

# 指先の左右における皮膚変形の差異に関する予備的検討

## Preliminary study on the difference of fingertip skin deformation between radial and ulnar side

○学 張 建堯 (電通大) 正 梶本 裕之 (電通大)

Jianyao ZHANG, The University of Electro-Communications, zhang@kaji-lab.jp  
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

The stick-slip phenomenon occurs in dynamic friction plays an important role in haptic perception. We observed that when using the finger pad to interact with a rough surface, under a certain downforce, the stick-slip phenomenon is more likely to occur when the finger exploring in ulnar direction than radial direction. We speculated that this might be the result of the different deformation characteristics of the skin on both sides of the finger pad. In this paper, we performed 3D measurements to obtain the height information on both sides of the fingertips under different downforce and tangential force. The results showed the differences in the elastic properties of the skin, which may explain the direction-dependent stick-slip phenomenon.

**Key Words:** Stick-slip phenomenon, Tactile exploration, Haptic perception, Fingerprint.

### 1. 緒言

指で粗い表面をなぞる際に発生するスティックスリップ現象は、触覚の知覚の一環として重要な役割を果たしている。また触覚提示においてもこの現象を人工的にシミュレーションすることは重要であると考えられる。スティックスリップ現象の生じやすさは接触面の材質、押下力、なぞり方、指の剛性などの条件によって変化する摩擦係数の変化と強く関連すると考えられる。これらの指の性質に対する研究は多数行われている。剛性について Pataky らは、指が特定の押下力で表面を探索する場合、DIP 関節が拘束され、指の剛性が大きくなり、触覚に影響が生じることを示した[1]。Babu らは指の動きと力に対する指の姿勢、接触角、およびなぞる方向の影響を分析し、これらの要素による見かけの指の長さの変化が指の硬さに影響することを示した[2]。また、なぞる方向によって粗さ感覚が異なることが知られている。Nakazawa らはなぞり方向によって皮膚の硬度が異なり、近位遠位方向(前後)運動の時の皮膚が橈骨尺骨方向(左右)より硬く、感じる粗さが変わることを示した[3]。指腹の柔らかさと触覚の関連性について、Chen らは指腹の FEM モデルを用い、軟部組織が外部の圧力刺激に対して敏感であることを示した[4]。指の接触圧力分布に対して、Derler らは高い荷重において、指腹の圧力分布が非対称になり、摩擦係数に影響を与えることを示した[5]。

我々は指先なぞり動作時の力計測を行うなかで、指が一定の押下力で左右方向(橈骨尺骨方向)に粗い表面をなぞる際に、尺骨方向よりも橈骨方向になぞる場合にスティックスリップ現象が発生しやすいことを観察していた。Fig. 1 に典型的な例を示す。1N の押下力で#120 の紙やすりを橈骨方向になぞる時は尺骨方向になぞる時より低い周波数の振動が生じ、スティックスリップ現象が発生した。こうした左右方向の差異については我々の知る限りこれまで報告されていない。我々はこの原因として、指が橈骨尺骨方向になぞる力を加えた際の指腹の両側の皮膚変形が非対称であるためではないかと考えた。

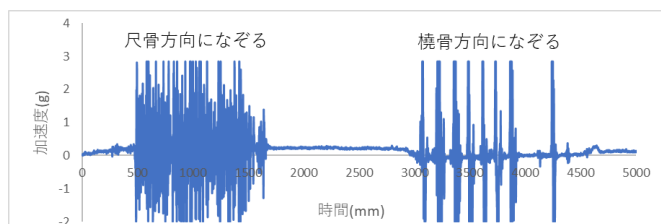


Fig. 1 Example of direction-dependent stick-slip phenomenon

本研究の目的は、指先皮膚にこうした左右非対称な変形が生じるかどうかを確認することである。指腹側面に対し、三つの荷重条件と、二方向に滑り始める前の限界条件での皮膚の変形状況を 3D 形状測定機で計測した。

### 2. 指側面の 3D 計測

#### 2.1. 計測装置と条件

指腹の側面はデジタル 3D 形状測定機(VR-3100, Keyence)を利用して計測した。計測原理は、対象物に対して縞模様の光を投影し、その変形を見るものである。反射光を CMOS イメージセンサで受光し、三角測距を用いて縞模様の歪みから対象物の形状を求める[6]。測定の様式図を Fig. 2 に示す。

