



顔面での皮膚吸引触覚刺激における有限要素解析

Finite element analysis of skin suction tactile stimulation on the face

亀岡嵩幸¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

Takayuki KAMEOKA and Hiroyuki KAJIMORO

1) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, {kameoka・kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会 (〒102-0083 東京都千代田区麹町 5-3-1)

概要: 頭部搭載型ディスプレイ (HMD) の普及とともに HMD に触覚提示装置を内蔵し、顔面へ感覚提示を行う研究が多く存在する。部位としてこれまで VR 環境における指先触覚情報を顔に提示するという異部位触覚提示技術の開発に取り組んできた。そこで種々の理由により吸引触覚を利用していたが、吸引部形状および吸引気圧により異なる触覚強度、触覚の質が感じられた。本稿では FEM シミュレーションを用いることで顔面における皮膚吸引触覚刺激提示を行うために皮膚内部に発生するひずみエネルギーを観察した結果を報告する。

キーワード: HMD, 吸引触覚, シミュレーション

1. はじめに

低価格頭部搭載型ディスプレイ (HMD) の普及に伴い HMD の利用範囲は拡大している。こうした背景のもと HMD を用いた VR 体験をより臨場感のあるものにするためにバーチャルオブジェクトとの接触感を再現するといった触覚技術の研究が盛んである[1][2]。これらの多くは手に装置を装着するものが多いが、装着が煩雑であるためハンズフリーな触覚提示技術が求められる。

例えばレーザーを用いた遠隔触覚提示[3]や、空中超音波を用いた遠隔触覚提示技術が研究されている[4]。しかしながらこれらの手法においても十分な強さを持った触覚提示を行うことが難しいという課題がある。そこで直接手に触覚を提示するのではなく異部位へ触覚を提示する触覚転移技術が提案されている。主に義肢の開発において失われた感覚を補填する目的で用いられることが多いが[5][6][7]、近年では VR 環境の感覚を提示する手法としても研究されている[8][9][10]。

これらの研究では手の感覚を足裏や腕、背部に提示しているが、HMD を装着することを前提とする場合、顔を触覚提示部位にすることで装着デバイスを HMD のみにし装置の着脱を簡略化することができる。HMD に触覚提示装置を内蔵する取り組みは多種多様な感覚モダリティを用いて提案されている[11][12][13][14]。さらに顔は脳の体性感覚野において手と隣接した領域に存在しており、手の感覚を顔で感じるという現象が Referred Sensation として知られている[15]ほか、幻肢痛の低減のために存在しない腕の感覚を頬に提示する取り組みがなされている[16]。

我々はこれまでに VR 環境の指先触覚情報を吸引触覚に

よって顔に提示する Haptopus を提案している[17]。吸引触覚を用いることで圧覚を錯覚させることも可能である[18]が、提示する感覚の最適化の議論は主観評価を軸とした考察にとどまっており、個人差の影響が大きく統一的な解釈が困難であった。

そこで本論文では Haptopus にて用いられている吸引触覚提示において皮膚に生じる機械変形を有限要素法を用いて解析し、吸引触覚の質的考察を行う。

2. 関連研究

2.1 有限要素法による皮膚構造シミュレーション

触覚知覚時にどのような機械的変化が皮膚に発生し種々の機械受容器が反応しているかを探るため有限要素法 (Finite Element Method, FEM) がしばしば用いられる[19]。

特に触覚受容器への影響が大きいものとしてひずみエネルギーと主観的触覚強度に相関があることが知られており、主に微小な皮膚変形に反応するメルケル細胞の活動に強く相関することが知られている[20]。吸引触覚における有限要素法を適用した先行事例においてもメルケル細胞に加わるひずみエネルギー分布を観測している[21][22]。本研究においても皮膚構造シミュレーションによりメルケル細胞が存在する領域に加わるひずみエネルギーの分布と大きさをを用いて触覚強度、触覚の質との関連について議論する。

