

Phantom Sensation を応用した自転車用ヘルメット型触覚通知システムの提案

高橋 瑠生斗* 坂本 大介*

概要. 自転車の走行において、自動車は重大な危険要因である。既存の車両接近通知は、スマートフォンやサイクルコンピュータの画面表示による視覚情報、あるいは音声による聴覚情報を用いるものが主流である。しかし、これらの手法は前方不注意を誘発したり、環境音を遮断してしまうなど、安全走行の観点から致命的な課題を抱える。そこで、本稿では、phantom sensation（感覚漏斗現象）を応用した自転車用ヘルメットによる新しい触覚通知システムを提案する。本システムでは、ヘルメットに複数のリニア共振アクチュエータを配置し、車両の接近や通過を頭部への触覚刺激として直感的に伝達する。これにより、利用者は視覚・聴覚を妨げられることなく走行に集中したまま情報を取得できる。本稿では、システム構成の概要を示すとともに、その有効性および実用性の検証に向けたデバイス設計について論じる。

1 はじめに

健康志向や環境意識の高まりを背景に、自転車は日常生活における身近な移動手段として再評価されている。一方で、利用の拡大に伴い、歩行者との接触事故など安全確保が課題として指摘されている。このような状況の中、交通安全を支援するための情報通信技術を活用した自転車の安全支援や危険通知の取組が注目されている [10]。特に都市部での自転車走行には高い注意力が求められ、走行者は視覚と聴覚を集中させて常に周囲のリスクを把握し、衝突を回避する必要がある。現在の主流の手法は、サイクルコンピュータの画面を用いた視覚的通知や、イヤホン・スピーカ機能による聴覚的通知である [9]。しかし、視覚的通知は前方不注意を誘発したり [6]、情報確認のために停止を要する場合がある。一方で、聴覚的通知は車両の接近音などの環境音を遮断する恐れがあり、風切り音や騒音環境下では情報が伝わりにくいという課題を抱える。

そこで本実装は、phantom sensation（感覚漏斗現象）を応用した、頭部への触覚刺激による方向提示手法を提案する。phantom sensation とは、複数の刺激を同時に提示することで、中間位置に仮想的な振動源を知覚する現象を指す。この現象を頭部で利用することで、少数の振動子によって広範囲かつ直観的な方向提示が可能となる。

頭部に触覚を提示する研究はいくつか行われており、4つの振動子を用いて振動の回数や場所により方向を提示する手法 [8] や、ヘッドマウントディスプレイ（Head-Mounted Display ; HMD）を用いて

後頭部に phantom sensation を提示し、没入感を高める研究 [5]、また、アクチュエータの位置によって phantom sensation の知覚特性が異なることを示した研究 [3] などが報告されている。

本稿では、自転車用ヘルメットに装着可能な触覚システムを提案し、その有効性を検証することを目的とする。特に、頭部全周（360度）に対して phantom sensation を試みる点、および実際の自転車走行環境での使用を試みる点に新規性がある。本稿では、試作したプロトタイプ構成とその課題について述べる。

2 提案システム

本章では、提案システムのプロトタイプについて述べる。図1に作成した触覚デバイスの外観を示す。



図 1. 実装したハードウェアおよびデバイスの外観

2.1 phantom sensation の利用

phantom sensation とは、身体表面の複数点に同時に同強度の振動刺激を与えると、それらの中間位置に仮想的な振動源を知覚する現象である。さらに、振動強度に左右差を設けることで、知覚される仮想的な振動位置を強い側へと移動させることができる。この特性を利用することで、少数の振動子によって連続的な移動感を提示することが可能となる。提案システムでは、ヘルメット内側に配置した4つのリニア共振アクチュエータ（Linear Resonant Actuator；LRA）の出力を制御し、頭部への触覚提示を実現する。これにより、後方からの車両の接近や左右からの車両の通過などの情報を直観的に伝達する。

2.2 ハードウェア構成

システムは、制御を行うマイコンボード（Arduino uno）、4つのLRA、アクチュエータ駆動用モータドライバ（DRV2605L）、およびドライバ制御用I2Cマルチプレクサ（TCA9548A）から構成される。LRAはヘルメットの内側に設置し、その配置は先行研究[8]を参考に決定した。また、都市環境下での使用を想定し、周囲の環境音やLRAの動作音が触覚知覚に影響を与えるのを防ぐため、ホワイトノイズを再生した[2][5]。

2.3 ソフトウェア構成

振動の制御にはDRV2605Lのライブラリ[1]を拡張して用いた。特に、setRealtimeValue()関数により、振動強度をリアルタイムで制御できる。先行研究で用いられた[7]、最大振動と最小振動を結ぶ一次関数に基づいて振動強度を線形的に変化させるアルゴリズムを基に、2つのアクチュエータ間で強度を連続的に変化させることで、滑らかな移動感を生成した。触覚パターンは6種類設計し、図2に示す。各パターン600msまたは800msの触覚提示から構成され、1回及び2回の通知を組み合わせた計24通りの触覚パターンを実装した。また、各アクチュエータの位置を確認するため、4つのアクチュエータを個別に駆動させる機能も実装した。これらはPC上から番号入力によって個別制御できるようにしている。

2.4 著者の実際に使用した感覚

4つのアクチュエータを個別に駆動した場合、前方の振動が最も強く感じられ、次いで左側、右側の順で強く感じられたが、大きな差は見られなかった。一方で、後方の振動は最も弱く感じられた。振動を知覚した位置と実際のアクチュエータ位置とのずれは大きくなかった。触覚パターンに関しては、各パターンを識別できたが、後頭部を通過するパターンは感じ取りにくかった。また、通知が1回よりも2回行われた方が認識しやすく、持続時間が短い刺激

