

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K14754

研究課題名（和文）魚類の他者認知における「動き」の重要性

研究課題名（英文）Importance of visual information of movement in fish recognition

研究代表者

八杉 公基（Yasugi, Masaki）

宇都宮大学・工学部・特任准教授

研究者番号：50722790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、魚類が相手の動きに含まれるどのような情報を他者認知に利用しているのかを特定し、彼らの認知システムにおいて「動きの視覚情報」が持つ重要性を明らかにすることである。コンピュータグラフィックスで作成したバーチャルフィッシュをディスプレイ上に提示する手法を採用している。本研究にとって、実際の魚の動きを高精度に再現し、かつ効率的にバーチャルフィッシュを作成することは必要不可欠であるが、既存の方法やソフトウェアではこれらの実現が難しいことが確認されたため、画像処理や深層学習を利用した新たな技術の開発を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、我々ヒトを含めた動物が、視覚的情報から相手の「生物らしさ」や「同種らしさ」をどのように判断しているのか？を明らかにする研究である。体の各部位の色や形、模様が相手を認知する際に果たす役割については多くの研究がなされてきた一方で、動きが持つ情報が注目されることはほとんどなかった。これは、動物の動きを研究者が自由に制御することが困難であるためである。外見や動きなどそれぞれの要素を独立かつ自由に編集して操作することができるバーチャル生物の利用は、これを可能にする画期的な手法であり、今後動物の認知メカニズムの様々な側面がバーチャル生物によって解き明かされることが期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to identify what kind of information fish are using for their recognition of colleagues and other species, and to clarify the importance of visual information of movement on their cognitive system. The method of presenting a virtual fish created by computer graphics on the display is adopted. For this research, it is indispensable to reproduce the actual movement of fish with high accuracy and efficiently create virtual fish, but it was confirmed that existing methods and software were insufficient for this research. Thus, I proceeded with the development of new technologies that utilize image processing and deep learning.

研究分野：魚類を扱った室内実験を主とする動物行動学、光情報学、動画像処理

キーワード：魚類 行動 認知 バーチャル生物

1. 研究開始当初の背景

近年の劇的な技術革新により、コンピュータの演算性能、描画技術は飛躍的に進歩した。特に、それらの性能を存分に活かしたコンピューターグラフィックスの進歩はすさまじく、本物と見紛うようなリアルなバーチャル生物を動かすことも可能となった(図1)。バーチャル生物は、任意のタイミングで映像刺激として提示できる。そして色、形、動きなどの情報を、実際の生物に見られる形質間の関連性を無視して、互いに独立に変化させることが可能である。これらの特徴は視覚を用いた動物の認知行動研究と非常に親和性が高い。そのため、この数年で急速に、バーチャル生物を動物の行動実験に導入しようとする動きが世界的に興りつつある(*Current Zoology*, 2017, vol.63 (1)、バーチャル生物を使った行動実験に関する論文の特集号)。



図1. メダカの3DCGモデル

申請者らは、実際のメダカの外見と行動座標データから再現した動きを持つバーチャルメダカ(図1)を使って、メダカが相手の色、形だけでなく動きによって他者を認知し、社会行動を行うことを初めて明らかにした(Nakayasu, Yasugi, et al., 2017)。さらに同じ「モデルの動き」でも、尾を左右に振るローカルな動きではなく、水槽内を泳ぎ回るグローバルな動きにこそ社会行動を誘発する要素が含まれていることが示唆された。このように、動きをローカル、グローバルに切り分けて操作できるのはバーチャル生物ならではの利点であり、これまでの動物の認知行動研究では検証できなかった要素である。また、バーチャル生物を使った過去の研究(Ingley et al., 2015 など)でも、技術的な難しさから、生物の動きを再現して操作したものは無かった。早くもこの技術は他の認知行動研究でも利用されており(Shimmura et al., 2017)、今後動物の認知メカニズムの様々な側面がバーチャル生物によって解き明かされることが期待される。

