



指先の SED 分布を計算する触覚分布シミュレータ

佐瀬 一弥¹⁾, 加藤 明樹¹⁾, 一條 暁生²⁾, 昆陽 雅司²⁾, 永野 光³⁾

1) 東北学院大学 工学研究科 (〒 984-8588 仙台市若林区清水小路 3-1)

2) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-1)

3) 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)

概要: 我々が開発してきた吸引触覚分布ディスプレイによる触覚分布レンダリングのために, VR 物体との接触に伴う指先の変形およびひずみエネルギー密度 (SED) を計算するシミュレータを開発した. シミュレータで計算した皮下の SED 分布を, 触覚分布ディスプレイで再現することを目指している. 本展示では, 開発したシミュレータにおいて, 剛体オブジェクトとの接触に伴って生じる指先の SED 分布を可視化するシステムを展示する.

キーワード: ハプティクス, 触覚分布, 有限要素法, ひずみエネルギー密度

1. はじめに

これまでに様々なアプローチで指先への触覚分布の提示が試みられている. 構成方法は多様であるが, ピンアレイ型 [1, 2], 電気刺激 [3, 4], 回転軸配列 [5], 空中超音波 [6] などがある. その中で我々は多数の吸引口を配置した触覚分布ディスプレイを開発してきた [7].

一方で, 軟組織の変形を考慮した手による自然なインタラクションのためのシミュレーション技術の取り組みが行われている [9, 8], しかし, 触覚分布提示を目的としたものは少ない. 指先の変形を考慮した触覚レンダリング手法として, Verschoor ら [10] の取り組みがあるが, 剛体板を指先に押し付ける形式の触覚ディスプレイに特化している.

我々は吸引触覚ディスプレイ向けに触覚分布の計算が可能なシミュレータを開発してきた. 吸引触覚ディスプレイは多数の吸引口における吸引圧力の制御によって, 皮下の触覚受容器 (メルケル細胞) 周辺のひずみエネルギー密度 (strain energy density, SED) を時空間的に再現することを目指したものである. これは触覚受容器が SED に応答していると考えられているためである [11]. そこで, VR 物体との接触に基づき指先の変形を計算し, 皮下の SED 分布を実時間計算する.

本展示では, 本シミュレータを用い, 剛体凹凸面に対し示指が接触した際の, 指腹の変形および SED (ひずみエネルギー密度) 分布を計算し可視化する展示を行う. ユーザーが手をかざして動かすと, シミュレータ内の VR 指が同期して動き, 指と VR 物体との接触に基づきリアルタイムで計算が行われる. SED 分布の計算結果は画面上に表示され, 提示されるべき触覚分布を確認できる.

2. 指先の触覚分布シミュレータ

2.1 接触・変形計算手法

指先の変形計算は有限要素法を採用した. 指先は骨と軟組織で構成した. 現段階では, 爪, 表皮, 真皮等の詳細な

層構造はなく, これらが一体の一様均質な線形弾性体とみなしたモデルとなっている. 接触物体は剛体オブジェクトに対応している. 接触判定は, 符号付距離場を接触対象の剛体オブジェクトに対して生成し, 有限要素モデルの節点との間で行っている. 接触応答はペナルティ法を採用した. 詳細は文献 [12] を参考されたい.

SED の計算については, 本シミュレータの材料は等方線形弾性体であるため, 各要素において次式を用いた.

$$SED = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} \quad (1)$$

ここで, σ は要素の応力テンソル, ϵ は要素のひずみテンソルである. 各要素での SED を計算後, 各節点において周囲の要素の SED の平均をとり, 節点値の線形補間することにより滑らかな分布を得た.

2.2 指の運動入力

2.2.1 入力デバイス

本シミュレータは入力デバイスの取得のためにオープンソースハプティクスライブラリ CHAI3D を用いている. したがって, CHAI3D が対応するハプティックデバイスや Leap-Motion の入力が可能である. また, マウス入力や定義された軌道の再生に対応した.

2.2.2 高さ方向の運動制約

触覚 (皮膚感覚) ディスプレイでは, 力覚 (体性感覚) フィードバックを伴わない場合, 剛体オブジェクトに指が過大にめり込むなど, 非現実的な指の運動の入力ができてしまう. そのような入力を行った場合, 挙動が不自然になるだけでなく, 物理シミュレーションが破綻し, 続行不能になる場合もある. そこで本シミュレータでは, 以下のような指の動作モードを作成した.

- Normal (標準)
- Offset Surface (表面オフセット)
- Fixed Z (高さ固定)

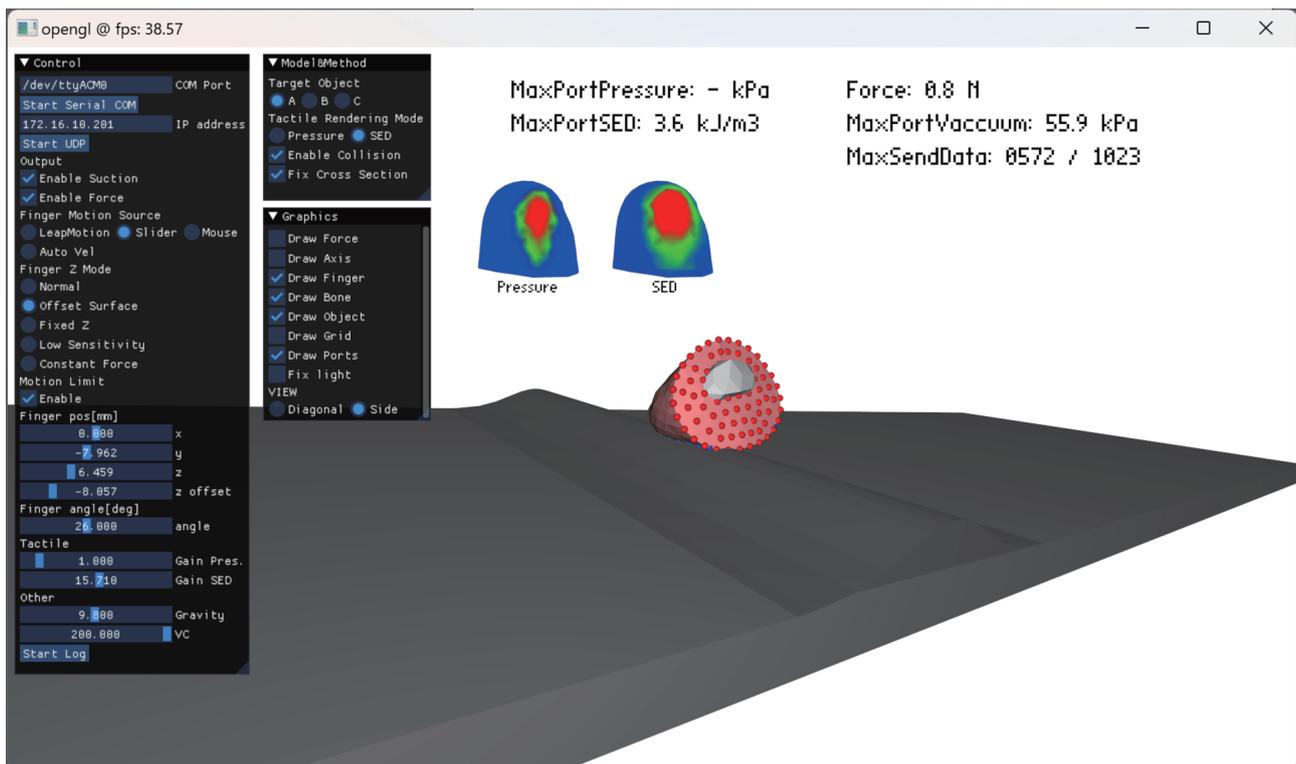


図 1: 触覚分布シミュレータの実行例

- Low Sensitivity (低感度)
- Constant Force (一定力)