ほど差し迫った印象を与えた。

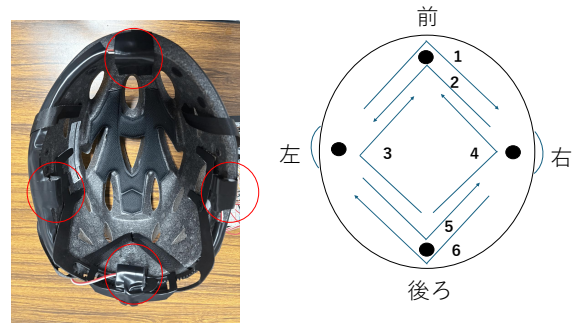


図 2. ヘルメットの LRA の装着位置と、6 通りの触覚パターンを表す図

3 今後の課題

本実装では、phantom sensation を利用した触覚通知システムの基礎的な実装を行い、頭部への振動提示によって方向情報を伝達する可能性を示した。しかし、現段階では以下の課題が残されている。

第一に、振動の知覚位置および感度には個人差が存在し、ヘルメットの装着位置や頭部形状により提示位置の再現性が変動することが確認されている[4]。より安定した提示を実現するためには、ユーザー特性に応じたキャリブレーション機構の導入が求められる。

第二に、走行時の外乱や風圧、ヘルメットの揺れが振動提示の知覚に与える影響については未検証である。今後は、実走行環境を模した評価実験を通じて、振動の強度・提示時間・提示部位などのパラメータ最適化を進める必要がある。

第三に、現システムは警告提示を想定した単方向の情報伝達のみを行っているが、将来的には車両接近の距離や速度に応じた段階的な触覚表現や、他の感覚モダリティ（聴覚・視覚）との統合的な提示手法も検討する。これにより、より安全で直感的な走行支援を目指す。

4 まとめ

本稿では、phantom sensation を応用した自転車用ヘルメット型触覚通知システムを提案した。4つのLRAを制御することで、頭部に連続的に移動する振動を生成し、車両接近方向を視覚・聴覚を妨げずに提示することを目指した。提案システムは、既存の視覚・聴覚中心の通知方式が抱える課題を補う可能性を示しており、安全性の向上と走行時の注意維持に寄与することが期待される。今後は、実走行環境下での評価や、提示アルゴリズムの改良を通じて、高精度な危険通知システムの実現を目指す。

参考文献

- [1] Adafruit. Adafruit DRV2605 Library. https://github.com/adafruit/Adafruit_DRV2605_Library. (2025 年 10 月 21 日参照).
- [2] P. Apparicio and J. Gelb. Cyclists' Exposure to Road Traffic Noise: A Comparison of Three North American and European Cities. *Acoustics*, 2(1):73–86, Feb. 2020.
- [3] O. B. Kaul, M. Rohs, B. Simon, K. C. Demir, and K. Ferry. Vibrotactile Funneling Illusion and Localization Performance on the Head. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, p. 1–13. ACM, Apr. 2020.
- [4] H. Kerdegari, Y. Kim, T. Stafford, and T. J. Prescott. *Centralizing Bias and the Vibrotactile Funneling Illusion on the Forehead*, p. 55–62. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [5] M. Kim, A. Abdulali, and S. Jeon. Rendering Vibrotactile Flow on Backside of the Head: Initial Study. In *2018 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM)*, p. 1–250. IEEE, Aug. 2018.
- [6] J. Ren, Y. Chen, F. Li, C. Xue, X. Yin, J. Peng, J. Liang, Q. Feng, and S. Wang. Road Injuries Associated With Cellular Phone Use While Walking or Riding a Bicycle or an Electric Bicycle: A Case-Crossover Study. *American Journal of Epidemiology*, 190(1):37–43, July 2020.
- [7] J. Seo and S. Choi. Initial study for creating linearly moving vibrotactile sensation on mobile device. In *2010 IEEE Haptics Symposium*, p. 67–70. IEEE, Mar. 2010.
- [8] D.-B. Vo, J. Saari, and S. Brewster. Tacti-Helm: Tactile Feedback in a Cycling Helmet for Collision Avoidance. In *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, p. 1–5. ACM, May 2021.
- [9] G. Zhao, X. Hu, J. Orlosky, and K. Kiyokawa. ReAR Indicators: Peripheral Cycling Indicators for Rear-Approaching Hazards. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI 2024, p. 1–9. ACM, June 2024.
- [10] 国土交通省. 第 2 次自転車活用推進計画. https://www.mlit.go.jp/road/bicycleuse/good-cycle-japan/assets/pdf/jitensha_katsuyo.pdf, 2021. (2025 年 10 月 21 日参照).

未来ビジョン

近年、自転車の安全利用に関する法整備や取り締まりが強化され、ヘルメット着用の努力義務化など、安全対策の重要性が高まっている。しかし、実際の着用率は依然として低く、その要因として、髪型の乱れや携行の不便さなど、装着に伴う心理的・物理的負担が指摘されている。本実装では、ヘルメットに新たな付加価値を与えることで、その着用を促進し、自転車利用者の安全意識向上につなげることを目的とする。特に、車両接近を直感的に伝える触覚通

知機能を付与することで、走行時の安全性を高めるとともに、ヘルメットの有用性を再定義することを目指している。さらに、本システムは視覚や聴覚に依存しない情報提示を可能とするため、視覚障害者や上肢に障害を有する利用者などに対しても有効に機能する可能性がある。このように、本実装は、交通安全の向上に加え、身体的制約を持つ人々の支援にも応用可能な基盤技術として位置づけられる。