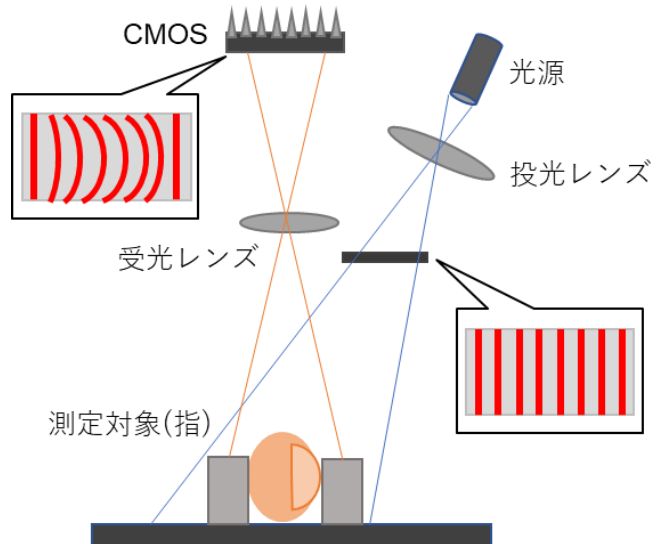


Fig. 2 Principle of surface height measurement.

指腹に荷重をかけるための簡易装置を Fig. 3 に示す。ノギスの右側の測定面にロードセル(DSA-03A, Tec Gihan)を装着して、センサー部に 3D プリントされた板を重ねた。指の接触対象として#120 の紙やすりを板に貼り付けた。左側の測定面にはスペーサーを装着し、指が紙やすりをなぞる自然状態と同じ姿勢と接触領域を維持した。ノギスのスライドを動かすことで

指腹に荷重をかけ、計測中の荷重の圧力値はロードセルで読み取り、条件を満たす一定の値となるようにリアルタイムでモニタリングした。計測の荷重条件は0N、0.5N、1Nとした。また1Nにおいては、指に左右方向の剪断力を加え、滑り始める直前の限界条件下の指腹側面の形状も測定した。計測に使う指は著者の左手の人差し指とした。Fig. 4の矢印が示すように、接触面と直交する線上の高さデータを取得し、荷重及び静止摩擦力が加えられた際の指腹側面の変形状態をえた。

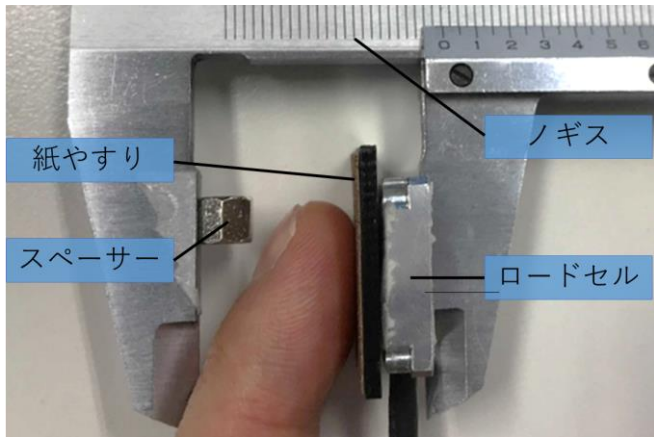


Fig. 3 A simple device for applying a pressing force to finger pad.

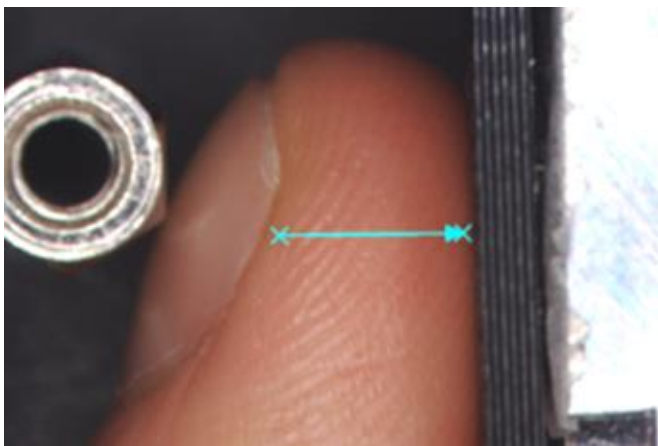


Fig. 4 The state of the side surface of the finger pad to which the 1N pressing force is applied as an example. The arrow shows the line where the height data was taken.

