

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540084

研究課題名(和文)力学系と離散事象系の二重化相互作用に基づく群行動のモデル化と制御

研究課題名(英文) Modeling and Control of Collective Behavior Based on Hybrid Interaction Model of Dynamics and Discrete Events

研究代表者

川嶋 宏彰 (Kawashima, Hiroaki)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：40346101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の長期的目的は、少数の疑似個体を通じて、魚群全体を制御・誘導するための原理を明らかにすることである。特に本課題の2年間の研究期間では、数匹から十匹程度の魚群の、実際の軌跡データに基づき、魚群の相互作用モデルを獲得する手法の確立を目指した。具体的には、(1)水中の2次元および3次元複数個体追跡手法を開発するとともに、(2)魚群に対する誘引性および反発性の働きかけを行う映像刺激を設計し、(3)個体間相互作用の様子をネットワーク変化として推定する枠組みを構築した。

研究成果の概要(英文)：The long-term goal of this research is to find the fundamental mechanism of controlling and navigating a fish group using a small number of imitated fish. In this two-year research period, we aimed at establishing a method to estimate collective fish interaction models from real fish trajectories of up to ten fish in a group. We first (1) developed underwater multi-object tracking method in 2-d and 3-d space, (2) designed video-based stimuli which have attractive or repulsive effects on a fish group, and then (3) built a framework to estimate a dynamic network topology of interaction among individuals in a fish group.

研究分野：パターン認識

キーワード：群行動モデル 複数個体追跡 画像解析 ハイブリッドシステム インタラクション解析 ネットワーク推定 映像刺激 魚群制御

1. 研究開始当初の背景

鳥や魚などの生物種が集団として創発する振る舞いを解析するために、たとえば蛍の同期現象には Kuramoto モデル、鳥の編隊飛行には Boids モデルなど、各種の数値モデルが提案されている。さらに近年は「群の挙動解析」にとどまらず、相互結合系をひとつのシステムとして捉え、外部からその結合系全体の振る舞いを制御しようとするアプローチが、様々な分野で活発に研究されている。たとえば、自律移動ロボットの分散協調エージェント群において、一部の個体を外部操作することにより群全体の動きを制御する研究や、ドライビングノードを通じた脳やソーシャルネットなどの複雑ネットワークの可制御性の解析が挙げられる。

ところが、実際の生物を対象とした群制御技術は、給餌や、脅威となる他の魚種によって魚群を動かす例（水族館でのエキシブションなど）はあるものの、同一の魚種間の相互作用を積極的に利用した手法は確立されていない。しかし最近になって、魚型ロボットに周囲の魚が影響される様子を解析する研究が米国で行われている。魚群は明確なリーダーを持つわけではないが、魚型ロボットの突発的な動きが、他の個体の動きを引き出しており、今後、疑似個体を通じて魚群の解析を行う研究が発展していくと予想される。

ここで重要なのは、これまでの群れの研究にて、各個体は単純化された微分方程式系によって記述されてきた点である。ところが、実際の生物は、中枢神経系からの信号によって身体の物理的運動を瞬時に切り替えるといった、状況判断を伴う複雑な振る舞いを見せる。たとえば、魚型ロボットの突発的な動きに誘引されて急に速度を変化させる様子や、周囲のどの個体に追従するかを動的に切り替える行動などが挙げられる。従来の微分方程式系の結合系で記述されるような相互作用モデルでは、このような離散事象的な魚群の振る舞いを扱えず、疑似個体に対する実際の魚群の誘導や反応を予測するうえで、数値モデルとしての限界があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究は長期的には、牧羊犬が羊の群れを制御するように、映像やロボットなどの少数の疑似個体を通じて魚群全体を自在に制御・誘導するための原理を明らかにすることを目指す。特に、魚を含む多くの生物種では、個体間の距離といった連続量だけでなく、周囲のどの個体を考慮するか（どの個体に注目して自分の行動を変化させるか）を離散的に変化させるとともに、その行動自体にも滑らかな運動や突発的な運動などいくつかのモードがある。すなわち、各個体は連続的な行動と離散事象的な状態遷移を利用して相互作用を行っていると考えられ、具体的なモデ

