

顔面への皮膚吸引刺激における吸引孔形状の違いによる感覚変化

Changes in Sensation of Skin Suction Stimulation on Face by Different Shapes of Suction Hole.

学 亀岡 嵩幸 (電通大) 梶本 裕之 (電通大)

Takayuki KAMEOKA, The University of Electro-Communications, kameoka@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

In recent years, many researchers have been investigating the addition of other modalities such as haptics to the visual and auditory based VR experience using HMDs. On the other hand, these haptic devices are cumbersome to wear and their fingers cannot be moved freely. We solved these problems by embedding a suction tactile presentation device in an HMD and presenting the finger sensation in a VR environment to the face. In this paper, we investigate how changes in the suction hole and suction pressure affect the tactile sensation. As a result, we found that a dense arrangement of 2 mm suction holes can provide strong tactile sensation even with weak suction pressure, and that pressure sensitivity is also easily presented.

Key Words: Haptics, Wearable device, Suction haptics, HMD, Virtual Reality

1. 緒言

近年、低価格な HMD が普及し、HMD を用いた VR 体験が活用されている。より高品質な VR 体験を実現するため、HMD による視覚、聴覚刺激だけでなく他の感覚モダリティを提示することで没入感を向上させる取り組みがなされている。とりわけ手掌部は人体の中で鋭敏な部位の一つであり、手掌部へ触覚情報を提示する手法は数多く研究されている[1]。

しかしながら、手掌部への触覚提示においては装置の装着が煩雑である、手指の自由な運動が妨げられるといった問題もある。そこで直接手掌部へ触覚を提示するのではなく、異なる部位へ提示することが考えられる。このような異部位への触覚提示は義手や義足の分野において指先の感覚を残存部位で補綴するために盛んに研究されている[2][3][4][5][6]。

ここで VR 体験において HMD の使用を前提とした場合、顔面へ触覚を提示することで装着物を HMD のみとすることができる。我々は既に VR 環境における指先触覚情報を顔に提示する取り組みとして Haptopus を提案している[7]。Haptopus は吸引触覚提示装置を HMD へ内蔵しており、VR 環境において指先に発生した触覚を目元周辺へ提示している。しかし、皮膚を吸引する吸引孔の形状による触覚の違いには言及されておらず、幅広い触覚の質を再現するためにさらなる改良の余地がある。

本論文では吸引部の形状の違いによりどのような触覚強度と質の変化が現れるかを調査した。

2. 関連研究

触覚情報を異部位へ提示する取り組みとして義肢への応用を紹介したが、VR 環境に適用した取り組みも存在する。

Okano ら[8]は VR 環境での手のひらの感覚を空気圧ピンディスプレイにより足裏へ提示し、リアリティを向上可能であることを確認した。同様に Moriyama ら[9]は VR 環境の指先の感覚を振動モーターにより背中に提示し、高解像度な指先の触覚を背中という大面積に展開することで小型化の難しいマトリクス触覚提示装置を簡易に制作した。また Moriyama らは VR 環境の指先の触覚を 5 節リンク機構により前腕へ提示している[10]。

これらの感覚提示手法は高品質な触覚提示が可能である反

面装置が大型であり、HMD に組み込むことは困難である。

HMD に内蔵された触覚提示デバイスとしては振動子を用いたものや[11][12]ペルチェ素子を用いた熱提示デバイスが提案されている[13]。これらの手法は提示装置がコンパクトである反面、指先の触覚情報において重要な物体との接触感を提示するための圧覚を提示することが難しい。このほか HMD のベルト部分と頭部の間に空気圧バルーンを配置し頭部を圧迫する[14]手法や HMD のベルト全体を巻き取ることで顔面へ圧覚を提示する手法が提案されている[15]。これらは純粋な圧覚の提示が可能な反面、大面積の触覚提示となり指ごとの細かい感覚を伝えることは難しい。皮膚変形を伴い触覚提示部位が個別に駆動されるものとして Wang らの Masque が提案されている[16]。Masque では皮膚に対して水平 2 軸に移動可能な 6 つのゲルパッドを用いて皮膚せん断を提示することができる。しかし 6 箇所ゲルパッドそれぞれを水平 2 軸の移動を可能とするために重量が増し、天井から装置を吊るすなどの対応を取る必要がある。

そこで本研究では吸引触覚提示を用いる。吸引触覚は Makino ら[17][18]による検証にて圧覚を生じることが示されており、VR 環境で発生した接触感の提示に有効だと考えられる。また吸引触覚提示は吸引箇所と駆動部分をチューブでつなぐことで分離出来るため HMD と皮膚の接触部という限られた空間で実装ができる。

