



透明吸引部と可視光を用いた同一部位への 圧覚・温覚提示モジュールの開発と HMD との統合

Development of a Co-located Pressure-Thermal Feedback Module Using a Transparent Suction Port and Visible Light, and Its Integration with Head-Mounted Displays

亀岡嵩幸¹⁾

Takayuki Kameoka

1) 九州大学（〒 815-0032 福岡県福岡市南区塩原 4-9-1）

概要: 本研究では、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）を用いたバーチャルリアリティ（VR）体験における没入感向上を目的として、吸引および可視光を利用した圧覚・温覚提示装置を HMD に統合する手法を検討する。本モジュールは光造形 3D プリンタを用いて作成した透明吸引孔と高輝度 LED より構成され、吸引圧錯覚による圧覚と可視光による光熱を空間的に同一の部位へ提示する。HMD への内蔵と VR アプリケーションの開発を行い、デモンストレーションを行った。その結果、バーチャルオブジェクトの熱および圧覚を同時に提示することに成功した。

キーワード: HMD, 吸引圧刺激, 光熱刺激, ウェアラブル

1. はじめに

コンシューマ向けヘッドマウントディスプレイ（HMD）は急速な低価格化と軽量化を遂げ、ハンドトラッキング機能を備えたスタンドアロン型のモデルが一般化している。視覚・聴覚刺激を主とした VR 体験は既存の HMD で十分に体験可能だが、触覚刺激を加えることでさらなる没入感の向上が期待される。特に、HMD に触覚提示装置を内蔵することで、追加の装着デバイスが不要となるため利便性を維持したまま触覚刺激を付与することが可能となる [1-5]。従来の提案では圧覚や熱覚、衝撃感、振動など様々な感覚を提示することができ、VR 体験の臨場感向上を達成している。

筆者らはこれまでに吸引圧を用いて指先の接触感を顔面へ代替的に提示する HMD 内蔵デバイスを開発し、VR 体験の没入感向上を達成した [6]。吸引圧刺激を用いる利点として、皮膚へ弱い吸引圧を提示すると圧覚を生じるという錯覚 [7] があることや、空気圧アクチュエータは小型かつ低電力で駆動可能であるためウェアラブル性に優れる [8] という点がある。加えてユーザーの動的な運動に合わせて吸引気圧を調整することで硬軟感の表現が可能であることを示した [9]。しかしながら、多様な VR 環境に触覚刺激により表現するためには異なる質の触覚刺激を包含する必要がある。特に温覚は人が周辺環境を認識するために重要な役割を果たし、VR 環境における没入感を向上させるために有用である。

そこで本研究では、透明レジンで成形した吸引部背面に高輝度 LED を配置し、圧覚と輻射熱を同一点へ重ねて提示する薄型モジュールを試作した。本稿ではモジュールの構造と設計について紹介し、HMD と併用した接触圧・熱提示

VR アプリケーションシナリオ例を示す。

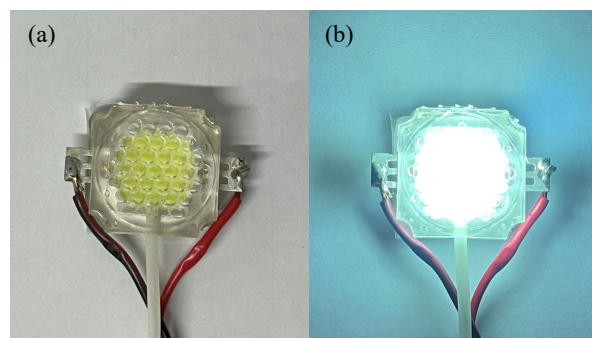


図 1: 提案モジュール概要図。光造形 3D プリンタ (Form4B, Formlabs) と透過レジン (Elastic 50A Resin) を用いて作成した吸引部と高輝度 LED (Chanzon High Power LED Chip 10W Cool White, Shenzhen Chanzon Technology Co., Ltd.) により構成される。(a) は LED オフ時、(b) は LED オン時の様子。

2. 関連研究

2.1 可視光を利用した熱刺激提示

可視光を熱源として用いる方法は、皮膚に直接デバイスを接触させることなく温感を与えられるため、非接触の熱現象の再現や直接の接触が困難な部位への刺激提示に適している。熱提示には高照度が必要となるため、実装には高輝度 LED が一般的に選択される。Kai らは手掌への温感フィードバックを目的に、多数の高輝度 LED を配列したウェアラブルシステムを構築し VR 環境の臨場感の向上を達成して

いる [10]。一方で、光熱方式はペルチェ素子と異なり冷感の提示はできない。これに対し、ボルテックスチューブを用いた冷却空気を提示する手法 [11] や、水中環境で光熱提示を行い液体で冷却する手法 [12] など、温感と冷感を統合した提示例も報告されている。

2.2 HMD 内蔵型の熱刺激提示手法

頭部での触覚・温覚提示を目的とした HMD 内蔵型デバイスも数多く提案されている。Peiris らはペルチェ素子を HMD クッション部に組み込み、VR 環境の熱源方向の教示を達成している [3]。Wolf らは振動子とペルチェ素子を組み合わせることで雨のような接触感覚と冷感の両方を要求する感覚の再現に成功した [13]。

本研究と特に関連する例として、西澤らは光ファイバーアレイを HMD 下部に配置し、口元へ可視光を照射して熱感覚を提示する手法を提案した [5]。光ファイバーを用いることで大型光源を HMD 本体から分離し装着性を確保するほか、光ファイバーごとの光量を制御することで光源方向の教示を行っている。

3. システム構成

図 1 にモジュール外観、図 2 にモジュール構成と寸法を示す。

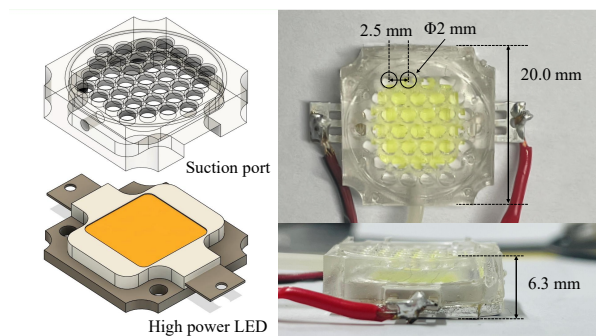


図 2: モジュール外観と寸法。

3.1 吸引部および気圧制御機構

吸引部は光造形 3D プリンタ (Form4B, Formlabs) で透明柔軟レジン (BioMed Elastic 50A Resin, Formlabs) を用いて造形した。吸引孔として直径 2 mm の孔を六方最密充填で配置し孔間隔を 2.5 mm に設定した。吸引部形状の設計は先行研究に基づき触覚強度が強くなる設計を採用した [6]。吸引部表面の厚さは 1 mm とし、皮膚との接触時に皮膚形状に合わせ変形することで密閉性を高めるようにした。加えて吸引孔外周に 0.5 mm の盛り上がり設けることで密閉性を更に高めた。後述する LED と吸引部は透明柔軟レジンにより接着した。

気圧制御機構はマイクロコントローラー (ESP32-DevKitC, Espressif Systems Ltd.)、電磁弁 (S070C-VAG-32, SMC Corporation)、吸引ポンプ (CS310PW, SHENZHEN SKOOCOM ELECTRONIC)、気圧センサ (MIS-2503-015V, Metrodyne Microsystem Corp.) より構成される。気圧制御手法

の詳細は先行研究に基づく [6]。吸引部と気圧制御部はポリウレタンチューブ (内径 1 mm) とシリコンチューブ (内径 3 mm) を組み合わせ接続した。

3.2 光熱提示部および温度制御機構

熱刺激源として 10W の高輝度 LED (Chanzon High Power LED Chip 10W Cool White, Shenzhen Chanzon Technology Co., Ltd.) を採用した。色は先行研究に基づき熱提示の効率が良いホワイトを選択した [12]。LED 背面にはアルミ基板と配置し放熱経路を確保した。LED 光は吸引部を透過し皮膚表面を輻射加熱する。LED へは 10 V, 1 A を PWM 制御により入力し、熱出力を連続可変とした。HMD に内蔵する際にはサーミスタ (56A1002-C3, Alpha Technics) を用いて温度を計測し、PID 制御にて目標気圧に到達するように制御した。

4. アプリケーション

本モジュールを HMD (Meta Quest 3, Meta. inc) のクッション部に内蔵し (図 3)、VR 空間でコーヒーカップに触れる場面を実装した (図 4)。制御機構は PD 出力可能なモバイルバッテリーによる駆動と、マイクロコントローラーと HMD を Bluetooth により通信することでウェアラブルに構成した。アプリケーションは Unity2022.3.22f1 を用いて作成した。VR 環境では HMD の機能によるハンドトラッキングを用いてコーヒーカップに触れることができ、触れる場所に応じて光熱、吸引圧、光熱+吸引圧の 3 種類のフィードバックが額へ提示される。また光熱提示による可視光がユーザーの VR 体験を阻害しないよう、モジュールを覆うように遮光シリコンシートを配置した。

本アプリケーションのデモンストレーションを国際会議 (IEEE World haptics 2025, 2025 年 7 月 8 日~11 日, 韓国 水原市) にて行い、フィードバックを得た。体験において可視光は体験を阻害せず、体験者の多くは光熱刺激の熱さに驚き思わず手を引く姿が見られた。またダイヤフラムポンプを用いた空冷による冷感の提示や VR 環境で触れるモチーフのアイデアなどのフィードバックを得た。特に高出力な LED を密閉環境にて用いることで LED の放熱が足りず故障のおそれやサーミスタを間に挟むことで空気漏れが生じやすくなっていた点などの指摘を受けたため、安定的なモジュールを設計する上で改善が必要である。

5. おわりに

本研究では薄型の吸引圧・光熱複合モジュールを設計し、HMD への内蔵およびアプリケーション作成とフィードバックの収集を行った。可視光を用いた光熱刺激は十分に VR 体験時の熱感覚を表現し、吸引圧刺激と同時に知覚可能であった。今後は空冷機構を追加することで冷覚提示を可能とする改良や、ユーザテストによる VR 体験時の没入感への影響の定量評価を行う。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23K19992 の支援を受けたもの

