

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：56101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630181

研究課題名(和文) 魚ライクロボットの遊泳行動と魚群との相互作用およびその応用可能性

研究課題名(英文) A study of the Interaction of Behavior between Small Swimming Robot and Fish Schooling

研究代表者

福田 耕治 (FUKUDA, Koji)

阿南工業高等専門学校・創造技術工学科・教授

研究者番号：40208955

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：人工物である小型水中遊泳ロボットを魚群に投入した場合の挙動を計測し、魚の行動モデルを明らかにすることで魚群制御への応用可能性を探るべく研究を展開した。刺激に対する魚行動を計測し、その行動をカオス・フラクタル理論を適用することで数値的に評価した。この際に必要な画像処理を中心とする解析プログラムも開発した。また、魚行動モデルによるシミュレーションシステムを改良し、実験による結果との比較を行った。一方、小型水中遊泳ロボットの開発が遅れたため、ロボットを魚群に投入した場合の挙動計測には至らなかった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a research about possibility of fish schooling control to build the behavior model for the real and artificial interaction through the experimental analysis of fish behavior in a water tank. The trajectories of fishes were recorded under light stimulus, and the fish behavior was evaluated using chaos-fractal theories. We have succeeded at the development of image processing system and simulation system to compare the experimental results. However, we haven't finished the development of small swimming robot, the experiment has not been executed using the robot.

研究分野：工学

キーワード：魚行動モデル 魚群 魚群行動シミュレーション 水中遊泳型ロボット

1. 研究開始当初の背景

本研究グループでは魚の行動解析手法の提案、魚行動モデルを実装した移動ロボットによる行動生成とその評価について研究している。これらの研究の目的は、主に魚類の環境に対する適応行動を人工生命の立場で解析すること。特にエッジ領域と呼ばれる自由行動領域の境界近傍での魚類の行動を実験的に観察してカオス・フラクタル理論に基づき行動を分析することで、行動が拘束されるエリアでの生物の適応行動ルールを抽出してアルゴリズム化し、新しいシミュレーション技術の可能性を探ることである。そして、これまでの研究により以下の成果を得ている。

- ・魚の泳速ノルムのアトラクタがカオス性を有し、時系列データがフラクタル性を有することを確認した。
- ・遊泳軌跡の自己アフィン指数より、軌跡がマルチフラクタル性を有することを確認した。
- ・移動ロボットに魚行動モデルを実装し、魚行動に近い行動を生成できることを確認した(図1参照)。

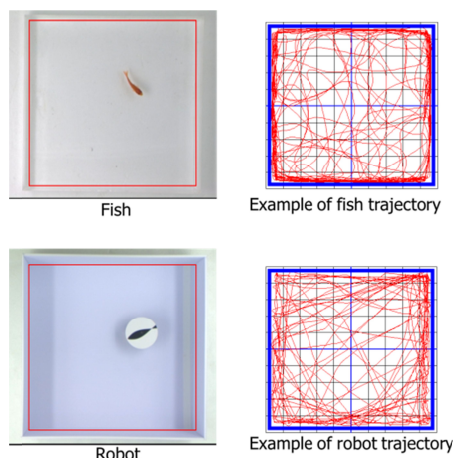


図1 魚とロボットの移動軌跡

しかし、これらは基本的に魚を単独で遊泳させた場合の成果である。そこで、本研究では以上の成果を適用・発展させ、魚群を対象に個々の魚の行動をカオス・フラクタル理論に基づいて定量的に解析評価して魚群における魚の行動モデルを獲得する必要があると考えるに至った。

2. 研究の目的

本研究グループでは、これまでに魚行動に着目し、カオス・フラクタル理論を用いて魚行動の定量的解析を行っている。また、これと同時に魚行動の解析結果に基づき、移動ロボットに魚行動モデルを実装して生物学的行動パターンが再現できることを確認している。このように、魚類に対し、その行動を定量的に評価し、それをロボットの移動解析に用いることで行動モデルを評価する研究は

他では行われていない。そこで、本研究では、新たに水中を遊泳する小型ロボットを開発し、魚行動モデルを実装する。そして、そのロボットを魚群近傍で遊泳させた際に得られる魚群との相互作用を定量的に解析することで、魚群の誘導や逃避を含む魚群制御の可能性を検討し、応用への有効性を明らかにする。

