

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：63904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26430028

研究課題名(和文)リアルタイム双方向情報処理システムを用いた動物の行動解析

研究課題名(英文)Behavior analysis of animals using virtual reality system

研究代表者

渡辺 英治 (Watanabe, Eiji)

基礎生物学研究所・神経生理学研究室・准教授

研究者番号：30250252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、メダカなど動物の社会性行動の発現メカニズムを明らかにすることにある。そのために本物そっくりな外見と動きをもつバーチャル(VR)動物との対面実験を行い、社会性行動を引き起こす視覚的な要因を明らかにした。コンピュータグラフィックスの利点を活かして、形・色・動きを操作したVRメダカを作成し、本物のメダカとの対面実験を行った結果、メダカはすべての視覚パラメータを統合的に利用して同種他個体の認識を行っていることが示唆された。同システムでの共同研究も成功し、さらに次期プロジェクトの一環として深層学習を利用した視覚認知実験も行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to clarify the mechanism of social behavior of animals such as medaka. For that purpose, we conducted face-to-face experiments with virtual (VR) animals that looked like real animals and revealed visual factors that cause social behavior. Utilizing the advantages of computer graphics, we created VR medaka that were manipulated shapes, colors, and motions, and conducted a face-to-face experiment with real medaka. As a result, it was suggested that medaka used all the visual parameters in an integrated manner. We also succeeded in collaborative research with this system, and also performed visual cognitive experiments using deep learning as part of the next project.

研究分野：動物心理学

キーワード：メダカ コンピュータグラフィックス 社会性 バーチャルリアリティ 視覚 深層学習 錯視 ディープラーニング

1. 研究開始当初の背景

(1)

動物は外界から情報を獲得し、ある種の情報処理を行い、最終的には行動を発現させて外界との適切な相互作用を行う。この一連の情報ループの中心に脳がある。複数の感覚モダリティが、この情報ループにおいて重要な働きをしているが、ヒトを含めて多くの動物種は視覚情報が重要な位置を占めている。こうした視覚の情報処理については幅広い研究が行われているが、特に行動神経科学は刺激から行動に至る過程全般を解析対象にし、認知や学習アルゴリズムの一端を明らかにしてきた。古典的な行動学では、知覚対象として実物のオブジェクトが提示されてきた。例えば、我々が行ったオープンフィールドテストでは、フィールドに固定した視覚オブジェクトを用いて、小型魚の空間学習能を明らかにした。しかし、この方法では相互作用をする視覚オブジェクトの操作が困難であった。そこで最近ではコンピュータディスプレイを使った視覚提示が行われるようになってきた。例えば、我々の研究では、水槽周囲のコンピュータディスプレイ上にメダカの摂食行動を誘発するプランクトンの運動数理モデルを再構成することに成功している。

(2)

さらに直近では、小型魚のバイオロジカルモーションを作成し、わずか六個の点から構成される疑似魚によって集団行動を誘発することにも成功している。しかし、この方法(一方向システム)にも限界がある。このようなコンピュータ画像を用いれば、刺激の操作は容易に行えるものの、相互作用性が欠落してしまうという大きな問題が生じる。そのような相互作用性のない刺激に対する動物の反応をもとに脳の情報処理システムについて論じることには限界があるだろう。本研究プロジェクトの最終目標は実験個体の行動をリアルタイムで解析し、それに合わせて視覚的刺激が変化するリアルタイム双方向情報処理システムの構築にある。これにより刺激を操作するとともに相互作用性を確保するという、従来の研究手法では不可能であったことが可能になる。本研究は、双方向システム開発の第一段階の研究にあたり、視覚提示するバーチャルな魚を提示するシステムの構築を行った。特に相互作用が複雑で従来型の手法では解析が困難であった視覚による同種他個体とのコミュニケーション機構をテーマとし、視覚優位であり、群れ形成など同種他個体との相互作用をする傾向が強いメダカを研究対象とする。

2. 研究の目的

(1)

いくつかのシミュレーション研究から、近隣の個体と反発・並進・接近行動を取り合う

ことによって魚の群れが形成されることが示唆されている(例えば, Aoki, 1982; Couzin et al., 2002)。しかしながら、これまでの研究手法では実験的にその真偽を検証することはできなかった。実際の動物を刺激個体として用いれば、実験個体と刺激個体との間で生じる行動を観察することはできるが、メンバー間の行動と群れ形成との因果関係までは明らかにできない。一方、実験個体に対して他個体の模型や画像を呈示する場合、相互作用性を持たせることはほとんど不可能に近い。そのため、模型や画像を用いた実験の結果に基づきメンバー間で相互作用し合う群れの形成について議論することには、大きな限界がある。