ルとして、離散事象系と微分方程式系の混在系（ハイブリッドシステム）を用いることが不可欠といえる。魚群における各個体の配置や動き情報が計測できる状況において、この二重化された相互作用を積極的に利用することで、少数の疑似個体の最小限のエネルギー投入で（いわば魚群のツボを利用して）群全体を制御することが可能になると期待でき、栽培漁業などの応用にとっても有用である。そこで本課題は、その数理的基盤として、魚群をハイブリッドシステムとしてモデル化するとともに、実際の魚群への刺激提示と反応観察からモデルの機械学習を行う枠組みの構築を目指す。

3. 研究の方法

研究目的で述べたような魚群の相互作用モデルの推定を行うためには、疑似個体を通じた実個体への働きかけ、および魚群の動きを個体レベルで解析する環境の構築が必要となる。そこで魚種としては、水槽内での飼育や実験が容易である数センチ大のサイズであり、かつ群泳が頻繁にみられるようなカラシン科のラミーノーブテトラを実験対象として選定した。水槽内での魚群の振る舞いはカメラにより撮影するとともに、魚群に対する刺激としては、水槽に接して配置された液晶ディスプレイからの映像提示により行うものとする。映像提示は常に側面から行うものの、4 節にて詳述するように、カメラは側部や上部などへ配置することが考えられる。図 1 に、側面から撮影する状況例を示す。

水槽内の魚群に対する刺激提示と反応観察から魚群の相互作用モデルを構築する上で、(1) 魚群の計測手法の開発、(2) 魚群の反応を誘発する刺激提示の設計、(3) 魚群の相互作用モデルの推定という 3 つの課題に取り組んだ。以下ではそれらの課題とそれぞれに対する方法の概要を述べる。

(1) 水槽中の複数個体追跡手法の開発

魚群中の各個体は類似した形状、テクスチャ、色をしており、それら複数個体の追跡は、画像中でのオーバーラップが生じる状況では難しい課題となる。本研究では主にノイズやオーバーラップに対処するために、モデルベースの手法を軸とする。具体的には、楕円モデルを用いた 2 次元追跡を行う方法、および詳細な 3 次元形状モデルと多視点カメラを用いて 3 次元追跡を行う方法を検討する。

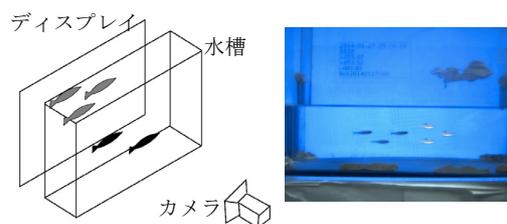


図 1. 計測環境例。右図は映像刺激と撮影魚群（黒い 3 個体が実個体）

(2) 魚群への映像刺激提示の設計と検証

魚群へ映像刺激を提示することで誘導を行う研究は、縞模様提示などの先行研究があるが、魚群の誘導を目的とした疑似個体映像への追従性については検討されていない。そこで、誘引性と反発性の二種類の刺激について検討し、誘引性の刺激では、「疑似個体に対する実個体の同期度解析」を、反発性の刺激では、「実個体間の相互作用変化解析」を目指し、それぞれの映像刺激の設計を行う。

(3) 魚群の相互作用ネットワーク推定

魚群の各個体の相互作用をとらえるために、個体間の相互作用モデルを仮定することで、上述(1)の計測で得られた個体レベルの軌跡データから、個体間の影響伝搬に関するネットワーク推定を行う手法を検討する。特に、群れの状態変化(群がりから群泳への遷移)が生じる過程において、どのような相互作用がみられるかを調べる。