3. 実験

3.1 手法

シミュレーションには ANSYS 2020 R2 Mechanical (ANSYS inc)を使用した。シミュレーションする皮膚の部

位は Haptopus にて吸引触覚を提示している頬を用いる。頬の構造として Chopra らが調査した人皮膚のデータを用いた[23]。表皮は $45.73\mu\text{m}$ 、真皮は $1040.46\mu\text{m}$ とした。また皮下組織の厚さは厳密には頬骨との距離を測る必要があるが骨との接触面は固定されていると考え厚さを $5000\mu\text{m}$ とし骨側を固定した(図 1)。皮膚の物性パラメータは Maeno らの調査[19]より引用した。密度は $1.1 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 、ポアソン比は 0.48、各ヤング率は表 1 に示したとおりである。皮膚の大きさは吸引部が収まる縦横 $3000\mu\text{m}$ の正方形とした。我々の先行研究にて使用した吸引部形状として直径 25mm の円に外接する正六角形の接触面を持ち、厚さ 1mm の内部が空洞な吸引部を作成していた。吸引部には吸引径が 2mm (91 点), 3mm (37 点), 4mm (17 点), 7mm (7 点), 10mm (3 点), 12mm (1 点) で六方最密充填構造にて穴を配置していた[24](図 2)。これらの吸引部形状に基づいて負圧を加える箇所を設定する。負圧の値は先行研究にて使用していた吸引ポンプの最大吸引気圧である -600hPa に固定した。

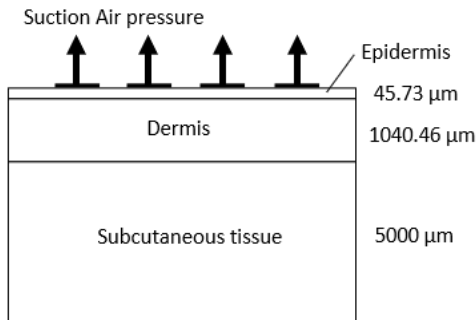


図 1 皮膚構造モデルの概略。表皮 (Epidermis)、真皮 (Dermis)、皮下組織 (Subcutaneous tissue) の厚さを記す。それぞれの組織は接着しているものとする。吸引部形状に基づいて表皮上に吸引方向に負圧 (Suction Air pressure) をかける。

表 1 有限要素解析にて利用した物理パラメータ

	表皮	真皮	皮下組織
ヤング率 (MPa)	0.136	0.080	0.034

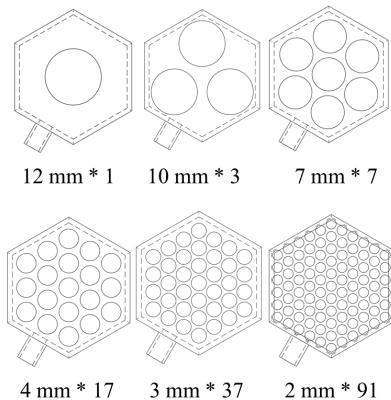


図 2 先行研究[24]にて使用した吸引部形状。各吸引孔の直径と個数を示す。

3.2 結果

吸引形状ごとにシミュレーションを行った結果を図 3

に示す。図 3 ではシミュレーション結果をわかりやすく表示するため真皮のモデルのみ表示している。

図 4 に各吸引形状ごとに観測した最大ひずみエネルギーの結果を示す。この結果より吸引孔の径が大きいほど同じ吸引気圧であっても強いひずみエネルギーが生じることがわかる。ただし吸引径 12mm の場合には最大ひずみエネルギーは 10mm より小さくなっている。