3. 研究の方法

既に述べたように、研究提案者はこれまでにカオス・フラクタル理論を用いた魚行動の定量的解析を行っており、それを用いて移動ロボットの移動軌跡を評価することにより魚行動に近い移動を発生させる行動モデルを得ている。ここで、魚群に異なる生物や人工物を投入した場合、一般には逃避・回避行動をとると予想されるが、人工物の挙動や形態で魚群の反応挙動は異なるのではないかという着想を得た。また、魚群を構成する魚類の行動は、各自の環境状況の影響、すなわち魚群を構成する周囲近傍の魚挙動の影響を強く受けることは、論理的にも明白である。そして、魚群を構成している魚どうしが相互に影響し合うシステムを一種の複雑ネットワークととらえ、魚類および人工物の相互作用の結果として人工物により魚群が受ける影響を、魚類の行動モデルに導入できないかと考えるに至った。すなわち、これまで実施してきた研究およびその成果に基づき、魚群中の魚行動を定量的に評価し、それを魚類の行動モデルに導入することで魚群の制御可能性を検討するのである。ここで、魚群に対して投入する人工物であるロボットは必ずしも魚類に近いものである必要は無いが、ロボットを少しずつ変化させて魚群の挙動変化を定量的にとらえることで、魚類の行動モデルの開発と精度向上を目指すものである。

阿南高専、徳島県水産研究所、県漁協が連携し、以下のように研究を進める。

カオス・フラクタル理論を用いた魚群における魚行動の解析：徳島県沿岸で捕獲した魚類(マアジを対象とする)を水産研究所にて実験し、解析評価する。

魚マイクロロボットの開発：魚群中に投入することを目的とする、リモコン動作および自律的に魚行動モデルに基づく遊泳パターンを再現可能なロボットを開発する。

魚群中の魚類行動モデルの構築と魚マイクロロボットへの実装：の解析結果に基づき、魚行動モデルを構築するとともに、それを で開発したロボットに実装して、さらに を実施する。なお、構築した魚行動モデルに基づきシミュレーションを行うシステムも開発し、モデルの検討ができるようにする。

行動モデルの改良と魚群制御の可能性を検討： と を繰り返すことで魚類行動モデルを改良することができ、それらの知見に基づいて魚群制御の可能性も検討する。

4. 研究成果

(1) 魚群行動計測実験

本研究では、当初矩形水槽を用いて魚群の行動を計測する実験を行った。しかしながら、領域の異方性を解消するため水槽を円形に変更した。さらに、ロボットを投入する前の実験として、光刺激の有無による魚行動について実験を行った。実験システムでは、水槽を真上からビデオ撮影し、魚を投入した後に一定時間馴致させた後のデータを利用して

いる。図2には矩形水槽を用いた実験画像と移動軌跡の例を示し、図3には円形水槽を用いた実験画像と移動軌跡の例を示す。なお、円形水槽の実験では、周囲光を暗幕用シートで遮り赤外線光器を利用して撮影しているため、モノクロ映像となっている。

図2に示した魚の移動軌跡を得るためのカラー画像解析処理プログラムは、研究期間以前に開発しているが、その一部の機能を本研究において開発している。また、図3に示した円形水槽における魚の移動軌跡を得るためのモノクロ画像解析処理プログラムは、適切な2値化閾値を追尾する機能を有しており、カラー画像解析処理プログラムとは全く別の処理が必要であった。このプログラムは、本研究期間内に開発している。

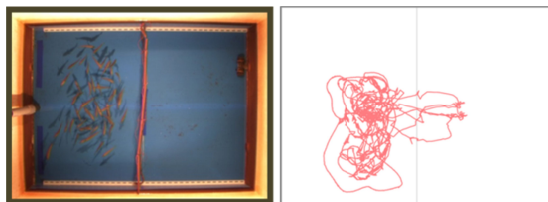


図2 魚群中の魚移動軌跡（矩形水槽）

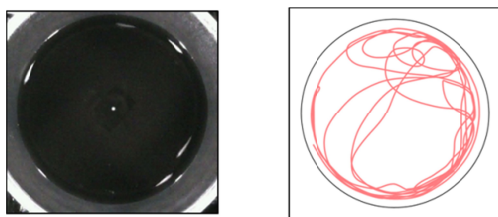


図3 魚群中の魚移動軌跡（円形水槽）

(2) シミュレーション

実験に対応したシミュレーションシステムの構築

我々は、本研究機関の開始までに魚の行動モデルを構築していたが、それは魚の周囲に円形状の誘引・忌避領域を設定するものであった。しかし、一般にはこのモデルには並行遊泳を誘発する領域があるとされている。本研究において、この領域の追加を行うモデル変更を行った。また、矩形水槽から円形水槽を用いた実験を実施したようにシミュレーションもこれに対応させた。矩形水槽と円形水槽のシミュレーションイメージを図4に示

