

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00329

研究課題名(和文) 深層学習を用いた生物との双方向コミュニケーションの確立

研究課題名(英文) Establishing mutual communication between organism and machine using deep learning

研究代表者

飯塚 博幸 (Iizuka, Hiroyuki)

北海道大学・情報科学研究院・准教授

研究者番号：30396832

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：メダカを実験の対象とし、リアルタイムに検出したメダカの位置に応じて視覚刺激を生成し提示する双方向相互作用システムを構築した。この実験装置を使用して、人工物とメダカの間で双方向相互作用が可能である条件と、単方向相互作用条件とを比較して、人工物とメダカの間で双方向相互作用が成立可能かを実験した。相互作用条件のときにリアルなメダカは人工物に興味を示し、単方向相互作用実験よりも人工物の存在する画面の方に滞在する時間が増加した。つまり、双方向の時に、リアルなメダカの特定の行動を誘発することが可能であった。これはコミュニケーション様の相互作用を人工物とメダカの間で実現できたといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今までの人工物を用いた生物の振る舞いを明らかにする実験では、本当の生物の動きを記録したものを再生するか、あらかじめ人工的に作られた動きを再生するプレイバック実験しか行われてこなかった。これは我々の行った実験のnon-reactive条件に相当する。それに対して、我々の実験では、リアルタイムに生物の動きを計測し、瞬時に人工物の動きを生成することで、人工物と生物の間で双方向相互作用を成立させることに成功した。結果としては、生物は双方向と単方向の相互作用で異なる振る舞いを見せ、生物の新たな実験ステージへと開いた。

研究成果の概要(英文)：We constructed a mutual interaction system between machine and fish (medaka). The system can generate and show visual stimuli of machine movements in response to the movements of the real medaka which are detected in real time. Using this experimental apparatus, we compared the real medaka behaviors to the artificial movements generated by reactive (mutual) or non-reactive (unidirectional) way. Real medaka were more interested in reactive artificial movements and spent more time on the screen showing the reactive artificial movements than non-reactive one. In other words, it was possible to induce specific behaviors in real medaka under the mutual interaction. It can be said that the communication-like interaction between the artifact and the medaka has been realized.

研究分野：人工生命

キーワード：生物機械間相互作用 双方向相互作用 メダカ

### 1. 研究開始当初の背景

生物がどのように対象物を認識しているかを解明するために、人工的に生成されたものに対する生物の反応を調べる研究は広く行われている。例えば、メダカの水槽に併設された画面上に白点を表示して、その白点の運動をミジンコ等の運動に現れるピンクノイズや  $1/f$  揺らぎで制御すると、メダカの白点に対する捕食行動が増加する[1]、メダカはバイオリジカルモーションを認識している[2]、カオス振動子によって生成された運動で動く猫じゃらしに猫は強い興味を示す、 $1/f$  の揺らぎをもつ運動に人間は生物らしさを感じる[3]、といった研究がある。生物の適応能力を解明する例では、生物と新たな身体としての機械を融合し、その制御能力を評価することが行われている[4]。このように生物の能力を解明する目的として、人工的な刺激や機械を用いた研究が行われ、生物の認識や適応能力について解明が進んでいる。

### 2. 研究の目的

本研究とこれらの先行研究との違いは、対象とのやりとりである相互作用にある。カオス猫じゃらしは内部にあるカオス振動子にもとづいて運動するだけで、猫がどう動いているかは関係ない。また、メダカに提示している白点やバイオリジカルモーションの運動においても、それぞれの運動の特性としてピンクノイズ、 $1/f$  揺らぎや記録された生物の動きがあるだけで、対象となる生物がどう動いているかは問わない。すなわち、機械的な刺激は、生物に対して1方向的な情報提示となっている。ここで考えるのは、人工物によって提示された刺激に対して生物が動いて、その動きから人工物が次の運動を決定し、そして、生物が機械の運動を観測した結果、生物が次の運動を生成するという循環構造である双方向の相互作用である。1方向的な相互作用は人工物からの情報提示に過ぎず、双方向的な相互作用はコミュニケーションとなる。この生物のコミュニケーション能力を明らかにするために、人工物と生物の間でコミュニケーションを成立させることが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

