

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：56101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656249

研究課題名(和文) バイオミメティクス応用を目指したゆらぎ・行動律速原理による魚行動モデルの構築

研究課題名(英文) Study of fish behavior model under a principle of rate-limiting fluctuation and behavior for biomimetic application

研究代表者

杉野 隆三郎 (Sugino, Ryuzaburo)

阿南工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：10259822

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：バイオミメティクス応用可能なゆらぎ・行動律速原理による魚行動モデルの構築を目指してシステム工学と水産学を融合させた総合的な研究を展開した。様々な実験条件を持つ水槽実験から数学解析可能なデータを抽出することができる遊泳撮像システムと画像解析システムの基礎的技術を確立することができた。これらの実験結果から、漁網やLED光源等の他のオブジェクトに対する魚群の行動パターンを水槽実験と数値実験との比較を通してカオス・フラクタル解析し、魚行動を記述するモデル  $dx/dt = f(x)\text{activity} + b$  を修正することができ、魚行動を模倣する小型水中ロボットのプロトタイプが製作できた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a comprehensive research about combined with fisheries and systems science to construct the fish behavior models under 'a principle of rate-limiting fluctuations and behaviors' for biomimetics. We achieved success developing the foudamental technologies about imaging and its processing systems which can extract the mathematical datas from the water tank experiments under the various physical conditions. From these obtained results, we could make a modified fish behavior model  $dx/dt = f(x)\text{activity} + b$  in which we have compared with numerical simulations and water tank experiments about the behavior in the fish net model, LED light source model and so on. We have eventually made up the prototype small underwater robot with above mentioned technologies in which it can mimic the fish behaviors.

研究分野：工学

キーワード：バイオミメティクス 生命系のゆらぎ 生物の適応行動 魚類行動 カオス フラクタル 数理モデリング 制御アルゴリズム

### 1. 研究開始当初の背景

バイオメティクスは持続可能な技術開発の分野として重要であり、魚類の群行動に注目した交通機械の制御モデルの研究等が存在しているが、これらは定性的な観察から行動モデルを推測することに留まっている。そこで、我々は魚行動の精密なモデルを構築するためカオス・フラクタル理論をベースとした魚行動に関する研究を展開し、以下の研究成果を得た。

魚の泳速ノルムのアトラクタがカオティックであることを確認  
泳速ノルムの時系列データが時間フラクタルを有することを確認  
遊泳軌跡の自己アフィン指数がマルチフラクタルであることを確認  
移動ロボットに魚行動モデルを実装し、生物的行動パターンが再現できることを確認

ここで、本研究が拠り所とし、また工学的応用のベースとなる生物行動の数値モデリングのアイデアを示す。まず、柳田敏雄が生物分子モーターの研究で見出した生命系ゆらぎの原理方程式(1)を紹介する。

$$dx/dt = f(x) \cdot \text{activity} + b \quad (1)$$

ここで、 $f(x)$ はアトラクタを持つ制御構造、 $\text{activity}$ は環境に対するシステムの整合性、 $b$ はシステムの自発的ゆらぎを示すものであり、生命系で見られる動的パターンの構造は自発的ゆらぎと行動のせめぎ合いで律速されることを主張するものである。この原理に基づく人工物の制御システムはこれまでのif/then ルールを多用した制御モデルより格段にシンプルで、膨大な組み合わせ計算のコストを劇的に低減することがわかっている。しかしながら、我々がこれまで取得した魚行動と移動ロボットによる生物模倣制御実験のデータをカオス・フラクタルにより精密解析した結果、魚行動モデルをバイオメティクスに昇華させるには、この方程式では不足があることがわかってきた。そこで、式(1)をさらに発展させて次の式(2)で記述されることを提案する。

$$dx/dt = f(x) \cdot \text{activity} + b(t, x, \text{individual}) \quad (2)$$

本研究の着想点は、システムの自発的ゆらぎは単純にウィナー過程等を適用すべきではなく、時間  $t$ 、空間  $x$  そして生物個体の特性  $\text{individual}$  を独立変数とする関数的な確率過程を導入して、式(1)の定式化を発展させる点にある。さらに、この生物のシステムゆらぎとその制御手法を見出すには、カオス・フラクタルの指標を用いた行動解析が必要不可欠であることを提案する。

