



# 指腹部高解像度吸引触覚ディスプレイによる把持感覚の再現 —第 3 報 吸引刺激の知覚とひずみエネルギー分布の関係の調査—

Reproduction of Grasping Sensation by High-resolution Suction Tactile Display for Finger Pads  
-3rd report: Investigation of The Relationship between Perceived Suction Stimuli and Strain Energy  
Distribution-

森田夏実<sup>1)</sup>, 昆陽雅司<sup>1)</sup>, 永野光<sup>2)</sup>, 佐瀬一弥<sup>3)</sup>, 田所諭<sup>1)</sup>

Natsumi MORITA, Masashi KONYO, Hikaru NAGANO, Kazuya SASE and Satoshi TADOKORO

- 1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 6-6-1)
- 2) 神戸大学 工学研究科 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)
- 3) 東北学院大学 工学部 (〒 985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1)

**概要:** 本論文では、高解像度吸引触覚ディスプレイにおいて、実時間シミュレーションにより求められる指腹と物体が接触した際の指腹のひずみエネルギー分布から、ディスプレイで提示する吸引圧を決定する方法の指針を得ることを目的とする。吸引圧の知覚及び 2 点弁別閾を実験により調べ、また、実験と同条件で有限要素解析を行い、結果を比較をすることで、人の知覚と指腹内部のひずみエネルギー分布の関係を調べた。

**キーワード:** 触覚, 吸引刺激, 有限要素解析

## 1. 緒言

ヒトは物体の変形や外力の向き、大きさなどに対応して器用に物体を把持することができる。ヒトの把持感覚を再現するには接触面の皮膚を高密度に刺激し、分布的な触覚情報を与える必要があり、特に、接触面の微小な変形を検知するメルケル細胞を刺激することが求められる。

指先に分布的な触覚を提示する従来手法として、ピンアレイを用いたものがある [1]。また、電気刺激を用いて触覚を提示するもの [2] や、超音波を使用したものも開発されている [3]。しかしながら、指先のような小さな場所に高密度に刺激を提示することは難しく、また高密度に刺激を提示しようとする装置の大型化・重量化を招いてしまう。そこで我々は、メルケル細胞を高密度に刺激する手法として吸引刺激を提案してきた。吸引刺激は流路を伸ばすことで装着部を小型軽量にすることが可能である。また、密着して刺激を提示することができ、隣り合う刺激同士の干渉も少ないという利点がある。

吸引刺激を用いた触覚ディスプレイの先行研究として、Porquis らは複数の吸引口が配置されたペン型のデバイスを開発し、吸引刺激を与える場所を変更させることによって、把持された物体にかかる外力の方向を知覚させることができるということを示した [4]。また、Maemori らは 4 つの吸引グループによる刺激を組み合わせることで 3 軸の並進力を表した [5]。永野らは 1 指 16ch のウェアラブル吸引ディスプレイを開発し、分布的な刺激を与えることで柔らかさ

や力の方向を提示することを試みた [6]。

我々は永野らが開発した 16ch 吸引ディスプレイを 32ch に高解像度化した [7]。32ch 吸引触覚ディスプレイは剛体指と弾性体の接触をリアルタイムでシミュレーションし、得られた指腹部の圧力分布に基づいて吸引圧を提示している。

シミュレーションで得られた力学量から吸引刺激を決定する際、メルケル細胞の発火には相関があると言われていたひずみエネルギーを参考にすることが望ましい。本稿では、人の知覚と指腹内部のひずみエネルギー分布の関係を調べることが目的とする。2 点弁別実験及び、吸引圧閾値実験の結果と、これらの実験と同条件で有限要素シミュレーションを行った結果を比較することでひずみエネルギーとその知覚の関係を求めることを試みる。

## 2. 2 点弁別実験

### 2.1 実験方法

2 点の吸引口から刺激を与え、2 点弁別閾を測定した。図 1 の様な吸引装置を用いて実験を行った。また、吸引口の配置は図 2 のようである。装置の上面中央に 2 点の吸引口が空いており、吸引口径は現在の吸引ディスプレイの吸引口径として採用している 1.6 mm である。この値は、刺激の強度を損なわずに吸引圧を圧覚と錯覚するような値 [8] である。

被験者は吸引装置の上に指を置き、提示された吸引刺激が 1 点に感じるか 2 点に感じるかを回答した。被験者の判断基準を揃えるため、知覚された刺激領域が確実に 2 つに

分かれたと感じた場合のみ 2 点と回答させた。押し込み力により閾値が変化することを防ぐため、吸引装置の下に秤を置き、モニターに表示される荷重が 100 g になるよう指示をした。吸引圧は  $-1, -10, -20, -30, -40, -50$  [kPa] であり、上下法に基づいて吸引圧を変化させた。吸引口間距離は 2.4, 2.8, 3.2 [mm] の 3 種類で行った。刺激はランプ波形で 0.5 s かけて圧力が減少した後、2 s 秒間目標圧力を維持し、その後開放する。指腹部の保湿度を統一させるため、実験前にはハンドクリームを塗布させた。被験者は 20 代～40 代、男性 5 人、女性 1 人の計 6 人であった。



図 1: 吸引装置の外観

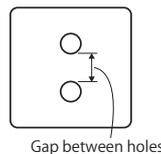


図 2: 吸引口の配置

## 2.2 実験結果

結果を図 3 に示す。吸引口間距離 2.4, 2.8, 3.2 [mm] での全被験者の 2 点弁別閾の平均は  $-31.5 \pm 4.9, -28.8 \pm 5.1, -22.6 \pm 5.4$  [kPa] となった。吸引口間距離が大きくなるほど閾値が下がる傾向が見られた。

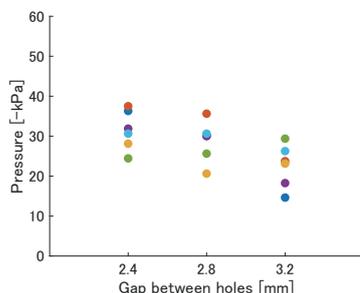


図 3: 実験結果：2 点弁別閾

## 3. 閾値実験

### 3.1 実験方法

ヒトが知覚する最小の吸引圧を調べた。2 点の吸引口から皮膚を吸引し、刺激を感じたか否かを回答させることで閾値を求めた。押し込み力により閾値が変化することを防ぐため、吸引装置の下に秤を置き、モニターに表示される荷重が 100 g になるよう指示をした。吸引圧は  $-1, -3, -5, -7, -9, -11, -13$  [kPa] の 7 種類であり、上下法に基づいて吸引圧を変化させた。吸引口間距離は、その影響を調べるため 0.4, 2.8 [mm] の 2 種類で行った。刺激はランプ波形で 0.5 s かけて圧力が減少した後、2 s 秒間目標圧力を維持し、その後開放する。指腹部の保湿度を統一させるため、実験前にはハンドクリームを塗布させた。被験者は 20 代～40 代、男性 5 人、女性 1 人の計 6 人であった。

### 3.2 実験結果

結果を図 4 に示す。吸引口間距離 0.4, 2.8 [mm] での全被験者の閾値の平均はそれぞれ  $6.5 \pm 2.9, 6.6 \pm 2.9$  [kPa] となった。吸引口間距離による閾値には大きな差は見られなかった。

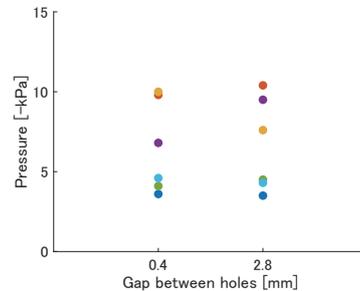


図 4: 実験結果：吸引圧の閾値

## 4. 有限要素シミュレーション

2. 章, 3. 章で行った実験と同条件で有限要素シミュレーションを行い、指腹内部のメルケル部ひずみエネルギーを計算した。シミュレーションには汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc を用いた。指腹の構造は角層が 10  $\mu\text{m}$ 、表皮が 0.7 mm、真皮が 1.8 mm、皮下組織が 4.8 mm とした。Moony-Rivlin モデルを適用し、材料特性は角層が  $C_{10} = 0.3322$ 、表皮が  $C_{10} = 0.0227, C_{11} = 0.082$ 、真皮が  $C_{10} = 0.011, C_{11} = 0.082$ 、皮下組織が  $C_{10} = 0.00567$  とし、ポアソン比は 0.4999、密度は  $1.1 \times 10^{-9}$  g/m<sup>3</sup> とした。0.2 s かけて 0.85 mm 押し込んだのち、0.82 s かけて吸引圧を  $-50$  kPa まで変化させた。0.22 s 後の押し込み力は約 1.0 N であった。

### 4.1 結果

シミュレーションにより得られたひずみエネルギー分布を図に示す。また、メルケル細胞位置（表面から 7mm）でのひずみエネルギー分布を図 6 に示す。

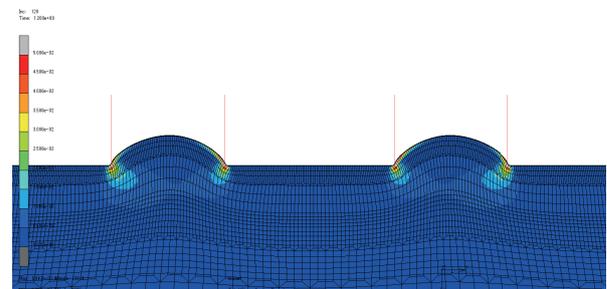


図 5: 有限要素シミュレーションの結果

### 4.2 考察

実験では、吸引装置に指を押し込んだ後に吸引刺激が与えられた。そこで、吸引刺激が与えられたときのひずみエネルギーが、押し込み終了時のひずみエネルギーからどれだけ

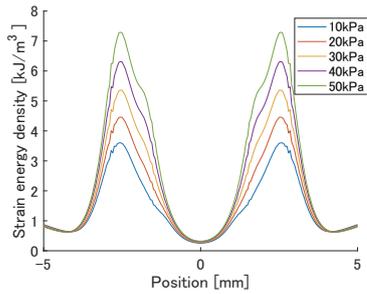
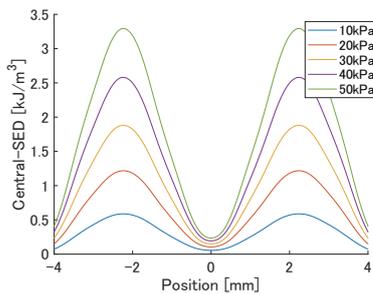


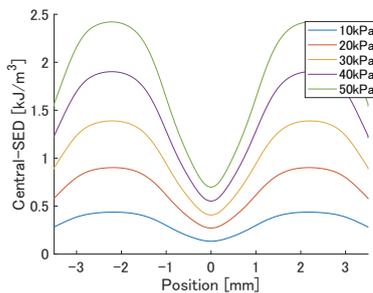
図 6: 吸引口間距離 2.8mm のときの SED 分布

変化したかに着目し、各ひずみエネルギーの値から押し込み終了時のひずみエネルギーを引いた値で考察を進める。

本研究では、ヒトはひずみエネルギーを、単独の点ではなく、ある範囲で統合して知覚をしていると仮定し、統合されたひずみエネルギーをひずみエネルギー代表値と呼ぶ。ここでは、ある点のひずみエネルギー代表値は、その点の左右  $r$  mm の範囲に含まれる節点のひずみエネルギーを平均した値とする。例として、吸引口間距離が 2.8 mm の場合において、 $r = 0.5, 1, 1.5$  mm のときのひずみエネルギー代表値の分布を図 7 に示す。



(a)  $r = 1$  mm



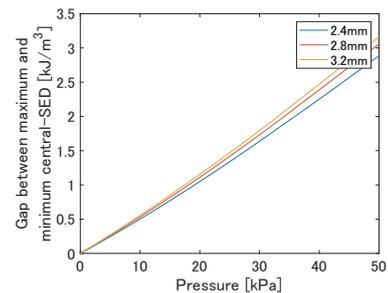
(b)  $r = 1.5$  mm

図 7: ひずみエネルギー代表値の分布例 (吸引口間距離: 2.8 mm)

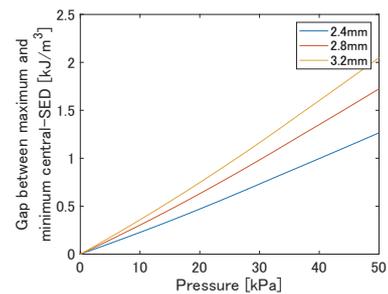
#### 4.2.1 2点弁別閾のひずみエネルギー代表値

ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差がある値を超えたとき、2点弁別ができると仮定する。吸引口間距離が 2.4, 2.8, 3.2 mm のときの、吸引圧とひずみエネルギー代表値

の最大値と最小値の差の関係を、統合範囲が  $r = 1, 1.5$  のときについてそれぞれ図 8b に示す。被験者実験より、吸引口間距離が 2.4 mm, 3.2 mm のときの 2 点弁別閾はそれぞれ  $-31.5, -22.6$  [kPa] である。図 9 のように、 $r = 1.4$  とし、吸引口間距離が 2.4 mm, 吸引圧が  $-31.5$  kPa のとき、ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差は  $0.96$   $\text{kJ/m}^3$  であり、吸引口間距離が 3.2 mm, 吸引圧が  $-22.6$  kPa のとき、ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差は  $0.94$   $\text{kJ/m}^3$  であることから、ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差が約  $0.95$   $\text{kJ/m}^3$  を超えたときに 2 点弁別閾ができると設定できる。



(a)  $r = 1$  mm



(b)  $r = 1.5$  mm

図 8: 吸引圧とひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差の関係

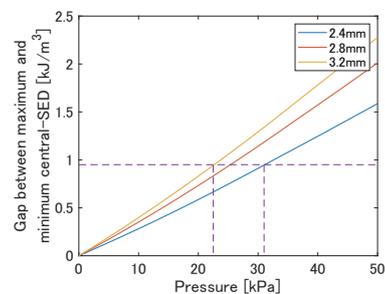


図 9:  $r = 1.4$  mm のときの吸引圧とひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差の関係

#### 4.2.2 知覚閾値のひずみエネルギー代表値

実験結果より吸引口間距離が 0.4, 2.8 [mm] のときの吸引圧の閾値は 6.5, 6.6 [kPa] であった。吸引圧 6 ~ 7 kPa 付

近に閾値があるとし、このときのひずみエネルギー代表値の最大値と統合範囲  $r$  の関係を図 10 に示す。吸引口間距離が 0.4, 2.8 [mm] のときで閾値に大きな差が無かったことから、ひずみエネルギー代表値もほとんど等しい値を取る必要がある。グラフより、 $r = 0 \sim 1.2$  でひずみエネルギー代表値の重なりが見られ、 $r =$  約 0.9 のとき最大となる。

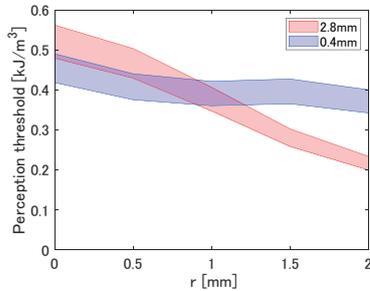


図 10: 統合範囲と知覚閾の関係

2点弁別閾から求めた統合範囲  $r$  と閾値から求めた  $r$  の値にずれがある。2点弁別実験の結果に個人差があることから、目安とした2点弁別閾が相応しくない可能性がある。被験者実験で調べた2点弁別閾より、仮に、吸引口間距離が 2.4 mm, 3.2 mm のときの2点弁別閾をそれぞれ標準偏差の範囲内から、 $-30$  kPa,  $-26$  kPa とすると、図 11 のように、 $r = 1.4$  とし、吸引口間距離が 2.4 mm, 吸引圧が  $-30$  kPa のとき、ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差は約  $1.4$  kJ/m<sup>3</sup> であり、吸引口間距離が 3.2 mm, 吸引圧が  $-26$  kPa のとき、ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差は約  $1.4$  kJ/m<sup>3</sup> であることから、ひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差が約  $1.4$  kJ/m<sup>3</sup> を超えたときに2点弁別閾ができると設定でき、この統合範囲は閾値から考えられる統合範囲と整合する。このとき、統合範囲  $r$  は  $1 \sim 1.5$  mm 程度とするのが良いと考えられる。

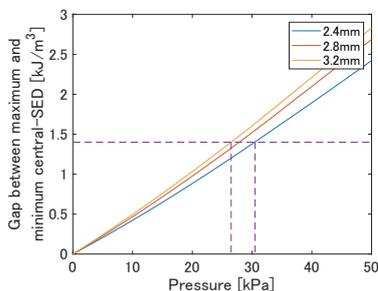


図 11:  $r = 1.15$  mm のときの吸引圧とひずみエネルギー代表値の最大値と最小値の差の関係

## 5. 結言

本論文では、高解像度吸引触覚ディスプレイにおいて、長時間シミュレーションにより求められる指腹と物体が接触した際の指腹のひずみエネルギー分布から、ディスプレイで提示する吸引圧を決定する方法の指針を得ることを目的と

し、実験と指腹部のシミュレーションを行った。実験では吸引圧の知覚閾及び2点弁別閾を調べた。その結果、吸引口間距離が 0.4, 2.8mm のときで知覚閾値にほとんど差が無いことと、吸引口間距離が大きくなるほど閾値が下がる傾向が見られた。また、実験と同条件で有限要素解析を行った。我々はある範囲を統合して知覚をしていると考え、その統合範囲は約  $1 \sim 1.5$  mm であるという結果となった。統合範囲の絞り込み、及び妥当性は今後実験を通して確かめていく予定である。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H04542 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Ujitoko, Y., Taniguchi, T., Sakurai, S., and Hirota, K. (2020). Development of finger-mounted high-density pin-array haptic display. *IEEE Access*, 8, 145107-145114.
- [2] Kajimoto, H., Kawakami, N., Maeda, T., and Tachi, S. (2004). Electro-tactile display with tactile primary color approach. Graduate School of Information and Technology, The University of Tokyo.
- [3] Matsubayashi, A., Makino, Y., and Shinoda, H. (2019, May). Direct finger manipulation of 3D object image with ultrasound haptic feedback. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-11).
- [4] Porquis, L. B., Maemori, D., Nagaya, N., Konyo, M., and Tadokoro, S. (2013, November). Haptic cue of forces on tools: Investigation of multi-point cutaneous activity on skin using suction pressure stimuli. In *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 2023-2029). IEEE.
- [5] Maemori, D., Porquis, L. B., Konyo, M., and Tadokoro, S. (2014, June). A multi-dof haptic representation using suction pressure stimuli on finger pads. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications* (pp. 285-294). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [6] Nagano, H., Sase, K., Konyo, M., and Tadokoro, S. (2019, July). Wearable suction haptic display with spatiotemporal stimulus distribution on a finger pad. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)* (pp. 389-394). IEEE.
- [7] 森田 夏実, 佐瀬一弥, 永野光, 昆陽雅司 and 田所諭. (2021). 指腹部高解像吸引触覚ディスプレイによる把持感覚の再現第 1 報: 高解像ディスプレイの開発と硬軟感提示性能の確認. 第 22 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予稿集
- [8] Makino, Y., and Shinoda, H. (2006). 吸引圧刺激による触覚生成法. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.11, No.1 (pp.123-131)