(2)

これを解決するためには双方向システムの開発が必要であるが、その第一ステップとしてコンピュータグラフィックスの技術によって、本物そっくりな形状や色、動きを再現した人工魚を作り出し、本物のメダカとの対面実験を行う。コンピュータグラフィックスの特性上、色、形状、動きは実験者の意図通りに自在に変更できる。コンピュータグラフィックスで作られたバーチャルな動物を利用して、メダカが同種他個体と相互作用するとき、どのような視覚パラメータを頼りに認識しているかを探ることができる。

3. 研究の方法

(1)

成体メダカは、繁殖業者から購入した。メダカは行動試験前に少なくとも2週間実験室の水槽で飼育した。これらのタンクを、温度を 26 ± 1 に制御し、光サイクルを14時間/10時間(明/暗)に設定した室内に置いた。すべての動物実験は自然科学研究機構動物実験委員会の承認を受けて実施した。

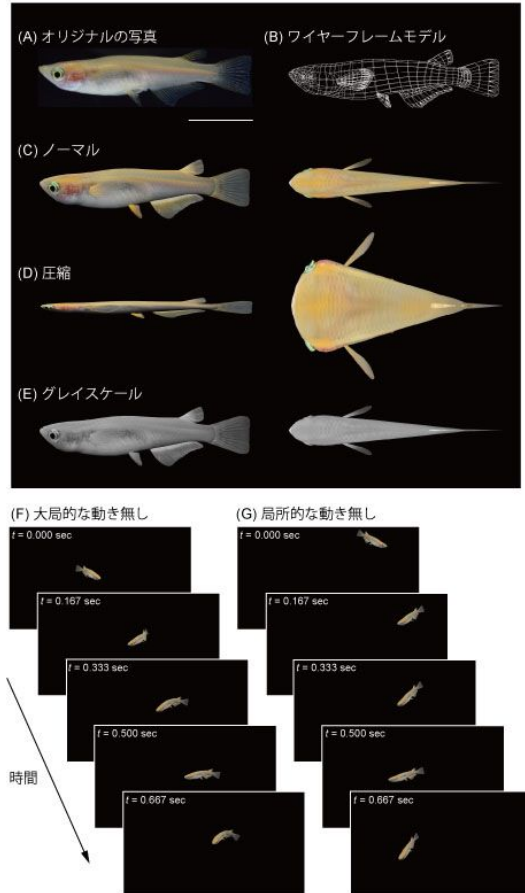
(2)

メダカの3次元ポリゴンモデルは、以下のように作成した。モデリングのために、実際のメダカの写真をデジタルカメラで背面、正面および左側から撮影した。ポリゴンモデルは、3つの写真を参考にして3Dモデリングソフトウェア3ds Max(Autodesk, California, USA)で作成され、FBX形式に変換される。別の3DモデリングソフトウェアBlenderでは、変換されたファイルをインポートして、テクスチャとモーションをポリゴンモデルに追加した。テクスチャファイルは、ポリゴンモデルの作成に使用されたメダカ魚の3つの写真で作成した。

(3)

メダカの動きは以前の我々の研究室で作成したバイオロジカルモーションを転用した(Nakayasu and Watanabe, Animal

Cognition 17, 559-575, 2014)。バイオロジカルモーションは三次元の座標データのため、これをオイラー角変換によってBVHファイルを作成した。3DモデリングソフトウェアBlender上のメダカのポリゴンモデルのメダカの背軸にBVHファイルを適用してコンピュータグラフィクスを完成させた(図1)



【図1】実験に使用したメダカの3DCGアニメーション。オリジナルの写真を元にしてワイヤーフレームのポリゴンを作り、その上に写真を貼り付け、動きは体軸上に本物のメダカの動きから得られたデータを組み込む。

(4)

