



指腹における吸引圧力の時空間分布制御に基づく 多指装着型触覚ディスプレイ —吸引圧分布による面状圧覚生起条件の調査—

永野光¹⁾, 斎藤薫¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 佐瀬一弥²⁾, 田所諭¹⁾

1) 東北大学大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, nagano@rm.is.tohoku.ac.jp)

2) 東北学院大学工学部 (〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1 丁目 13-1, sase@mail.tohoku-gakuin.ac.jp)

概要: これまでに、多指装着型の吸引触覚ディスプレイを提案し、指先皮膚への分布的な吸引圧刺激によって硬軟感や多方向の力覚が生起することを実験的に示してきた。本稿では、空間的に高解像度な面状圧覚を提示する装着型吸引触覚ディスプレイを実現するため、吸引口群の口径および口間距離が生起する面状圧覚に及ぼす影響を調査した。実験の結果、吸引口間距離が大きくなるにつれて、二点吸引刺激を面状圧覚と知覚し難くなる傾向が示された。また、吸引口径が小さいほど面状圧覚を生起し易い傾向が示されたものの、知覚強度は低下するとの報告も得られた。刺激強度とのトレードオフの関係については今後の議論が必要である。実験に用いた設計要素の範囲では、口径および口間距離をそれぞれ 1.7 mm および 1.1 mm とすることで空間的に高解像度な面状圧覚提示が可能となること示された。

キーワード: 吸引圧, 多指, 分布刺激, 圧覚, 触覚ディスプレイ

1. 緒言

ヒトは、多指を用いて巧みな物体ハンドリングを実現すると同時に、把持対象物に加わる力(大きさや方向)および材質感(硬軟感や摩擦感)を多指を介して知覚している。このような多様な感覚情報の一部もしくはすべてが運動生成・計画に寄与することは想像に難くない。つまり、遠隔環境や仮想環境における高精細な物体操作の実現には、多様な感覚を多指に提示可能な触覚ディスプレイおよび提示手法の構築が大きく寄与すると推測できる。

これまでに、指先への力覚提示に関して、皮膚変形などの皮膚感覚刺激によって疑似的な力覚を提示する指先装着型の触覚ディスプレイが数多く報告されている [1, 2, 3]。大きさや方向を含む力覚の提示において、深部感覚刺激だけでなく皮膚感覚刺激も寄与する点に着目している。また、多様な材質感のひとつである硬軟感の提示に関して、指腹と対象物との接触面積および接触面内の圧力分布の関係が重要な役割を示し [4, 5, 6]、装着型の触覚ディスプレイによって硬軟感を提示した研究例もある [7]。しかし、多自由度の力の大きさと方向、硬軟感などの材質感の複合的な提示を実現する触覚ディスプレイは構築されていない。

そこで、著者らはこれまでに、吸引圧刺激 [8, 9] を用いて、指腹を分布的に刺激する装着型の触覚ディスプレイを開発し、多自由度の力および硬軟感の複合的な提示が可能であることを実験的に示した [10, 11] (図 1.)。