以上の魚類行動に関する数理的アイデアを先行研究の成果をベースに盛り込むことで、世界的に見ても極めて独創的な生物行動からのバイオメティクス応用可能な技術の開発を目指す。

### 2. 研究の目的

魚類行動の工学的応用に関する研究はいくつか存在している。しかしながら、これらの研究は魚行動の目視観察により遊泳行動パターンを類推し、行動変量の平均や分散など簡単な統計量を用いて行動モデリングをしているに過ぎず、カオス・フラクタルなどの複雑系理論を用いた魚行動の精密な科学的研究は、国外においてほとんど存在していない。また、魚類は乱流が非常に発達した海洋において群れ行動をとることにより省エネかつロバストな行動を取っていることが推測される。これは、魚群の周囲には群れを包み込む運動流塊  $\text{volume}$  が形成され、この集団中の各個体は単独で泳ぐよりもエネルギー消費を抑えることができるうえ、遊泳動線上に出現する環境の急激な変化にも安全な行動をとることが可能なる。このように不確定性の高い環境下で柔軟かつ高利得な運動を展開する魚類の行動を精密にモデリングし、その制御アルゴリズムを構築してバイオメティクス応用に挑戦することを目的とする。

具体的には阿南高専、徳島県水産研究所、漁協が産官学連携して次の目標を達成する。

魚類遊泳行動の解析と行動モデルの構築  
日本の沿海漁業において一般的な魚種について遊泳行動のデータを水槽実験とフィールド調査から取得する。そして、現在開発中のデータ解析ソフトウェアをさらに高精度化かつ汎用化することで、魚類の複雑な遊泳行動の精密な定量分析を可能にする。

#### 魚類行動シミュレーターの開発

得られた魚行動モデルを用いて海中の構造物や集魚灯など環境刺激下での魚群行動をシミュレーションすることができるソフトウェアを開発し、その有効性を実際の漁場や水槽実験の結果と比較することで検証する。

移動ロボットのロバスト制御技術の開発  
魚類行動から得られた行動モデルからその数理的定式化を導きだし、省エネでロバストな新しい制御アルゴリズムを開発する。そして、移動ロボットにこのアルゴリズムを実装して生物模倣制御の実験を展開することで、他の人工物制御への適用性を検証する。

### 3. 研究の方法

阿南高専、徳島県水産研究所、漁協が連携し、以下に従い研究を進展させる。

フェーズ1：複雑系理論による魚類行動の解析として沿岸で捕獲した魚類(アジ、ブリ)を水産研究所で実験、魚類の行動パターンをカオス・フラクタル理論で解析する。

フェーズ2：魚類行動モデルの構築と数理的定式化としてフェーズ1で解析した魚行動パターンから精密な魚行動モデルを構築し、ゆらぎ・行動律速方程式による数理的定式化を完成させる。

フェーズ3：魚類行動シミュレーターの開発としてフェーズ2の知見に基づき魚類行動シミュレーターを開発するとともに、実際の漁場フィールドにおける適用性を検証する。

フェーズ4：移動ロボットへの実装と応用技術の確立として得られた新しい定式化による人工物への省エネ・ロバスト制御技術を確認し、魚類行動に関する新しいバイオミメティクス応用を創成する。

平成 24～26 年度の研究期間において実施した方法の概要を年度毎に以下に示す。

平成 24 年度の方法)

(1) これまでに得られた研究成果をもとに魚種を特定した(アジとブリを想定)水槽実験を実施して単一個体と群れ行動を定量的に調べる。

(2) すでに魚行動を VTR 画像から解析する計測システムを開発し、環境刺激を受けた魚行動のカオス性・フラクタル性を抽出することに成功している。さらに、リアブノフ・スペクトルや相関次元と埋め込み次元などの様々な指標を求めることができる解析手法を確立する。