3. 実験装置

吸引により圧覚を提示する手法として Makino らの検証[17][18]では複数点の吸引孔を持つ吸引部が採用されていた。同様に Porquis ら[19]による指先への吸引触覚提示による力覚変調を行った研究においても多点吸引が用いられているが、吸引径パターンによる感覚の違いについては検証されていない。またこれらの研究は手掌部に対して適用されており、顔面の皮膚においても同様の吸引径、吸引点数が有効であるかは明らかでない。そこで本稿では複数の吸引形状を試作し、

それぞれの吸引部での触覚感覚を調査する。

3.1 吸引システム

本稿で用いる皮膚吸引システムは空気吸引ポンプ (SC3701PML, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC) と電磁バルブ (SC415GF, SC0526GF, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC) を組み合わせた気圧調整機構から構成される (図 1, 図 2)。吸引気圧調整には気圧センサー (MIS-2503-015V) を用いて常に気圧を計測し、マイクロコントローラ (ESP-WROOM-32) により電磁バルブの開閉を FET (2SK2232) で制御することで調整する。吸引ポンプは常に吸引を続け、電磁バルブにより吸引先を外気と皮膚で切り替えることで気圧を調整する。吸引ポンプの駆動電圧を調整することで気圧制御することも可能であるが、吸引ポンプのモーターは時間応答性が高くないため電磁バルブによる高速な応答を用いるべきと判断した。

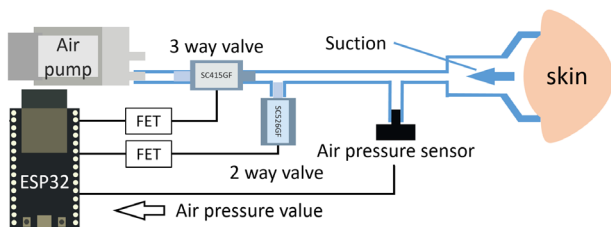


Fig. 1 Suction air pressure modulation system.

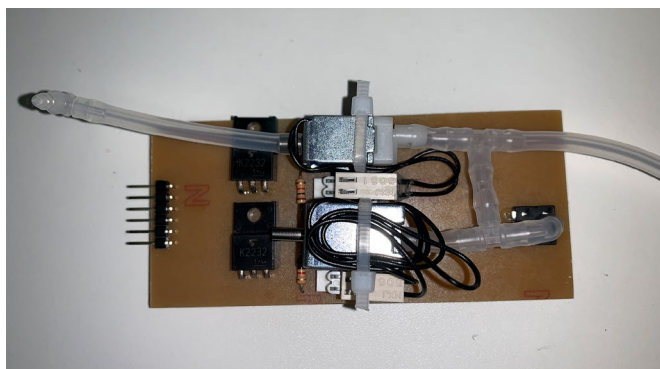


Fig. 2 Photo of the suction system

3.2 吸引部

吸引部は HMD に内蔵することを想定し同一面積の吸引部にて吸引孔を六方最密充填構造にて配置し、吸引直径を変更したものを作成した。吸引部の皮膚接触部は直径 25mm の円に外接する正六角形とした。吸引孔は Haptopus[7]に用いられていた直径 12mm の単一吸引点と直径 10, 7, 4, 3, 2mm の吸引孔をそれぞれ複数配置した多点吸引部を作成する。吸引部は光造形 3D プリンタ (Form3, FormLabs) により作成し、材質は Elastic50A を使用した。

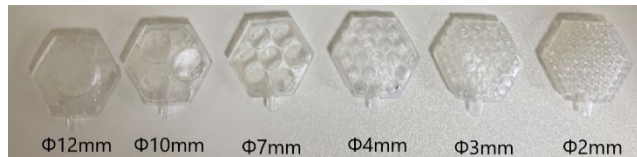


Fig. 3 Suction ports

4. 実験

吸引部形状の違いによりどのような感覚差が生じるか調査するため、各吸引部形状にて吸引触覚を感じ始める最小吸引気圧と、痛覚が生じ始める最大吸引気圧を調査した。最大吸引気圧値は吸引ポンプの制限から -500hPa を最大とした。その後得られた吸引可能気圧範囲を 6 等分し吸引刺激を提示した。これは例えば最小吸引気圧が -50hPa, 最大吸引気圧が -400hPa であった場合、-50, -120, -190, -260, -330, -400 に分割するということである。それぞれの気圧値にて吸引触覚の質 (吸引と感じるか圧覚と感じるか) と吸引強度を回答させる。回答方法はリッカートスケールにて吸引の質 (-3: 吸引, +3 圧覚), 吸引強度 (1: とても弱い, 7: とても強い) として回答させる。

