

発表論文

Marin Vargas A, Bisi A, Chiappa AS, Versteeg C, Miller LE, Mathis A. Task-driven neural network models predict neural dynamics of proprioception. Cell. 2024;187: 1745–1761.e19. doi:10.1016/j.cell.2024.02.036

研究目的・概要

固有受容は、身体の状態を感知して脳に伝えるシステムである。しかし、固有受容システムは入力をどのように処理して脳に伝えているのかはわかっていない。この研究では、筋紡錘が受け取る筋肉の長さおよびその変化速度が、どのようにコードされ、アカゲザルの楔状束核 (CN) と体性感覚皮質 (S1) に伝わるのかを、深層学習を用いて解析した (図 1)。CN, S1 におけるニューロンの発火率に対して直接フィットさせるのではなく、まず人工データを用いて生物学的な仮説に対応したタスクが解けるようにモデルを訓練し、訓練後のモデルの転移学習によりニューロンの発火率を予測した。その結果、肢の位置と速度を予測することを目的とした計算タスクは、CN と S1 の両領域の神経活動を予測する上で最も優れていた。このような傾向は、受動的な運動ではなく能動的な運動を予測する場合に顕著に見られた。

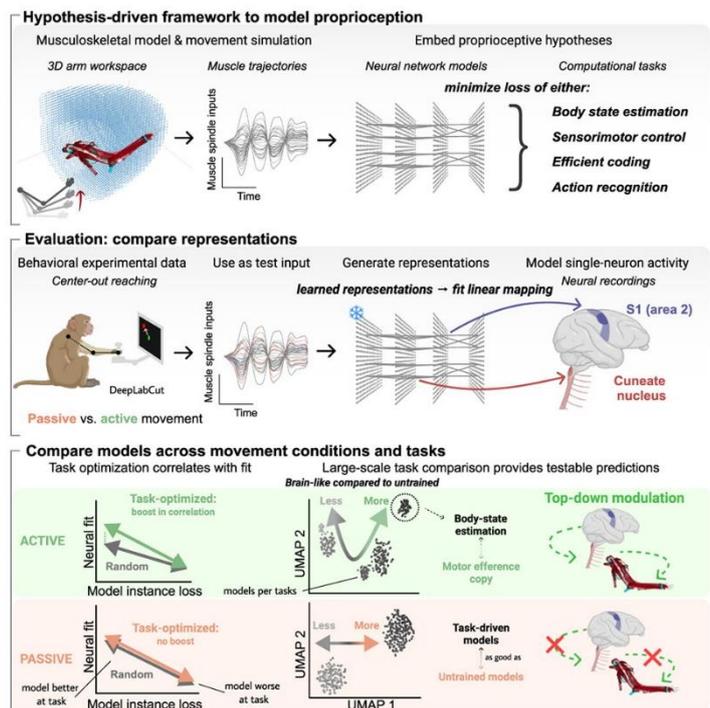


図 1. 研究概要.

先行研究と比べて何がすごい？技術やアプローチのキモはどこ？

- 実験データとして、アカゲザルのニューロンの発火率を用いている。非ヒト霊長類であるサルに、画面の表示に合わせて操作子を操作させる、という複雑なタスクをこなさせる一方で、その際の CN と S1 の神経活動を計測している。これによって、ほかの生物種よりもヒトに近い知見が得られることが期待される。
- ニューロンの発火率について直接フィットさせるのではなく、まず人工データを用いて生物学的な仮説に対応したタスクが解けるようにモデルを訓練し、訓練後のモデルの転移学習によりニューロンの発火率を予測した。このようなタスク駆動型モデルにより、他のモデルよりも優れたフィット、

および生物学的仮説の検証が可能となっている。

どのようにこの手法・仮説の有効性を検証したのか

タスク駆動型モデルの有効性を示すため、筋紡錘が受け取る筋肉の長さとその変化速度からニューロン発火率を予測する複数のモデルを構築して比較した。線形モデルや、ニューロン発火率に対して直接フィットさせるデータ駆動型モデルよりも、タスク駆動型モデルのほうが良い予測性能が示された (図2)。

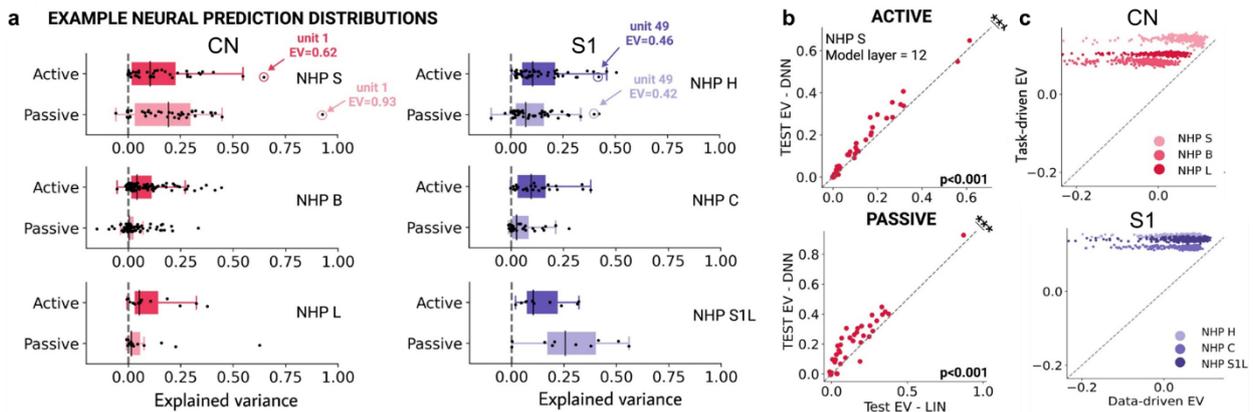


図2. タスク駆動型モデルの予測性能 (a) およびその線形モデル (b) またはデータ駆動型モデル (c) との比較. EV, explained variance; NHP, non-human primate; DNN, deep neural network.

その他、議論した内容 (ネガティブコメントや limitation もあれば)

- 実験は、画面の表示に合わせてサルが操作子を操作する Active な条件と、操作子がサルの意思と関係なく動く Passive な条件で行っている。これらの条件は完全に区別できるのか？
- モデルの予測性能を分散説明率で評価しているが、その中央値は 0.3 以下である。一般的なフィッティングにおいては、この分散説明率は低いと思われるので、生物学的な仮説の検証に懸念がある。
- モデルでは、層を増やすほどテストデータに対するフィットが向上し、CN, S1 いずれにおいても、第 10 層をフィッティングに用いるのが最適だった。一方で、解剖学的には筋紡錘から CN は 2 つのシナプス、S1 はさらに 2 つのシナプスで離れているだけである。したがってモデルの構造と解剖学的見地の間に乖離があると考えられる。

この研究をさらに発展させるとしたら

- 著者らは最後に、Active な条件での CN と S1 はトップダウンで調節される可能性を示唆した。この示唆は、実験は難しくとも、モデルを使って検証することが望まれる。
- 層の数が多くても予測性能がそれほど高くない、ということは、ニューロンで行われている情報処理と深層学習モデルでの計算に大きな乖離があるのかかもしれない。あるいは、実験での生物学的または計測におけるノイズが大きいのかかもしれない。今後は、より優れたモデルや実験の構築が望まれる。