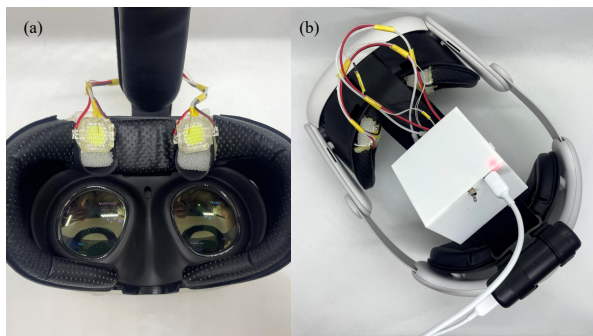


図 3: HMD のクッション部へモジュールを内蔵した様子。
(a) クッション部および (b) 制御機構含む上からの様子。

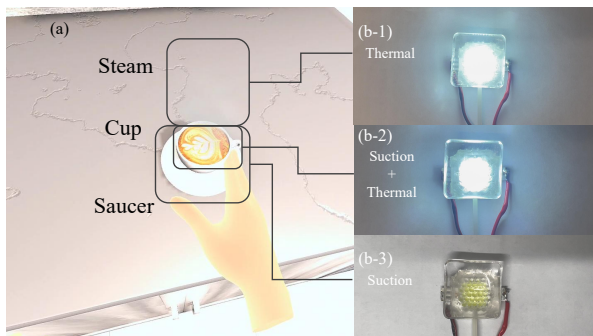


図 4: VR アプリケーションの様子。(a) 体験者はハンドトラッキングにより自身の指でコーヒーカップおよび湯気に触れることができ、(b-1) 湯気に触れた場合は熱のみを感じ、(b-2) カップに触れた場合は熱と接触圧を感じ、(b-3) ソーサーに触れた場合は接触圧のみを感じる。

である。

参考文献

- [1] Vivian Shen, Craig Shultz, and Chris Harrison. Mouth Haptics in VR using a Headset Ultrasound Phased Array. *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14, 4 2022.
- [2] Wen-Jie Tseng, Yi-Chen Lee, Roshan Lalintha Peiris, and Liwei Chan. A Skin-Stroke Display on the Eye-Ring Through Head-Mounted Displays. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13. Association for Computing Machinery (ACM), 4 2020.
- [3] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, Liwei Chan, and Kouta Minamizawa. ThermoVR: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays. In *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Vol. 2017-May, pp. 5452–5456, New York, NY, USA, 5 2017. Association for Computing Machinery.
- [4] Dennis Wolf, Michael Rietzler, Leo Hnatek, and Enrico Rukzio. Face/On: Multi-Modal Haptic Feedback for Head-Mounted Displays in Virtual Reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, No. 11, pp. 3169–3177, 11 2019.
- [5] 西澤 昌宏, 原澤 賢充, 半田 拓也, 小峯 一晃. 光ファイバアレイを用いた非接触の可視光空間温覚提示. 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 9 2023.
- [6] Takayuki Kameoka and Hiroyuki Kajimoto. Design of Suction-Type Tactile Presentation Mechanism to Be Embedded in HMD. *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 0, p. 75, 6 2022.
- [7] Y. Makino, N. Asamura, and H. Shinoda. Multi primitive tactile display based on suction pressure control. In *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004. HAPTICS '04. Proceedings.*, pp. 90–96. IEEE, 2004.
- [8] Ali Shtarbanov. FlowIO Development Platform – the Pneumatic “Raspberry Pi” for Soft Robotics. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–6, New York, NY, USA, 5 2021. ACM.
- [9] Takayuki Kameoka and Hiroyuki Kajimoto. Tactile Transfer of Finger Information through Suction Tactile Sensation in HMDs. *2021 IEEE World Haptics Conference, WHC 2021*, pp. 949–954, 7 2021.
- [10] 界瑛宏, 山口勉, 三武裕玄, 長谷川晶一. HMDVR のための可視光 LED による手への非接触型温覚提示. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 83–92, 2019.
- [11] Jiayi Xu, Shoichi Hasegawa, Kiyoshi Kiyokawa, Naoto Ienaga, and Yoshihiro Kuroda. Integration of Independent Heat Transfer Mechanisms for Non-Contact Cold Sensation Presentation With Low Residual Heat. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 16, No. 4, pp. 770–784, 10 2023.
- [12] Sosuke Ichihashi, Masahiko Inami, Hsin-Ni Ho, and Noura Howell. Hydroptical Thermal Feedback: Spatial Thermal Feedback Using Visible Lights and Water. *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–19, 10 2024.

- [13] Dennis Wolf, Leo Hnatek, and Enrico Rukzio. Face/On: Actuating the facial contact area of a head-mounted display for increased immersion. In *UIST 2018 Adjunct - Adjunct Publication of the 31st*

Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 146–148. Association for Computing Machinery, Inc, 10 2018.