(3) ゆらぎ・行動律速原理に基づく魚行動モデルから移動ロボットに実装可能な制御アルゴリズムをすでに開発し先行実験もしているが、先の水槽実験の結果から個体と群れの行動に対する行動パターンを分析し、先に示した定式化(2)にある魚行動の自発的ゆらぎ項  $b(t, x, individual)$  が記述可能な数理モデリングを確立する。

平成 25 年度の方法)

(1) 先の魚行動実験から得られたデータから新たに新しいゆらぎ・行動律速原理の定式化(2)に基づく魚行動シミュレーターを開発する。

(2) 魚行動シミュレーターによるシミュレーション結果を実際の漁場フィールドで観測した魚行動のデータと比較して新しい行動モデルの妥当性を検証する。フィールド調査によるデータ取得に失敗した場合、水産研究所の大型回流水槽を用いて魚群行動実験を実施し、それを代替データとする。

平成 26 年度の方法)

(1) 実際の魚行動データと計算機シミュレーションの結果を比較した際に出てくる不具合を洗い出し、行動モデリング・定式

化・計算アルゴリズムにフィードバックすることで研究プロセスに修正を加えて全体の完成度を向上させる。

(2) 移動ロボットに構築した新計算アルゴリズムを実装し、図 1 に示す各種の生物模倣制御実験を繰り返し、環境・個体相互作用運動に対する省エネ・ロバスト制御手法の適用性を検証する。さらに、本研究による成果がバイオミメティクス応用の視点からどの程度有効であるかを明らかにする。

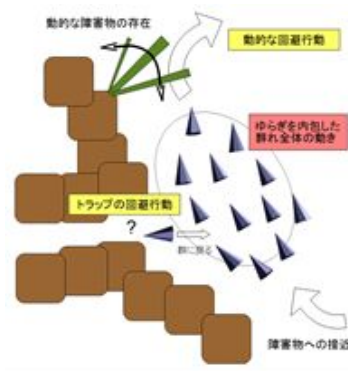


図 1 魚類行動を模倣した水中ロボットの省エネ・ロバスト制御に関する応用例

#### 4. 研究成果

先行研究で小型の水槽実験装置とその撮像システムは完成していたが、本研究では供試魚としてマアジを供試魚としたため、徳島県水産研究所にある大型水槽の実験装置とその撮像システムを開発することが最初の取組みとなった。

平成 24～26 年度の研究期間において得られた成果の概要を年度毎に以下に示す。ここで、徳島県水産研究所において定期的に本研究に進捗を協議し、年度毎に本研究の成果報告を研究所に実施したことを付記しておく。

##### (1) 平成 24 年度

これまでの先行研究でマアジを供試魚とする水槽実験システム(図 2 参照)と画像解析システムが完成しており、本年度はマアジ 1～50 匹を供試した魚群行動実験を実施し、漁網メッシュモデルに対してどの様な行動をとるかをカオス・フラクタル解析により分析した。その結果を次に示す。



図 2 徳島県水産研究所に構築した本研究の水槽実験システム

まず、泳速のカオス性（魚行動のゆらぎの性質）であるが、泳速のリアプノフ指数を分析することにより、単独個体の指数は魚群のそれより大きくなることから、群行動により行動のカオス的ゆらぎの低下することがわかった。さらに、図3に示すように、漁網のメッシュサイズが大きくなると魚の「漁網壁認識行動」に関するゆらぎ（壁とみるか通り抜け可能な網と判断するかのゆらぎ）が大きくなることがわかった。

次に遊泳軌跡の自己アフィン指数（魚行動の幾何学的性質を示す）であるが、図4に示すように単独の指数は魚群のそれより大きくなることから、群行動により個体行動が拘束され、漁網近傍の行動ゆらぎが低下することから、水平方向と垂直方向の自己アフィン性が異なるという「行動のマルチフラクタル性の顕著化」が見られることがわかった。

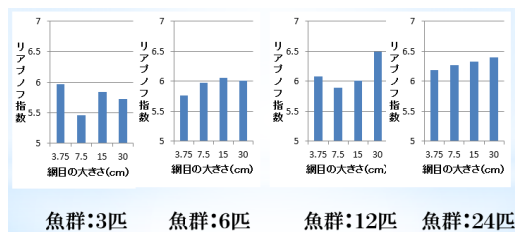


図3 漁網メッシュサイズと魚群サイズによる行動ゆらぎのカオス性の違い

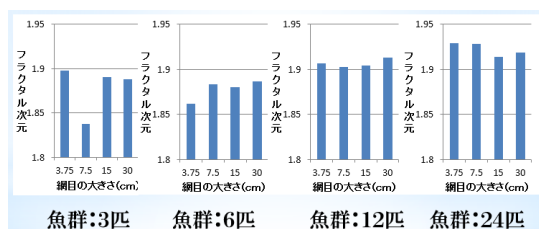


図4 漁網メッシュサイズと魚群サイズによる行動ゆらぎのフラクタル性の違い

以上により、計画の「フェーズ1：複雑系理論による魚類行動の解析として沿岸で捕獲した魚類（アジ、ブリ）を水産研究所で実験、魚類の行動パターンをカオス・フラクタル理論で解析する」は達成できた。

## (2) 平成25年度

先行研究で用いてきたユークリッド空間をベースとする確率微分方程式による数値シミュレーションでは、魚類という生物の行動モデルの階層化とその個体を取り巻く環境の離散モデルとの相互作用を合理的に統合化することが困難なことがわかってきた。そこで、ビットマップの方法と名づけた一種のセルオートマトンモデルを確率微分方程式に結合させることを着想した。図5によく知られた魚類の行動反応領域を示すが、このような階層化された反応領域と他の個体や

壁や漁網などの生物とは属性が著しくことなる他のオブジェクトとの相互作用を重畳させた場合に、ユークリッドの意味で定義される無限小の「点」や「線」を計算機の内部表現で取り扱うことになり、様々なデッドロック問題や内部メモリの有限性の問題が噴出してきたためである。これは、生物行動や環境属性モデルの階層構造や幾何学的構造が複雑になるほど致命的になる。

そこで本研究では、これまでの連続体仮説に基づくユークリッド空間を捨てて完全な離散系であるセルオートマトン空間で事象を扱うことにし、そのセル空間を計算機になじみやすい画像処理系で一般的なピクセルモデルに置き換えることにした。すなわち画像処理で取り扱うピクセルが持つ色・明度・彩度を確率微分方程式により記述されるゆらぎ・行動律速原理による魚行動モデル方程式(2)のカスケード修飾項にうまく組み込むことで先に述べたユークリッド空間で発生する諸問題を解決する戦略である。

ここで、図6を用いて、それぞれの反応領域が他の魚へ及ぼす影響力を青色、緑色、青色のグラデーションで表した場合のビットマップの方法によるモデリングの一例を示す。青色のグラデーションは個体が発生させる斥力を、緑色のグラデーションは並行遊泳を促す力、赤色のグラデーションは引力を示しており、前項で述べた魚の反応領域を模したもとなっている。本来、魚個体の中心位置からの斥力・引力の強度変化についても論じなければならないが、単純なモデルを作成するために色の変化は線形的なものとしている。

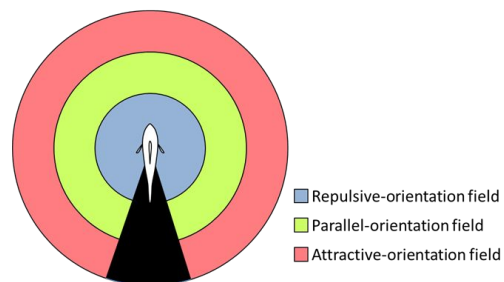


図5 魚個体近傍における階層化された行動反応領域

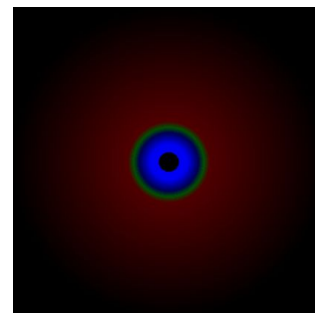


図6 セルオートマトン表現された魚類個体の反応領域のビットマップ表現

次にビットマップの方法による漁網メッシュモデルに対する数値シミュレーションと水槽実験の比較を示す。図8では24匹での漁網モデルに対する魚群行動を泳速ノルムの時刻歴データにカオス解析を施してそのリアプノフ指数を比較したものであるが、他の個体や漁網などの他のオブジェクトに並進行動ルールを組み込むと数値シミュレーションの精度が格段に向上することが明瞭にわかり、複雑な個体と環境の相互作用を簡単に実装できるビットマップモデルの有効性と適用性を示している。

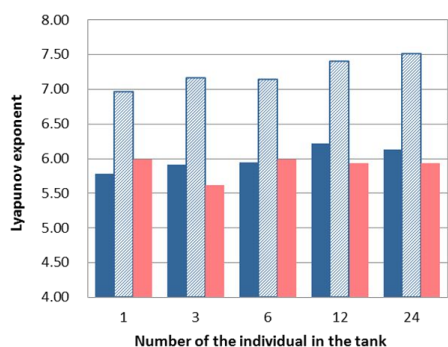


図7 魚群行動のリアプノフ指数の比較 (赤：水槽実験，青：数値実験，グレー：並列行動ルールなしの数値実験)

以上により、計画の「フェーズ2：魚類行動モデルの構築と数理的定式化としてフェーズ1で解析した魚行動パターンから精密な魚行動モデルを構築し、ゆらぎ・行動律速方程式による数理的定式化を完成させる」はビットマップモデルにおけるセルオートマトンの数理的議論は十分に出来ていないもののその定式化はほぼ達成できたと言える。

### (3) 平成26年度：フェーズ3

実フィールド(定置網による漁場)における魚群行動実験装置は2次元から3次元への撮像システムの開発に手間取り厳しいものがあつたので、漁協からの依頼でLED集魚灯への応用を試みた。

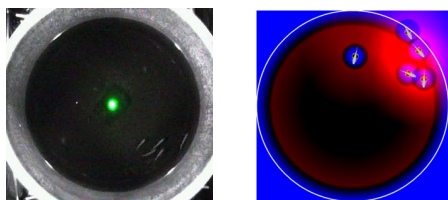


図8 LED光に対する魚群行動実験

図8に、その水槽実験のショットと抽出した遊泳軌跡を数値シミュレーションと比較した結果を示すが遊泳パターンは概ね妥当な結果を得たものの、水槽実験の魚群サイズと水槽サイズとのスケール効果が影響してカオス性とフラクタル性の抽出は困難であることが判明した。

以上により、「フェーズ3：魚類行動シミュレーターの開発としてフェーズ2の知見に基づき魚類行動シミュレーターを開発するとともに、実際の漁場フィールドにおける適用性を検証する。」は実フィールド実験の困難性と大スケールの水槽が用意できないという水槽実験の設備的限界に阻まれて十分に検証することができなかった。

### (4) 平成26年度：フェーズ4

移動ロボットへの実装とバイオミメティクス応用を確立するために小型水中ロボットの開発を開始した。またプロトタイプを構築している段階であるが、ゆらぎ・行動律速モデルから得られた新しい知見による人工物への省エネ・ロバスト制御技術を確立し、魚類行動に関する新しいバイオミメティクス応用を創成する具体的な工学的ロードマップを構築することができたと考える。