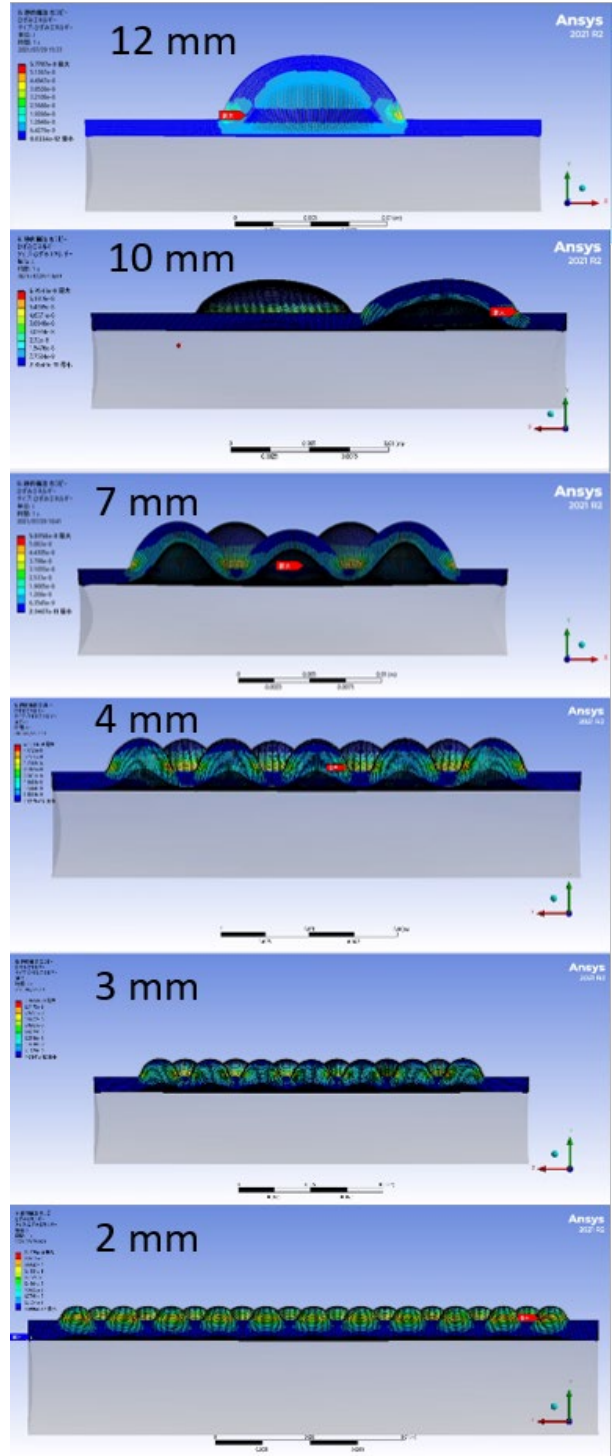


図 3 吸引径ごとのひずみエネルギーシミュレーション結果の断面図。皮膚表面の吸引箇所にて -600hPa の圧力をかけ

ている。真皮のみ表示している。

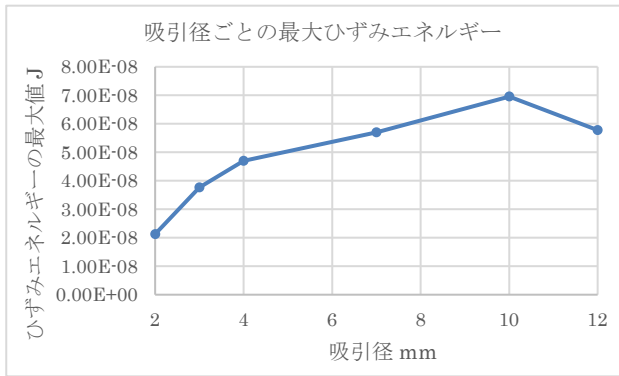


図 4 吸引径ごとの最大ひずみエネルギー

4. 考察

図 4 よりメルケル細胞に加わるひずみエネルギーの大きさは 10mm までの範囲では吸引径が大きくなるほど大きくなるのがわかった。ひずみエネルギーの強さと触覚強度との相関が存在するのであれば吸引径 2mm がもっとも触覚が弱くなり、10mm のときに最も強くなるはずである。しかし我々の先行研究により調査した吸引径ごとの触覚強度では吸引部形状の違いによる明確な差は生じていなかった[24] (図 5)。考えられることとして小さい吸引孔の場合、複数の吸引孔を配置するため最もひずみエネルギーが強くなる吸引孔のエッジの長さの総和が大きくなり、大きなひずみエネルギーを持つ大きい吸引孔のときと触覚強度が同等、もしくは上回るようになったと推察する。