4. 研究成果

(1) 水槽中の複数個体追跡手法の開発

① 楕円モデルに基づく2次元複数個体追跡

水槽の側面もしくは上部から撮影した単視点の映像より、魚群の各個体の2次元座標を追跡する手法として、各個体を楕円形状と仮定した複数個体追跡手法を提案した。

例えば上部から撮影する際には、水槽内の水位を浅くして、泳ぐ方向を平面内におおよそ限定することができるが、泳ぎに影響を与えないようにするにはある程度の水位を確保する必要があるため、3節で述べたような個体同士のオーバーラップは避けられない。この場合、モデルベースの個体追跡手法は一時的な遮蔽に対して頑健であるため、オーバーラップやノイズなどの問題に対処することができる。本研究では、入力画像の背景差分と閾値処理により得た二値画像を入力とし、各個体は中心部分から離れるに従って二値化ノイズや形状変化の影響を受けやすいと考え、二値化による検出領域から一様サンプリングされたデータがガウス分布に従うと仮定した(図2)。

魚は旋回時にS字やC字の形状をとるが、これらは円に近い楕円で近似することとした。すると、複数個体追跡は混合ガウス分布のパラメータ推定を各フレームで繰り返すような処理となり、分布の平均を個体の位置、共分散の情報を個体の向きや形状とした。パ

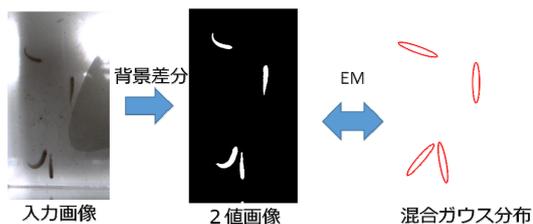


図2. 上部カメラによる2次元複数個体追跡

ラメータ推定は Expectation & Maximization アルゴリズムなどのよく知られた最適化手法を利用でき、前フレームの結果を初期値とすることができる。

カメラを水槽の側面に配置する場合(奥行き短い水槽を用いた実験)で3匹の追跡を試したところ、対応付けの誤りは27000フレーム中31回であり、事後処理は必要とするものの、軌跡データの抽出作業を大幅に軽減できることを確認した。また、カメラを水槽上部に配置する場合(水深の浅い状況での実験)、30×30cmの範囲で少なくとも10匹程度の追跡には同様の手法を適用することができることを確認した。さらに、サンプリングの粒度によって処理コストを変化させることができ、リアルタイム処理にも向いているといえる。

② 詳細な魚形状モデルを用いた多視点3次元複数個体追跡

①では扁平な形状の水槽もしくはセパレータを利用して魚の泳ぐ範囲を限定し、2次元平面での魚が運動すると仮定した手法であるが、各個体の3次元位置を追跡する手法として、詳細な魚の3次元形状モデルをパーティクルフィルタとともに利用する多視点複数個体追跡手法を提案した。

本手法では、まず水中の魚の位置と3次元形状をパラメトリックにモデル化する。加えて、その3次元魚形状が、図3に示すような上部カメラおよび側面カメラへそれぞれ投影される過程を、水槽表面での屈折を考慮できるような投影モデルも利用することで詳細にモデル化している。その結果、現在推定されている各個体の3次元位置および形状の妥当性を、毎フレーム同期撮影された3視点の画像上で尤度関数を用いて正確に評価することができ、パーティクルフィルタの実装によく整合する。図4(左)は、追跡結果を正面カメラに投影し、元の撮影画像に重ねたもの(各色が各個体を表す)であり、図4(右)には入力された二値画像(赤領域)と、3次元から2次元に再投影された各個体の推定領域(黄緑)を表す。これら赤と黄緑領域のオーバーラップ度(黄領域の割合)より尤度を求める。

