

[研究助成 (A)]

全身体 BMI

2241020

研究代表者
(助成金受領者)東京科学大学
大学院医歯学総合研究科

准教授 平 理一郎

[研究の目的]

BMI は、脳活動を機械やコンピュータへ接続することで、失われた運動機能や意思伝達機能を補う技術として発展してきた。これまでの研究では、カーソル移動、文字選択、ロボットアームの到達運動など、比較的少数の自由度を持つ出力の制御に大きな成果が得られている。一方で、私たちが日常的に行う身体運動は、個々の筋や関節を独立に動かすものではなく、四肢、体幹、頭部を含む全身の協調、姿勢の維持、重力方向の推定、地面や外界との相互作用を含む、きわめて高次元で動的な過程である。

このため、BMI をより自然な身体操作へ拡張するうえで、脳活動から単一の運動変数を読み出すだけでは十分ではない。未解決の問題は、脳が身体全体をどのような単位として表現し、身体と環境の関係をどのように統合しているのかである。特に、歩行や姿勢制御では、四肢の位置や速度だけでなく、身体が地面に対してどのように傾き、重力方向に対してどのように配置され、次の運動へどのように準備されているかという情報が重要になる。これらの情報は、将来的に仮想身体や外部機械を自然に操作するための中核となる。本研究では、この未解決問題に対して、全身体 BMI という視点から取り組む。すなわち、脳活動を身体の一部の運動出力に対応づけるだけでなく、身体全体の状態、運動意図、姿勢、環境との関係を含む神経表現として捉え、それを仮想空間上の身体へ接続す

るための基礎原理を明らかにすることを目指す。これにより、脳、身体、環境、機械を連続した感覚運動システムとして理解し、ALS や脊髄損傷などにより身体運動が制限された人に対して、より自然で高自由度な身体操作を可能にする次世代 BMI の基盤を築く (図 1)。

[研究の内容、成果]

本研究では、全身体 BMI の実現に向けて、神経活動、身体運動、環境情報、仮想身体を連続的に扱う実験系と解析系を構築した。1 光子広視野カルシウムイメージングによるリアルタイム仮想身体制御、全身体骨格モデルと逆運動学によるアバター制御、2 光子カルシウムイメージングと 6 自由度プラットフォームによる身体・環境表現の解析、さらに 2 光子 BMI に向けたリアルタイム画像転送と表現学習を実現した。

【行動解析のリアルタイム処理】

全身体アバターを操作するためには、動物の全身体情報を正確に計測する必要がある。私たちはマシンビジョンカメラ 4 台を頭部固定マウスの周囲に配置し、200~300 fps で同時に動物身体を記録するシステムを構築した (図 2)。この 2 次元画像からなる時系列データに対し深層学習ツール DeepLabCut を用いて 2 次元画像中の姿勢情報を抽出した。さらに 4 つのカメラで特定できた 4 組の 2 次元情報から各体部位