す。図において青色・赤色・緑色の三原色は斥力・引力・並行遊泳の作用をもたらすように働く。並行遊泳領域を考慮したシミュレーションにより、実験で見られた「壁に沿って遊泳する」挙動を確認することができた。ここでは、特に壁に沿って遊泳する傾向が強く表れる、単独（1匹だけを投入する）での矩形水槽の実験とシミュレーションの結果を図5に示す。

さらに、刺激の有無による影響を検討するため、円形水槽については誘引刺激と忌避刺激を水槽中央部に配置した場合のシミュレーションを行っている。その結果例を図6に示す。これは実験と同様に5匹のアジを投入した結果のうちの一匹の挙動を示したものであるが、全般的にこの図に見られるように誘引作用の刺激を配置した方が水槽中央側に移動しやすく、忌避作用の刺激を配置した方が水槽周辺部を遊泳する傾向が強いことが確認できた。

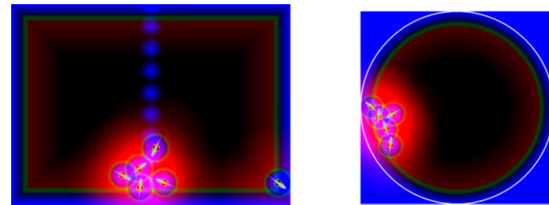


図4 シミュレーション実行画面例

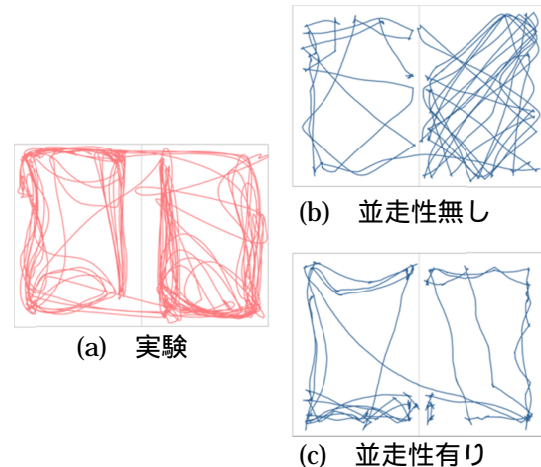


図5 魚移動軌跡例（単独魚）

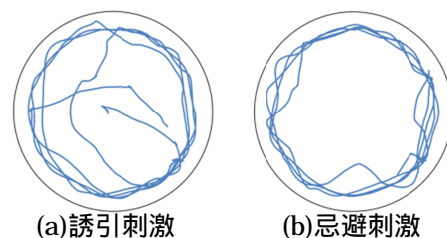


図6 シミュレーション例（5匹中の1匹）

数値的比較

ここまで述べてきた実験及びシミュレーションの結果のうち、矩形水槽の実験及びシミ

ュレーションの結果得られた複雑な魚の行動をカオス・フラクタル解析により評価比較した。特に今回は水槽への投入引数を変化させて数値的な変化をとらえようと試みた。

図7はリアプノフ指数、図8はフラクタル次元について比較している。並行遊泳を考慮した場合、リアプノフ指数もフラクタル次元も考慮しない場合に比較して大きくなった。図2から図6でもわかるように、並行遊泳を考慮することで遊泳軌跡は実験に近くなったが、リアプノフ指数やフラクタル次元は実験と異なる結果が得られた。

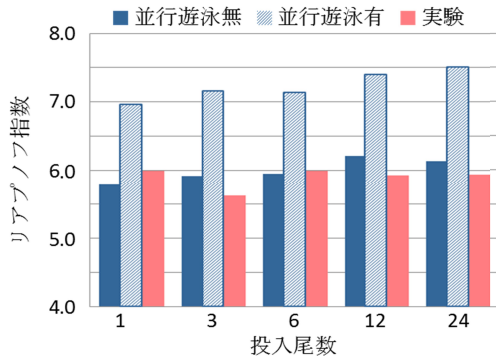


図7 リアプノフ指数の推移

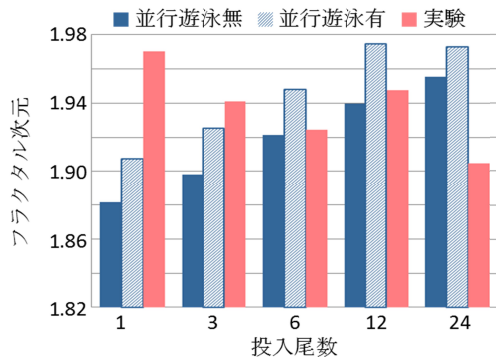


図8 フラクタル次元の推移

カオス・フラクタル解析によるシミュレーションと実験との相違は、モデルパラメータを調整することで対応しようと考えており、現時点でGAを用いた調整システムの開発を試みているところである。

(3)魚ロボット開発

本研究では研究の経緯から対象魚をアジに限定している。そこで、我々は小型遊泳ロボットを開発するにあたり、アジの遊泳フォームやサイズ・形状に近くなることを考慮した。

全体構成

開発したロボットの機能構成を図9に示す。遊泳機構はアジの遊泳フォームであるカランジフォームを実現するため、二軸のサーボ駆動による左右揺動機構とした。浮沈動作を実現するための姿勢センサおよび重心移動機構を駆動させる機能、さらには周囲との衝突を避けるための測距センサをおよそ220[mm]（先頭から尾ひれ最後尾までの全長

で250[mm]）にまとめている。

構成したロボットを図10に示す。なお、図10では後部の駆動部分が見えるようにシリコンゴムのカバーを外している。ロボットを構成する構造部品のほとんどは本研究課題の経費で購入した3Dプリンタにより造形しており、形状決定までに何度も試作した結果得られた成果である。

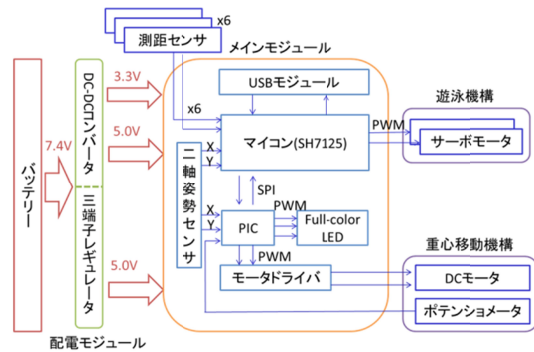


図9 小型遊泳ロボットの機能構成

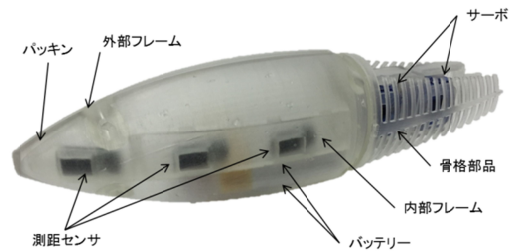


図10 製作したロボットの外觀

駆動方式の検討

本研究の期間内に、超音波リニアアクチュエータ、電磁サーボ、モータ駆動式サーボの3種類のロボット駆動方式について試作・検討した。その結果、駆動音は最も大きくなるものの、駆動回路も含めたサイズが最も小さくなることから、现阶段ではモータ駆動式サーボを利用することにした。

回路構成

図11には、小型遊泳ロボットに搭載する回路基板を示す。基板は2枚で構成されており、図中左がメインボード、右が電源ボードである。各ボードは、図9で示したロボットの機能構成に対応しており、ロボット本体内に配置できるように小型化に成功している。

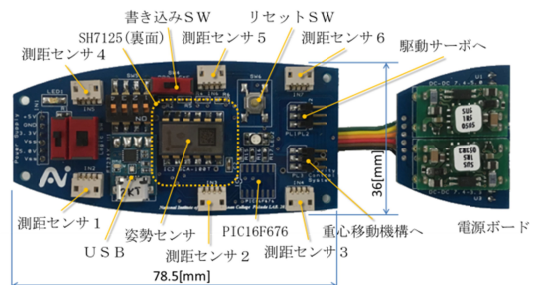


図11 ロボットの回路基板

以上のように、水槽における魚群行動の計測実験ならびにそのシミュレーションを行い、カオス・フラクタル解析を実施した。また、ロボット投入は魚群にとって外部刺激ととらえることができることから、光による刺激の影響について実験・シミュレーションの両面から検討した。ただし、これらの実験・シミュレーションなどは魚の遊泳領域を平面としてとらえている。今後の展開としては、3次元領域に対する研究を進めていく予定であり、計測方法を検討しているところである。

一方、小型遊泳ロボットの開発は本体機構製作、回路開発はほぼ終了したものの現時点で完成には至っていない。このため、研究期間内にロボットを魚群に投入した際の魚行動の実験や評価、それによる魚行動モデルの改変を実施することはできなかった。なお、ロボット開発は現在も進めており、今後の課題として研究を継続することにしている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 4 件)

櫛田佳那, 福田耕治, 杉野隆三郎, 森住昇, Computational Algorithm for Fish Schooling Using Bitmap Image, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, pp.937-942

森本眞樹, 杉野隆三郎, 福田耕治, 伊丹伸, 森住昇, Development of Measurement System and Complexity Analysis for Three-Dimensional Fish Swimming Behavior, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, pp.2245-2248

石原葵, 杉野隆三郎, 福田耕治, 森住昇, Numerical Accuracy of Extraction Shape from Point Cloud Using CIP-LSM, Proceedings of SICE 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, pp.2094-2099

大西章太, 川上蓮也, 福田耕治, 伊丹伸, 杉野隆三郎, Development of Small Swimming Robot to Control Fish Schooling - Bio-mimic Design and Prototyping -, Proceedings of SICE Annual Conference 2016, 査読有, 計測自動制御学会, 2016, 掲載予定

[学会発表](計 11 件)

田村元帥, 伊丹伸, 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 守岡佐保, LED 光刺激に対する魚類の遊泳行動の解析, 平成 25 年度日本水産学会秋季大会, 日本水産学会, p.21, 2013

櫛田佳那, 福田耕治, 杉野隆三郎, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, 魚群における魚行動シミュレーション, 平成 25 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, p.13, 2013
福田耕治, 櫛田佳那, 杉野隆三郎, 守岡佐保, 魚群行動シミュレーションと水槽実験との比較, 平成 25 年度日本水産学会秋季

大会, 日本水産学会, p.21, 2013

伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 守岡佐保, 海水魚の遊泳行動解析システムの開発, 平成 26 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, p.43, 2014

櫛田佳那, 福田耕治, 杉野隆三郎, 守岡佐保, 魚行動シミュレーションと水槽実験との比較およびシミュレーションモデルの改良, 平成 26 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, p.44, 2014

杉野隆三郎, 伊丹伸, 福田耕治, 小林美緒, 守岡佐保, 魚群サイズの定置網モデルに対するカオス・フラクタル性, 平成 26 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, p.10, 2014

藤川明広, 伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 守岡佐保, 枝川大二郎, LED 光刺激に対するマアジの遊泳行動解, 平成 26 年度日本水産学会秋季大会, 日本水産学会, p.23, 2014

沖野悠太, 伊丹伸, 福田耕治, 小林美緒, 枝川大二郎, 杉野隆三郎, LED 光に対する魚行動のカオス・フラクタル, 平成 27 年度電気関係学会四国支部連合大会, 電子情報通信学会, p.70, 2015

堀内悠暉, 福田耕治, 伊丹伸, 杉野隆三郎, 魚遊泳軌跡を得るためのマルチトラッキングプログラム, 2015 年度計測自動制御学会四国支部学術講演会, 計測自動制御学会, 2-08, 2015

川上蓮也, 福田耕治, 小型水中遊泳ロボットの開発, 2015 年度計測自動制御学会四国支部学術講演会, 1-23, 2015

伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 枝川大二郎, 上田幸男, LED 光刺激に対するマアジの群れ行動のカオス・フラクタル解析, 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 日本水産学会, p.23, 2016

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 耕治 (FUKUDA Koji)
阿南高専・創造技術工学科・教授
研究者番号: 40208955

(2) 研究分担者

杉野 隆三郎 (SUGINO Ryuzaburo)
阿南高専・創造技術工学科・教授
研究者番号: 10259822

(3) 研究協力者

守岡 佐保 (MORIOKA Saho)
徳島県立農林水産総合技術支援センター・水産研究課・研究員

(4) 研究協力者

真崎 登志雄 (MASAKI Toshio)
徳島県牟岐東漁協・職員