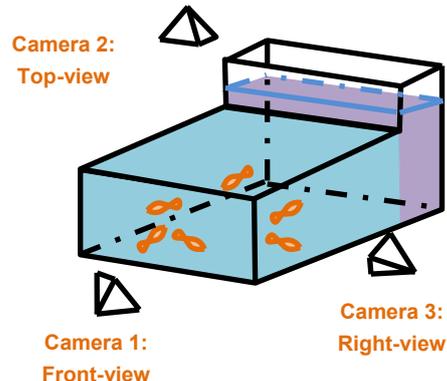


図3. 3次元複数個体追跡での水槽形状

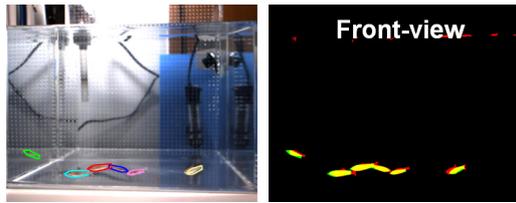


図 4. 追跡結果例（3次元の追跡結果を正面カメラへ投影して可視化）

6匹の個体追跡において、提案手法を撮影系列からランダムに選択した72フレームを用いて評価を行ったところ、平均4.54mm（標準偏差2.55mm）の精度で個体位置の追跡が可能であった。このとき、正解データとしては2次元画像中で魚の特徴点を手動追跡し、それらを各視点から3次元空間中に逆投影して得た直線同士の交点とした。一方、個体の方向は平均30度程度の誤差があり、十分な精度が得られなかった。今後は魚の運動により適したダイナミックモデルを導入するとともに、処理速度についても向上させる必要がある。

(2) 映像刺激による魚群誘導の可能性検証

① 疑似個体に対する実個体の同期度解析

映像疑似個体の往復運動に基づいた誘引性の映像刺激の設計を行った。具体的には図1のような水槽（35×30×20cmにセパレータを入れたもの）に対して側面のディスプレイから3匹の疑似個体の往復運動を2次元CGとして提示した際に、同じく3匹からなる実個体群が疑似個体にどのように追従するかを解析し、これによって、映像疑似個体を魚群誘導の実験に利用できるか否かを検証した。

追跡手法としては(1)①を利用し、水槽の奥行きを無視した2次元平面での軌跡データを得た。さらに、映像中の疑似個体は水平方向に往復させたため、実個体の運動についても、疑似個体の運動と同じ軸（これをx軸とする）における1次元時系列を解析した。図5（上）は実個体3匹および疑似個体提示位置のx軸座標をそれぞれプロットしたもの

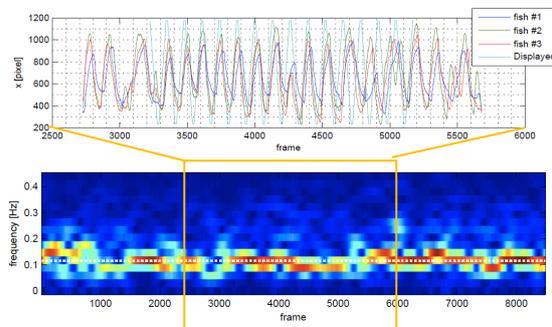


図 5. 上：実個体および疑似個体の位置変化。下：提示前後を含めた系列全体での実個体の周波数変化（スペクトログラム）および疑似個体の往復周波数（点線）

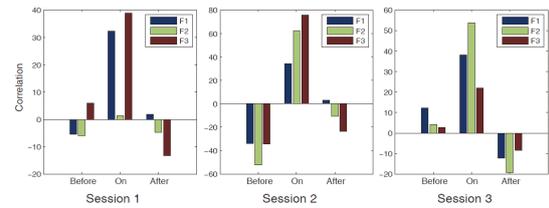


図 6. 提示前・中・後の各区分における実個体の運動の位相と、提示した疑似個体の往復運動の位相とのずれを、軌跡の相関をもとに算出し比較したもの

であるが、提示区間（3584-5259フレーム）では、実個体の往復周期がいずれも疑似個体によく一致していることが分かる。

しかしながら提示区間の前後を含めたより広い時間範囲で実個体の往復周期の変化を調べると、図5（下）に示すように、提示時間以外であっても疑似個体の往復周期にほぼ一致する時間帯が頻繁にみられた。そこで、位相の同期についても軌跡同士の相関に基づいて調べたところ、図6に示すように、提示前、提示後の区間に比べると、提示中の区間で相関が高くなる傾向がみられた。これより、サンプルサイズはまだ少ないものの、疑似個体の映像刺激に誘引性の効果があることが示唆された。今回の結果は、将来的にロボット等を用いた誘導を行うための基礎的な知見となるが、今後は一方向的に提示するのではなく、魚群の状態に応じて疑似個体の運動を変えるようなフィードバック機構を、データドリブンで学習する方法を検討する予定である。

