

修士学位論文要約（平成29年3月）

バーチャル環境における感覚・運動ミスマッチに関連した マウス脳波の計測と解析

中澤 邑支朗

指導教員：中尾 光之， 学位論文指導教員：片山 統裕

Measurement and analysis of mice EEG related to sensorimotor mismatch in virtual environment

Yushiro NAKAZAWA

Supervisor: Mitsuyuki NAKAO, Research Advisor: Norihiro KATAYAMA

In this study, we developed a virtual reality (VR) experimental system for mice to investigate the neural mechanisms of sensory-motor mismatch in the brain, because it allows to control the visual feedback precisely during voluntary locomoting activity. Because visual aliasing phenomena have the potential to induce sensory-motor mismatch, they were completely suppressed based on the theoretical analysis of the virtual environment and visual feedback. It was found that the hippocampal electroencephalographic (EEG) theta activity occurred during locomotion and its frequency and amplitude correlated with the locomotion speed. In a part of animals, the amplitude of hippocampus theta activity transiently increased after the visual feedback manipulation during locomotion. However, the hippocampal activity did not change in response to optical flow stimulation when the animal was staying immobile. These results suggest that the change in hippocampal theta activity after the visual feedback manipulation would be a response to sensory-motor mismatch.

1. はじめに

随意運動中、脳内では運動によって得られる感覚フィードバック (FB) を無意識に予想し、実際に得た感覚との誤差を計算していると考えられている。しかし、その脳内機構は十分に明らかになっていない。我々は感覚 FB を正確かつ容易に制御できるバーチャルリアリティ (VR) 行動実験系を構築し、この問題に取り組んできた¹⁾。このシステムを用いて、様々な感覚情報の連合機能を担う海馬脳波を測定したところ、一部のマウスで感覚 FB 操作時に一過性の反応が観察された²⁾。この現象が感覚・運動のマッチングに関連した反応である可能性が示唆されたが、再現性が十分でなく、確証を得るには至っていない。

本研究では、従来の VR システムの問題点を克服新しいマウス用 VR システムを開発した。このシステムを用い、VR 空間を行動中のマウスにおいて海馬脳波を計測し、自発運動と海馬シータ波の関係を解析した。さらに、感覚 FB 操作に対する海馬脳波の反応について再検討した。

2. マウス用 VR 行動実験系

開発したマウス用 VR システムの概観を図 1 に示す。この実験系は、マウスの直線的な歩行運動をモニターする円柱式トレッドミル、視覚 FB を与える液晶ディスプレイ (27V 型 LCD, LG 電子 27MP77MH-P)、および

バーチャル環境シミュレータ (Windows 10 Pro PC) で構成される。トレッドミルの周囲に配置した 2 枚の LCD により、マウスの広い視野の大部分をカバーした (水平方向 236 度、垂直方向 50 度)。マウスは頭部を固定された状態で、円柱式トレッドミル上に配置されており、前後方向にのみ自由に移動することができる。

バーチャル環境シミュレータの開発には、3D ゲーム開発エンジンである Unity 5 (unity3d.com) を用いた。バーチャル空間内には無限長の直線通路を設置し、通路の両壁には周期的な縦縞模様を描いた。トレッドミル上のマウスの移動距離を光学センサで読み取り、その動きに応じて VR 空間内におけるマウスの視界を計算して LCD に表示することにより、VR 環境を構築した。

3. VR 空間における視覚エリアシングの抑制

開発した VR システムの動作試験中、視覚ディスプレイに不自然な視覚現象が観察された。第一は、遠方の縞がちらちらする空間的エリアシング現象である。第二は、走行速度が高い時に実際の移動方向とは逆方向に移動しているように見える時間的エリアシング現象である。これらは意図しない感覚・運動ミスマッチを引き起こす可能性があるため、次の方法で完全に抑制した。空間的エリアシング現象については、VR チャール空間の壁に貼り付けるテクスチャ

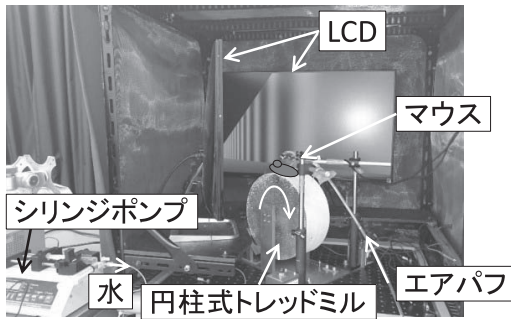


図1 マウス用 VR 行動実験系

にアンチエイリアシング空間フィルタを適用することにより抑制した。時間的エイリアシング現象に対しては、バーチャル直線通路の表示過程を数理モデル化してエイリアシングが生じない条件を導出し、バーチャル空間のパラメータを決定した³⁴⁾。