## 2.2. 計測結果

以下、身体座標に基づき、左手の人差し指の爪を上にした状態の右側（橈骨側、親指側）を内側、左側（尺骨側、小指側）を外側と表記する。無荷重条件の計測結果を Fig. 5 に示す。内側と外側を比較するためデータは左右折り返している。指腹の両側はほぼ同じ形状であることが分かった。0.5N 荷重における計測結果を Fig. 6 に示す。両側の皮膚は膨らんで（高さが全体に高くなって）おり、曲率は小さくなった。外側の皮膚の凹凸は無荷重の時より大きく変わり、指紋による皺が深くなり、皮膚が積み重なるように変形した。それに比べて、内側の皮膚の凹凸変化は小さく、外側のような規則的な大きな皺は生じなかった。1N の荷重における計測結果を Fig. 7 に示す。外側の皮膚の溝が 0.5N の場合よりも狭くなった。やはり内側の皮膚は外側より平らであり、0.5N の時からの変化は

小さかった。

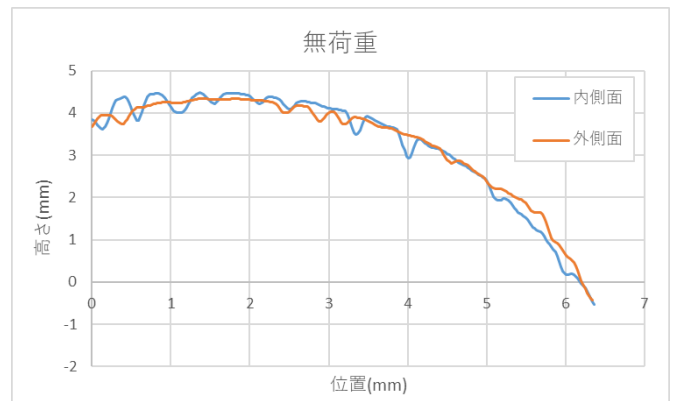


Fig. 5 Side shape of finger pad under no pressing force condition.

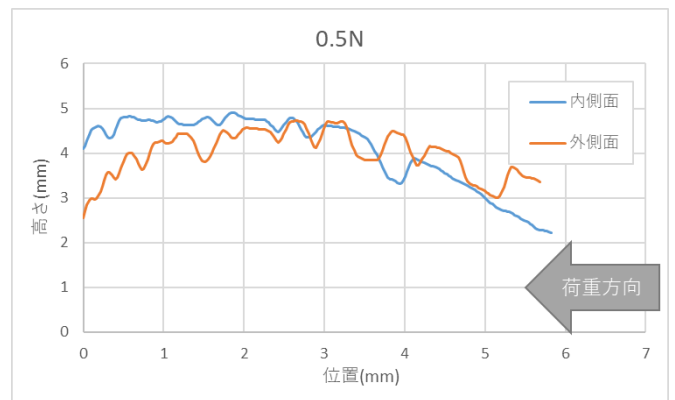


Fig. 6 Side shape of finger pad under 0.5N pressing force condition.

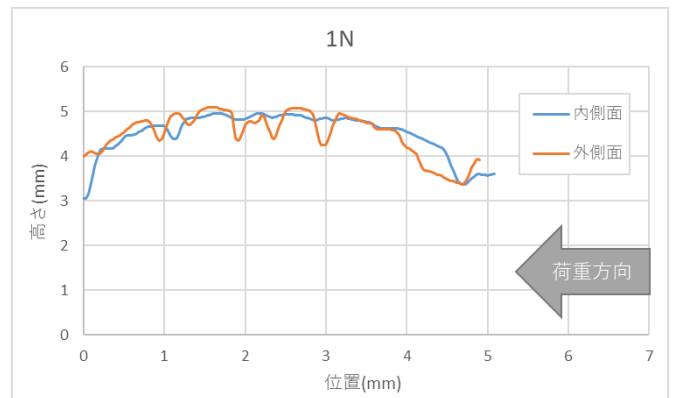


Fig. 7 Side shape of finger pad under 1N pressing force condition.