② 実個体間の相互作用変化解析のための反発性刺激の設計

水槽内の各魚個体の軌跡から、群れの群泳状態が生起する過程を、個体レベルの相互作用メカニズムとして解析する枠組みを考案した。特に魚群内における個体間相互作用の変化が顕著にみられるような、魚群の「群がり（aggregation）」から「群れ（school）」へ

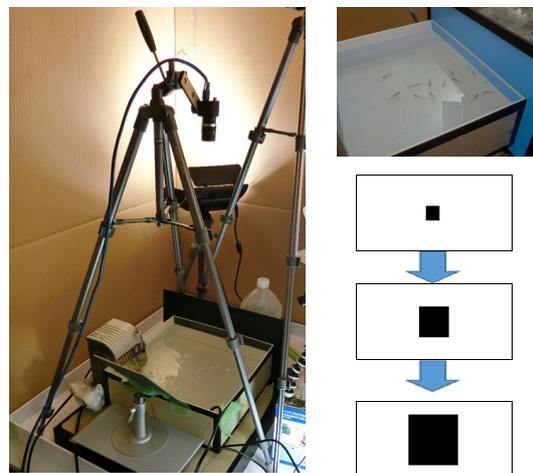


図 7. 左・右上：実験で用いたディスプレイ・カメラ配置。右下：反発性の群行動を誘発させるための刺激設計例

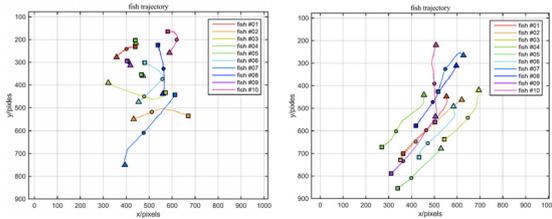


図 8. 刺激提示後半の区間 (左), および刺激提示後 1.7 秒経過後からの区間 (右) における各個体の軌跡. それぞれの区間は 100 フレーム (約 1.7 秒). 各区内で△が始点, ○が 50 フレーム後, □が終点

の状態変化を, 映像刺激を用いて組織的に誘発させる方法を検討した.

具体的には, 図 7 に示すような実験環境において, 白背景に黒い矩形画像が急に拡大するような逃避行動誘発性の刺激を設計し, 刺激提示によって群れの状態変化が引き起こされることを, 各個体の軌跡 (図 8) で定性的に確認するとともに, 群れ全体の統計量 (平均速度や方向の一致度) を用いて定量的に確認した. ただし反応の得られない場合も見られたため, 刺激提示に対する魚群の反応がどのような要因によって定まるかを今後より詳細に調べる必要がある.

(3) 魚群の個体間相互作用ネットワーク推定

刺激提示の影響が魚群の個体間を伝搬し, 魚群の状態変化が引き起こされる過程を調べるために, (2)②で述べたような反発性の映像刺激を用いて, 刺激提示後における個体間の相互作用ネットワークを推定する方法を考案した.

具体的には, 魚群内の各個体の行動モデルとして, 各個体の速度ベクトルが周囲の個体との相対位置によって定まるという先行研究のモデルを基とし, さらに各個体が独自の移動先の目標点を持ちうるという拡張を行った. このとき, 各個体は周囲の個体との協調項および自律項で構成されるようなモデルとなり, 各項の重みと目標点を, 重みの非負制約をはじめとしたいくつかの制約の下で, 移動窓での短時間推定をすることで, 群れの相互作用ネットワーク推定を実現した.