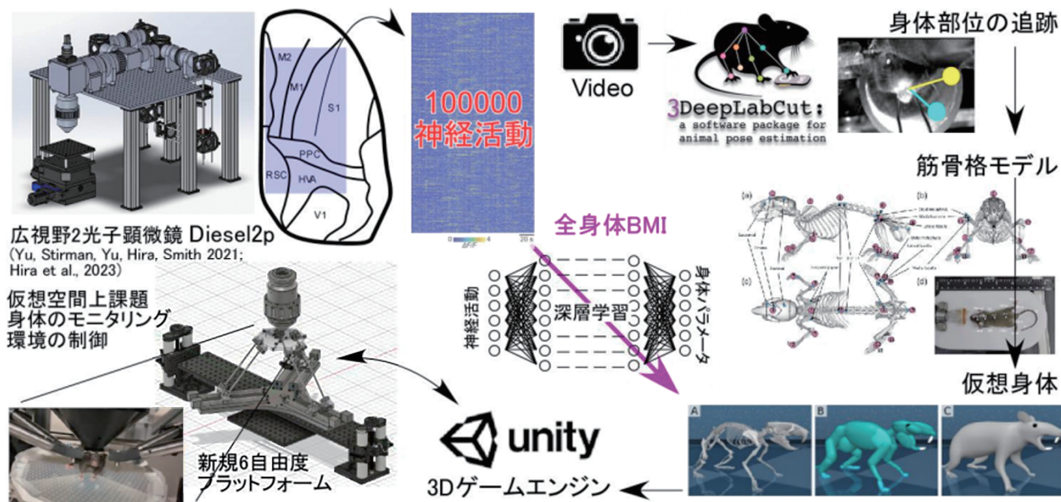


図1 本研究計画の全体構想。広視野2光子顕微鏡 Diesel2p により、大脳皮質の運動野、体性感覚野、頭頂連合野などから大規模に神経活動を記録する。同時に、ビデオ撮影と DeepLabCut により、前肢、後肢、体幹、尾部などの身体部位を追跡する。得られた神経活動と姿勢情報を対応づけ、深層学習により身体状態を推定する。さらに、身体座標を筋骨格モデルに変換し、Unity 上の仮想身体として再構成する。新規6自由度プラットフォームにより姿勢や地面傾斜を制御し、身体と環境の関係を神経活動から読み出す。最終的に、神経活動に基づく仮想身体制御を実現する。

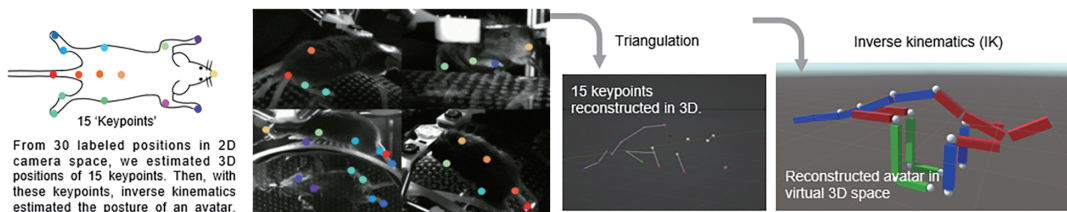


図2 実際のマウス運動を仮想身体へ変換する手順。ホイール上で運動するマウスを複数台のカメラで撮影し、各画像上で前肢、後肢、背部、尾部など15点の身体特徴点を DeepLabCut により検出した。各特徴点は複数視点の2次元座標として得られるため、カメラ間の幾何情報を用いた三角測量により、3次元空間内の keypoint 座標へ再構成した。次に、この3次元座標を入力として逆運動学を適用し、限られた特徴点情報から関節位置と骨格姿勢を推定した。これにより、実際のマウス身体運動を Unity 上の仮想3D アバターとして再現することが可能になった。本手法は、現実身体の運動を仮想身体へリアルタイムに転送するための基盤となる。

の3次元座標を特定するアルゴリズムをカメラ画像のゆがみを補正する形で新規に作成した。これによって非常に正確な全身の3次元姿勢トレースが可能となった。

カメラ画像の保存→DeepLabCutによる姿勢抽出→3次元再構成→逆キネマティクス→Unity上で描画、の工程をリアルタイム化した。その結果、このループが1台のPCで完結でき、30fpsのスピードで撮像からアバターの操作までを安定的に実行することができた。

アバター自体をリアリスティックに作るために、骨格モデルを作った。簡易版は四肢や体幹を円柱によって近似するもので、例えば前肢上

部や前肢下部などに分けて実際にマウスの身体を解剖し骨格を実測することでこれらの円柱の長さを特定した。これを3次元ソフト Blender で構成し、3次元ゲームエンジン Unity 上で動作させることに成功した(図3)。

【1 光子カルシウムイメージングと姿勢の関係】

頭部固定マウスに対して、1光子カルシウムイメージングを行った(図4)。この神経活動と同時に取得した姿勢情報から、神経活動がどの姿勢情報に対応しているのかをリッジ回帰で求めた。その結果、相関係数 ~ 0.7 で姿勢情報を再現することができた。

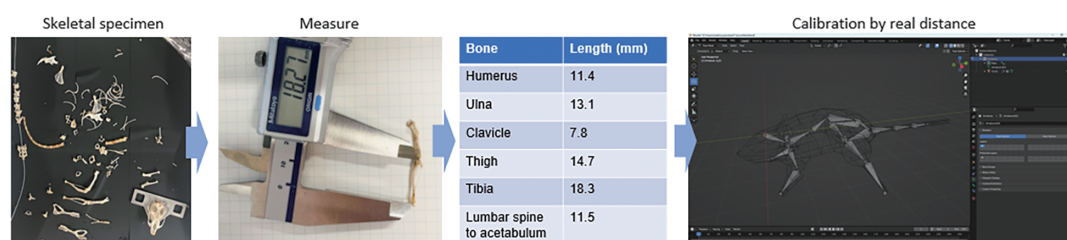


図3 仮想マウス骨格モデルの作成手順。まず、実際のマウス標本から骨格を取り出し、上腕骨、尺骨、鎖骨、大腿骨、脛骨、腰椎から寛骨臼までの距離など、仮想身体の形状を決める主要な骨長を計測した。得られた実測値をもとに、Blender上でマウスの骨格モデルを作成し、各骨の長さと同関節位置を実際の身体寸法に合わせて調整した。さらに、実空間での距離情報を用いてモデル全体のスケールを校正し、DeepLabCutから得られる身体特徴点や3次元再構成座標と対応づけられるようにした。この手順により、実際のマウス身体寸法に基づいた仮想身体を構築し、逆運動学とUnity制御に利用できるモデルを整備した。

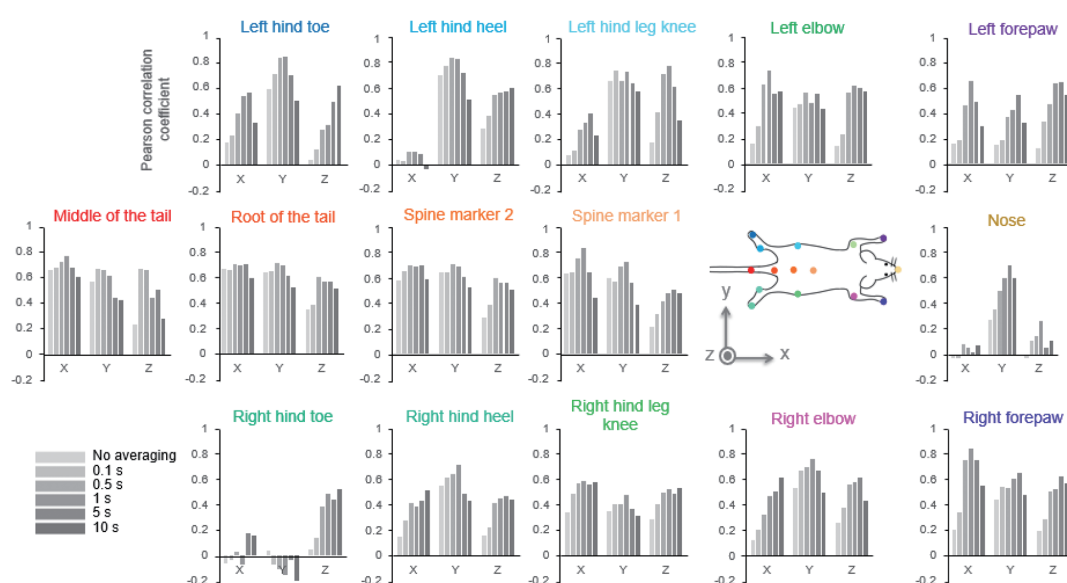


図4 広視野1光子カルシウムイメージング画像から全身体3次元姿勢を予測した結果。中央の模式図は解析対象とした15個の身体keypointを示す。各小パネルは、鼻、前肢、肘、後肢膝、後肢踵、後肢つま先、背部、尾根部、尾中央の各keypointについて、X、Y、Z座標ごとの予測精度を示している。縦軸は実測座標と予測座標のPearson相関係数である。棒の濃淡は、座標データに適用した移動平均の時間窓を表し、平滑化なし、0.1秒、0.5秒、1秒、5秒、10秒を比較した。体幹および尾部に近いkeypointでは比較的安定した予測精度が得られ、後肢の一部座標でも高い相関が認められた。全体として、移動平均の時間窓を長くすると予測精度が上昇し、カルシウム画像からは瞬間的な肢位置よりも、遅い時間スケールの姿勢変化や運動状態が読み出しやすいことが示された。

【カルシウムイメージングのリアルタイム処理によるアバター操作】

これをリアルタイム化するために、LabVIEWで取得した画像をpythonで処理して3次元姿勢情報に変換し、それをもとに逆キネマティクスによって骨格情報に変換する流れを高速化した(図5)。その結果、ダミーデータを使用した実証実験のレベルではビデオレートでのリアルタイム処理に成功した。

【2光子イメージングと6自由度プラットフォームによる身体・環境表現の解析】

全身体BMIで読み出す神経情報の構造を明らかにするため、広視野2光子カルシウムイメージングと6自由度プラットフォームを組み合わせた実験を行った。6自由度プラットフォームにより、頭部固定マウスの支持面を制御し、複数方向の地面傾斜、傾斜保持中の回転、上下動などを与えた。同時に、大脳皮質の広範囲から神経細胞活動を記録し、複数台カメラによる

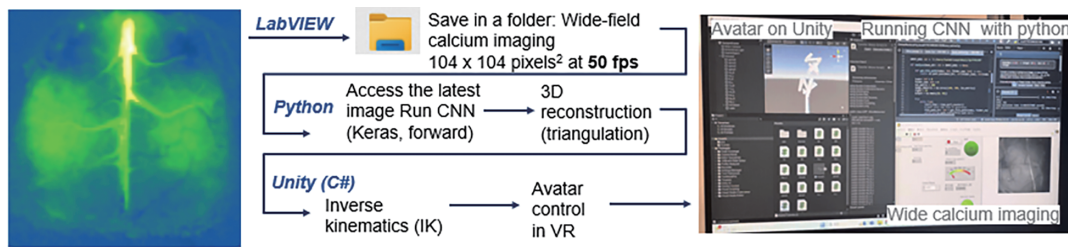


図5 広視野1光子カルシウムイメージングによる神経活動駆動型アバター制御系。左は大脳皮質表面から取得したGCaMP蛍光画像を示す。LabVIEWで取得した広視野カルシウム画像は、 104×104 pixels, 50 fpsの時系列データとして保存される。Pythonプログラムは保存フォルダ内の最新画像にアクセスし、Kerasで実装したCNNモデルを用いて、画像から運動状態または身体座標を推定する。推定された出力は3D再構成処理へ送られ、Unity側に入力される。UnityではC#で実装した逆運動学により、推定された運動情報を仮想身体の関節運動へ変換し、VR空間内のマウスアバターを制御する。右は、Unity上のアバター、PythonによるCNN推論、広視野カルシウムイメージング画像を同時に動作させている実装画面を示す。本系により、広視野カルシウム画像の取得、CNN推論、運動情報の変換、仮想身体制御を連続的に接続し、神経活動に基づくリアルタイム仮想身体制御を実装した。

