



ウェアラブルな複数触覚提示システム Haptiple の基礎検討

前田智祐¹⁾, 倉橋哲郎¹⁾

Tomosuke Maeda, and Tetsuo Kurahashi

1) 株式会社豊田中央研究所 ヒューマンサイエンス研究領域 感覚統合モデリングプログラム
(〒 480-1192 愛知県長久手市横道 41-1, {tmaeda, kurahashi}@mosk.tytlabs.co.jp)

概要: 触覚は全身に存在する特殊な感覚である。しかし、多くの触覚デバイスは装着する部位に制限があり、複数の触覚を広範囲に提示することが困難である。これらの問題を解決するために、本研究では身体の上さまざまな部位に対して、振動覚、圧覚、温冷覚・風覚を提示可能なシステム、Haptiple を提案する。本稿では、Haptiple の試作とアプリケーションおよび現状の制約について述べ、そこから本システムのコンセプトの実現可能性を示す。

キーワード: 触覚, ウェアラブル, 身体性

1. はじめに

触覚は全身に存在している特殊な感覚である。触覚研究では、VR 空間における没入感向上のために、振動覚、圧覚、温冷覚のデバイスの研究・開発が行われている。指や手に触覚提示する研究では、さまざまな形態のウェアラブルデバイスが提案されている [1]。指先や手だけでなく、全身や身体の上の広範囲に触覚を提示する研究が行われている。中でも振動覚の全身触覚提示のアプローチでは、映像 [2] や音楽体験を向上 [3] させるものやゲーム体験を向上 [4] させるものが提案されている。振動だけでなく複数触覚を提示する研究も行われており、Haptic Around [5] では、ウェアラブルデバイスと設置型デバイスのハイブリッド型の触覚提示システムにより、複数の触覚提示を実現している。また、26 個のエアバッグを制御することで、身体の上の広範囲に圧覚提示を実現した Force jacket [6] も提案されている。温冷覚提示デバイスにおいては、ウェアラブルかつモジュール型のシステムで、身体の上の広範囲に温冷覚を提示可能な TherModule [7] が提案されている。

さまざまな触感を生成する研究では、TECHITILE toolkit [8] や StereoHaptics [9] が提案されている。これらは入力に触覚センサ、出力に振動子を用い、シンプルな触覚のデザインやプロトタイピングを実現している。同様に、触覚をデザインするという観点から、データに基づいて重さ知覚モデルを構築し、把持型の VR コントローラーをプロトタイピングができる手法 [10] が提案されている。別のアプローチとして、磁石を用いた触覚のプロトタイピングが提案されている。Magnet Plotter [11] は、マグネットラバーシートに磁性を転写し、マクロな触覚のデザインを実現している。同様のアプローチとして、Magneto-Haptics [12] は、永久磁石間の磁力を数値計算で求めることで、さまざまな触覚



図 1: Haptiple

をつくることを実現している。

ヒューマンコンピュータインタラクションの分野では、インタラクションの範囲と応用先を拡張するために、さまざまな形態や用途に合わせてカスタマイズ可能なモジュール型の研究が加速している [13]。

複数触覚提示を身体の上の広範囲に提示することができれば、新しい体験やインタラクションを実現できると考えられる。そこで私たちは、身体の上の広範囲に複数触覚提示が可能な Haptiple を提案する。Haptiple は、従来の触覚提示方法を参考にし、振動覚、圧覚、温冷覚を同時に制御できるシステムをワイヤレス化することで、身体性を阻害せずに、多くの部位に多様な感覚を提示することを目指している。これにより、VR 空間や実空間におけるインタラクションの範囲を拡張できる。本発表では、

- 複数触覚提示モジュールを開発すること
- さまざまなアプリケーションによってシステムのコンセプトを示すこと

の2点に関して報告する。

2. システム設計・試作

2.1 Haptible のコンセプト

振動覚、圧覚、温冷覚が提示できるモジュールには、高性能な計算機を搭載せず、無線通信可能なマイクロコントローラによって、ゲートウェイ（無線 LAN (Local Area Network)）を介して、ネットワーク上の計算資源に接続し、そこで複雑な計算処理を行う。その結果を用いて各モジュールの制御を行う。これにより、

- モジュールをセンサとアクチュエータとして利用すること
- バンドやボタンを用いて装着部位の自由度を上げる
- 他の視覚、聴覚デバイスとの連携が容易になること
- 制御に用いる信号を計算資源上に保存し、再利用できること

が可能となる。

2.2 設計要件

振動覚、圧覚、温冷覚を身体の広範囲に与えるためには、以下の設計要件が重要である。

- ウェアラビリティ: 身体の一部に提示するために、各モジュールは小さく、身体に身につけられるサイズで軽量である必要がある。一般的に身につける腕時計くらいのサイズが望ましい。
- スケーラビリティ: いくつかのモジュールを身体のままな部位や他のデバイスに装着できる柔軟性を持ち、各モジュールの複雑な計算処理は、計算資源によって処理できる。各モジュールだけでなく、他の感覚を提示するデバイスと連携し、身体感覚を通したインタラクションができる。
- コントローラビリティ: 無線通信を用いて、各モジュールは触覚のパターンや強度を制御できる。また、触覚信号を計算資源に記録し、再生することができる。

2.3 ハードウェアの実装

Haptible システムは、振動覚、圧覚、温冷覚・風覚をそれぞれ単一で提示するモジュールと無線 LAN と計算資源（ここではコンピュータ）によって構成される。無線 LAN を使用し、各モジュール-PC 間の通信を行う。多くのモジュールとデバイスと通信を行うために、同時接続数の上限が 100 台である無線 LAN (RT2060ac, Synology 社製) を使用した。各モジュールは無線通信を行うために無線 LAN と Bluetooth が使用できるマイクロコントローラ (ESP32 Microcontroller, DFRobot 社製) を用いた。また、マイクロコントローラには、タッチセンサが使用できる入力端子が用意されている。導電性糸を用いることで、さまざまな素材をタッチセンサとして使用できる。通信プロトコルは、Open Sound Control (OSC) をである。計算資源は、各部位につけられたモジュール

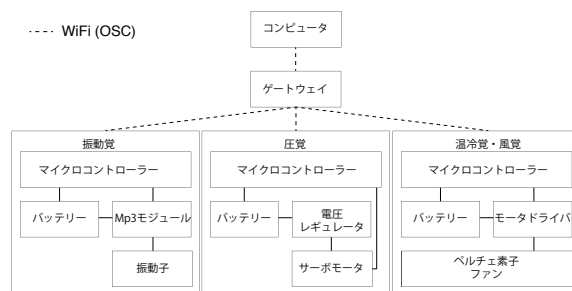


図 2: システムの概要

ルに対して、振動覚、圧覚、温冷覚・風覚を制御する。システム構成を図 2、振動覚、圧覚、温冷覚・風覚の各モジュールの実現例を図 3 に示す。

2.3.1 振動覚モジュール

Haptible における振動覚モジュールは、従来研究を参考にし、触覚信号を低周波（数 Hz から 200Hz 程度）の音響信号した。音声モジュールは、Mp3 Voice Module DFR0534, DFRobot 社製）はマイクロコントローラとシリアル通信を行い、予め保存された触覚信号を再生することで触覚提示を実現している。保存できる容量は 8 MB で、ファイル数は 200 である。触覚信号は音楽制作ソフトで作成を行う。触覚信号をプリセットしておくことで、PC-モジュール間で生じる遅延を減らしている。最大出力は 3 W であり、多種類の振動子を使用することができる。今回は手首や胸部周辺の部位に装着するために振動子 (Vp2, アークヴラボ社製) を使用した。

2.3.2 圧覚モジュール

圧覚を提示する方法は、DC モータによってベルトを締め付ける手法 [1] やサーボモータによる反動 [14] や直接押し込みによる圧覚提示 [15] があげられる。Haptible では、身体のままな部位に圧覚および力覚を提示するため、サーボモータによる圧覚提示する方法を採用した。マイクロコントローラによって PWM (Pulse Width Modulation) 制御を行い、圧覚の強さを調整する、電圧レギュレータ (S911V5F, Pololu 社製、最大電流 1.5 A) を用いており、定格 5 V のサーボモータが使用できる。小型のサーボモータ (HS-40, Hitec 社製) を使用した。