「Normal」は運動に制限を与えず、自由な運動入力可能なモードである。「Offset Surface」は対象表面に対し一定の深さだけめり込むような高さに運動が制限されるモードである。「Fixed Z」は高さを一定値で固定したモードである。「Low Sensitivity」は高さに対する感度を低下させ、高さ方向に対して運動が縮小されるモードである。例えば、現実空間で 100 mm 動かしたときに VR 空間で 1 mm だけ動くようになる。「Constant Force」は一定力で押し付けるモードである。シミュレータは基本的に位置入力、力出力であるため、本モードでは力が一定になるようにフィードバック制御 (PID 制御) を行うことで一定力を実現した。

2.3 展示内容

本展示においては、ノート PC で本シミュレータを実行し展示する。入力デバイスとして LeapMotion を用いる。体験者は計算された変形、接触圧力分布、SED 分布を視覚的に確認することができる。

3. おわりに

本稿では、触覚分布ディスプレイとの統合を目的として開発された、指先の SED 分布を計算する触覚分布シミュレータについて、計算手法のほか、対応する入力デバイスや指の運動制約などについて述べた。

本シミュレータは開発中であり、課題が残されている。现阶段では爪・真皮・表皮・皮下組織の構造を考慮せず、一様な材料特性を用いたが、この構造が触覚受容器における

SED に大きく影響していると考えられている。したがって、今後は指の解剖学的構造を考慮していく予定である。また、静摩擦や柔軟物体との接触の対応についても今後取り組む予定である。

謝辞 JSPS 科研費 JP21H04542, JP22K17936 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Y. Ujitoko, T. Taniguchi, S. Sakurai, K. Hirota : Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display, IEEE Access, Vol. 8, pp. 145107–145114, 2020.
- [2] J. J. Zárate, H. Shea: Using Pot-Magnets to Enable Stable and Scalable Electromagnetic Tactile Displays, IEEE Transactions on Haptics, vol. 10, no. 1, pp. 106–112, 2017.
- [3] V. Yem, H. Kajimoto, K. Sato, H. Yoshihara: A System of Tactile Transmission on the Fingertips with Electrical-Thermal and Vibration Stimulation, Proc. HCHI 2019, LNCS 11570, pp. 101–113, 2019.
- [4] H. Kajimoto: Electro-Tactile Display Kit for Fingertip, Proc. 2021 IEEE World Haptics Conference, pp. 587–587, 2021.
- [5] T. Nakamura: Distributed Tactile Device Using Micro DC Motor Arrays, Proc. 2023 IEEE World Haptics Conference, WIP.E1.9, 2023.

- [6] A. Matsubayashi, Y. Makino, H. Shinoda: Rendering Ultrasound Pressure Distribution on Hand Surface in Real-Time, Proc. EuroHaptics 2020, LNCS 12272, pp. 407–415, 2020.
- [7] N. Morita, A. Ichijo, M. Konyo, H. Kato, K. Sase, H. Nagano, S. Tadokoro: Wearable High-resolution Haptic Display Using Suction Stimuli to Represent Cutaneous Contact Information on Finger Pad, IEEE Transaction on Haptics, doi:10.1109/TOH.2023.3280391, 2023.
- [8] K. Hirota and K. Tagawa: Interaction with Virtual Object Using Deformable Hand, Proc. 2016 IEEE Virtual Reality (VR), pp. 49–56, 2016.
- [9] M. Verschoor, D. Lobo, M. A. Otaduy: Soft Hand Simulation for Smooth and Robust Natural Interaction, Proc. 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 183–190, 2018.
- [10] M. Verschoor, D. Casas, M. A. Otaduy: Tactile Rendering Based on Skin Stress Optimization, ACM Transactions on Graphics, vol. 39, no. 408, pp. 90:1–90:13, 2020.
- [11] M. A. Srinivasan, K. Dandekar: An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two-Dimensional Models of the Primate Fingertip, J. Biomech. Eng., vol. 118, no. 1, pp. 48–55, 1996.
- [12] 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, 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究委員会第29回研究会予稿集, HAP02-1, pp. 3–6, 2022.