



DeepLabCut を用いたオカダンゴムシの腹側からの行動解析

Behavioral analysis from the ventral side of pill bug using DeepLabCut

岡凌平¹⁾, 田邊 匠¹⁾, 永谷直久¹⁾
Ryohei Oka, Takumi Tanabe, and Naohisa Nagaya

1) 京都産業大学 (〒603-8555 京都市北区上賀茂本山, i2186032@cc.kyoto-su.ac.jp)

概要 : 動物の行動解析ツールとして, 従来の手法よりも少ない学習コストで所望の身体部位の位置推定を実現する DeepLabCut (DLC) が注目されている. しかし, 多関節の節足動物の運動に対して, DLC がどこまで適応可能かに関する実証例は少ない. 本研究では, DLC をオカダンゴムシの腹側からの撮像データに対して適応する際の, 撮像解像度と位置推定の精度の関係や, 歩行に関わる付属肢の連動性に着目して解析を行った.

キーワード : 動物行動学, DeepLabCut, *Armadillidium vulgare*, computational ethology

1. はじめに

生物の行動計測は, 特定の行動を引き起こす要因を明らかにすることができ, 主に動物行動学において, 節足動物の行動特性は古くから視覚的に観察し, 評価されてきた. 動画解析手法の確立により, より詳細かつ正確に動きや行動パターンを定量的に評価することが可能になった. しかし, 画像解析のためには, 観察対象の行動範囲を容器で制限する必要がある. このような行動制限のない条件下での計測を実現するために, 2000 年代初頭からバーチャルリアリティ (VR) 技術を用いた行動計測装置の開発が進められている [1]. 我々が開発に携わってきている昆虫行動計測用の全方向運動補償装置 ANTAM [2] もその一つであるが, これらの手法では腹側からの計測はほとんど試みられていない. 腹側から動画を計測することで, 歩行時の脚の詳細な動きを計測することができ, 刺激に応じて体軸を変化させる際の脚と体節の連動性を評価することが可能になる. また, 脱皮による体型変化に伴う歩容の変化を定量的に評価することが可能となる.

我々は運動補償機構を備えた腹側からの行動計測システムである ANTAM-Q の開発を行っている. 本システムの開発には運動補償機構を含むハードウェアの再設計と, 腹側からの動画取得および解析手法の開発がそれぞれ必要である. 本研究では, オカダンゴムシの腹側から得られた動画解析手法として, DeepLabCut [3] を用いた解析の試験的取り組みを行った. 作成したモデルで推論を行い, 部位別の推論の妥当性, 腹側撮影から得られた情報の報告を行う.

2. 提案手法

2.1 DeepLabCut について

DeepLabCut (DLC) は Mathis らによって開発されたマーカーレスで動物の姿勢推定を行えるツールで, 転移学習を用いた手法により, 動物の特徴点推定や追跡を行うことができる. このツールの最大の利点として, 従来のように大量のデータセットを用意せずに, 精度の高い結果が得られる点である [3].

2.2 使用するカメラ

オカダンゴムシの腹側を撮影するにあたって, 十分な解像度を有したカメラとして Luxonis 社の OAK-1 を使用した. このカメラは最大 4K (3840 x 2160 pixel) 解像度で 30FPS の高解像度の撮影が可能である. また H265 の圧縮方式で保存することで, Raspberry Pi Zero のような性能の低いマイコンボードでも 4K 解像度で 30FPS の動画を処理することができる.

2.3 計測条件

図 1 のような撮影台を 3D プリンタで作成した. この台に体長 10mm 程度のオカダンゴムシを入れたシャーレを載せ, 腹側から撮影を行った. また, ダンゴムシが画面外にはみ出さないように, シャーレ上に更に小型のシャーレをダンゴムシの上からかぶせて, 行動範囲を狭めた.



図1 撮影台

図2はOAK-1を用いて、オカダンゴムシを腹側から撮影したものである。解像度を4K(3840×2160)、フレームレートを30FPSとした。OAK-1のレンズカメラからシャーレまでの距離は約7.6cm、空間解像度は1030ppiであった。

2.4 学習データの作成

撮影した長さが1~2分のダンゴムシの動画10本を使用した。それぞれの動画のダンゴムシの個体は全て異なり、動画1本につき1つの学習モデルを作成した。学習に使うフレームは、学習時間を極力減らすために、YOLOV5を用いて動画のフレームをそれぞれダンゴムシの周辺だけになるようにクロップして保存し、その中からデータセットとして用いる80枚を抜き出した。また、推論に用いる動画も推論時間を短縮するために、動画の一部をクロップした。これら一連の処理はそれぞれ別のツールを用いる必要があり、煩雑であったので、まとめて下処理が行えるGUIツールを作成した。抜き出した100枚のフレームをDLCを用いて脚の指節14本、第二触角2本、頭部と腹尾節の計18カ所を手動でラベリングを行う。学習回数はDLCのデフォルト設定の500000回、ネットワークはResNet50を使用した。



図2 ダンゴムシの腹側(2560×1440にクロップ)

3. 実験: DeepLabCut を用いたトラッキング

学習後、生成されたモデルを用いて推論を行い、生成されたCSVを用いて評価を行った。CSVには推論によってラベリングされたラベルの座標と尤度が記載されている。この尤度(0~1)はラベリングの妥当性を示しており、値が低いと推論が上手くいっていない可能性が高い。一方で尤度が高ければ必ずしも正しい座標付近にラベリングされているとは限らないため、正確な精度を算出するにはすべ

てのフレームに手動ラベリングしたものと二乗平均平方根(RMSE)を用いて比較する必要があるが、すべての動画を合わせるとフレーム数が膨大で時間が掛かるため、今回は尤度を用いて、閾値を超えるフレーム数から精度を評価した。DLCはモデル生成後、尤度の低いラベルを含むフレームを手動で修正する機能があり、その際の尤度のデフォルトの閾値が0.4であるため、これを閾値とする。それぞれの部位の尤度が閾値を超えたフレーム数を全フレーム数で割った値を、パーセンテージで表したものを精度とする。以下の表1は10本の動画で精度の平均をとったものである。

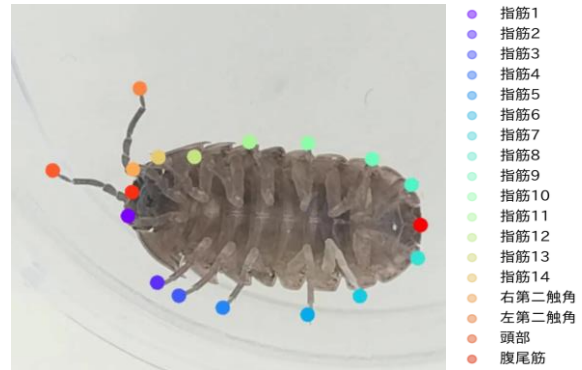


図3 ラベリングされたダンゴムシ

表1 各部位の推論の精度

部位	精度 (%)	部位	精度 (%)
指節1	72	指節10	87
指節2	72	指節11	84
指節3	77	指節12	83
指節4	81	指節13	79
指節5	85	指節14	77
指節6	85	右第二触角	59
指節7	85	左第二触角	55
指節8	87	頭部	78
指節9	89	腹尾節	89

また、以下のグラフはダンゴムシの各部位の座標を全てプロットしたものである。

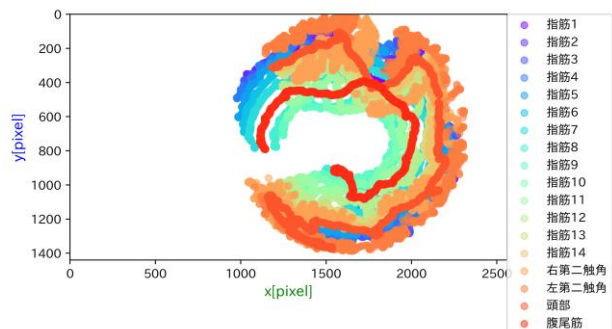


図4 各部位のラベルの全座標のプロット

図4は、腹尾筋などの高い精度の推論が行われている部位は、プロットされた点同士が重なって綺麗な線が描かれている。一方で第二触角は点が散乱している。

4. 考察

表1を見ると、変化が見られない腹尾筋の推論精度が高いことが分かり、動きが激しく、動画でも残像が発生している第二触角は精度が比較的低い。また、指筋は前脚に比べて後脚のほうが比較的精度が高いが、これは第二触角と交わるフレームが複数存在し、正しく推論が行えていないからであると考えられる。腹尾筋と同じく、変化が見られない頭部の精度が比較的低いのも、第二触角と前方の脚によって隠れてしまうフレームが原因であろう。また、平均で見れば極端に低い精度の部位は無いが、各動画の精度で見ると、20%を切る部位が生じた。それらの動画を見ると、やはり第二触角が激しく動き、他の脚と残像が重なるフレームがかなり多かったため、このような精度となったのだろう。これをどう改善するかが、今後のトラッキングの重要な点となる。