このように、メダカの他者認知において外見や動きが重要なことはわかりつつあるが、それらに含まれるどのような要素が、どういった意味を持つ情報として処理されているか、という具体的な部分についてはまだよく分かっていない。例えば、申請者が現在進めている実験では、バーチャルメダカの動きから「ゆらぎ」を削るとメダカが社会行動を抑制することがわかりつつある。このような「ゆらぎ」はゼブラフィッシュをはじめとする他の動物の動きや自然現象からも検出されており、生物が発する信号に広く含まれる特徴だと認識されている(Matsunaga & Watanabe, 2012)。これが相手の「生物らしさ」の判断にのみ使われているのか、それとも種特異的な情報をも含んでいるかは、他種のゆらぎと比較することで明らかになるだろう。さらに、他種の特徴を導入したバーチャルメダカを作成して提示することで、人間が認識した種間差を実際にメダカが認識し、利用しているかを確かめることも可能である。このように、バーチャル生物の利点を活かした操作実験と種間比較を組み合わせることによって、魚類の動きをこれまでにないレベルで分解し、それらの要素が持つ情報と他者認知における役割を網羅的に検討できると考えられている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、魚類が相手の動きに含まれるどのような情報を他者認知に利用しているのかを特定し、彼らの認知システムにおける動きの重要性を明らかにすることである。これまで、バーチャル生物を使った研究では外見の複雑さや精巧さばかりが重視されてきた。また魚類の認知行動研究でも、体の各部位の色や形、模様について検証することはあっても(Tibbetts & Dale, 2007)、彼らの動きが持つ情報に注目することはほとんどなかった。その中で「動き」に着目してその役割を解明しようとする本研究の独自性は高く、これを遂行できるのはそのような視点を持ってバーチャル生物の作成技術を習得してきた申請者において他にない。本研究をきっかけに「動き」が持つ情報の価値が見直され、魚類を含めた動物の認知行動研究には欠かせない視点となることが期待される。

3. 研究の方法

まず実験水槽内に対象魚を入れて自由遊泳する姿を4K画質で撮影し、魚の上面・側面・正面がはっきりと写った画像を抽出する。これら3枚の高解像度の画像から、3次元コンピューターグラフィックス(3DCG)作成ソフトウェアであるBlenderを使って、魚の3DCGモデルを作成する(<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.5947066>)。次に、魚を入れた水槽の上面からの撮影に1台、側面からの撮影に1台の計2台のハイスピードカメラで同期撮影することで、魚のシルエット

トから体軸座標を計算し、体軸運動と水槽内の位置の三次元座標を構築する。この構築されたモーションファイルと 3DCG モデルを関連付けることで、バーチャルフィッシュが完成する。このバーチャルフィッシュをディスプレイに表示し、透明水槽に向けて隣接させることで、水槽内にいる魚に提示することができる。5分間バーチャルフィッシュを提示した際に魚がディスプレイ前にいた時間を計測し、その魚が誘引されて追従した時間とした。この時間を、バーチャルフィッシュの外見や動きを変えて比較した。

材料には、行動や生理、および遺伝的基盤がよく研究されているメダカの飼育系統であるヒメダカを用いた。ヒメダカは同種の他個体を見ると接近し、追従する。これはバーチャルメダカを提示した場合でも同じであり、この習性はヒメダカが提示されたバーチャルフィッシュを同種の他個体として認知している指標として利用できる。ヒメダカ以外のバーチャルフィッシュも作成し、外見や運動のデータを入れ替えて提示することで、「動き」が持つ種特異的な情報と他者認知における役割を検討することができる。

4. 研究成果

申請時とは所属が異なりプロジェクト雇用の研究員となったため、本研究に割けるエフォートが10%と大幅に減少したが、以下4つの成果を出すことができた。

(1) 本研究は魚の「動き」が持つ情報を明らかにすることを目的としているため、「見た目」が与える影響は実験ごとに揃える必要がある。しかしながらヒメダカを使った予備実験の結果を解析する中で、水槽内のヒメダカに対してバーチャルメダカが横向きに泳ぐ/こちら向きに泳ぐことでヒメダカの接近追従反応が影響を受ける可能性が示された。もしこの傾向が事実なら、提示する映像内のバーチャルメダカの向きは偏りなく同一の条件に揃える必要がある。これは、今後の行動実験の結果の頑健性および再現性を保証する際に重要となるため、優先して検討すべき事項とした。バーチャルメダカが横向きに泳ぐ/こちら向きに泳ぐという2群の比較に加え、運動要素を段階的に削除したバーチャルメダカを用いた検討を行うことで、バーチャルメダカの向きそのものがメダカの接近反応に影響を及ぼすことを示したが、残念ながら投稿論文は「実験不十分」との判断で受理されなかった。そのため、向きを横向きからこちら向きまで30度ずつ変更した、合わせて5パターンのバーチャルメダカを準備し、メダカの接近反応の違いを検討した。

照明条件などの検討を重ね、以降の行動実験では試行ごとの微調整の必要なく、撮影したヒメダカの接近反応の動画から半自動的にROI (Region of interest, ここではバーチャルメダカを提示するディスプレイ前の関心領域) 内のヒメダカ出現頻度を算出することを可能にした。