実験では魚群の状態に応じて映像刺激の提示タイミングを決定できるようなリアルタイム追跡システムを実装するとともに, 刺激提示によって状態変化が誘発されている際の魚群の遊泳軌跡から, 相互作用ネットワ

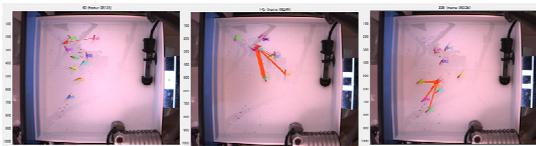


図 8. 上: 個体 1 が他の個体から受ける影響の強さの変化 (影響の度合いをエッジの幅で表している)

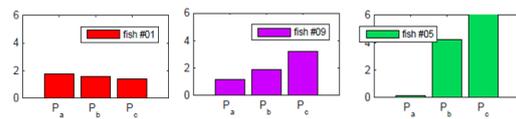


図 9. 刺激提示後の 3 区間における各個体の自律項と協調項の比 (左から個体 1, 9, 5 のグラフ. 横軸は区間, 縦軸は比の対数)

ークの動的な変化が推定できることを示した. 図 8 は 10 個体からなる魚群に刺激提示を行った際に, ある個体 (これを個体 1 とする) が他の個体からどの程度の影響を受けたかを可視化したものである (具体的には各個体に対する協調項の重みを他個体からの影響の強さとした). この図より, 個体 1 は提示直後から常に他の個体へ追従し, 群れ全体の動きに合わせて行動している様子が, 推定された相互作用ネットワークからわかる.

一方, 図 9 は各個体が群れの中でどのような役割を果たしているかを検討するために, それぞれの自律項と協調項の比 (の対数) が, 刺激提示直後からどのように変化するかを 3 区間に分けて確認したものである. 目視で確認したところ, 個体 1 は常に他の個体を追従しているが, 個体 9 や個体 5 については, 後半で群れを率いる様子が見られた. 特に個体 5 は他の個体に協調する振る舞いは見られないものの, 後半では群れを先導するような振る舞いを見せていたが, 図 9 のグラフはこの特徴 (後半で自律項の割合が高まる) をうまくとらえている.

本研究で提案した相互作用ネットワーク推定の手法は, 今後データ量を増やして妥当性を検証するとともに, 群れの誘導という観点からも有効性の評価を行っていく必要がある. さらに, 各個体は注目する他個体を頻繁に切り替える様子が確認され, 群れ全体はハイブリッドシステムとしてモデル化することの妥当性が示唆されたが, 一方で, 各個体はどのような条件・要因に基づいて, 追従 (注目) する周辺個体を変化させるのかについては本研究期間で扱うことができなかった. 周辺状況に応じた離散状態 (モード) 遷移則の導入が必要となるが, これは今後の課題とする.

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 0 件)

[学会発表] (計 4 件)

① Rodrigo Verschae, Shohei Nobuhara, Hiroaki Kawashima, Takashi Matsuyama, A Real-Time 3D Fish Detection and Tracking System, The 19th Meeting on Image Recognition and Understanding (MIRU2016), 2016. 8. 1-4. (発表予定) アクトシティ浜松 (静岡県・浜松市)

② Yanghong Zhong, Hiroaki Kawashima, Takashi Matsuyama, Vision-based 3D Tracking System for Fish Interaction Analysis, 情報処理学会第 77 回全国大会, pp. 2-519-2-520, 2015. 3. 18. 京都大学 吉田キャンパス (京都府・京都市)

③ Hiroaki Kawashima, Yu Kanechika, Takashi Matsuyama, Camera-Display System for the Interaction Analysis of Live Fish vs Fish-like Graphics, The 17th Meeting on Image Recognition and Understanding (MIRU2014), 2014. 7. 30. 岡山コンベンションセンター (岡山県・岡山市)

④ 兼近悠, 川嶋宏彰, 松山隆司, 映像疑似個体を通じた魚群のインタラクション解析のためのカメラ・ディスプレイシステム, 情報処理学会研究会資料 (CVIM192-29), 2014. 5. 16. 近畿大学 東大阪キャンパス (大阪府・東大阪市)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕 2015 年 10 月 4 日の京都大学アカデミックデイのブースにて他の水中コンピュータビジョン技術とともに紹介を行った。
<http://research.kyoto-u.ac.jp/academic-day/2015/55/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川嶋 宏彰 (KAWASHIMA, Hiroaki)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号: 40346101

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし