

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11525

研究課題名(和文) 深層学習を用いた生物行動の認識と計量

研究課題名(英文) Recognition and Measurement of Animal Behavior by Using Deep Learning

研究代表者

佐藤 賢二 (Satou, Kenji)

金沢大学・融合科学系・教授

研究者番号：10215783

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：深層学習の急速な発展により、画像中の人物や物体を高精度に認識する研究は長足の進歩を遂げつつある。その一方で、人間以外の生物を対象とした姿勢や動作の認識は、高い需要があるにも関わらず研究例が少なく、大部分が動物にマーカを装着したモーションキャプチャに基づいていた。本研究では動物を撮影した動画像に対して深層学習を含む各種の機械学習手法を用いることにより、時間と共に変化する動物の位置や姿勢を計測し、更にその結果を解析することで特定の行動を高精度に認識したり、動物個体に特有の行動を抽出したり、特に指定しなくても動物や人間の繰り返し行動や特徴的行動を抽出できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の動画像を対象とした各種の認識技術や計測技術は近年急速に発展したが、動物の行動を自動的に認識し計量する研究は比較的少数に留まっていた。本研究により開発された各種の手法は、主に医学や薬学の分野で動物を用いて行われる行動観察実験の精度を高めるのに貢献するだけでなく、近年需要が高まりつつあるペット産業分野や畜産業および水産養殖業で、動画像を用いて動物の行動を計量し異常検出を行うなど、様々な応用が期待される点で社会的意義がある。また、繰り返し行動および特徴的行動の自動検出や、単色生物の動き検出の高精度化など、従来殆ど研究されていなかった分野で成果があったことに学術的意義がある。

研究成果の概要(英文)：Thanks to the rapid growth of deep learning, researches on the accurate recognition of human and object in images have made rapid strides. In contrast, researches about the recognition of animal's pose and behavior were relatively fewer and based on the motion capture with markers. In this research, it was shown that by using various machine learning algorithms including deep learning, time-series data of animal's location and pose can be accurately measured from video. In addition, based on the measured data, we developed methods for accurate recognition of specified behavior of animals, extraction of behaviors specific to animal individuals, and extraction of repetitive and/or characteristic behavior of animal and human by unsupervised learning.

研究分野：生命情報学

キーワード：生物行動 深層学習 位置推定 姿勢推定 動作認識

1. 研究開始当初の背景

深層学習の急速な発展により、画像中の人物や物体を高精度に認識する研究は長足の進歩を遂げつつある。特に、画像認識への深層学習の応用は爆発的な広がりを見せており、写真の自動分類や自動車の衝突防止など、様々な応用分野で圧倒的な精度を達成している。さらに、Caffe や TensorFlow などの深層学習ライブラリが公開され、大量の画像を用いて予め学習した深層学習モデルが利用可能になったことで、深層学習にあまり詳しくない研究者でも自分が認識したい生物や物体の画像を少量(数十から数百枚)用意し、ダウンロードしたモデルに対して微調整(ファインチューニング)を行うことで、高精度に認識を行うことが可能になった。さらに、カーネギーメロン大学で開発された OpenPose の登場により、少なくともヒトに関しては、動画中に写った数十人の姿勢推定(どの部分が誰の手で、どちらを向いているか、など)を、リアルタイムに近い速度で行うことが可能になった。

一方、人間以外の生物を対象としたこれまでの画像認識研究は、その多くが生物の位置認識に関するものであった。生物の行動計測において位置情報は重要であり、ある生物がどのような条件でどの程度活発に動いているか、どの場所にどの程度長く滞在するかを計測して数値化することにより、生物の行動原理に影響する要因とその効果の程度を明らかにすることができる。しかしながら、位置を追跡して計量するだけでは生物の行動の一側面しか知ることができない。

より詳細な行動情報としての生物の姿勢や動作、仕草などを高精度に認識する研究も行われているが、生物にマーカを取り付けてモーションキャプチャを行うか、対象生物種を限定した上でその生物の典型的な行動を認識する場合が殆どである。例えば、Howard Hughes Medical Institute の研究者らは、トンボに再帰性反射マーカを取り付けてモーションキャプチャを行うことにより、トンボが餌を捕らえる際の詳細な行動原理を明らかにしているし、MIT の研究者らは、ケージ内におけるマウスの典型的な8つの行動(餌を食べる、水を飲む、歩く、休むなど)をマーカレスで認識できることを示している。だが、前者の方法では、特に高等動物ではマーカを取り付けを嫌がって自然な行動が阻害される可能性があり、後者の方法では、例えば手で鼻を掻いたり尻尾を振るなどの細かい動作を検出することができない、という問題がある。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、様々な動物の位置と姿勢を高精度に認識する手法の開発と、認識した情報に基づいて動物の行動を解析する手法の開発である。申請者はこれまで、DNA やアミノ酸配列の分類問題を主な対象として、サポートベクターマシンや深層学習などの機械学習アルゴリズムと、それを高精度化するための特徴選択手法を研究してきた。その一方で、静止画や動画を対象として指定した物体をディスプレイ上で実寸表示する研究を通して Kinect や RealSense などの深度センサ付きカメラを活用しており、生物の画像認識についても興味を持っていた。これらの理由により、本研究の着想に至った。

3. 研究の方法

本研究ではまず、機械学習を用いて動物の行動認識を行う研究について文献調査を行った。その結果、対象は実験動物やペット、畜産動物、野生動物など多岐に渡ること、実験動物の場合は飼育環境や行動観察用のステージなど決められた範囲で撮影された動画を入力とする場合が多いこと、予め確立された行動試験において条件の異なる群(例えば野生型のマウスとうつ病のマウスなど)の比較を行う場合が多いことなどが分かった。本研究ではマウスやフェレット、ショウジョウバエなど、実験動物の行動認識を中心としつつ、様々な背景で撮影された野生動物や、作業中の人間等も対象として研究を行った。認識や予測については様々な機械学習アルゴリズムおよび精度を高めるための補助的な手法を組み合わせることで実験を行った。テーマごとの個別の研究方法は以下の通りである。殆どのテーマにおいて、入力には動物や人間を撮影した動画であるが、センサーデータに基づくものもある。

(1) 姿勢認識結果に基づく行動認識

・異なるボディプランを持つ4種類の動物(ヒト、クワガタ、カモメ、タイ)の動画に対して、LEAP を用いた姿勢認識の精度検証を行った。動画の各フレームに対して、姿勢を構成するキーポイントのアノテーションを手動で行い、一部を訓練データとして、残りを試験データとして用いることで、キーポイントの認識精度を計算した。特徴抽出のための既存モデルとしては、COCO データセットを学習した5種類のモデルを検討し、最も精度が高いと思われるものをファインチューニングして使用した。

・透明な床を通してフェレットを下から撮影した動画画像を用いて、フェレットの足の位置を深層学習で検出し、2匹の歩行行動を比較した。

・人間やフェレット、ショウジョウバエなどの生物を撮影した動画を対象として姿勢認識を行い、結果として得られた行動をキーポイントの時系列変化として表現した上で、一定の時間的区

間で区切った部分行動をクラスタリングし、時間的に変化するクラスタ番号の変化点を検出した。さらに、同様のデータに対して離散フーリエ変換により行動の周期を計算し、動的時間伸縮法で類似度を計算した。

(2) 姿勢認識を使わない行動認識

・深層学習を用いて、飼育ケージに入っているマウスの行動(水を飲む、歩く、毛づくろいする、等)や、強制水泳試験におけるマウスの行動分類を行った(図1)。

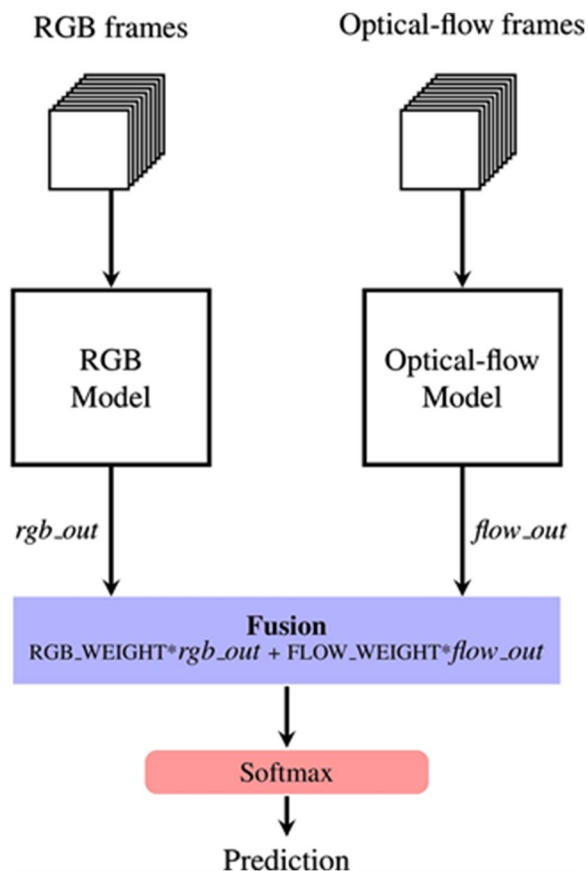


図1 マウスの行動認識を行う深層学習の構造

・ショウジョウバエについて、動画における連続画像から計算したオプティカルフロー画像を用いて行動分類を行った。

(3) 位置推定結果に基づく行動認識

・高架式十字迷路を移動するマウスの軌跡データを用いて、健常なマウスと自閉症のモデルマウスの行動パターンを比較した。

・痛みがマウスの行動に与える影響を解析した。人工的に痛みを引き起こすためにホルマリンを投与したマウスと、生理食塩水を投与したマウス、何も投与しないマウスをそれぞれ5~6匹ずつ用意し、オープンフィールドおよび高架式十字迷路における行動を撮影してトラッキングし、行動解析を行った。

・ミナミメダカなどの小型魚類を対象として各種の条件で動画を撮影して、群れにおける動物の追従行動の解析を行った。各個体の位置をトラッキングし、他の個体との距離や相対的な位置関係を解析した。検出した追従行動に基づいて群れの中における役割の動的な変化を解析した。

(4) センサーデータに基づく行動認識

・比較的大型の動物である馬を対象として、3軸加速度センサー、ジャイロスコプ、磁気センサーなどのデバイスにより測定されたデータから馬の行動の種類を分類した。

(5) 行動認識の精度を高めるための補助的手法の開発

・少ない種類の動画データから汎用的なモデルを構築するための基礎研究として、単色背景で撮影してプログラムで切り抜いたオブジェクトと、ランダムに選択した背景を合成することにより、学習データの量を人工的に増やすデータ拡張を行い、その効果を実験的に調べた。学習器としてU-Netを用い、様々なオブジェクトと背景の組み合わせで実験を行った。

・檻に入った実験動物の行動解析を容易にするため、Deep Flow Guided Video Inpaintingを用いて檻に隠れた部分の修復を行った。

・黒猫のような単色の動物や野外環境における逆光条件下など、対象動物のテクスチャに関する情報が乏しい状況における行動解析の精度を高めるため、動物のシルエット画像を対象としてオプティカルフロー計算の精度を高める研究を行った。

4. 研究成果

本研究の主な成果は、動物の行動認識において従来法を超える精度を達成する手法や、これまで殆ど研究されていなかった新しい行動認識の手法を開発したことである。テーマごとの個別の研究成果は以下の通りである。

(1) 姿勢認識結果に基づく行動認識

・4種類の動物に対してキーポイントの認識実験を行った結果、ボディプランの違いは認識精度にあまり影響しないこと、背景を含めた画像全体を入力する代わりに対象の動物が写っている領域だけを切り出して入力することにより精度が大幅に上昇すること、明確な目印が無いキーポイントは認識精度が低いこと、対象動物と背景の色合い等が近い場合は背景除去をしないと認識精度が低いこと、画像の鮮明さが精度に大きく影響することなどが分かった。

・2匹のフェレットの歩行行動を比較することで、両方に共通な歩行パターンや片方に特有な歩行パターンを抽出できることを明らかにした。

・人間やフェレット、ショウジョウバエなどの生物について、キーポイントの時系列変化をクラスタリングし、クラスタ番号の変化点を検出することにより、教師無しで行動解析を実現できることを明らかにした。さらに、3次元動画からキーポイントを抽出することが、奥行きが重要な行動の検出に有用であることを示した。ヒトを対象とした実験では、シナリオに沿って屈伸運動などいくつかの繰り返し行動を接続した動画に加えて、デスクワーク中や食事中など、シナリオが無い自然な動画を対象とした場合でも繰り返し行動や特徴的な行動を抽出できることを明らかにした。

(2) 姿勢認識を使わない行動認識

・飼育ケージに入っているマウスの行動や強制水泳試験におけるマウスの行動を、深層学習を用いて分類する手法を開発し、従来法より高精度に行動分類を行えることを確認した。

・ショウジョウバエの行動分類について、オプティカルフロー画像を平均化した上で、ImageNetから学習されたCNNモデルであるVGG16を元に学習と予測を行う手法を開発し、従来法を上回る高い精度を達成できることを確認した。

(3) 位置推定結果に基づく行動認識

・高架式十字迷路における健常なマウスと自閉症のモデルマウスの行動パターンを比較し、片方に特有な行動を抽出する手法を開発した。

・痛みがマウスの行動に与える影響について、3種類のグループに特有な行動を抽出することができた。

・ミナミメダカなどの小型魚類の群れにおいて、個体同士の位置関係を表す特徴量を新たに加えるなどの処理を行うことにより、追従行動の認識精度を改善することができた。また、クラスタリングを用いて群れにおける動物の追従行動の解析を行った。認識された追跡関係を元に解析を行い、1つの群れの中におけるリーダーやフォロワーの役割の時系列的変化を示すことができた。