5. 結果と考察

実験は研究室所属の 22~26 歳の男性 10 名に対して行った。実験結果を図 4, 表 1, 表 2 に示す。これらのデータは全被験者の平均である。図 4 より最小吸引気圧は吸引径によらず横ばいだが、最大吸引気圧は単一吸引点の 12mm では -500hPa となり装置の最大出力となった。またこの値で痛覚が生じる被験者はほとんどいなかったため、12mm 単一吸引部の最大吸引気圧は -500hPa より強いと考えられる。10, 7, 4, 3mm までは -250~-300hPa と横ばいであるが、2mm のときは -227hPa と最も小さくなった。

表 1 より吸引気圧が弱いほど圧覚を感じやすいことがわかる。また吸引径が 12mm の単一吸引点であるときがもっとも圧覚を感じやすいことがわかる。多点吸引の中では吸引径 2mm が圧覚を感じやすい傾向にある。

表 2 より吸引気圧が強くなるほど触覚強度が上がるのがわかる。ただし 12mm の単一吸引点では最大触覚強度が 3.1 であり、他の条件と比較して弱い。これは装置が提示可能な最大吸引気圧が -500hPa であったために十分な触覚強度が出せなかった可能性が考えられるが、より強い触覚強度を出すために吸引を強めると皮膚へ痕が残ってしまうなどのデメリットも存在する。多点吸引間で結果を比較すると、大きな違いは見られない。

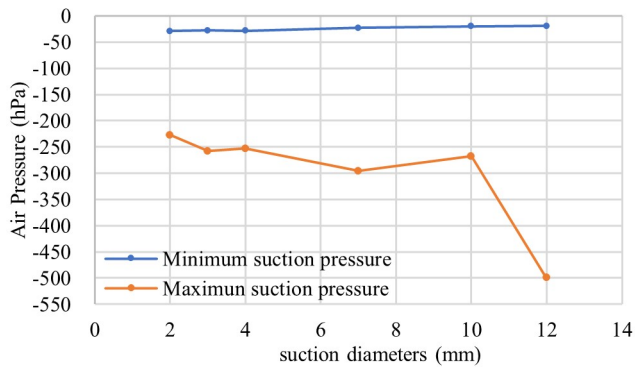


Fig. 4 Maximum and minimum suction pressure values for different suction diameters.

Table 1 Perception of suction and pressure perception by different suction diameters and pressures. The score is -3 for suction and +3 for pressure perception. The green area in the table shows the sensation of pressure and the red area shows suction.

| | | Suction pressure level | | | | | |
|------------------------|----|------------------------|-----|------|------|------|------|
| | | 1/6 | 2/6 | 3/6 | 4/6 | 5/6 | 6/6 |
| Suction diameters (mm) | 12 | 1.1 | 0.9 | 0.1 | 0 | -1.1 | -0.5 |
| | 10 | 0.9 | 0.3 | 0.3 | -1 | -1.2 | -2.3 |
| | 7 | 1.2 | 0.9 | -0.5 | -1.5 | -1.2 | -2.3 |
| | 4 | 1.1 | 0.6 | -0.3 | -1.1 | -1.3 | -2.2 |
| | 3 | 0.6 | 0.3 | -0.2 | -1.5 | -1.2 | -1.7 |
| | 2 | 0.9 | 0.7 | -0.5 | -0.9 | -1.5 | -0.8 |

Table 2 Perception of tactile intensity with different suction diameters and pressures

| | | 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 |

表 1 と表 2 の結果より吸引の質と触覚強度の相関をグラフにすると図 5 のようになる。この図を見ると吸引形状に依らず吸引強度が強まるにつれ吸引を感じやすくなっていることがわかる。吸引触覚提示による VR 環境における指先触覚情報の質感提示を行うため、VR オブジェクトとの接触感覚、特に圧覚を感じやすく、十分な触覚強度を持つ直径 2mm の吸引径が最も適していると考えられる。

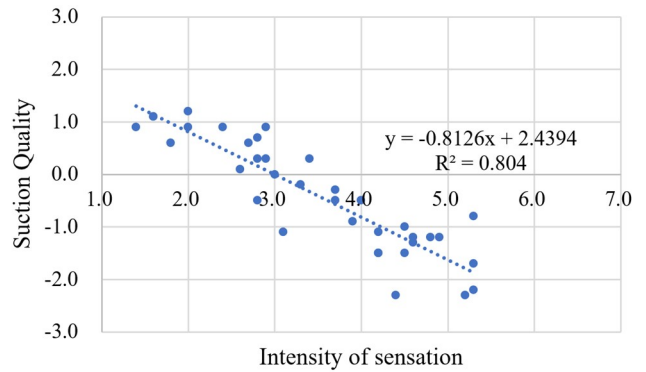


Fig. 5 Correlation between suction quality (-3: suction, +3: pressure perception) and subjective intensity.

