970-5.

[14] S. Brahmbhatt, C. Ham, C. C. Kemp, and J. Hays, “ContactDB: Analyzing and Predicting Grasp Contact via Thermal Imaging,” in 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Jun. 2019, pp. 8701–8711. doi: 10.1109/CVPR.2019.00891.

[15] W. M. Jenkins, M. M. Merzenich, M. T. Ochs, T. Allard, and E. Guic-Robles, “Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation,” Journal of Neurophysiology, vol. 63, no. 1, pp. 82–104, Jan. 1990, doi: 10.1152/jn.1990.63.1.82.

[16] M. W. Marzke, “Precision grips, hand morphology, and tools,” American Journal of Physical Anthropology, vol. 102, no. 1, pp. 91–110, 1997, doi: 10.1002/(SICI)1096-8644(199701)102:1<91::AID-AJPA8>3.0.CO;2-G.

© 2025 日本バーチャルリアリティ学会