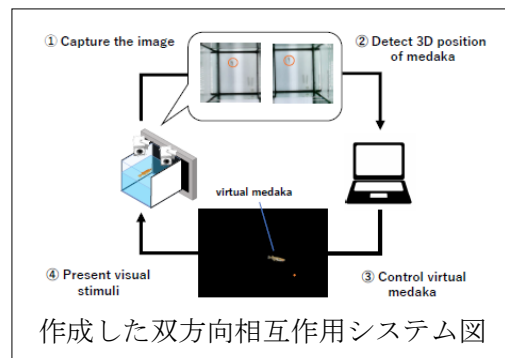
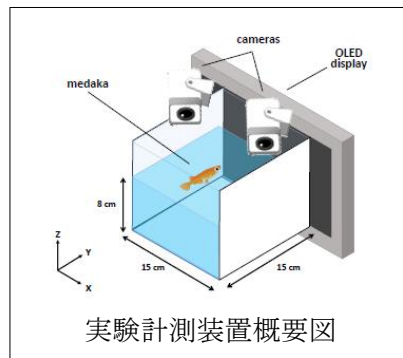
対象とする生物は計画通り社会性があることがわかっているメダカを使用した。研究計画どおり、初年度に双方向相互作用を行うことが可能な基本的な実験装置の構築を行い、まずは1方向的な情報提示によるメダカの視覚刺激に対する基本的な行動を明らかにし、次年度以降に双方向相互作用を成立させる実験を行った。

実験装置は主に、15cm の立方体のガラス水槽、2 台の web カメラ、メダカに対する情報提示用の有機 EL ディスプレイ、リアルタイムのメダカの位置計測用兼メダカへのフィードバック刺激制御用コンピュータからなる。2 台の web カメラは水槽の上方 10cm に固定され、実験の対象となるメダカの三次元位置を推定するために用いられる (装置概要図)。有機 EL ディスプレイは水槽の 1 つの面に取り付けられ、メダカに視覚刺激を提示する。ディスプレイに表示される視覚刺激以外の水槽外部からの視覚刺激を制限するために、ディスプレイに向かって左右の 2 つの側面の外側に白いポリスチレンのシートを取り付けた。外部からの刺激を減らすために、これらの実験設備は暗幕で覆われた卓上暗室内 (60cm x 40cm x 60cm) に設置する。

実験装置全体では、以下のプロセスを経て、人工物とメダカ間の相互作用の循環構造を形成している (双方向相互作用システム図)。(1) 2 台のカメラで取得したメダカの画像からステレオマッチングによって、水槽内のメダカの 3 次元位置をリアルタイムに推定する。(2) メダカの行動系列を入力として、メダカへの視覚刺激の動きを計算する。(3) 計算結果をディスプレイ上に表示し、メダカへの応答とする。

メダカに提示する人工物としての視覚刺激は、様々なものを用いたが、最終的には、先行研究に合わせた単一の小さな白点、バイオリジカルモーション様のメダカのサイズに合わせた 6 つの白点が連なったもの、コンピュータグラフィックスで表示したメダカの 3DCG モデルの 3 種類用いた。

人工物とメダカの間で双方向相互作用が成立しているかどうかを検証するメインの実験では、reactive と nonreactive の 2 つの条件で対照実験を行った。reactive の条件では、双方向相互作用システムシステムを用いて、人工物はリアルタイムのメダカの動きに応じて動きを決定する双方向相互作用が可能な視覚刺激を提示する。一方で、non-reactive の実験では、reactive の実験で生成された視覚刺激を記録しておき、メダカの動きとは関係なくその映像を視覚刺激として提示する。これは、人工物の位置や速度などの分布が reactive の実験と全く同じだが、



実験の対象のメダカの位置と関係なく動くためメダカから人工物への作用がなく、双方向の相互作用が起こらないことを意味する。この reactive 条件と non-reactive 条件は、別個体に独立な実験として行うこともあれば、同個体に対して、時間的に条件を変化させる実験を行って、reactive と non-reactive の検証を行った。

人工物の動きは、当初の実験計画では、深層強化学習を用いて学習によって獲得することを計画した。この方法は、計画通りに2年目、3年目に繰り返し実験を行い、実験データも得られたが、再現性が乏しく学習も安定しなかった。そこで、双方向相互作用をより安定して成立させるために、生物集団の振る舞いを再現することで有名なボイドモデルを用いた実験も並行して行い、双方向相互作用を成立させた。ボイドの個体は、結合、分離、整列の3つのルールに従って動きを決定する。取得した対象のメダカの三次元位置を x-z 平面 (x: 水平軸, z: 鉛直軸) に投影し、その二次元の位置に対して人工物はボイドモデルのルールによって動きを決定する。この実験では、実験の対象となるメダカと人工物の2個体のみでシミュレーションを行うため、人工物(a)の位置と速度はメダカ(m)の位置と速度を用いて以下の式により計算した。

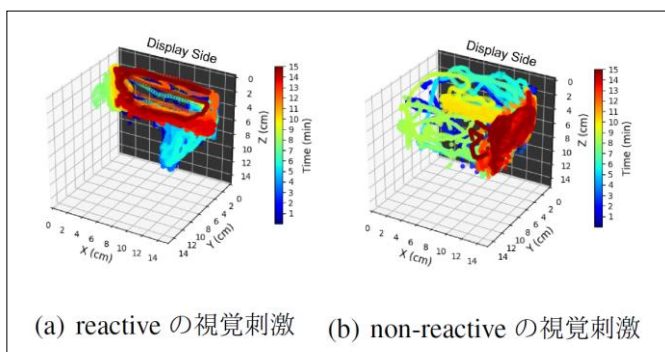
$$v'_a = v_a + \alpha(p_a + p_m) + \beta \frac{(p_a - p_m)}{\|p_a - p_m\|} + \gamma(v_m - v_a),$$

$$p'_a = p_a + v'_a.$$

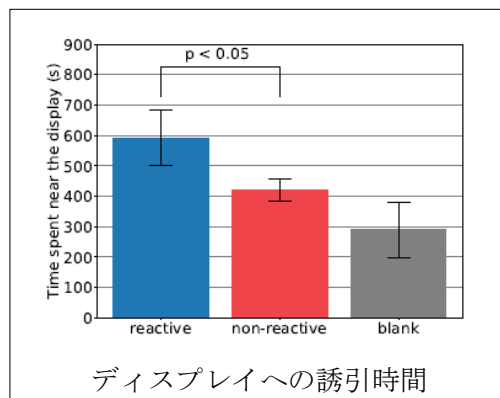
#### 4. 研究成果

初めに、異個体に reactive と non-reactive 条件を独立に行った実験成果を示す。単一の白点の視覚刺激を提示したときの、reactive と non-reactive の実験での代表的なメダカの軌跡の例を図に示す。黒の面がディスプレイの取り付けられた面、色の変化が時間の経過を表している。

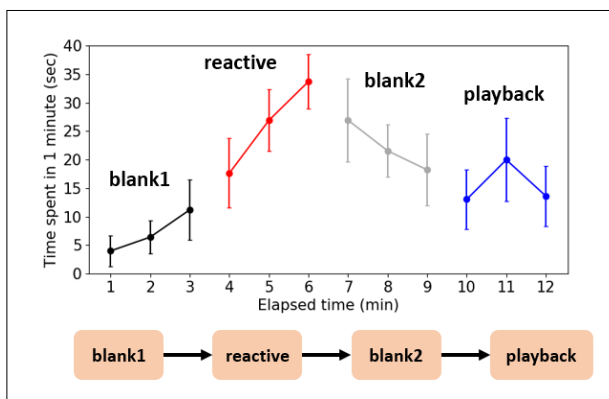
reactive の単一の白点の視覚刺激を提示したとき、メダカはディスプレイの近くに長く滞在した。実際のメダカの動画では、視覚刺激が提示されるとメダカの振る舞いが明らかに変化し、活発に白点を追いかけている様子が観察された。一方、non-reactive の単一の白点の視覚刺激を提示したとき、reactive の視覚刺激を提示した場合と異なり、メダカがディスプレイの近くに偏って滞在することなく水槽全体を泳いでいる



様子が観察された。これはメダカに視覚刺激を提示しなかったときのメダカの軌跡と同じ傾向である。これらの結果は、バイオリジカルモーション様の視覚刺激や 3DCG モデルにおいても、おおよそ同様の結果が得られた。メダカがどの程度視覚刺激に誘引されたかを定量化するために、メダカがディスプレイから 3cm 以内の領域に滞在した時間を計測した。3cm という設定は、メダカの大きさがおよそ 3cm であることに基づいている。白点の視覚刺激を提示した実験でディスプレイから 3cm 以内の領域に滞在した時間を示す。ディスプレイから 3cm 以内の領域に滞在した時間は、reactive の視覚刺激を提示した場合、平均で 591 秒であり、non-reactive の視覚刺激を提示した場合、平均で 420 秒であった。t 検定によりこれらの実験の間で有意に差があることが確認された (p=0.04)。



次に、同個体に対して、reactive 条件と non-reactive 条件を時間的に変化させたときの実験成果について述べる。右図に人工物に 3DCG モデルを用いたときの結果を示す。Blank のときにはディスプレイには何も表示せず、真っ暗な状態である。結果をみると、reactive のときにより、ディスプレイに誘引され、Blank になると興味を失い、non-reactive (図中 playback) 条件のときには、reactive ほど誘引されていないことがわかる。また、図には示していないが、ボイドの動きのパラメータを変えると、メダカの誘引効果にも違いがあ



ることが示された。

このように、reactive 条件のときにリアルなメダカは人工物に興味を示し、non-reactive である 1 方向相互作用実験よりも人工物の存在する画面の方に滞在する時間が増加した。双方向相互作用の時に、リアルなメダカの特定の行動を誘発することが可能であった。これはコミュニケーションのような相互作用を仮想メダカとリアルなメダカに実現できたといえる。

先行研究では、実際のメダカの録画映像から抽出した動きの、バイオリジカルモーションおよび 3DCG アニメーションがメダカを誘引することを示した。これらの研究では、提示された視覚刺激の動きは non-reactive であるにも関わらず、メダカを誘引した。これは、視覚刺激の動きのパターンが実際のメダカの動きがもつ特性と同じであり、メダカがそのパターンに反応したことによると考えられる。本研究で行った実験のボイドモデルは、群れを再現することで知られてはいるものの、必ずしもメダカの動きの特性を持っていない。我々の実験の結果では、non-reactive のボイドモデルの動きの視覚刺激は、reactive の実験と同じ動きであり速度などの分布が一致しているにも関わらず、メダカを誘引しなかった。つまり、ボイドモデルの動きを提示した場合には、動きの持っている特性によってではなく、双方向に相互作用が起こることによってメダカが誘引されていることが考えられる。

最後に、深層強化学習を用いる方法については、生物と双方向の相互作用を見せる結果も得られたが、結果の再現性が十分といえるまでには至らなかった。深層強化学習のデータには確度の高い再現性が必要とされ、生物を交えた相互作用のデータにおいては再現性が乏しく、学習が安定しなかったのもその原因と考えられる。しかし、ボイドモデルでも双方向の相互作用を成立させることが可能であったため、学習の安定を図れば、強化学習を用いた方法も可能であると考えている。

#### <引用文献>

- ① Matsunaga, W., and Watanabe, E., (2012). Visual motion with pink noise induces predation behaviour. *Scientific Reports* 2, 219.
- ② Nakayasu, T., and Watanabe, E., (2014). Biological motion stimuli are attractive to medaka fish. *Animal Cognition* 17, 559-575.
- ③ Fukuda, H., & Ueda, K. (2010). Interaction with a moving object affects one's perception of its animacy. *International Journal of Social Robotics*, 2(2), 187-193.
- ④ Emoto, S. & Ando, Noriyasu & Takahashi, H. & Kanzaki, Ryohei. (2007). Insect-controlled robot - Evaluation of adaptability. *J Robot Mechatron*. 19. 436-443.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Katsuki Auchi, Wataru Noguchi, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto	4. 巻 25
2. 論文標題 Effect of Reactivity Artificial Medaka on Real Medaka	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the twenty-fifth international symposium on Artificial life and Robotics	6. 最初と最後の頁 86-89
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 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 -
1. 著者名 Hiroyuki Iizuka, Yosuke Nakamoto, Masahito Yamamoto	4. 巻 31
2. 論文標題 Hybrid Synthetic Approach to Animal Interaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the Artificial Life Conference 2019	6. 最初と最後の頁 50-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1162/isal_a_00139	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 Yosuke Nakamoto, Hiroyuki Iizuka, Masahito Yamamoto	4. 巻 24
2. 論文標題 Establishing Mutual Interaction between Artificial and Real Medaka	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the twenty-fourth international symposium on Artificial life and Robotics	6. 最初と最後の頁 633-637
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 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 -
1. 著者名 Hiroyuki Iizuka, Yosuke Nakamoto, Masahito Yamamoto	4. 巻 30
2. 論文標題 Learning of Individual Sensorimotor Mapping to Form Swarm Behavior from Real Fish Data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 Conference on Artificial Life	6. 最初と最後の頁 179-185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1162/isal_a_00039	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 Nakamoto Yosuke、Iizuka Hiroyuki、Yamamoto Masahito	4. 巻 1
2. 論文標題 Reproduction of swarm behavior by learning individual rules using neural network	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)	6. 最初と最後の頁 847-852
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SII.2017.8279328	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1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Hiroyuki Iizuka
2. 発表標題 AI applications to swarm behaviors
3. 学会等名 Swarm Intelligence in AI and ALife workshop on Swarm 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分担者	山本 雅人  (Yamamoto Masahito)  (40292057)	北海道大学・情報科学研究院・教授   (10101)	