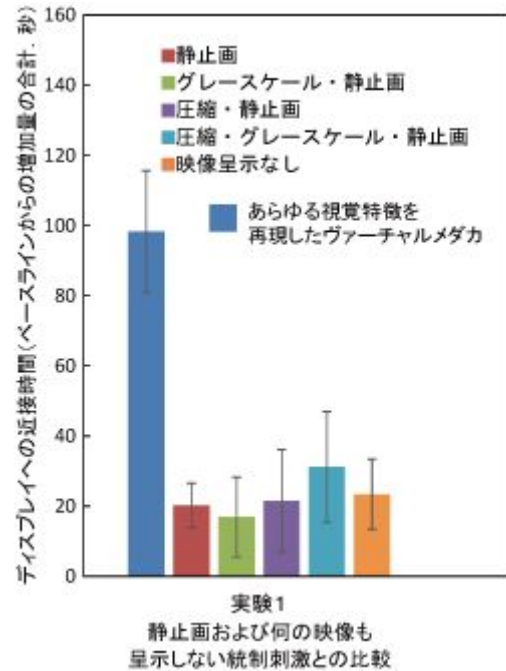
内径15センチ四方の水槽(水の高さは8センチ)をコンピュータディスプレイの前に設置し、水槽にメダカを1匹入れ、1時間の馴致を行った。その後、ディスプレイに視覚刺激を五分間提示した。メダカの撮影は刺激提示前の1分間を加えて計6分間おこなった。動画からメダカの先端座標をトラッキングし、ディスプレイから10ミリ以内に先端座標が入っている時間を計算した。視覚刺激をしていない最初の1分間の値から上昇した部分を社会性接近と定義した。

4. 研究成果

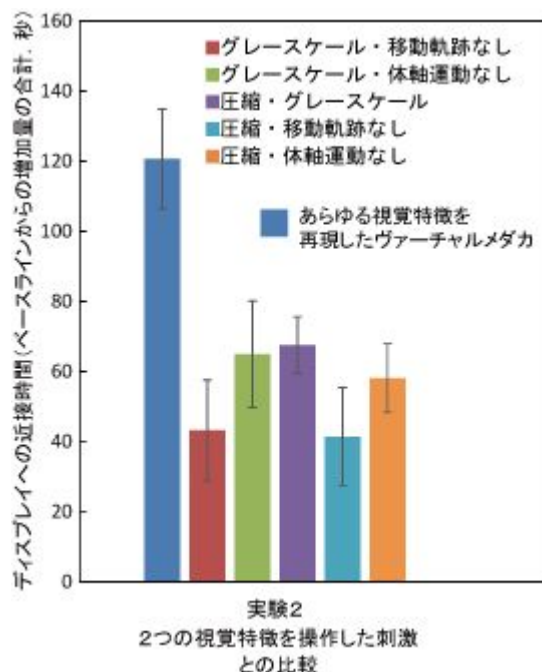
(1)

三種類の実験を行った。ひとつめは、動き

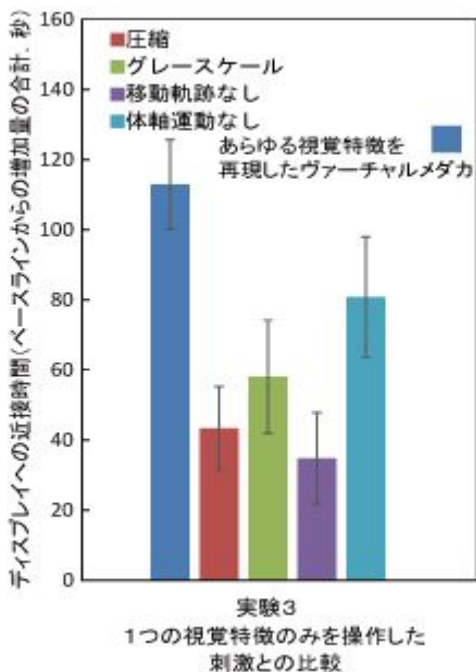
の与える影響をみるために、すべてのアニメーションの動きを止めた実験を行った(実験1)。二番目の実験は、ふたつの視覚特徴を同時に操作した刺激での比較である(実験2)。三番目の実験は、ひとつの視覚特徴のみを操作した視覚刺激との比較である(実験3)。すべての実験の結果をまとめて図2、図3、図4に示す。



【図2】縦軸は5分間の内、メダカの先端がディスプレイから10ミリ以内に入っている時間。一番左が色、形、動きを全て再現した疑似メダカを提示した場合。動きをなくすとメダカの近接行動が消失していることがわかる。



【図3】図の見方は図2と同じ。ふたつの視覚特徴を同時に操作した刺激は近接行動が半分程度に減少していることが分かる。



【図4】図の見方は図2と同じ。ひとつの視覚特徴を同時に操作した刺激は近接行動が半分程度に減少していることが分かる。視動が半分程度に減少していることが分かる。ただし、体軸運動を除いた刺激においては、その減少度は抑えられている。

(2)

以上の結果から、3DCGアニメーションなどのバーチャルリアリティ技術はメダカの群れ行動研究のために応用可能であること、メダカは群れる相手を選択する際、特定の視覚特徴に反応するというよりむしろあらゆる視覚特徴を活用すること、などが示唆された。

これまで、色・形・移動軌跡・体軸運動などのあらゆる情報を同時に統制・操作しなければ、それぞれが群れ行動に対してどれほど影響を与えているのかは厳密には検証できなかったが、3DCGアニメーションを活用することで従来不可能であった研究が可能になった。特に、尾ビレなどの局所的な動きのみを取り除く、移動運動のみを止めるなどの運動情報の高度な操作の影響の分析は、本研究が世界初の試みである。従来は、ノーベル賞受賞者であるティンバーゲンによるイトヨを用いた実験が示すように、特定の視覚刺激が行動誘発のカギとなっていると考えられてきたが(イトヨの場合には、お腹が赤い模様を見せることで攻撃行動を誘発)、少なくともメダカにおいてはあらゆる視覚情報を駆使して群れる相手を選択している可能性が示唆された。今後、種間比較実験、性行動や攻撃行動場面など様々な事態での実験などさらなる追加検討が必要だが、本成果は、

動物の視覚認知メカニズムの研究の発展に貢献するものと考えられる。

(3)

今後の展開としては以下のようなことが考えられる。先述のように、種や実験場面を変えて追加検討を行うことに加えて、さらに細かな情報操作を行うことで、動物の視覚世界の一端が解明されていくものと考えられる。また、本研究ではあらかじめ撮影した映像からメダカの動きを再現し、それをディスプレイに映し出したが、次の段階としては、リアルタイムでバーチャル生物の動きを操作することに加えて、ディスプレイではなく水中でバーチャル生物の像を結像させるなど、さらなる技術的改良を行えば、実際の生き物とバーチャルな生き物との相互作用が可能になる。小型魚の群れと大型魚が織りなす振る舞いについての実験的検討が可能になり、水族館などでのショーへの応用が期待できる。3DCGアニメーションをはじめとするバーチャルリアリティ技術を活用した動物行動実験は、我々に新たな世界を見せてくれるであろう。

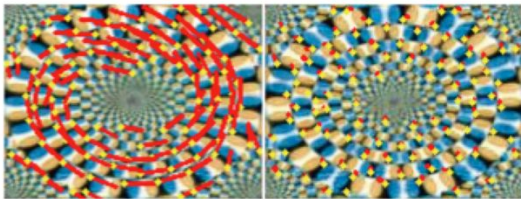
(4)

上記研究の応用として、基礎生物学研究所の吉村研究室との共同研究を行った。通常のメダカだけでなく、実験操作が加えられたメダカに同システムを応用することは、汎用性を確かめるのに重要である。本研究では、メダカの色覚に季節変化が存在することを明らかにした。動物たちは環境の変化によって、光感受性や色覚をダイナミックに変化させることで毎年繰り返される季節変化に、より良く適応していることが考えられている。ヒトにおいても色覚に季節変化があることが報告されており、メダカで明らかになった季節による色覚の変化は幅広い動物種に共通する仕組みである可能性が考えられる。本成果は科学雑誌 Nature Communications に、2017年9月4日付けで掲載された。

(5)

行動と視覚との関係を探っていくためには、動物の脳の中でどのような情報処理がなされているかを探る必要がある。そのために次期プロジェクトとして、研究プロジェクトに深層学習の手法を導入した。深層学習機は、脳の神経ネットワーク構造や動作原理を参照して設計された人工知能のひとつであり、近年、画像分類や音声認識など、幅広い分野で画期的な成果を収めているだけでなく、脳の動作メカニズムを研究するためのツールとしても期待が高まっている。今回我々は、大脳皮質の動作原理として有力な仮説のひとつである予測符号化理論を組み込んだ深層学習機によって、錯視の再現ができるかどうか検証を行った。深層学習機に、我々の日常生活などの自然な情景を撮影した動画(約

5時間)を繰り返し学習させたところ、学習した後の深層学習機は、実際に動いているプロペラが回転する動きを予測するだけでなく、蛇の回転錯視が引き起こす、あたかも画像が回転しているかのように見える回転運動様の錯覚すらも再現することがわかった。本成果は、錯視を深層学習機が再現した世界で初めての事例であり、錯視を引き起こすメカニズムのひとつとして予測符号化理論が有力な仮説であることを支持している。今後、錯視を判断基準にした深層学習は、脳の動作原理の解明に貢献すると期待される。本成果は2018年3月15日付けで学術誌 *Frontiers in Psychology* に掲載された(図5を参照)。



【図5】蛇の回転錯視(左図は左回転、右図は無回転)の運動知覚が深層学習機によって再現された。連続した二枚の予測画像からオプティカルフローを検出し、ベクトルとして表現した(黄色の点がベクトルの始点、赤い線がベクトルの方向と大きさを示している)。

本論文で「逆心理学(Reverse Psychology)」という手法を提案している。逆遺伝学が要素である遺伝子から生物個体の表現型を解き明かしていったように、逆心理学では要素であるニューロンの働きから心の表現型を解き明かしていくことになるだろう。逆心理学が新しい神経科学の地平を切り拓いてくれることを期待する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

Watanabe E, Kitaoka A, Sakamoto K, Yasugi M and Tanaka K, Illusory Motion Reproduced by Deep Neural Networks Trained for Prediction. *Frontiers in Psychology* 9:345. (2018)

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00345>

【査読有り】

Shimmura, T., Nakayama, T., Shinomiya A., Fukamachi, S., Yasugi, M., Watanabe, E., Shimo, T., Senga, T., Nishimura, T., Tanaka, M., Kamei, Y., Naruse, K., and Yoshimura, T., Dynamic plasticity in phototransduction regulates seasonal changes in color perception. *Nature*

Communications 8, Article number: 412 (2017)

<http://dx.doi.org/10.1038/s41467-017-00432-8>

【査読有り】

Nakayasu, T. Yasugi, M., Shiraishi, S. Uchida, S. and Watanabe, E., Three-dimensional computer graphic animations for studying social approach behaviour in medaka fish: Effects of systematic manipulation of morphological and motion cues. *PLoS ONE* 12(4): e0175059, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0175059> (2017)

【査読有り】

Nakayasu, T. and Watanabe, E., Analysis of movements of medaka fish and construction of 3D animation. *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*. 4, 232-235 (2015)

【査読有り】

Nakayasu, T. and Watanabe, E., Biological motion stimuli are attractive to medaka fish. *Animal Cognition* 17, 559-575 (2014).

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10071-013-0687-y>

【査読有り】

〔学会発表〕(計11件)

八杉公基、渡辺英治 同種他個体へのメダカの接近行動を引き起こす行動要素の抽出 第40回日本神経科学学会(2017)

新村毅、中山友哉、四宮愛、深町昌司、八杉公基、渡辺英治、下貴行、千賀琢未、西村俊哉、田中実、亀井保博、成瀬清、吉村崇 メダカの体色と色覚の季節適応 第88回日本動物学会(2017)

新村毅、中山友哉、四宮愛、深町昌司、八杉公基、渡辺英治、下貴行、千賀琢未、西村俊哉、田中実、亀井保博、成瀬清、吉村崇 Dynamic plasticity in phototransduction regulates seasonal changes in color perception. 第24回日本時間生物学学会(2017)

八杉公基、渡辺英治 Lateral asymmetry in eye use evasive response of medaka fish. 第39回日本神経科学学会(2016)

宮坂健寛、水野慎士、渡辺英治 運動視差を用いた魚の視覚機能解析システムの提案 第78回情報処理学会(2016)

中易知大、渡辺英治 Using 3DCG animations to study shoaling behavior in medaka: effects of systematic manipulation of morphological and motion cues. 第75回日本動物心理学学会(2015)

Tomohiro Nakayasu and Eiji Watanabe, How to hack animals using virtual reality technologies. Behaviour 2015, a joint meeting of the international ethological conference (2015) 招待講演

中易知大、渡辺英治 Effects of systematic manipulation of morphological and motion cues on shoaling behavior in medaka: study by using 3DCG animation 第38回日本神経科学学会(2015)

Tomohiro Nakayasu and Eiji Watanabe, Analysis of movements of medaka fish and construction of 3D animation. International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms (2014)

中易知大、渡辺英治 A study on making 3DCG animation of medaka. 第74回日本動物心理学学会(2014)

中易知大、渡辺英治 A preliminary study on the morphological and motion cues involved in the induction of shoaling behavior by using 3DCG animation of medaka. 第37回日本神経科学学会(2014)

〔その他〕

ホームページ等

リアルなヴァーチャルメダカ、メダカの群れ形成メカニズム解明に貢献

<http://www.nibb.ac.jp/press/2017/04/12.html>

メダカの色覚が季節によってダイナミックに変化することを発見

<http://www.nibb.ac.jp/press/2017/09/04.html>

深層学習によって「蛇の回転錯視」の知覚再現に成功

<http://www.nibb.ac.jp/press/2018/03/20-2.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 英治 (WATANABE, Eiji)

基礎生物学研究所・神経生理学研究室・准教授

研究者番号：30250252

(2) 研究分担者

該当無し

研究者番号：

(3) 連携研究者

中易 知大 (NAKAYASU, Tomohiro)

基礎生物学研究所・神経生理学研究室・研究員

研究者番号：90623091

(4) 研究協力者

該当無し