図9 開発中の魚ロボットのプロトタイプ

本研究の成果は、徳島県水産研究課課長と外部評価者(徳島大学水産学教授)に評価してもらい概ね肯定的な評価を得た。しかしながら、魚群サイズの違いによる水槽サイズとのスケール効果について、他のオブジェクトである漁網モデルやLED集魚灯などに対する魚行動パターンの精密な分析と実フィールドにおける効果検証については今後の課題となった。今後も継続して本研究を進展させる予定である。

### 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, Proc. of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, pp.937-942  
 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, Proc. of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, pp.2094-2099  
 森本真樹, 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, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, pp.2245-2248  
吉田貴一, 杉野隆三郎, 平山基, 森住昇, Development of SPH Approach for Hydrodynamics of Around Fish Body, Proceedings of SICE Annual Conference 2013, 査読有, 計測自動制御学会, 2013, pp.2249-2254

〔学会発表〕(計 20 件)

Shin Itami, Ryuzaburo Sugino, Koji FUKUDA, Mio Kobayashi, Noboru Morizumi, Saho Morioka, Shinichirou Kamada, "Influence of Light Stimulation for Attraction and Avoidance Behavior of Fish", 9th International Bioelectrics Symposium, 2012

福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, カオス・フラクタルによる魚群行動解析手法の開発, 平成 24 年度日本水産学会秋季大会, 2012  
杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, 漁網近傍における魚群のカオス・フラクタル性について, 平成 24 年度日本水産学会秋季大会, 2012

伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, 白色 LED 光に対する魚類行動のフラクタル性に関する一考察, 平成 24 年度日本水産学会秋季大会, 2012

伊丹伸, 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, 光に対する魚類の誘引・忌避行動解析のカオス・フラクタル解析, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2013, 2013

杉野隆三郎, 漁網に対する魚群行動のカオス・フラクタル性と応用の可能性, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2013, 2013

伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, LED 点滅光に対する魚類の行動解析, 平成 25 年度日本水産学会春季大会, 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と解析, 平成 25 年度日本水産学会春季大会, 2013

野村彰純, 杉野隆三郎, 福田耕治, 小林美緒, 森住昇, 守岡佐保, 鎌田信一郎, クラゲ防止ネットに対する魚群行動の解析, 平成 25 年度日本水産学会春季大会, 2013

谷田 恵佳, 杉野 隆三郎, 福田耕治, 小林 美緒, 魚群の海中構造物に対する反応行動のカオス・フラクタル解析, 平成 25 年電気関係学会四国支部連合大会, 2013  
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, 2013

杉野隆三郎, 伊丹伸, 福田耕治, 小林美緒, 守岡佐保, 魚遊泳行動の 3 次元撮像システムの開発, 平成 25 年度日本水産学会秋季大会, 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, 2013

伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 守岡佐保, LED 光刺激に対する海水魚の遊泳行動解析システムの構築, 平成 26 年度日本水産学会春季大会, 2014

櫛田佳那, 福田耕治, 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, 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, 2014

高曽根遥香, 平山基, 杉野隆三郎, メタボールと粒子法を用いた魚周りの数値シミュレーション, 平成 26 年電気関係学会四国支部連合大会, 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析, 平成 26 年度日本水産学会秋季大会, 2014

伊丹伸, 福田耕治, 小林美緒, 杉野隆三郎, 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, 生体情報処理と高度情報処理シンポジウム 2015, 2015

伊丹伸, 福田耕治, 杉野隆三郎, 小林美緒, 枝川大二郎, LED 光刺激に対するマアジの群れ行動の定量的評価, 平成 27 年度日本水産学会春季大会, 2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉野 隆三郎 (SUGINO RYUZABURO)  
阿南高専・情報コース・教授  
研究者番号: 10259822

(2) 研究分担者

伊丹 伸 (ITAMI SHIN)  
阿南高専・機械コース・講師  
研究者番号: 10259822

(3) 研究分担者

福田 耕治 (FUKUDA KOJI)  
阿南高専・情報コース・教授  
研究者番号: 30462146

(4) 研究協力者

小林 美緒 (KOBAYASHI MIO)  
阿南高専・電気コース・助教  
研究者番号: 30462146