2.3.3 温冷覚・風覚モジュール

温冷覚を提示するために、ペルチェ素子を採用した。ペルチェ素子は小型のペルチェ素子 (TEC1-03103, 日本テクモ社製) を使用し、その駆動には小型のモータドライバ (BD65496MUV, Pololu 社製) を使用し、制御方法には PWM 制御を用いている。また、風覚提示のために小型ドローンモータ (7 × 16mm, 19000KV) を使用した。

3. 性能仕様

3.1 通信速度

複数のモジュールを用いた触覚提示を行う場合、PC-モジュール間の制御信号に要する時間 (図 4 における PC が制御信号を送信後にモジュールからの応答信号を受信する

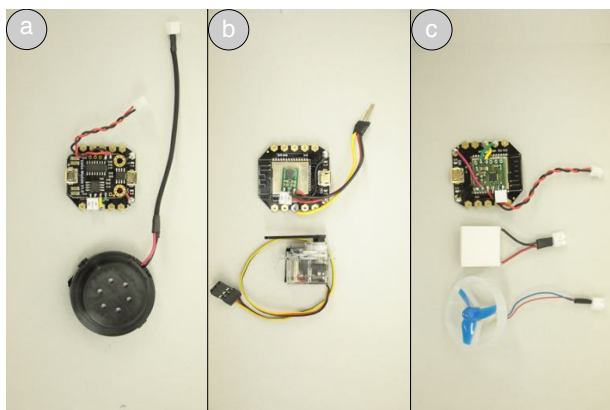


図 3: Haptible モジュールの回路 (a) 振動覚モジュール (b) 圧覚モジュール (c) 温冷覚・風覚モジュール

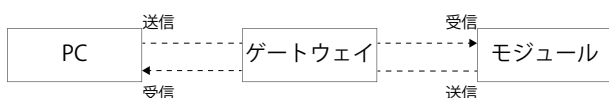


図 4: PC-モジュール間の通信速度の実験

までの時間)を評価する。通信速度の評価には、Max 8 を使用した。PC からモジュールにコマンドを送り、モジュールがコマンドを受信すると PC に再度通信を返し、PC で受信したときの時間を計測した。モジュール 1 台に対して 10 回の送受信に要した平均時間は 71.1 ms、標準偏差は標準偏差は ± 19.3 ms であった。したがって、センサ等で受信しながら制御する場合は、71 ms、一方向で制御する場合はその半分の 36 ms を要する。

3.2 駆動時間

振動覚モジュールおよび圧覚モジュールに対しては 400 mh、温冷覚・風覚モジュールに対しては 860 mh を使用した。このときの駆動時間について述べる。使用しているマイクロコントローラは、無線通信のみで約 100 mA の電流を使用する。したがって、振動覚と圧覚モジュールの通信のみでの駆動時間は 4 時間未満、温冷覚・風覚モジュールでは 8 時間未満である。振動覚モジュールが最大出力で駆動した場合、約 800 mA の電流を使用するため、連続駆動が約 30 分である。圧覚モジュールで使用しているサーボモータの停動電流は 450 mA であるため、駆動時間は 1 時間未満である。また、温冷覚モジュールは最大出力約 1 A の電流を使用するため、最大出力における使用時間は 1 時間未満となる。以上のことから、各モジュールを最大出力で使用した場合の駆動時間は約 30 分である。

3.3 接続数および接続距離

Haptible モジュールと各デバイスの接続数は、ゲートウェイに依存する。今回使用したゲートウェイでは、機器の仕様上 100 台のモジュールとデバイスの同時接続が可能である。Haptible モジュールの制御可能距離もゲートウェイに依存する。モジュールおよびデバイスは電波の届かない範囲になると通信が不可能になる。多くのモジュールを同時に制御するようなアプリケーションの場合やゲートウェイ



図 5: アプリケーション例: ダイビング VR コンテンツ (a) Haptible と HMD を装着している様子. (b) Unity 上のステージ

との距離が離れる場合にゲートウェイを増やす必要がある。現状、10 台、10 m 以内の範囲では、明らかな応答遅延や通信エラーの問題は顕在化していない。

4. アプリケーション

本システムの有効性を探索するために、アプリケーションの一例として、身体動作が伴う VR コンテンツを実装した。本アプリケーションでは、ワイヤレス HMD である Oculus Quest, 振動感, 温冷覚・風覚モジュールを用いた (図 5 (a)). コンテンツは Unity で開発した。高所から水中に飛び込むコンテンツのフローを以下に示す。