4. 感覚・運動ミスマッチに関連した海馬脳波の解析

本研究は東北大学動物実験委員会の承認の下行われた。C57BL/6 マウス ($n = 5$) の海馬に脳波記録電極を刺入し、バーチャル空間を走行中の海馬脳波を測定した。実験は、In dark, ノーマル FB, 視覚 FB 操作, Optical Flow 操作の 4 条件で行った。5 匹中 2 匹は、解析条件を満たす自発運動をしなかったため、これらを除いた 3 匹分のデータを解析した。

ノーマル FB 条件で観察された海馬シータ波の周波数と走行速度との相互相関関数を図 2 に示す。これより、両者の間には中程度の相関があり、相関が最大になる遅れ時間が 100 ms (>0) であることから、海馬シータ波の周波数がマウスの自発運動に先行して変動することが分かる。この傾向は実験条件およびマウスによらず共通して見られた。海馬シータ波の振幅と走行速度についても、同様の結果がすべてのマウスにおいて観察された。

視覚 FB 操作時の海馬脳波を解析した結果、マウス M18 では視覚 FB を OFF→ON 及び ON→OFF 切り替え後に、またマウス M17 では OFF→ON 切り替え後に海馬シータ波のパワーが一過性に増加する現象が観察された。この現象が単に視覚刺激 (Optical flow) に対する反応である可能性を検討するため、マウスが静止状態にある時に Optical Flow を操作する視覚刺激を与え、海馬脳波を解析したが、海馬シータ波に変化は生じなかった。このことから、移動運動中に視覚 FB 操作で生じた海馬シータ活動の変化は感覚・運動のマッチ/ミスマッチに関連した反応である可能性が示唆される。しかし、反応する条件が個体により異なっているため、明確な結論を得ることはできなかった。

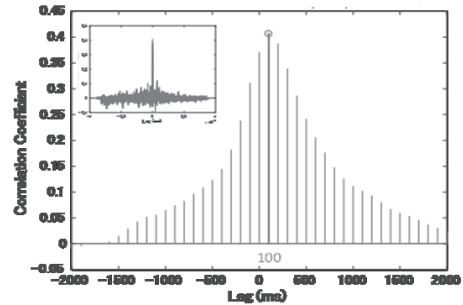


図2 海馬シータ波の周波数と走行速度の相関関数。Lag >0 で相関関数がピーク値をとることから周波数の変動が走行速度変化に先行することが示唆される。

5. まとめ

本研究では、従来のシステムの問題点を克服した VR システムを新たに開発した。VR 空間で生じる視覚的エイリアシング現象に対しては、テクスチャの空間フィルタ処理、及び、VR 空間と視覚 FB 系のモデル化・解析により、完全に抑制することができた。

開発した VR システムを用いてバーチャル空間を自発行動中のマウスの海馬脳波を解析した結果、海馬シータ波の周波数と振幅がマウスの運動に先行して変動することを見出した。また、一部のマウスにおいては、視覚 FB を操作した直後に海馬シータ活動が一過性に増加する現象が確認された。この現象は、静止状態に同様の視覚刺激を与えても観察されないことから、感覚・運動のマッチ/ミスマッチに関連した反応である可能性が示唆される。しかし、個体により反応する条件が異なっており明確な結論は得られなかった。さらに例数を積み上げていく必要があるだろう。

本実験システムは大脳皮質活動の光イメージング計測系と組み合わせることが可能である。今後はより広い脳の領域で神経活動を測定し、感覚・運動ミスマッチを検出する脳内領域を探索することを通じ、そのメカニズムの解明が進むことを期待したい。

文献

- 1) N. Katayama *et al.*, Proc. Ann. Conf. SICE 2012, 791-794 (2012).
- 2) 日高慶太, 東北大学 大学院情報科学研究科修士学位論文, (2013).
- 3) 中澤昌支朗, 片山統裕, 日高慶太, 中尾光之, 計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム (LE2016) 論文集 (2016).
- 4) 中澤昌支朗, 片山統裕, 町田祉永, 中尾光之, 信学技報, MBE 116, 21-24 (2016).