観察例数を大幅に増やすことができた一方で、バーチャルメダカに対するヒメダカの反応の経時的な変化に予想外の大きな個体差があることが明らかとなった。先行研究を含めたこれまでの実験では、バーチャルメダカを提示する前の1分間にヒメダカがROI にいた時間をベースラインとして用いていたが、本実験ではこのベースラインが個体によって大きく異なることが、そのままバーチャルメダカに対する反応の個体差として現れていることが分かった。ベースラインの個体差はディスプレイ前の水槽に映り込むメダカ自身の姿に対する感受性の違いと考えられ、本実験で対象としている反応とは異なる。この影響を排除するための閾値を設けた新たな解析方法を開発・検討した。上記の半自動的な出現頻度の算出と合わせて、これらの解析手法がバーチャルフィッシュを使った認知行動実験のスタンダードとなることを視野に入れ、実験結果を論文として公表する準備を進めている。

(2) 従来法では、メダカを入れた水槽の上面からの撮影に1台、側面からの撮影に1台の計2台のハイスピードカメラで同期撮影することで、メダカの体軸座標の三次元構築を行っていた。しかしながら予備的な実験から、メダカのように鉛直方向に扁平な魚を撮影する場合、魚がカメラの方を向いたフレームで著しく体軸の推定精度が落ちることが解決すべき課題となっていた。そこで本研究では、画角が直行するように配置した2台のカメラで側面からの撮影を行い、撮影したフレームごとに二値化して得られたシルエットの大きな方のカメラの映像を選んで体軸推定を行うことで、体軸の推定精度向上を試みた。本研究の減額された予算では、当初購入を予定していた同期撮影可能なハイスピードカメラ3台を同一機種で揃えることは難しかったので、上面の1台はHAS-UIC (株式会社 DITECT 製)、側面の2台は acA1300-200uc (株式会社 Basler 製) とした。側面の2台については、メーカーサポートとの相談の末、遅延1ミリ秒以下の精度で同期できるよう回路の設計と実装を行った。上面と側面の同期については、画面内にLED点滅による信号パターンを収めることで、最大数ミリ秒のずれに収まる同期撮影を実現した。本研究では魚の行動を100fpsで撮影するので、これらの同期精度は十分許容できると考えられる。

またバーチャルフィッシュを高精度に、かつ効率的に作成する手法を開発する過程で、既存のソフトウェアではメダカ以外の魚種での魚体のシルエット生成、および体軸推定が困難である

ことが明らかとなった。体軸推定が可能なソフトウェアは多くはないが、いずれも二値化したシルエットの端点を2ヶ所検出し、それらを前後軸として端点間の輪郭を等分割し結ぶことで体軸の推定座標とする方式を採用している。そのため特に側面から撮影した映像で、シルエットに含まれる鱗の面積が大きく、撮影したフレーム毎に形が変化する場合、①体軸の位置が鱗に引きずられて変化する、②尖った鱗を端点として体軸推定を行ってしまう、という問題が発生することがわかった。これは、本研究で対照実験を行う予定であるメダカ以外の魚類で深刻な問題であるが、撮影条件によってはメダカでも問題①が発生しうることが確認された。体軸推定を行うほとんどの研究では、使用するのは上面から撮影した映像であるため、これらの問題は三次元撮影を行う今回のような研究特有の問題だと言える。しかしながら、体軸の推定精度の向上と自動取得化は本研究の要であり、今後同様のテーマを様々な魚種で実施する場合にも不可欠なシステムとなるため、優先して解決すべき課題であると判断した。

体軸の推定アルゴリズムを新規で検討するのは実装までに時間と労力がかかり過ぎるため、既存のソフトウェアでも体軸を検出しやすいシルエットの作成が可能になる作業手順の構築を目指した。基本技術として、Python+OpenCVによる画像処理に加えて、深層学習を利用した魚の胴体部分の輪郭検出を検討した。これらに必要なPythonのコーディング、ならびに深層学習への理解と実装技術の取得を進めた。これらの技術の開発と実装は、新たに獲得した科研費基盤研究(C)「3DCG バーチャルフィッシュの作成および提示技術の開発(22K12242, 2022年度から)」にて引き続き進める。

(3) 提案手法では、魚の外見や動きについて個体差および種間差が検出できる要素を抽出し、その要素を変更したバーチャルフィッシュを作成して対象魚の反応を調べるとしている。しかしながら定性的、定量的な観点から見ても外見や動きに含まれる要素の数は決して少なくはなく、種認識への影響を網羅的に探索するには膨大な時間がかかってしまうことが懸念された。そこで効率的な探索を行うため、(2)の過程で技術を取得した深層学習による援用を考案した。外見や動きで個体識別および種判別が可能なニューラルネットワークが構築できれば、そのニューラルネットワークが注目する領域を精査することで、「個体差および種間差が含まれる要素」の有力な候補を選抜することができる。