- ユーザは高所から水に飛び込むようにジャンプをする。
- 飛び込むと風覚モジュールで風を提示する。
- 水中に着地すると、振動覚と温冷覚を提示する。

3 名の本アプリケーションの体験の結果、「落ちている感覚がする」、「自分の意志で飛び込むとリアルに感じる」、「これは面白い」等のコメントを得た。

特に興味深いのは、自分の意志で飛び込むとリアリティが上がるという点である。身体動作を行うことで、コンテキストを使うことができるためだと考えられる。したがって、身体動作に伴って触覚を与えるとより高い体験を提供できると考えられるため、今後、主観評価や生体信号等を用いて評価を行っていききたい。

5. むすび

本研究では、ウェアラブルかつモジュール型で複数の触覚を提示できる Haptible の実装とアプリケーションを示した。今後、ユーザスタディを継続して実施し、身体運動による同一刺激に対する感じ方の違い等を検討していく予定である。

参考文献

- [1] Claudio Pacchierotti, Stephen Sinclair, Massimiliano Solazzi, Antonio Frisoli, Vincent Hayward, and Domenico Prattichizzo. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: taxonomy, review, and perspectives. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 580–600, 2017.
- [2] Paul Lemmens, Floris Cromptvoets, Dirk Brokken, Jack Van Den Eerenbeemd, and Gert-Jan de Vries. A body-conforming tactile jacket to enrich movie viewing. In *World Haptics 2009-Third Joint EuroHaptics conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 7–12. IEEE, 2009.
- [3] Satoshi Hashizume, Shinji Sakamoto, Kenta Suzuki, and Yoichi Ochiai. Livejacket: Wearable music experience device with multiple speakers. In *International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions*, pp. 359–371. Springer, 2018.
- [4] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Benjamin Outram, Kouta Minamizawa, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, p. 20. ACM, 2016.
- [5] Ping-Hsuan Han, Yang-Sheng Chen, Kong-Chang Lee, Hao-Cheng Wang, Chiao-En Hsieh, Jui-Chun Hsiao, Chien-Hsing Chou, and Yi-Ping Hung. Haptic around: multiple tactile sensations for immersive environment and interaction in virtual reality. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, p. 35. ACM, 2018.
- [6] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L Klatzky, Scott E Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson P Sample. Force jacket: Pneumatically-actuated jacket for embodied haptic experiences. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 320. ACM, 2018.
- [7] Tomosuke Maeda and Tetsuo Kurahashi. Thermodule: Wearable and modular thermal feedback system based on a wireless platform. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, p. 14. ACM, 2019.
- [8] Kouta Minamizawa, Yasuaki Kakehi, Masashi Nakatani, Soichiro Mihara, and Susumu Tachi. Techtile toolkit: a prototyping tool for design and education of haptic media. In *Proceedings of the 2012 Virtual Reality International Conference*, p. 26. ACM, 2012.
- [9] Ali Israr, Siyan Zhao, Kyna McIntosh, Zachary Schwemler, Adam Fritz, John Mars, Job Bedford, Christian Frisson, Ivan Huerta, Maggie Kosek, et al. Stereohaptics: a haptic interaction toolkit for tangible virtual experiences. In *ACM SIGGRAPH 2016 Studio*, p. 13. ACM, 2016.
- [10] Eisuke Fujinawa, Shigeo Yoshida, Yuki Koyama, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Computational design of hand-held vr controllers using haptic shape illusion. In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, p. 28. ACM, 2017.
- [11] Kentaro Yasu. Magnetic plotter: a macrotexture design method using magnetic rubber sheets. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4983–4993. ACM, 2017.
- [12] Masa Ogata. Magneto-haptics: Embedding magnetic force feedback for physical interactions. In *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 737–743. ACM, 2018.
- [13] Ken Nakagaki, Artem Dementyev, Sean Follmer, Joseph A Paradiso, and Hiroshi Ishii. Chainform: A linear integrated modular hardware system for shape changing interfaces. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 87–96. ACM, 2016.
- [14] Yuichiro Katsumoto. Bottomless joystick. In *SIGGRAPH ASIA 2016 Emerging Technologies*, p. 6. ACM, 2016.
- [15] Hrvoje Benko, Christian Holz, Mike Sinclair, and Eyal Ofek. Normaltouch and texturetouch: High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 717–728. ACM, 2016.