

# 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7報：把持における知覚的なじみの提案と構成論的実証法

○昆陽 雅司（東北大） 森田 夏実（東北大） 一條 暁生（東北大）  
佐瀬 一弥（東北学院大） 永野 光（神戸大） 田所 諭（東北大）

本稿では、ヒトの手による器用な把持・操りにおいて、皮膚感覚がどのように情報処理され、運動制御に利用されているかを理解するために、皮膚感覚を利用した対象への知覚的「なじみ」の仮説とその構成論的実証法について述べた。指と対象物との接触を実時間で高速にシミュレーションし、分布触覚ディスプレイにより皮膚感覚を再現する触覚サイバー・フィジカル・システムを構築して、ヒトの把持・操り戦略を調査するアプローチについて報告した。

### 1. はじめに

近年、高齢者の介護のために優しく接するロボットや、複数指で部品を組み付けたり、食材をお弁当に盛り付けたりするロボットなど、単に物体を把持するだけでなく、把持対象に力を加えるタスクも含めたマニピュレーション能力の向上が求められている。ヒトの手による器用な把持・操りにおいて、皮膚感覚がどのように情報処理され、運動制御に利用されているかを理解することは、器用なロボットハンドの実現や、リモート操作のための感覚フィードバック技術などに重要な知見を与える。例えば、Johanssonらは、マニピュレーションタスク中の指先受容器の神経活動とその活用戦略についてレビューしており、末梢への感覚運動制御ループには100 ms程度の比較的長い遅延が発生する中で、器用に物体を操作するには、連続する動作をフェーズに分けて、それぞれフェーズで動作戦略のサブゴールが設定されていること、フェーズ間の移行を示す何らかのイベントの検出と予測が行われている可能性について報告している。つまり、指先に存在する多数の触覚受容器の情報は集約され、接触の物理的な相互作用のイベントと紐付いて解釈される可能性がある。

本研究では、接触面の把持状態を集約する情報として「なじみ」状態に着目する。ロボットハンドにおいて、「なじみ」は柔軟指や、劣駆動によるなじみ機構など、受動的な機械要素として機能し、シンプルな機構で適応的にタスクを実現する手法として注目されている[2]。しかし、受動的ななじみ機構だけでは、精度うあなじみ性、タスクの柔軟性に限界がある。そこで、本研究では、皮膚に存在する触覚受容器が「なじみ」の状態を知覚し、より能動的に「なじみ」状態を制御しているという「知覚的なじみ」の概念を提唱し、その実証を試みる。

「知覚的なじみ」の実証にあたり、把持操り時の接触界面の力学情報や皮膚感覚の活動を直接観察することは困難である。本研究では、指と対象物との接触を実時間で高速にシミュレーションし、分布触覚ディスプレイにより皮膚感覚を再現する触覚サイバー・フィジカル・システムを構築して、ヒトの把持・操り戦略を実証論的に調査するという新しいアプローチに挑戦する。

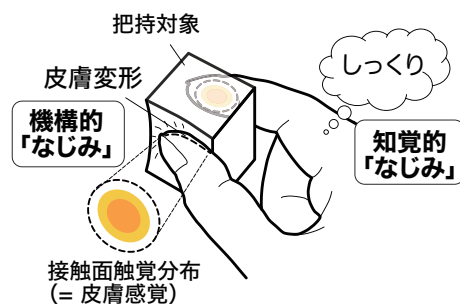


図1: 機構的なじみと知覚的なじみ

本稿では、ヒトの手による器用な把持・操りにおいて、皮膚感覚がどのように情報処理され、運動制御に利用されているかを理解するために、皮膚感覚を利用した対象への「知覚的なじみ」の概念と触覚サイバー・フィジカル・システムによる構成論的実証法について報告する。

### 2. 把持における「知覚的なじみ」の提案

本研究で着目する皮膚の感覚機能は、対象の柔らかさに応じて把持力を即座に調整したり、不定形の対象に対して複数の指の把持力を安定に調整して環境と相互作用させる能力である。一般に、大きな力を発生するロボットでは、物体をしっかりと把持しすぎると環境との接触によるわずかな変位で過大な力を把持物体に及ぼす危険がある。一方、ヒトは、物体を必要最小限の適度な力で把持し、相互作用による力を逃がすように手指の姿勢を追従させることが可能である。

これを実現する鍵が、柔軟体としての皮膚の存在である。皮膚は把持対象との間に介在することにより、一時的に接触の荷重を逃がしたり、接触位置を追従させる機能がある。このような受動的な機械要素としての柔軟指の「なじみ」効果はロボットハンドでも広く導入されている。一方、ヒトは皮膚表面に変形を取得する触覚受容器を配置することで、知覚的に「なじみ」の状態を把握することにより、受動的でなく能動的にも皮膚の「なじみ」を制御していると考えられる。例えば、図1に示すように、ヒトが把持位置・把持力を調整した際の接触面触覚分布情報に基づく「しっくりと安心して」持っているという感覚的な実感は、機構的

にも皮膚の変形余裕を残し、かつ、皮膚変形が偏らずにちょうど良い力の方向に把持している力学的な安定平衡状態と自然に一致する可能性が高い。

また、知覚的なじみ状態からの逸脱は、把持物体に外力が加わったり、接線方向に力が加わって物体が滑り落ちそうになった際に発生する。このような「知覚的なじみ」状態を基準とした、その状態からの偏りは、外力の大きさや方向の知覚にも利用されると考えられる。筆者らは、対向する2指で把持した物体の接触面に吸引刺激を加えて触覚分布の疑似的な偏りを生成することで、物体に加わる並進力やトルクを提示できることを示しており [3]、ヒトが複数指の接触面の偏り情報を統合し、その組み合わせによって外力の方向を知覚している可能性は高い。

本研究では、従来の受動的に達成されてきた「機構的なじみ」の機能を、皮膚感覚の「知覚的なじみ」によって能動的に達成される状態として捉え直し、「知覚的なじみ」が、把持操りのための運動戦略の規範になっていることを検証する。

### 3. 触覚サイバー・フィジカル・システムによる「知覚的なじみ」の構成論的実証法

把持操り時の皮膚の感覚機能を調査する上で、ボトルネックは、直接的な観察の難しさにある。従来、把持操り時の接触界面の力学情報を直接観察することは困難であった。本研究では、指と対象物との接触を実時間で高速にシミュレーションし、分布触覚ディスプレイにより皮膚感覚を再現する触覚サイバー・フィジカル・システム (CPS) を構築して、ヒトの把持・操り戦略を実証論的に調査するという新しいアプローチを提案する。具体的には、1) 接触面の分布的触覚情報を再現する高解像触覚ディスプレイ、2) 柔軟物体・複数接触・摩擦に対応した実時間接触シミュレーション、3) 皮膚感覚と力覚を独立提示可能な多指操作環境を構築して調査を行う。このような触覚 CPS の実現は、従来、直接観察が困難であったヒトの把持操り運動に伴う皮膚変形と接触面の触覚状容器の活動、および対象物との力学的拘束状態を可視化したり、感覚刺激の条件に直接介入することが可能となる。

「知覚的なじみ」の実証においては、触覚 CPS を利用して、シミュレーション空間で把持力や把持位置の調整タスクを実施し、対象物の形状や物性、拘束条件、皮膚刺激の生成条件を改変しながら、ヒトの把持操り戦略への影響を確認することで、実証的に皮膚感覚の働きとその機序を調査する。例えば、被験者が知覚的に「なじんでいる」と感じる把持状態に調整させ、接触面の触覚分布情報と力覚の関係を求める。「なじみ」時に被験者が一定に保とうとする情報に着目し、触覚分布情報が「知覚的なじみ」の規範になり得るかを検証する。

## 4. 触覚サイバー・フィジカル・システムの概要

### 4.1 触覚ディスプレイの概要

触覚ディスプレイは筆者らの提案した高解像吸引型皮膚触覚ディスプレイ (図 2) を使用する [4]。本ディス



(a) 装着時の外観 [4] (b) 力覚統合用 [8]

図 2: 高解像吸引触覚ディスプレイ

プレイは吸引刺激法により吸引口を高密度で配置することで高解像度な触覚分布を提示している。吸引刺激には、小径の穴から吸引した刺激と、小さなピンで押された刺激を区別できないという錯覚が報告されている [6]。これは触覚受容器であるメルケル細胞の活動は皮膚変形の方に依存せず、受容器位置のひずみエネルギーに相関し、接触面の空間的な分布情報を取得するという特徴に基づいている。

負圧で皮膚を刺激のメリットとして、正圧で皮膚を刺激する場合に比べて、隣接する吸引口刺激の干渉が少なく、独立して刺激を制御しやすいという点が挙げられる [4]。このため、従来のピンアレイ型高解像ディスプレイと比較して、より正確に分布刺激を再現することが可能である。

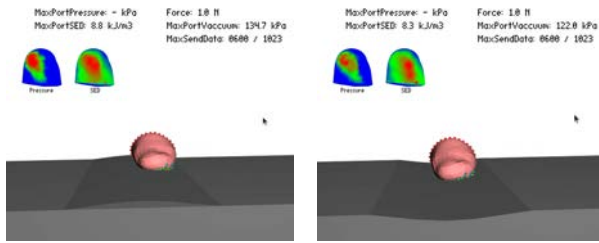
本研究で開発された吸引触覚ディスプレイは、指腹部に口径 1.6mm の吸引口が 62 個配置され、同心円状に広がる圧力分布が表現でき、かつ多様な圧力分布に対応可能なように 32ch の吸引ポートにグループ分けされている。デバイスを指腹部に密着させるため指サック状になっており、材料は 3D プリンタ (キーエンス、AGILISTA-3200) で低硬度シリコン材料 (AR-G1L) を用い、吸引口や指先の流路まで一体で造形されている。図 2(b) の CAD 図は力覚ディスプレイとの統合用に設計された吸引ディスプレイを示しており、細径の柔軟マルチラインエアチューブを用いて圧力を供給することもなく統合することが可能である [8]。

吸引ポートはそれぞれレギュレータと接続されており、次節の実時間接触シミュレーションの結果に基づいて算出される吸引圧指令値をシリアル通信によりマイコンに送信し、圧力が制御される。

### 4.2 実時間接触シミュレーション

#### 4.2.1 有限要素モデルの概要

有限要素法を用いて剛体モデルと指先モデルの接触力分布をリアルタイムで算出し、製作した力触覚統合ディスプレイから示指に対して刺激を提示する [7]。シミュレーションは、大変形を許容可能な Corotational FEM を用いて実装されており、ペナルティ法を用いて変形を計算することで高速化を実現している。指先モデルは剛体である末節骨と、ヤング率によって変形度を制御可能な軟組織で構成されている。なお軟素材は単純化のため指の皮膚・皮下組織・爪を均一な軟組織とみなしており、表面から約 2 mm の深さを受容器位置と見なし、その位置のひずみエネルギーを計算する。算



(a) 凸面のなぞり (b) 凹面のなぞり

図 3: 実時間接触シミュレーションによる剛体面なぞり時のひずみエネルギーの算出例

出されたひずみエネルギーに基づき補間することで、吸引口位置のひずみエネルギーを求める。なお、今後、指モデルは、表皮・真皮・皮下組織といった剛性の異なる層構造を再現する予定である。

本研究の把持タスクのシミュレーションでは、接触対象は剛体を対象とし、示指と母指の2指のひずみエネルギーを同時に算出する。検証実験では、刺激調整する動きが決められているため、予め計算しておいたひずみエネルギー分布をルックアップテーブルとして呼び出すことで、再現性を確保する。この方法は、有限要素モデルを高解像度化して、実時間計算が間に合わない場合にも利用でき、被験者の調整運動の自由度を拘束している場合には有効である。

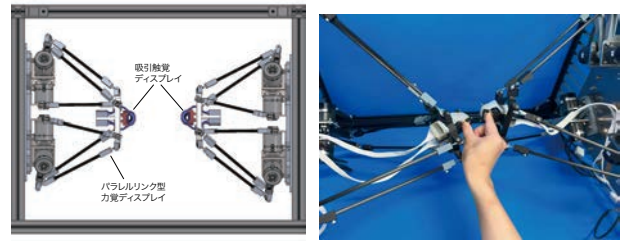
#### 4.2.2 シミュレーション例

実時間シミュレーションの結果として、示指の指先モデルを剛体の凹凸面に対して押し当てて表面をなぞった際のキャプチャ画像を図3に示す。2つの図は右から左の方向に指先で(a)凸面と(b)凹面をなぞった際のスナップショットであり、各図の上側に、カラースケールでFEMで算出された表面の圧力分布(左)と指内部のひずみエネルギー分布(右)を図示している。凹面と凸面で表面の圧力分布は同様でも、皮膚内部のひずみエネルギー分布には差が見られ、接触部以外にも広範囲に触覚分布が広がる様子が確認できる。

#### 4.3 力覚ディスプレイとの統合

把持力を提示する力覚ディスプレイは、指先への力覚提示を想定し、低慣性、高剛性、高速動作性などの特徴を有するパラレルリンク型を用いて構築する[8]。指への6自由度力覚提示を可能とするとともに従来の動作範囲を拡大する伝達機構として、6RSSパラレルリンク機構に冗長ジョイントを追加した機構を有する。リンク機構根本の回転ジョイントに接続するモータにはダイレクトドライブモータ(MDH-4018-20B, Microtech Laboratory Inc.)を用い、バックドライバビリティの向上を図っている。モータは、専用のモータドライバを用いて駆動され、力覚の制御は組み込みボードPC(Raspberry Pi 4 Model B)によって行われる。制御周期は1kHzである。実時間シミュレータとはおよそ100HzでUDP通信を行い、位置の送信と、提示すべき力覚の受信を行う。

本研究では開発した力触覚統合ディスプレイを2台を用いて、図4のような実験装置を製作し、2指に対して把持感覚を提示する。



(a) 2指把持タスク時の配置 (b) 指先装着時の外観

図 4: 把持タスクのための力触覚統合ディスプレイ

## 5. 接触シミュレーションに基づく吸引刺激の生成法

### 5.1 解析方法

接触シミュレーションに基づく高解像度触覚ディスプレイを実現するため、シミュレーションで求めたひずみエネルギーとディスプレイによる刺激を結びつける必要がある。そこで本研究では、有限要素解析ソフトを用いて詳細な皮膚モデルに、吸引刺激を与えた際の触覚受容位置のひずみエネルギーを求め、心理物理実験と組み合わせることで、ひずみエネルギーから吸引ディスプレイに与える吸引圧分布を算出する方法を検討した[9, 10]。

有限要素解析には、汎用有限要素ソフト MSC.Marc を用いる。作成した角層、表皮、真皮、皮下組織を再現した層状皮膚モデル[10]を図5に示す。材料には超弾性の Mooney-Rivlin モデルを使用し、静解析で皮膚変形を解析した。物性パラメータは既存研究を参照している。

### 5.2 ひずみエネルギーの統合範囲

メルケル細胞は複数が一つの感覚神経繋がっていることから、シミュレーションによって得られるひずみエネルギーもある範囲内のひずみエネルギーを統合する必要がある。そこで、2点弁別閾と振動閾値の心理物理実験と有限要素解析によって求められるひずみエネルギーの関係性を求め、吸引刺激に対する知覚現象を矛盾なく説明できるひずみエネルギーの統合範囲を求めた[9]。統合した後のひずみエネルギーをひずみエネルギー代表値 rSED と呼ぶこととする。ひずみエネルギー代表値の統合手順は、初めに各ひずみエネルギーから押し込み終了時のひずみエネルギー  $SED_{0i}$  を引き、その後、半径  $r$  の範囲にある節点の SED を平均した値を利用した。その関係式は以下で定義される。

$$rSED(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=x-r}^{x+r} (SED_i - SED_{0i}) \quad (1)$$

実験の結果、統合範囲が 1.1 mm 程度で矛盾なく心理物理実験を説明できることが確認された。

### 5.3 ひずみエネルギーと吸引圧の関係

前節で定義したひずみエネルギー代表値を知覚されるひずみエネルギーと定義し、吸引圧  $P$  とひずみエネルギー代表値の関係性を調べた[10]。また、吸引刺激が独立して提示することが可能であるか確かめるため、一つの

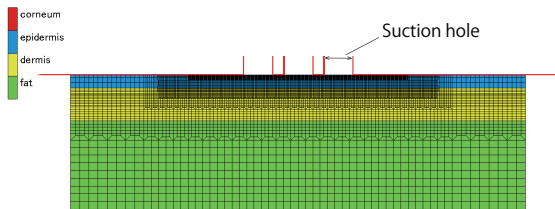


図 5: 精細皮膚モデルを用いた吸引刺激の FEM 解析

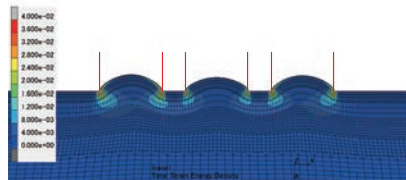


図 6: 有限要素シミュレーション結果の一例  
吸引圧 (-50, -20, -40 [kPa]) の場合

吸引口から刺激を与えた場合と、複数の吸引口から刺激を与えた場合のメルケル細胞位置のひずみエネルギーの違いを見ることで、隣接する刺激からの影響についても確認する。

具体的には、前述の皮膚の有限要素モデルに隣接する 3つの吸引口を配置し、中心の吸引口に対する隣接する吸引圧の影響を調べている。吸引口の配置は、実際にしようとする吸引触覚ディスプレイに合わせて吸引口径は 1.6 mm、吸引口間距離は 0.6 mm とした。シミュレーション結果の一例を図 6 に示す。

中心の吸引圧と中心位置でのひずみエネルギー代表値の関係を図 7 に示す。4つのカーブは、隣接する 3つの吸引口に加えた圧力の比率を表す。4つのカーブはほぼ重なっており、隣接する吸引圧の影響は、統合範囲が 1.1 mm 程度あれば十分に小さいことが確認された。また、ひずみエネルギー代表値と吸引圧の関係はほぼ線形に増加することが確認された。吸引圧  $P$  [-kPa] とひずみエネルギー知覚量  $pSED$  [ $J/m^3$ ] の関係式は、吸引圧の組み合わせが (1 : 1 : 1) の場合の関係を線形近似すると近似式は下記で表される。実際の実験では、皮膚の硬さに個人差があることから、個人毎に比例定数を調整して実験を行う。

$$P = 15.71 \times (pSED) \quad (2)$$

## 6. まとめ

本稿では、ヒトの手による器用な把持・操りにおいて、皮膚感覚がどのように情報処理され、運動制御に利用されているかを理解するために、皮膚感覚を利用した対象への知覚的「なじみ」の仮説とその構成論的実証法について述べた。指と対象物との接触を実時間で高速にシミュレーションし、分布触覚ディスプレイにより皮膚感覚を再現する触覚サイバー・フィジカル・システムを構築して、ヒトの把持・操り戦略を調査するアプローチについて報告した。次報 [11] では、2指把持タスクにおける知覚的ななじみ状態の検証について報告する。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 21H04542 の助成を受けた。

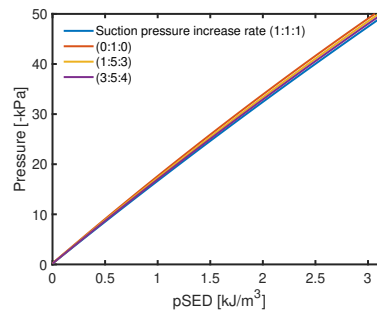


図 7: ひずみエネルギー代表値 - 吸引圧の関係

## 参考文献

- [1] R. Johansson, J. Flanagan, “Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks,” *Nat. Rev. Neurosci.* 10(5), pp. 345–359, 2009.
- [2] F. Negrello, H.S. Stuart, and M. G. Catalano, “Hands in the Real World,” *Front. Robot. AI*, 30, 2020.
- [3] D. Maemori, L. B. Porquis, M. Konyo and S. Tadokoro, “A Multi-DOF Haptic Representation Using Suction Pressure Stimuli on Finger Pads,” *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications, 9th International Conference, EuroHaptics 2014*, vol. 8619, pp. 285-294, 2014.
- [4] N. Morita, A. Ichijo, M. Konyo, H. Kato, K. Sase, H. Nagano, and S. Tadokoro, “Wearable High-resolution Haptic Display Using Suction Stimuli to Represent Cutaneous Contact Information on Finger Pad,” *IEEE Transactions on Haptics*, doi: 10.1109/TOH.2023.3280391.
- [5] 一條暁生, 森田夏実, 永野光, 佐瀬一弥, 昆陽雅司, 田所諭, “指腹部高解像吸引ディスプレイによる把持感覚の再現 (第 4 報, 1 指への力触覚同時提示と硬軟感提示性能の評価)”, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2022.
- [6] Y. Makino, N. Asamura, H. Shinoda, “Multi primitive tactile display based on suction pressure control”, *Proc. 12th IEEE Symp. Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems(Haptic Symp. '04)*, pp.90–96, 2004.
- [7] 加藤明樹, 佐瀬一弥, 永野光, 昆陽雅司, “触覚分布提示のための実時間指変形シミュレーション手法の検討”, ハプティクス研究委員会 第 29 回研究会, 2022.
- [8] 一條暁生, 永野光, 森田夏実, 昆陽雅司, 佐瀬一弥, 田所諭, “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 6 報: パラレルリンク型力覚ディスプレイとの統合”, *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023*, 2023.
- [9] 森田夏実, 昆陽雅司, 永野光, 佐瀬一弥, 田所諭, “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 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—”, 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2022.
- [10] 森田夏実, 昆陽雅司, 永野光, 佐瀬一弥, 田所諭, “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 5 報 ひずみエネルギーに基づく吸引刺激の生成—”, 第 23 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 *SI2022*, 2022.
- [11] 一條暁生, 昆陽雅司, 加藤明樹, 佐瀬一弥, 永野光, 田所諭, “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 8 報: 2 指把持タスクにおける知覚的ななじみ状態の検証”, *日本ロボット学会学術講演会*, 2023.