動画を使った学習に比べて画像を使った学習の方が実装のハードルが低いため、まずはヒメダカの外見を撮影した画像から個体の識別が可能なニューラルネットワークが構築できるかを検討した。ヒメダカ8個体について水槽内を5分間遊泳する様子を撮影し、画像処理によってカメラに側面を向けているシーンのみを抽出した(図2)。この抽出画像を、VGGnet(Simonyan & Zisserman, 2015)をベースに構築したニューラルネットワークに学習させ、学習済みニューラルネットワークによる新規画像の識別率を計算した。その結果、8個体を平均精度0.987で識別することのできるニューラルネットワークが構築できた。メダカが遊泳する画像には①個体の外見、②各個体を取りがちな姿勢、③各個体の水槽内での滞在場所の傾向などの情報が含まれている可能性がある。構築したニューラルネットワークの注目領域を精査することで、それぞれの形質が識別に果たす役割を分離したい。

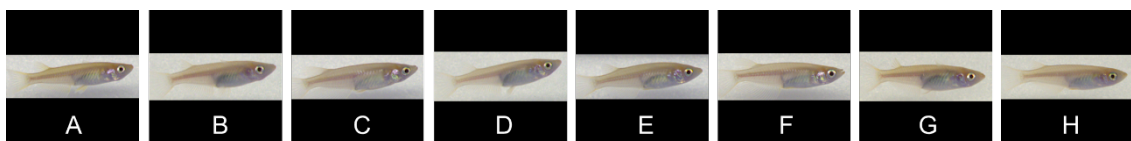


図2. ニューラルネットワークによる個体識別実験に用いられたメダカ画像(A~Hは個体番号)

(4) 従来法では、対象魚の入った水槽にディスプレイを隣接させ、ディスプレイ上にバーチャルフィッシュを投影することで、魚にバーチャルフィッシュを提示してきた。この方法では、バーチャルフィッシュに誘引されたヒメダカの接近行動はいずれ水槽の壁やディスプレイ自体に阻まれるため、接近後の魚の反応(例えば闘争行動や群れ行動)を観察するのは困難であった。これはバーチャルフィッシュを使った実験だけでなく、映像刺激を提示するすべての実験に共通する課題である。この課題を解決するため、現在の所属である宇都宮大学工学部 山本裕紹研究室で研究が進められている「空中ディスプレイ技術」の導入に意欲的に取り組んだ。これは、ディスプレイに表示される内容を、ディスプレイから離れた場所、つまり水槽の壁を越えて水槽内にいる実験個体の目前に空中像(水中像)として表示できる手法である。これにより実験個体が「触ることのできる」映像刺激を提示することが可能となり、従来法では大きな課題となっていた「ディスプレイによる干渉」を解決できると考えている。

本研究では、①実験動物の周囲に空中像を形成することで、没入型の刺激提示を行うことがで

きるものと②実験動物の正面に空中像を形成することで、行動観察エリア中央に実験動物を誘引して相互作用を観察できるものの2種類の行動実験装置を提案した。空中ディスプレイは本来、ヒトを対象として開発された技術である。動物実験に応用することで、技術自体の新たな応用先を開拓するとともに、動物学の分野にも大きな進歩をもたらすことが期待される。本技術の動物実験への導入は、科研費基盤研究(S)「多重反射による空中ディスプレイの薄型化と水中CAVEへの応用～魚に映像を見せる～(20H05702)」にて発展的に進められている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 渡辺英治, 八杉公基, 山本裕紹	4. 巻 72
2. 論文標題 仮想メダカ像を用いたメダカの行動解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 生物の科学 遺伝	6. 最初と最後の頁 623-629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 八杉公基	4. 巻 38
2. 論文標題 動物実験用の空中ディスプレイシステムの開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 月刊オプトロニクス	6. 最初と最後の頁 87-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Abe Erina, Yasugi Masaki, Takeuchi Hideaki, Watanabe Eiji, Kamei Yasuhiro, Yamamoto Hirotsugu	4. 巻 26
2. 論文標題 Development of omnidirectional aerial display with aerial imaging by retro-reflection (AIRR) for behavioral biology experiments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 221-229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-019-00502-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Masaki Yasugi
2. 発表標題 Use of aerial displays in our lives and for animal experiments
3. 学会等名 International Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Yasugi, Hirotsugu Yamamoto
2. 発表標題 Forming Aerial Images at the Center of Triangular Container by Using Polarized Aerial Imaging by Retro-reflection (pAIRR)
3. 学会等名 The 25th International Display Workshops (IDW'18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 八杉公基, 山本裕紹
2. 発表標題 深層学習による画像分類を利用した in situ 観察での魚類の個体識別法
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Yasugi, Hirotsugu Yamamoto
2. 発表標題 Individual Identification of Swimming Fish by Image Processing And Deep Learning
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------