装着型吸引触覚ディスプレイの重要な設計要素として、指

Hikaru NAGANO, Kaoru SAITOH, Masashi KONYO, Kazuya SASE, and Satoshi TADOKORO

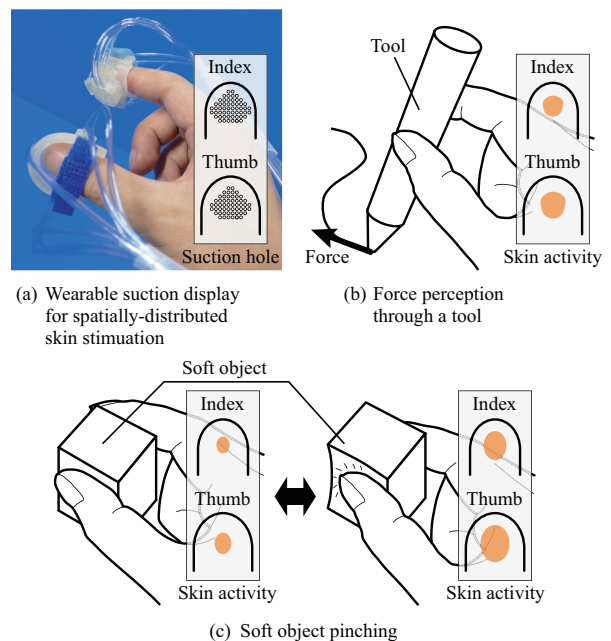


図 1: 装着型吸引触覚ディスプレイによる多方向の力と硬軟感の複合提示

腹に接する吸引口群の口径および口間距離がある。吸引口間距離を十分小さくし、空間的に高解像度な口群を設計することで、圧点群ではなく面状の圧覚が生起すると期待できる。また、この関係が吸引口径に影響される可能性も存在する。本稿では、指腹に接する吸引口群の口径および口間距離が生起する面状圧覚に及ぼす影響を調査することで、装着型吸引触覚ディスプレイの設計要素を最適化する。

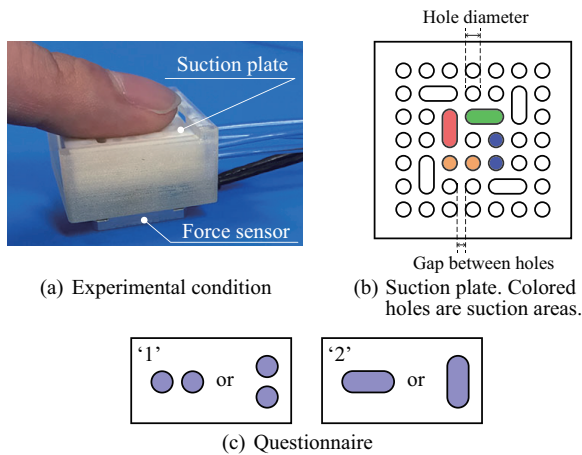


図 2: 実験環境

2. 装着型吸引圧触覚ディスプレイ

Fig.1 に、これまでに著者らが開発した吸引圧触覚ディスプレイ [10, 11] を示す。これらの先行研究での吸引口径および吸引口間距離はそれぞれ 1.7 mm および 1.1 mm であった。指腹に接触する部分はシリコンゴムによって作成することで指腹と吸引口群の間での空気漏れを回避する。

この触覚ディスプレイは、指先皮膚への吸引圧刺激を皮膚押し込み方向の圧覚と錯覚する現象 [8] を利用している。この錯覚現象では、一定口径以下の穴から指先皮膚を吸引した場合、ヒトは棒状の物体で押し込まれる圧覚を得る。この現象の原理は、皮膚内に存在する機械受容器のうち、静的変形に鋭敏に反応するメルケル小体の変形方向によらず大きさのみを検出するという特性に起因すると考えられている。

分布的な吸引圧刺激によって接触面積の違いを表現した研究例として、Arai らの触覚ディスプレイがある [12]。このディスプレイでは、リニアアクチュエータを併用することで指腹のせん断変形を模擬している。著者らのディスプレイでは、実際のせん断変形は提示せず、分布的な吸引圧刺激を用いてせん断変形に起因する空間的な偏りを模擬することで疑似的なせん断方向の力の提示を実現している [10]。

3. 手法：吸引口径および口間距離が面状圧覚に及ぼす影響の調査

3.1 実験環境

実験時の指先の様子を図 2.(a) に示す。複数の吸引口を有する吸引装置が指腹に接する。押し付け力による感覚閾値の変化を避けるため、吸引装置の下に力覚センサを配置する。吸引装置に結合されたシリコンチューブはレギュレータに接続され、レギュレータへの指令電圧を制御することで吸引口からの圧力を制御する。

3.1.1 吸引装置

吸引装置の概要上面図を図 2.(b) に示す。吸引装置は、図 2.(b) 中で色付けされた四箇所の吸引部と、多数の凹円柱形状の非吸引部で構成される。四箇所の吸引部は、二個

表 1: 実験に用いた吸引口径および口間距離の組み合わせ

(Hole diameter, Gap between holes) [mm]
(1.5, 1.1), (1.5, 1.7), (1.5, 2.3),
(1.7, 1.1), (1.7, 1.7), (1.7, 2.3),
(1.9, 1.1), (1.9, 1.7), (1.9, 2.3),

の円形吸引口が内部で空気室を共有するもの（縦・横配置各一箇所）と、円形吸引口が平行線で結合された角丸長方形の吸引口を有するもの（縦・横配置各一箇所）である。円形吸引口の口間距離が十分小さい場合、角丸長方形と二個の円形の知覚が等しくなり、口間距離が大きい場合、2 種の知覚に差異が生じ易いと推測する。また、これらの関係は口径の影響も受けることが考えられる。参加者が指を吸引装置の上に置く際に形状を判断することを避けるため、吸引部配置の組み合わせは 2 種用意した。実験に用いた吸引口径および口間距離の組み合わせを表 1 に示す。

3.2 参加者

実験参加者は著者らの研究室の男子学生 3 名である。全ての参加者は、傷や火傷などを指に有しておらず、また、実験の目的を知らされていない。

3.3 手順

はじめに、吸引装置の上に指を置き力覚センサの値が 1–3 N に入るように調整する。その後、四箇所の吸引口のいずれかから刺激が提示される。吸引圧刺激としてステップ状の刺激を用いる。一定圧の刺激 (1 s) が提示された後、大気圧に開放 (1 s) するという 2 s の刺激が、参加者が回答するまで、繰り返される。回答項目は、図 2.(c) に示すように、知覚した形状が角丸長方形と二個の円形のうちのいずれであったのかという項目である。これを一試行とし、四箇所の吸引部ごとに三試行実施する。12 試行が終了した後、吸引口径や口間距離の異なる吸引装置に取り換える。12 試行の吸引刺激および吸引装置の提示順はランダムである。Table 1 の組み合わせごとに 2 種の吸引装置を実験に用いたため、組み合わせごとに 24 試行を実施する。

4. 結果

正答率を Fig. 4. に示す。本稿では、実験参加者数が 3 名と少ないため、平均の正答率に併せて参加者ごとの正答率を示す。

吸引口間距離に関して、口間距離が大きくなるにつれて、正答率が高くなる傾向が示された。これは、口間距離が 2.3 mm のように大きい場合、二点での吸引刺激を面状の圧覚と区別し易いということを表している。口間距離に関する三条件の中では、吸引口間距離が 1.1 mm の条件で、高い空間解像度の面状圧覚提示が実現できている。

吸引口径に関して、口径が小さいほど、正答率は低い傾向があり、二点吸引刺激を面状の圧覚と知覚しやすいこと

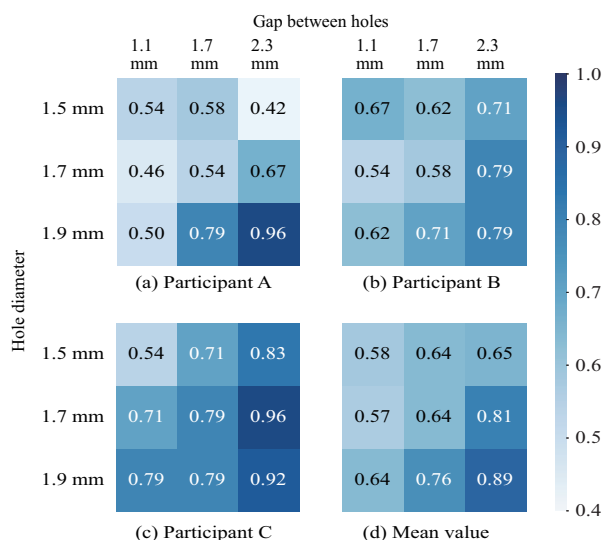


図 3: 二点吸引刺激と面状吸引刺激の弁別課題における正答率

が示された。しかし、口径が 1.5 mm の条件では、多くの参加者より、刺激強度が小さいという報告を得ている。強度の大きな力覚提示を実現するためには、吸引口径を大きくする必要がありと考える。提示可能な知覚力の範囲もディスプレイを設計する上での重要な要素の一つであるが、この点に関する詳細な議論には、知覚力の測定が必要である。

5. 結言

空間的に高解像度な面状圧覚を提示する装着型吸引触覚ディスプレイを実現するため、吸引口群の口径および口間距離が面状圧覚に及ぼす影響を調査した。吸引口間距離が大きくなるにつれて、二点の吸引刺激を面状吸引刺激と弁別する確率が高くなり、二点吸引刺激を面状圧覚と知覚し難いという傾向が示された。また、吸引口径が小さいほど面状刺激と二点吸引圧刺激を区別しにくい傾向があったものの、知覚強度とのトレードオフが示唆され、知覚力の測定を交えた今後の議論が必要である。本稿での実験に用いた設計要素の範囲では、口径および口間距離をそれぞれ 1.7 mm および 1.1 mm とすることで空間的に高解像度な面状の圧覚を提示可能となることが示された。

謝辞

本研究の一部は ImPACT プログラム「タフ・ロボティクス・チャレンジ」および JSPS 科研費 JP18H01401, JP18K13722 の助成を受けた。

参考文献

[1] K. Minamizawa, H. Kajimoto, N. Kawakami, and S. Tachi, "Wearable haptic display to present gravity sensation," *The Proceedings of the Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 133–138, 2007.

[2] D. Prattichizzo, F. Chinello, C. Pacchierotti, and M. Malvezzi, "Towards wearability in fingertip haptics: a 3-dof wearable device for cutaneous force feedback," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 4, pp. 506–516, 2013.

[3] F. Chinello, M. Malvezzi, C. Pacchierotti, and D. Prattichizzo, "Design and development of a 3rrs wearable fingertip cutaneous device," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE, 2015, pp. 293–298.

[4] T. Kitazawa, F. Kimura, and A. Yamamoto, "Multi-digit softness: development of a tactile display to render softness feeling on multiple fingers," in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2014, pp. 215–222.

[5] K. Fujita and H. Ohmori, "A new softness display interface by dynamic fingertip contact area control," in *5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 2001, pp. 78–82.

[6] M. Bianchi and A. Serio, "Design and characterization of a fabric-based softness display," *IEEE transactions on haptics*, vol. 8, no. 2, pp. 152–163, 2015.

[7] M. Bianchi, E. Battaglia, M. Poggiani, S. Ciotti, and A. Bicchi, "A wearable fabric-based display for haptic multi-cue delivery," in *Haptics Symposium (HAPTICS), 2016 IEEE*. IEEE, 2016, pp. 277–283.

[8] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda, "A cutaneous feeling display using suction pressure," in *SICE 2003 Annual Conference*, vol. 3. IEEE, 2003, pp. 2931–2934.

[9] L. B. Porquis, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Enhancement of human force perception by multi-point tactile stimulation," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 3488–3493.

[10] 永野光, 昆陽雅司, and 田所諭, "指腹における吸引圧力の空間分布制御に基づく多指装着型触覚ディスプレイ-多自由度の方向知覚の検証-, " in 第 22 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2017, pp. 1D4–05.

[11] —, "指腹における吸引圧力の時空間分布制御に基づく多指装着型触覚ディスプレイ-吸引面積および圧力の制御による硬軟感提示手法-, " in 第 18 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, 2017, pp. 1B1–14.

[12] F. Arai, H. Morita, G. Kwon, T. Fukuda, and H. Matsuuru, "Tactile display which presents shear deformation on human finger," in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2001, pp. 2486–2491.