指が紙やすりに対して接面方向に力を加える条件における計測結果を Fig. 8 と Fig. 9 に示す。外側の皮膚は内側方向に力を与える場合と尺骨方向に力を与える時の歪みは大きい。内側の皮膚の形状は、力の方向、比較的に安定であることが分かった。皺の変化を比較すると、指が内側方向に力を生じて皮膚が外側にずれる場合、外側は大きい荷重をかけたときと類似して皺が深くなった。逆に指が外側方向に力を生じて皮膚が内側にずれる場合、内側の皮膚の凹凸は大きな変化がないことが観察された。

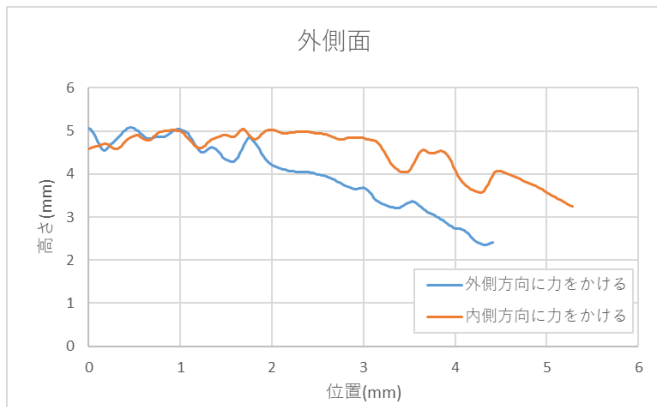


Fig. 8 The shape of the outer side of the finger pad when applying force in the radial-ularn direction.

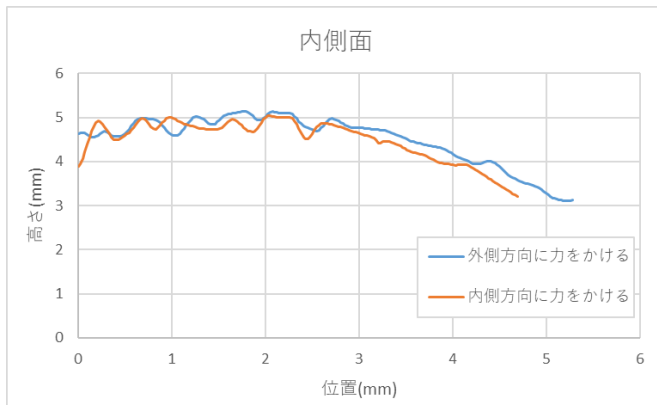


Fig. 9 The shape of the outer side of the finger pad when applying force in the radial-ularn direction.

### 3. 考察

指腹側面の計測結果によると、各条件下において外側の皮膚変形は内側より著しいことが分かった。荷重に対して、外側の皮膚は指紋の溝を折り目として、組織が折り重なるようにして表面が変形した。それに対して、内側の皮膚は表面の形をほぼ変えずに荷重に適応していた。これは皮膚自体の伸縮性が高いためと考えられる。

この現象から、指腹に荷重をかけるとき、皮膚の硬度は左右で同一ではなく、異なる弾性性質を持っていると推測される。内側周辺の皮膚は伸縮性に優れて、外側周辺より柔らかいと考えられる。

現時点では1名のみデータであるが、仮に今回見出した内側と外側の皮膚変形の非対称性が一般的であった場合に、どのようにスティックスリップに影響が生じるかを考察する。指が外側方向に力を加えたとき、外側の皮膚は伸縮性に欠けるため変形と傾き変化によって指腹の横ずれに対応する。したがって紙やすりとの接触領域は指腹の中央から外側周辺の硬い表面に移動しやすいと考えられる。Benoitらは、接線方向の滑りの開始時の指先接触のダイナミクスを調査し、指の局所的に硬い組織は、柔らかい部分よりも滑りやすいことを示した[7]。このことから、指が外側方向になぞるときにはより滑りやすく、探索中にスティックスリップ現象も生じにくくなると考えられる。逆に内側の皮膚の伸縮性の高さから、内側方向になぞるときには皮膚全体の横ずれは生じにくく、また荷重によって内側の柔らかい皮膚は粗い試料の表面の凹凸に噛み合うので、摩擦は大きくなり、スティックスリップが発生しやすくなると考えられる。従って、指腹両側の皮膚の