また、以下の図は図4と同じくラベルの全座標をプロットしたものであるが、より可視化をしやすくするために部位を左右の最前の脚、最後の脚、頭部、腹尾筋に絞った。

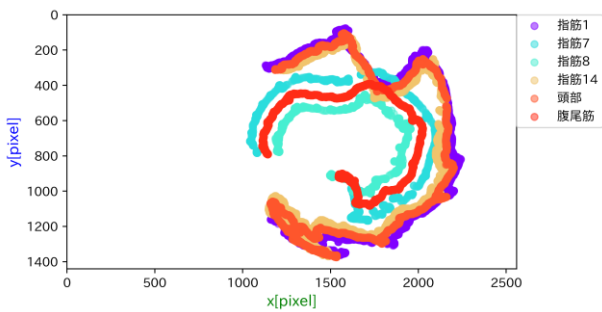


図5 一部部位のラベルの全座標のプロット

図を見ると、頭部の軌跡がダンゴムシが進行したルートとみなすことができる。また、前脚に比べて、後ろ脚の方が左右に間隔が開いている状態が見られる。動画を見ると、ダンゴムシは前脚を歩行のためにあまり使用せず、前方にある障害物(シャーレの壁)の確認や、口を触ることが多かった。一方で、中央の脚(指筋3,4,11,12)は、間隔の差が大きく、歩行に最もエネルギーを割いていると考えられる。

5. まとめ：

本研究では、DLCを用いて腹側から撮影したダンゴムシの動画から、計18カ所の部位を通常の観察では難しい腹部の可動範囲や、歩行軌跡の確認が可能であることが分かった。また、腹側からの撮影により、ダンゴムシの排便の様子や、水を飲む様子など背側からの撮影では見られない動画を得ることができた。

現在本研究と並行して、別のメンバーがANTAM-Qの運動補償機構に取り組んでいる。こちらでの撮影が可能になると、球殻上で長時間かつ空間的制約の無い腹側からの撮影が可能になり、現在はシャーレの周囲を歩行する程度し

か動きを見せないが、壁が無くなることで、全方向に向けて歩行するダンゴムシを撮影することができ、歩行に関する特性の解明に繋がるのが期待できる。しかし、シャーレ上では問題なく撮影できるが、ANTAM-Qの球殻上で行うとなると、球殻上の傷がエラーの原因になる、球殻の運動補償で残像が発生してラベリングが困難になるなどの問題が生じる。また、球殻上ではダンゴムシは同じ位置に固定するため、軌跡を得るにはシャーレ上とは異なる方法でグラフのプロットを行う必要がある。通常のラベリングに関しても、第二触角の精度が低い点は脚との連動性を解析する際に問題となる。



図6 排便のようす

今後の展望としては、第二触角を正確に捉えるために、よりFPSの高いアクションカメラの使用、球殻上の傷などが推論に影響を与えないように画像処理による除去を行い、球殻上での解析ができるシステムを構築する。また、現在のモデルは汎化性能が低いいため、様々なダンゴムシの個体の推論が行えるモデルの生成をする。

参考文献

- [1] NAGAYA, Naohisa, et al. Anomalous diffusion on the servosphere: A potential tool for detecting inherent organismal movement patterns. PloS one, 2017, 12. 6: e0177480.
- [2] Hemal Naik, Member, Student, Renaud Bastien, Nassir Navab, Member, IEEE, and Iain D Couzin, Animals in Virtual Environments IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, VOL. 26, NO. 5, MAY 2020.
- [3] Mathis, A, Mamidanna, P. Cury, K. M. et al. DeepLabCut: markerless pose estimation of user-defined body parts with deep learning. Nat Neurosci 21, 1281–1289 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0209-y> A. Mathis, P. Mamidanna, "Markerless tracking of user-defined features with deep learning" arXiv preprint arXiv: 1804.03142, 2018.