また実験後に被験者からコメントを得たところ、「圧覚を感じる時は弱く触れられるような感覚を感じた」、「痛覚を感じる際は皮膚が小さくつままれるような感覚であった」という回答を得た。実験結果と被験者の回答を統合して考えると吸引触覚による圧覚知覚はタップ感、接触感のような弱い圧覚を提示可能であるが、より強い圧覚を提示しようとするとも明確に吸引であると知覚することがわかる。また痛覚に関しては皮膚が吸引孔に吸い込まれるため、小さくつままれるような感覚を感じることは理解が容易である。さらに本稿で採用した吸引部素材は柔軟性に優れているため吸引により吸引部自体が変形し、皮膚に吸着し、さらに皮膚に食い込むような形状に変化したと考えられる。

6. 結言

本稿では HMD に内蔵することを想定した皮膚吸引触覚提示装置における吸引部の設計手法に寄与する知見を調査、報告した。その結果、皮膚吸引触覚は吸引孔の大きさと密度により同じ吸引気圧であっても触覚強度と質が変化することがわかった。同じ面積の吸引部に対してより小さい吸引孔を密集して配置することで大きな吸引孔を用いるよりも強い触覚強度を提示できることがわかった。また皮膚吸引による圧覚知覚錯覚については形状によらず触覚強度が弱い場合に生じやすいことがわかった。ただし吸引孔が小さい場合は強度が強い場合も比較的圧覚を感じやすい傾向にあった。

今回の結果は十分に柔らかい吸引部を使用した結果であるため、今後は吸引部素材の違いによる感覚変調についても調査を行いたい。

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

参考文献

- [1] M. Maisto, C. Pacchierotti, F. Chinello, G. Salvietti, A. De Luca, and D. Prattichizzo, "Evaluation of wearable haptic systems for the fingers in Augmented Reality applications," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 1-1, 2017.
- [2] 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.
- [3] G. Shi, E. Peperoni, C. M. Oddo, M. Li, J. Hardwicke, M. Venus, S. Homer-Vanniasinkam, H. A. Wurdemann, A. Palombi, Z. Lim, A. Astolfi, A. Burani, S. Campagnini, F. G. C. Loizzo, M. Lo Preti, and A. M. Vargas, “Fluidic haptic interface for mechano-tactile feedback,” *IEEE Trans. Haptics*, vol. 13, no. 1, pp. 204–210, Jan. 2020.
- [4] 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.
- [5] P. D. Marasco, J. S. Hebert, J. W. Sensinger, C. E. Shell, J. S. Schofield, Z. C. Thumser, R. Nataraj, D. T. Beckler, M. R. Dawson, D. H. Blustein, S. Gill, B. D. Mensh, R. Granja-Vazquez, M. D. Newcomb, J. P. Carey, and B. M. Orzell, “Illusory movement perception improves motor control for prosthetic hands,” *Sci. Transl. Med.*, vol. 10, no. 432, Mar. 2018.
- [6] M. C. Jimenez and J. A. Fishel, “Evaluation of force, vibration and thermal tactile feedback in prosthetic limbs,” in *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, 2014, pp. 437–441.
- [7] 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.
- [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, 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.
- [10] 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.
- [11] V. A. De Jesus Oliveira, L. Brayda, L. Nedel, and A. Maciel, “Experiencing guidance in 3D spaces with a vibrotactile head-mounted display,” *Proc. - IEEE Virtual Real.*, vol. 23, no. 4, pp. 453–454, 2017.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] H. Y. Chang, W. J. Tseng, C. E. Tsai, H. Y. Chen, R. L. Peiris, and L. Chan, “Facepush: Introducing normal force on face with head-mounted displays,” in *UIST 2018 - Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2018, pp. 927–935.
- [16] C. Wang, D. Y. Huang, S. W. 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 *UIST 2019 - Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, Oct. 2019, pp. 439–451.
- [17] Y. Makino and H. Shinoda, “Suction Pressure Tactile Display Using Dual Temporal Stimulation Modes,” *SICE Annu. Conf. 2005 Okayama*, 2005.
- [18] 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.
- [19] L. Ben Porquis, M. Konyo, and S. Tadokoro, “Enhancement of human force perception by multi-point tactile stimulation,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 3488–3493, 2011.