硬度の差異はスティックスリップ現象生起の左右の方向依存性に関連すると考えられる。

指腹両側の変形の様子が異なる原因として、人間の指が物を把持する、あるいは持ち上げるように進化したことが考えられる。物を把持する際、人差し指の場合は重力の影響で皮膚変形は内側が伸びて外側が縮む。このため、外側の皮膚は物の重力に対抗するために硬さを維持し、内側の皮膚は接触面積を維持して摩擦係数を高めるために柔らかくなったと想像できる。把持力に関する研究は多数行われているが[8][9][10]、把持時の摩擦現象とスティックスリップ生起の方向依存性の繋がりについては検討されておらず、今後調査すべきと考えられる。

今回はスティックスリップ現象の方向依存性について予備的に考察したが、接触領域の皮膚変形を直接計測していない。さらに全ての皮膚変形の3D画像は静止状態で撮ったものなので、実際になぞるときは若干異なると思える。今後は計測方式を修正して、動的状態で皮膚変形を直接計測することで、接触領域にも指腹両側と同じような変形パターンが出るかを確認するとともに、大人数での計測を通して今回の観察が一般化できるかどうかを確認する。

### 4. まとめ

本報告は、指が紙やすりを左右になぞる際にスティックスリップ現象生起の方向依存性があるという観察から、その原因の一つとして指皮膚の左右に変形の非対称性があるのではないかと考え、それを検証した。異なる荷重条件と接線方向の力の加わった状態において、指腹側面の変形状況を3D形状測定機で計測した。その結果、指皮膚の内側と外側では変形の様子が異なることを示した。この差異は皮膚の内側と外側で弾性が異なることを示唆しており、これがなぞる方向によってスティックスリップ現象が発生する様子に変化を生じる原因ではないかと考察した。

謝辞：本研究はJSPS科研費JP20H05957の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] TC. Pataky, ML. Latash and VM. Zatsiorsky. 2005 "Viscoelastic response of the finger pad to incremental tangential displacements.", *J. Biomech.* 38, 1441-1449. (doi:10.1016/j.jbiomech.2004.07.004).
- [2] D. Babu, M. Konyo, H. Nagano and S. Tadokoro, "Introducing Whole Finger Effects in Surface Haptics: An Extended Stick-Slip Model Incorporating Finger Stiffness," in *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 3, pp. 417-430, 1 July-Sept. 2018, doi: 10.1109/TOH.2018.2806458.
- [3] N. Nakazawa, R. Ikeura and H. Inooka, 2000, "Characteristics of human fingertips in the shearing direction.", *Biol. Cybern.* 82, 207-214. (doi:10.1007/s004220050020).
- [4] H.Chen, L. Shuai, L. Zhang and M. Miao, "A Finite Element Modeling Study on the Fingertip Deformation under Pressure Stimulation", 2016 7th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2016), MATEC Web of Conferences Volume 45, 2016.
- [5] S. Derler, J. Süess, A. Rao, G.-M. Rotaru, "Influence of variations in the pressure distribution on the friction of the finger pad", *Tribology International*, Volume 63, 2013, Pages 14-20, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.03.001>.
- [6] Keyence, "ワンショット 3D 形状測定機 VR-3000 シリーズ", [http://www.3s-dc.co.jp/wp/wp-content/uploads/2016/11/VR-3000\\_C\\_250071\\_JA\\_1096-1-1.pdf](http://www.3s-dc.co.jp/wp/wp-content/uploads/2016/11/VR-3000_C_250071_JA_1096-1-1.pdf). 2016年, P11.
- [7] D. Benoit, L. Philippe and T. Jean-Louis 2014, "Dynamics of fingertip contact during the onset of tangential slip", *J. R. Soc. Interface.* 1120140698 <http://doi.org/10.1098/rsif.2014.0698>.
- [8] S. Sato, S. Okamoto, Y. Matsuura et al. Wearable finger pad deformation sensor for tactile textures in frequency domain by using

accelerometer on finger side. *Robomech J* 4, 19 (2017).  
<https://doi.org/10.1186/s40648-017-0087-1>.

- [9] Y. Hiramatsu, D. Kimura, K. Kadota, T. Ito, H. Kinoshita (2015) Control of Precision Grip Force in Lifting and Holding of Low-Mass Objects. *PLoS ONE* 10(9): e0138506.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138506>.
- [10] N. Masataka, M. Konyo, T. Maeno and S. Tadokoro, "Reflective grasp force control of humans induced by distributed vibration stimuli on finger skin with ICPF actuators," *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, Orlando, FL, USA, 2006, pp. 3899-3904, doi: 10.1109/ROBOT.2006.1642299.