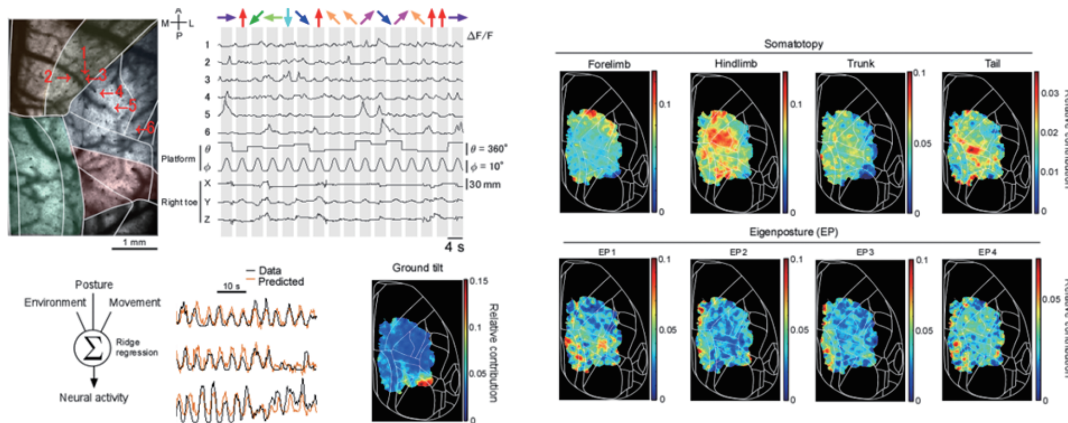


図6 広視野2光子カルシウムイメージングと全身姿勢解析による大脳皮質の身体表現。左上は、大型頭蓋窓を通して記録した大脳皮質の領域配置と、代表的な神経細胞活動を示す。左下では、神経活動、姿勢、運動、環境情報を説明変数として用い、ridge regressionにより各要素の神経活動への寄与を推定した。実測値と予測値の比較により、身体姿勢や地面傾斜に関連する活動成分を評価した。中央下のマップは、地面傾斜に対する相対的寄与を皮質上に可視化したものである。右は、前肢、後肢、体幹、尾部に対応するsomatopy、および姿勢変化を低次元成分として表したEigenpostureの寄与マップを示す。

全身姿勢計測も行った。これにより、神経活動、姿勢変化、環境傾斜を同じ時間軸で解析できるデータセットを作成した(図6)。

解析では、地面傾斜方向に選択的な神経細胞を同定し、運動野、体性感覚野、頭頂連合野、後部皮質領域を含む複数領域で応答を比較した。傾斜方向に応じた活動は複数の感覚運動関連領域に分布していた。さらに、傾斜条件、姿勢変化、運動状態を比較することで、地面傾斜に伴う神経活動と身体運動に伴う神経活動の関係を解析した。複数領域間の活動構造も比較し、身体と環境の関係が大脳皮質内でどのように共

有されるかを調べた。この解析により、全身BMIに必要となる神経表現として、四肢座標や走行速度に加えて、姿勢、重力方向、地面傾斜を含む身体・環境情報を扱う必要があることを明確にした。

【2光子BMIに向けたリアルタイム画像転送と表現学習】

本研究の後半では、2光子カルシウムイメージングをBMI制御へ接続するためのリアルタイム基盤を整備した。2光子画像は細胞解像度の神経活動を含むため、広視野1光子イメージ

ングで構築したリアルタイム仮想身体制御を、より高解像度の神経活動へ拡張するうえで中核となる。撮像装置で取得した2光子画像を外部計算機へ低遅延で転送するシステムを構築し、転送された画像を用いて神経活動の特徴抽出と表現学習を行う解析系を整えた。

表現学習では、細胞活動を個別に抽出してからモデルへ入力する方法に加えて、画像全体または画像から得られる低次元特徴量を用いて、運動状態、姿勢、環境傾斜に対応する潜在表現を学習する方法を検討した。これにより、2光

子画像に含まれる高次元神経活動を、全身体BMIに必要な身体・環境情報へ結びつける解析基盤が得られた。

[成果の発表、論文など]

Imamura, F., Imamura, H., Hira, R., Isomura, Y†, & **Hira, R†**. (2025). Ground tilt representation in the rodent cerebral cortex. **bioRxiv**, 2025-09. (†co-correspondence)

Ryoya Yamamoto, Hiroki Mori, Satoshi Oota, Yoshikazu Isomura, **Riichiro Hira**, Fumiya Imamura. "Development of real-time control of virtual whole-body model using wide field calcium imaging" 2LBA-006 APPW2025 March. 18 Makuhari Messe <ポスター賞>