(4) センサーデータに基づく行動認識

・Kammingaらが公開している馬の行動データを用い、学習器の選択やデータの加工などの前処理を行うことにより、従来法を大きく上回る分類精度を達成することができた。

(5) 行動認識の精度を高めるための補助的手法の開発

・背景合成を用いてデータ拡張を行うことで、画像中の動物部分の切り出し(セマンティックセグメンテーション)の正解率が向上することが分かった。その一方で、オブジェクトの種類数を一定に保ったまま背景の種類数を増やしていくと、ある点から逆に正解率が下がることが分かった。

・飼育環境下の動物の動画の中で、檻に隠れた部分の動物の体の修復を行った結果、固定視点の動画ではそのまま修復しても従来法より低い精度だったが、動画を加工して人工的な視点の移動を導入することにより、平均的なエラーを従来法の半分程度に抑えることができた。

・単色動物や逆光でシルエットになっている動物について、動画に含まれるシルエット画像の輪郭を縮小して重ね合わせることで対象のテクスチャ情報を人工的に増加させ、既存のアルゴリズムによるオプティカルフロー計算の精度を改善できることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Bedy Purnama, Mera Kartika Delimayanti, Kunti Robiatul Mahmudah, Fatma Indriani, Mamoru Kubo, Kenji Satou | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 The Enrichment of Texture Information to Improve Optical Flow for Silhouette Image | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Advanced Computer Science and Applications | 6. 最初と最後の頁 423-428 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14569/IJACSA.2021.0120253 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Nguyen,N.G., Phan,D., Lumbanraja,F.R., Faisal,M.R., Abapihi,B., Purnama,B., Delimayanti,M.K., Mahmudah,K.R., Kubo,M., Satou,K. | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Applying Deep Learning Models to Mouse Behavior Recognition | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Biomedical Science and Engineering | 6. 最初と最後の頁 183-196 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4236/jbise.2019.122012 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kenji Satou |
| 2. 発表標題 On the Effect of Feature Extraction: Practical Cases for Improving Classification |
| 3. 学会等名 4th International Conference of Computer and Informatics Engineering（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 重弘到真, 久保守, 佐藤賢二 |
| 2. 発表標題 シルエット画像に対するオプティカルフロー計算の精度改善 |
| 3. 学会等名 2021 年度電気・情報 関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 林隼平, 辰巳祐大, 久保守, 佐藤賢二 |
| 2. 発表標題 3次元の姿勢認識結果を用いた行動解析 |
| 3. 学会等名 2021 年度電気・情報 関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 鮎岡良樹, 久保守, 佐藤賢二 |
| 2. 発表標題 魚の群れにおける追従行動の検出 |
| 3. 学会等名 2021 年度電気・情報 関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kenji Satou |
| 2. 発表標題 Problems and Approaches in Animal Behavior Analysis, |
| 3. 学会等名 The 3rd International Conference on Applied Science Mathematics and Informatics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 辰巳祐大, 久保守, 佐藤賢二 |
| 2. 発表標題 動物の姿勢認識結果を用いた行動認識 |
| 3. 学会等名 2019 年度電気・情報 関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 上田貴哉, 久保守, 新明洋平, 河崎洋志, 佐藤賢二 |
| 2. 発表標題 動物の歩行に基づく類似行動の分析 |
| 3. 学会等名 2019 年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nguyen,N.G., Delimayanti,M.K., Purnama,B., Mahmudah,K.R., Kubo,M., Kakikawa,M., Yamada,Y., Satou,K. |
| 2. 発表標題 Applying Deep Learning Models to Action Recognition of Swimming Mice with the Scarcity of Training Data |
| 3. 学会等名 BIOINFORMATICS 2019: 10th International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Purnama,B., Delimayanti,M.K., Nguyen,N.G., Mahmudah,K.R., Kubo,M., Kakikawa,M., Yamada,Y., Satou,K. |
| 2. 発表標題 On The Problem About Optical Flow Prediction for Silhouette Image |
| 3. 学会等名 BIOINFORMATICS 2019: 10th International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Delimayanti,M.K., Purnama,B., Nguyen,N.G., Mahmudah,K.R., Kubo,M., Kakikawa,M., Yamada,Y., Satou,K. |
| 2. 発表標題 Clustering and Classification of Breathing Activities by Depth Image from Kinect |
| 3. 学会等名 BIOINFORMATICS 2019: 10th International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宇野智江, 久保守, 新明洋平, 河崎洋志, 佐藤賢二 |
| 2. 発表標題 動物の行動認識のための檻の陰部分の補間 |
| 3. 学会等名 平成30年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |