



# 爪からの加振による指腹部触覚センシング

Finger-pad tactile sensing using excitation from fingernail

梶本裕之<sup>1)</sup>

Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 大学院情報学専攻 (〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, kajimoto@kaji-lab.jp)

**概要:** 指先を用いる技能の記録や再現のために、ユーザの指に装着して指腹の触覚を計測する技術は重要である。一方でセンサ自体が指腹を覆うと本来の触覚が損なわれるという課題がある。これに対して爪色や爪の歪、指側面の変形を計測する方法が提案されているが、加えられた力の方向計測に留まっている。本研究では爪上に偏心型振動子と加速度・角速度センサを載せ、加振による指の振る舞いを計測することで指腹の接触位置等を推定する方法を提案する。

**キーワード:** アクティブセンシング、加振、指腹、触覚

## 1. はじめに

人が手先で行う器用な操作には触覚が関与している場合が多い。例えば我々は、視覚手がかりなしに鉛筆や爪楊枝を操ることが出来るが、プラスチック製の指キャップをはめて同じことを行うことは難しい。このとき我々は、指のどこで把持しているか、どのような向きで把持しているか、という情報を触覚によって得ながら操作していると考えられる。

こうした器用な操作に関わる触覚を記録し、遠隔に伝送できれば、記録側の人を遠隔側の人の代理人とすることで、触覚を利用した遠隔作業が可能になると考えられる。また器用な操作に関わる触覚を記録すること自体が、そうした操作を可能とするロボットの開発に有用な知見をもたらすとも考えられる。

操作中の人の触覚を記録するには、一般的に装着型の触覚センサが必要となる。これまで多くの装着型の触覚センサが開発されており、その多くはグローブの形態を取る[1][2][3]。しかしこうしたグローブ型の触覚センサは、それ自体が本来の触覚を妨害してしまうという課題がある。

一方でこれまで、指腹を覆わないウェアラブル触覚センサもいくつか提案されている。指の爪色変化を計測するもの[4][5][6]、爪の変形を計測するもの[7]、指側面の変形を計測するもの[8]がその代表例である。しかしこれらのセンサは、指に加わる力を、方向も含めて計測可能なものではあるが、指腹の接触位置や接触形状についての十分な情報を得られるものではなかった。

図 1 にウェアラブル型触覚センサの機能別分類を示す。文字 A が凸形状として与えられているとき、(a)は接触対象の形状が分かるものであり、分布型触覚センサがこれに

あたる。(b)は力の方向と大きさが分かるものであり、爪色を利用したセンサ等はこれにあたる。一方で、(c)は接触重心が分かるもの、(d)は外周エッジが分かるものであるが、従来のウェアラブル型の触覚センサはこの領域を狙ったものは少ない。前に挙げた例のように、鉛筆や爪楊枝を操るような場面では、こうした接触位置やエッジの向きの情報が必要と考えられる。

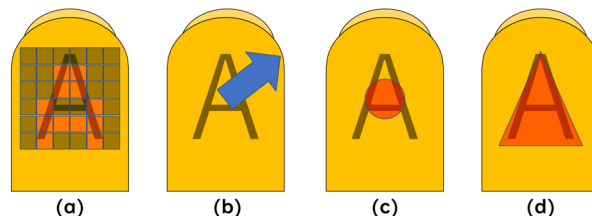


図 1: ウェアラブル触覚センサの機能分類。(a) 圧力分布が分かる、(b) 力の方向、大きさが分かる、(c) 接触重心が分かる、(d) 外周エッジが分かる

以上の考察に基づき、本研究では「指腹を覆うことなく」「接触重心や外周エッジを把握できる」「ウェアラブルの」触覚センサを提案する。本研究の提案手法を図 2 に示す。爪に偏心型の振動子と 6 自由度センサ (加速度および角速度センサ) を搭載する。振動子によって加振し、振動を近傍の 6 自由度センサで取得する。このとき指が対象物に接触すると、接触位置および形状によって、ある軸の振動が妨げられる。これを利用して、接触位置、形状を推定する。直動型振動子を用いることも考えられるが、偏心型の振動子によって二自由度の振動が提示されることで、接触位置、形状の推定がより容易になるのではないかと考えた。

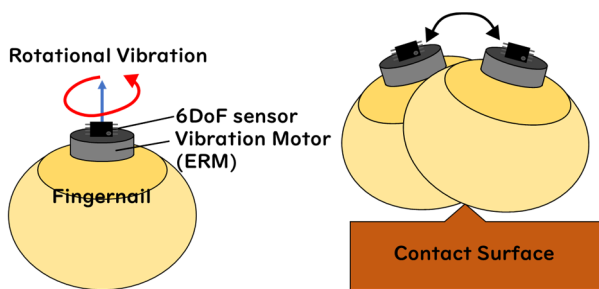


図 2：提案手法。爪に振動子と 6 自由度センサを搭載、振動子により加振し、接触による変化を捉える

## 2. 関連研究

振動入力と計測の組み合わせにより接触位置を検出する手法は、多くの HCI(Human-Computer Interaction)研究で提案されている。GripSense[9]はスマートフォンに内蔵された振動子と角速度センサの組み合わせでスマートフォンの把持姿勢を推定している。VibPress[10]は振動の減衰により押下力と、側面から押しているか否か等を推定している。

前腕を含めた身体の接触センシングを試みた例として、Mujibiya ら[11]は腕のバンドから超音波振動を出力、受信し、腕の接触位置を推定している。Funato ら[12]は腕に伝わる振動の計測により握力を推定している。FingerPing[13]では指にスピーカ、手首に複数のマイクをつけてジェスチャ認識を行っている。

同様の手法は環境を含めたセンシングにも利用できる。Touch Active[14]はピエゾスピーカとピエゾマイクを用い、伝達関数を測定することでインタラクションを推定している。VersaTouch[15]は机上の複数の振動子からの振動センシングにより指先位置を特定している。VibroScale[16]ではスマートフォンを振動させることで重量計として利用している。Ali ら[17]はスマートフォンの振動を用いたアクティブセンシングで、その下にあるものを当てる試みを行っている。Dementyev ら[18]は、振動のセンシングに個別のセンサを用いず、振動子の逆起電力を用いることで同様のアクティブセンシングが出来ることを示している。

以上のように、HCI 分野における振動によるアクティブセンシングは、主に把持状態や身体同士の接触位置、机上の物体とのインタラクションセンシング等に用いられており、指に装着する例は少ない。指に装着してウェアラブル化した例として、VibEye[19]では指に振動子と加速度センサを搭載し、把持の際の振動の伝わり方で把持物体の材質を同定しているが、指の接触位置等を推定するものではなかった。

ロボティクス分野では、ロボットフィンガとしての利用を念頭に、振動による接触位置のアクティブセンシングを行った事例がいくつか存在する。Backus ら[20]はロボットフィンガの接触位置を推定するために関節を振動させ、Phase-Lock-Loop 制御により共振周波数を決定、その周波数から接触位置を推定する手法を提案している。Mitra ら

[21]は振動入力と共振周波数の計測によって接触位置を特定する手法を提案している。

## 3. システム

図 3 に試作したデバイスおよび軸定義 (XYZ 軸) を示す。振動子としては円盤型振動子 (FM64G, 東京パーツ工業) を用い、センサとしては加速度及び角速度の 6 自由度センサ (MPU-6050, InvenSense) を用いている。センサと振動子は両面テープで接続され、振動子と爪は付け爪用の強力両面テープ(Kalolary)で接続されている。制御及び計測はマイクロプロセッサ(ESP32 DevkitC, Espressf Systems)によって行われる。センサとマイクロプロセッサの間は I2C 通信され、約 1.7kHz で XYZ 軸の加速度、XYZ 軸回りの角速度が取得される。

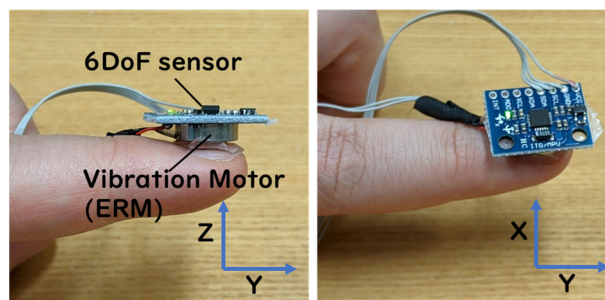


図 3：試作デバイスおよび軸定義

今回の報告の範囲では、振動子に加える電圧は PWM 制御された一定の値とし 100Hz 程度の振動を生じさせた。PC はマイクロプロセッサとシリアル通信し、Python 環境によりデータ取得、描画および計算が行われる。

## 4. 予備的検討

6 自由度のセンサ信号を取得し、そのうち 2 つの信号に関してリサージュ図形を描くことで予備的検討を行った。リサージュ図形は同じ周期の 2 つの信号間の位相差を明瞭に観察するためのツールとして用いた (周波数の変化に対してもロバストな図形が得られる)。センサ値の組み合わせとしては、X-Y 軸加速度、Y-Z 軸加速度、Z-X 軸加速度、X-Y 軸角速度、Y-Z 軸角速度、Z-X 軸角速度の 6 種類となる。ここではいくつかの代表的な例について紹介する。

図 4 に、X-Y 軸角速度によるリサージュ図形の変化を示す。(a)何も接触していない場合楕円形に近い形を描き、Y 軸周りの角速度のほうが X 軸回りの角速度より大きくなる。これは指本来の回転のし易さによると思われる。(b)指腹に物体 (ハサミの先) を接触させた場合、楕円は X 軸方向に縮む。(c)指末端に物体を接触させた場合、楕円は Y 軸方向に縮む。つまりこの楕円の変化によって、指の前後方向のどこに接しているかを推定できる可能性がある。(d)指で強く押し付けた場合、リサージュ図形は全体として小さくなる。これは振動がより吸収されるためと考えられ、接触面積または接触圧に関する情報も取得可能であることが示唆される。

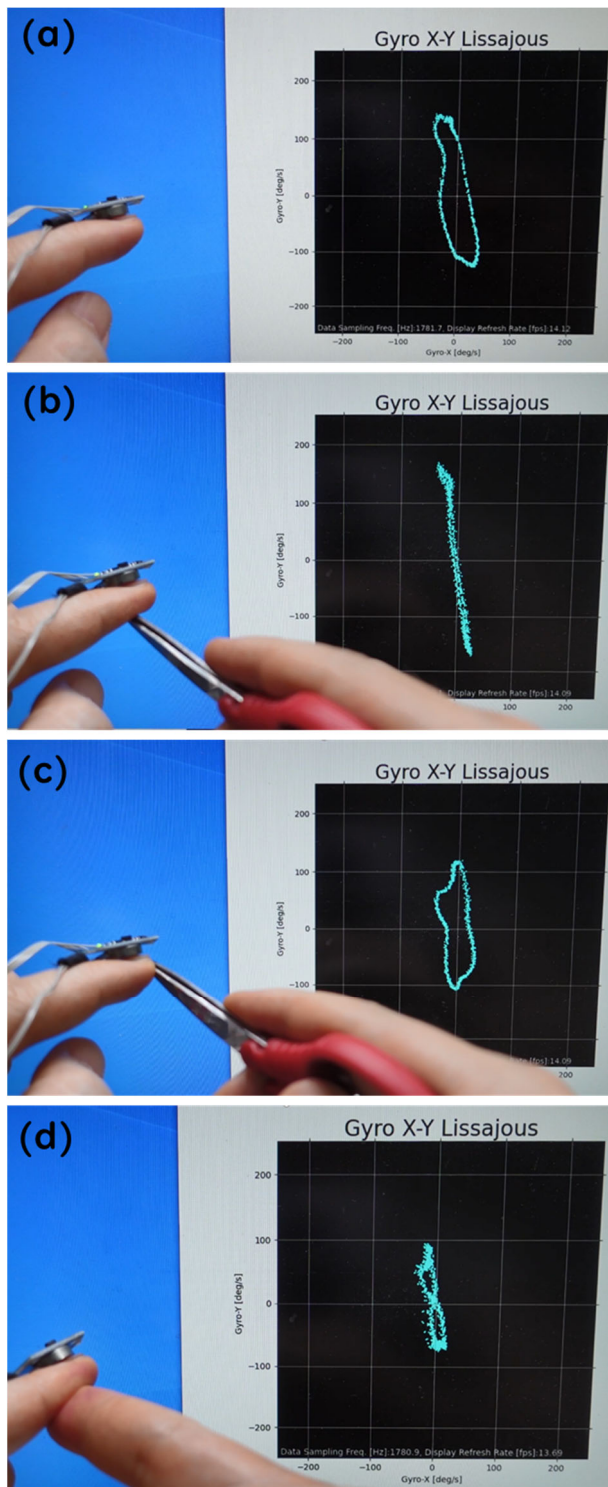


図 4 : X-Y 軸角速度によるリサージュ図形

図 5 に、Z-X 軸加速度によるリサージュ図形の変化を示す。(a)何も接触していない場合は楕円形に近い形を描き、X 軸の加速度のほうが Z 軸の加速度より大きくなる。これは偏心型振動子の本来の振動が XY 平面上であることから妥当と思われる。(b)(c)指腹の側面に物体を接触させた場合、接触位置の左右に応じて楕円の傾きが変化している。つまりこの楕円の変化によって、指の左右方向のどこに接しているかを推定できる可能性がある。

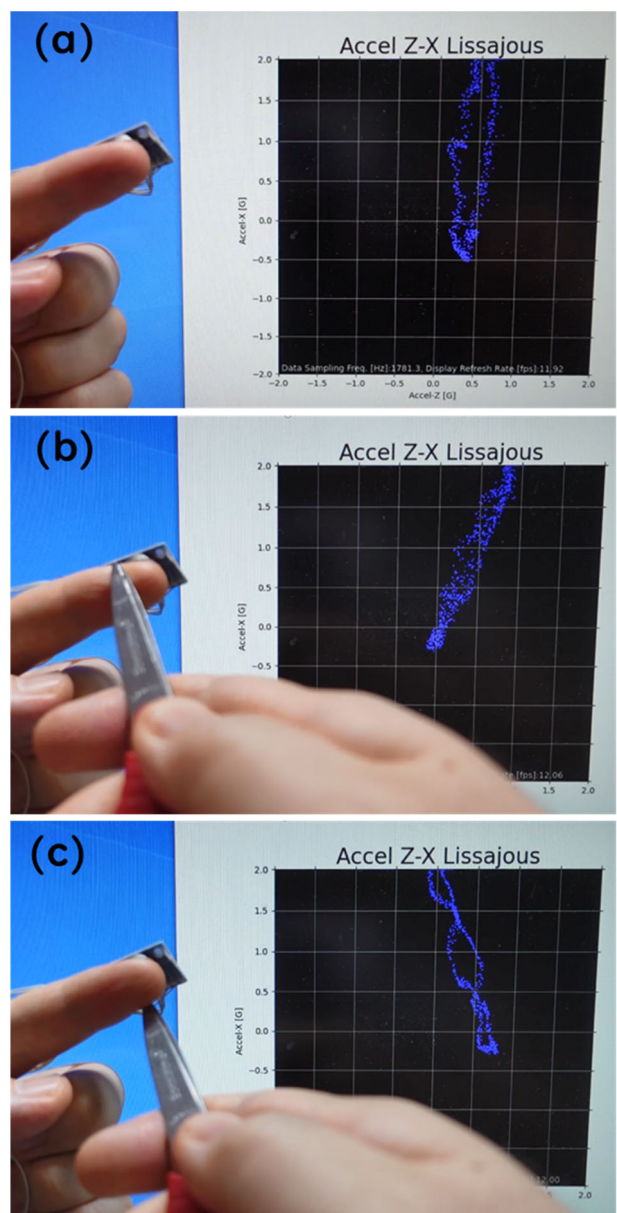


図 5 : Z-X 軸加速度によるリサージュ図形

## 5. おわりに

本研究は、指腹を覆うことなく、接触重心や外周エッジを把握できる、ウェアラブルの触覚センサを構築することを目指した。爪上に偏心型振動子と加速度・角速度センサを載せ、加振による指の振る舞いを計測することで指腹の接触位置等を推定する方法を提案した。

提案手法の予備的検討において 2 軸データに対するリサージュ図形を描画したところ、接触位置および接触の強さを検出可能であることが示唆された。今後は接触位置、接触形状等を算出するアルゴリズムの検討、今回用いた偏心型振動子の直動型振動子との比較、および実際の使用時にユーザがなるべく振動を知覚しないための制御方法等を検討していく。

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] Wang, Z., Holledampf, J., Buss, M., “Design and Performance of a Haptic Data Acquisition Glove,” Proceedings of Int. Workshop on Presence, 349-357, 2007.
- [2] 鷺坂, 大村, 長久保, 国吉, 尾崎, “皮膚の変形に追従する高密度触覚センサグローブ,” 日本ロボット学会論文誌, 30(7), 711-717, 2012.
- [3] Yem, V., Kajimoto, H., Sato, K., Yoshihara, H., “A System of Tactile Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation,” Int. Conf. Human-Computer Interaction, pp.101-113, 2019.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-22649-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22649-7_9)
- [4] Mascaro, S. A., Asada, H., “Photoplethysmograph fingernail sensors for measuring finger forces without haptic obstruction,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, 17(5):698-708, 2001.
- [5] Abu-Khalaf J. M., Mascaro, S. A., “Optimization of stretchable fingernail sensor fabrication based on finite element modeling,” IEEE Sensors Applications Sympo., pp.1-6, 2018. <https://doi.org/10.1109/SAS.2018.8336754>
- [6] Ando, H., Miki T., Inami, M., Maeda T., “SmartFinger: Nail-Mounted Tactile Display,” ACM SIGGRAPH conference abstracts & applications, 2002.  
<https://doi.org/10.1145/1242073.1242113>
- [7] Sakuma, K., Abrami, A., Blumrosen, G., Lukashov, S., Narayanan, R., Ligan, J. W., Caggiano, V., Heisig, S. J., “Wearable Nail Deformation Sensing for Behavioral and Biomechanical Monitoring and Human-Computer Interaction,” Sci Rep 8, 18031, 2018.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36834-x>
- [8] Nakatani, M., Kawasoe, T., Shiojima, K., Koketsu, K., Kinoshita S., Wada, J., “Wearable Contact Force Sensor System Based on Fingerpad Deformation,” IEEE World Haptics Conf., pp. 323-328, 2011.  
<https://doi.org/10.1109/WHC.2011.5945506>
- [9] Goel, M., Wobbrock, J. Patel., S., “GripSense: Using Built-in Sensors to Detect Hand Posture and Pressure on Commodity Mobile Phones,” 25th Annual ACM Sympo. User Interface Software and Technology, pp.545-554, 2012.  
<https://doi.org/10.1145/2380116.238018>
- [10] Hwang, S., Bianchi, A., Wohn, K., “VibPress: Estimating Pressure Input Using Vibration Absorption on Mobile Devices,” 15th Int. Conf. Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, pp. 31–34, 2013.  
<https://doi.org/10.1145/2493190.2493193>
- [11] Mujibiya, A., Cao, X., Tan, D. S., Morris, D., Patel S. N., Rekimoto, J. “The Sound of Touch: On-body Touch and Gesture Sensing Based on Transdermal Ultrasound Propagation,” ACM Int. Conf. Interactive Tabletops and Surfaces, pp.189-198, 2013.  
<https://doi.org/10.1145/2512349.2512821>
- [12] Funato, N., Takemura. K., “Grip Force Estimation by Emitting Vibration,” 30th Annual ACM Sympo. User Interface Software and Technology, pp.141–142, 2017.  
<https://doi.org/10.1145/3131785.3131829>
- [13] Zhang, C., Xue, Q., Waghmare, A., Meng, R., Jain, S., Han, Y., Li, X., Cunefare, K., Ploetz, T., Starner, T., Inan, O., Abowd, G. D., “FingerPing: Recognizing Fine-grained Hand Poses Using Active Acoustic On-body Sensing,” Conf. Human Factors in Computing Systems, No.: 437, 10pages, 2018. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174011>
- [14] Ono, M., Shizuki, B., Tanaka, J., “Touch Activate: Adding Interactivity to Existing Objects Using Active Acoustic Sensing,” 26th Annual ACM Sympo. User Interface Software and Technology, pp.31-40, 2013.  
<https://doi.org/10.1145/2501988.2501989>
- [15] Shi, Y., Zhang, H., Cao, J., Nanayakkara, S., “VersaTouch: A Versatile Plug-and-Play System that Enables Touch Interactions on Everyday Passive Surfaces,” Augmented Humans Int. Conf. No. 26, 12pages, 2020.  
<https://doi.org/10.1145/3384657.3384778>
- [16] Zhang, S., Xu, Q., Sen, S., Alshurafa, N., “VibroScale: turning your smartphone into a weighing scale,” ACM Int. Joint Conf. Pervasive and Ubiquitous Computing and Int. Sympo. Wearable Computers, pp.176–179, 2020.  
<https://doi.org/10.1145/3410530.3414397>
- [17] Ali, K., Liu, A. X., “Fine-grained Vibration Based Sensing Using a Smartphone,” IEEE Trans. Mobile Computing, online, 2021.  
<https://doi.org/2021.10.1109/TMC.2021.3067679>
- [18] Dementyev, A., Olwal, A., Lyon R. F., “Haptics with Input: Back-EMF in Linear Resonant Actuators to Enable Touch, Pressure and Environmental Awareness,” 33rd Annual ACM Sympo. User Interface Software and Technology, pp. 420–429, 2020. <https://doi.org/10.1145/3379337.3415823>
- [19] Oh, S., Yun, G., Park, C., Kim, J. Choi, S., “VibEye: Vibration-Mediated Object Recognition for Tangible Interactive Applications,” Conf. Human Factors in Computing Systems, No. 676, 12pages, 2019.  
<https://doi.org/10.1145/3290605.3300906>
- [20] Backus S. B., Dollar, A. M. “Robust Resonant Frequency-Based Contact Detection with Applications in Robotic Reaching and Grasping,” IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 19(5):1552-1561, 2014.  
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2287761>
- [21] Mitra, R., Boyd, K., Subedi, D., Chitrakar, D., Aldrich, E., Swamy, A., Huang, K., “Contact Sensing via Active Oscillatory Actuation,” 3rd Int. Conf. Mechatronics, Robotics and Automation, pp. 99-104, 2020.  
<https://doi.org/10.1109/ICMRA51221.2020.939836>