また直径 12mm の吸引径では触覚強度が弱く、ひずみエネルギーの最大値が落ち込んでいる。触覚強度が弱いことは吸引孔が 1 つのみ配置されていたためにエッジの長さの総和が小さかったからという先の推察通りだが、ひずみエネルギーについては吸引孔が隣り合うことで皮膚の変形量が大きくなりひずみエネルギーも増大していたが 12mm の場合は吸引孔が 1 つしかなかったため変形量が小さくなっていったためではないかと推測する。

		Suction pressure level					
		1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6
Suction diameters (mm)	12	1.6	2.4	2.6	3	3.1	2.8
	10	1.4	2.9	3.4	4.5	4.8	4.4
	7	2	2.9	4	4.2	4.9	5.2
	4	1.6	2.7	3.7	4.2	4.6	5.3
	3	1.8	2.8	3.3	4.2	4.6	5.3
	2	2	2.8	3.7	3.9	4.5	5.3

図 5 吸引径 (Suction diameters), 吸引気圧 (Suction pressure level) の組み合わせごとの主観的触覚強度。先行研究より引用[24]。主観的触覚強度はリッカードスケール 7 段階にて回答させた (1: 弱い~7: 強い)。吸引気圧は触覚刺激を知覚できる閾値 (1/6) から痛みを感じる閾値 (6/6) 範囲にて 6 段階で変化させた。

5. おわりに

本研究では HMD へ内蔵する吸引触覚提示装置の開発に必要な吸引触覚特性を明らかにするため、顔面における皮膚吸引時に皮膚に発生する変化を有限要素法を用いて解析した。その結果、皮膚吸引時にメルケル細胞に働くひずみエネルギーの大きさは吸引径が 10mm のときに最大となった。このことから吸引触覚提示時における最大ひずみエネルギーは触覚強度との相関はなく、ひずみエネルギーの総量、すなわちひずみエネルギーが集中する吸引孔のエッジ部分の総量が最終的な触覚強度に影響を与える可能性があることがわかった。また吸引孔を密集させ変形量を増やすことでより強い触覚強度を得られるのではないかと推測できた。

今後は気圧を変えた場合や吸引部との接触を考慮したシミュレーションを行いさらに深い考察を行っていく。また今回の結果を踏まえ、より VR 環境の触覚情報を幅広く再現可能な吸引触覚提示システムの開発を行う。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP20K20627, JP20J23626 の助成を受けたものです

参考文献

- [1] J. Perret and E. Vander Poorten, "Touching Virtual Reality: A Review of Haptic Gloves," in *ACTUATOR 2018: 16th International Conference on New Actuators*, 2018, pp. 1-5.
- [2] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo, "Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 10, no. 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 580-600, 2017.
- [3] J.-H. Jun, J.-R. Park, S.-P. Kim, Y. Min Bae, J.-Y. Park, H.-S. Kim, S. Choi, S. J. Jung, S. Hwa Park, D.-I. Yeom, G.-I. Jung, J.-S. Kim, and S.-C. Chung, "Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations," *Sci. Reports 2015 51*, vol. 5, no. 1, pp. 1-16, Jun. 2015.
- [4] I. Hwang, H. Son, and J. R. Kim, "AirPiano: Enhancing music playing experience in virtual reality with mid-air haptic feedback," in *2017 IEEE World Haptics Conference, WHC 2017*, Jul. 2017, pp. 213-218.
- [5] C. Antfolk, A. Björkman, S. O. Frank, F. Sebelius, G. Lundborg, and B. Rosen, "Sensory feedback from a prosthetic hand based on airmediate d pressure from the hand to the forearm skin," *J. Rehabil. Med.*, vol. 44, no. 8, pp. 702-707, 2012.
- [6] G. Shi, A. Palombi, Z. Lim, A. Astolfi, A. Burani, S. Campagnini, F. G. C. Loizzo, M. Lo Preti, A. M.

- Vargas, E. Peperoni, C. M. Oddo, M. Li, J. Hardwicke, M. Venus, S. Homer-Vanniasinkam, and H. A. Wurdemann, "Fluidic Haptic Interface for Mechano-Tactile Feedback," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 204–210, 2020.
- [7] K. R. Schoepp, M. R. Dawson, J. S. Schofield, J. P. Carey, and J. S. Hebert, "Design and Integration of an Inexpensive Wearable Mechanotactile Feedback System for Myoelectric Prostheses," *IEEE J. Transl. Eng. Heal. Med.*, Aug. 2018.
- [8] T. Okano, K. Hiki, K. Hirota, T. Nojima, M. Kitazaki, and Y. Ikei, "Development of a sole pressure display," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Nov. 2018, vol. 432, pp. 175–179.
- [9] T. Moriyama, A. Nishi, T. Nakamura, V. Yem, and H. Kajimoto, "Hap-Link : Wearable haptic device on the forearm that presents haptics sensations corresponding to the fingers," in *SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, *SIGGRAPH Asia 2018*, Dec. 2018, pp. 1–2.
- [10] T. Moriyama, H. Asazu, A. Takahashi, and H. Kajimoto, "Simple is vest: High-density tactile vest that realizes tactile transfer of fingers," in *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, *SA 2019*, Nov. 2019, pp. 42–43.
- [11] D. Valkov and L. Linsen, "Vibro-tactile feedback for real-world awareness in immersive virtual environments," in *26th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2019 - Proceedings*, Mar. 2019, pp. 340–349.
- [12] R. L. Peiris, W. Peng, Z. Chen, L. Chan, and K. Minamizawa, "ThermoVR: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays," in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, May 2017, vol. 2017-May, pp. 5452–5456.
- [13] Y. Kon, T. Nakamura, and H. Kajimoto, "HangerOVER: HMD-embedded haptics display with hanger reflex," in *ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, *SIGGRAPH 2017*, Jul. 2017, pp. 1–2.
- [14] C. Wang, D.-Y. Huang, S. Hsu, C.-E. Hou, Y.-L. Chiu, R.-C. Chang, J.-Y. Lo, and B.-Y. Chen, "Masque: Exploring Lateral Skin Stretch Feedback on the Face with Head-Mounted Displays," in *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2019, pp. 439–451.
- [15] V. Ramachandran, "The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture," *Brain*, vol. 121, no. 9, pp. 1603–1630, Sep. 1998.
- [16] A. Ichinose, Y. Sano, M. Osumi, M. Sumitani, S. I. Kumagaya, and Y. Kuniyoshi, "Somatosensory Feedback to the Cheek during Virtual Visual Feedback Therapy Enhances Pain Alleviation for Phantom Arms," *Neurorehabil. Neural Repair*, vol. 31, no. 8, pp. 717–725, Aug. 2017.
- [17] T. Kameoka, Y. Kon, T. Nakamura, and H. Kajimoto, "Haptopus: Transferring the touch sense of the hand to the face using suction mechanism embedded in HMD," 2018.
- [18] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda, "Multi Primitive Tactile Display Based on Suction Pressure Control."
- [19] T. MAENO, K. KOBAYASHI, and N. YAMAZAKI, "Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors.," *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 41, no. 1, pp. 94–100, Mar. 1998.
- [20] H. P. Saal, B. P. Delhay, B. C. Rayhaun, and S. J. Bensmaia, "Simulating tactile signals from the whole hand with millisecond precision," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 114, no. 28, pp. E5693–E5702, Jul. 2017.
- [21] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda, "Multi primitive tactile display based on suction pressure control," in *Proceedings - 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS*, 2004, pp. 90–96.
- [22] L. Ben Porquis, D. Maemori, N. Nagaya, M. Konyo, and S. Tadokoro, "Haptic cue of forces on tools: Investigation of multi-point cutaneous activity on skin using suction pressure stimuli," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013, pp. 2023–2029.
- [23] K. Chopra, D. Calva, M. Sosin, K. K. Tadisina, A. Banda, C. De La Cruz, M. R. Chaudhry, T. Legesse, C. B. Drachenberg, P. N. Manson, and M. R. Christy, "A comprehensive examination of topographic thickness of skin in the human face," *Aesthetic Surg. J.*, vol. 35, no. 8, pp. 1007–1013, Nov. 2015.
- [24] T. Kameoka and H. Kajimoto, "Tactile Transfer of Finger Information through Suction Tactile Sensation in HMDs," *IEEE World Haptics*, 2021.