

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

兼近 悠^{1,a)} 川嶋 宏彰^{1,b)} 松山 隆司^{1,c)}

概要：魚群のメカニズムを詳細に理解するために、疑似個体を導入して実際の魚群との相互インタラクションを解析するアプローチが考えられる。そこで本論文では、疑似個体として映像を用いる方法に着目し、魚画像の動きに対する魚群の反応を計測するシステムを構築するとともに、実際の魚を用いてその基礎的検討を行った。各個体の追跡結果から遊泳周期の位相を解析することで、実際の魚群がディスプレイ上の魚画像に同期して泳ぐことを示し、疑似個体として映像を使うことの有効性を確認した。

1. 序論

群れは、個体間での情報の伝搬を用いることで、群れの一部への刺激や、比較的少数の個体への刺激が外部から与えられたときに、群れ全体の位置や配置などについて統率のとれた行動を瞬時にとることができる。例えば、イワシの群れは多数の個体から成るが、群れの性質を利用し、敵から身を守っている。この群れの行動は非常に興味深い。群れの一部の個体が天敵を発見すると、群れ全体がすぐさま敵を回避する行動に移る。

動物の群れに注目する研究は数多く行われてきた。Partridge は魚の群れの構造を解析し、その機能のいくつかを明らかにした [1]。また Reynolds は単純なルールで群れらしい動きを再現した [2]。魚群の動きをマクロな観点から解析しようとする試みとして、寺山らは、魚群の水中映像をオプティカルフローで解析し、魚群中の個体の速度分布を推定している [3]。しかしながら、観測だけに基づく群れの解析では、冒頭で述べたような群れとしての瞬時的な行動を支える、個体間の情報伝搬メカニズムを理解するには限界がある。ここで、システムをモデル化する方法の一つとして、対象とインタラクションをとることによりモデルを構築することが考えられる。

インタラクションによる群れの理解の例としては、Swainらによる、魚と魚を模したロボットとのリアルタイム・インタラクションシステムが挙げられる [4]。魚群をカメラで撮影し、検出した魚群の重心に向かって、敵に見立てた

ロボットをリアルタイムに動かし、魚群の反応を観察するシステムを構築している。一方、本研究では、群れ全体の位置や速度などのマクロな視点から群れを捉えるのではなく、群れの各個体のダイナミクスおよび個体間の相互作用に着目する。すると、これを利用した魚群への働きかけの実現につながる。群れの観測データから群れのダイナミクスのモデル化が行えた上で、群れの一部の（群れへの影響が強であろう）個体に対してロボット等により、最適なタイミングで働きかけを行うこと、いわば群れの「ツボを突く」ことで群れ全体の振る舞いに影響を与えることができると考えられる。これには、どのような制御を外部から加えれば、群れの振る舞いがどのように変化するかといった予測を可能にするような、精密な群れのモデルが必要となる。

そこで本研究では、各個体の振る舞い、群れ全体の振る舞いを解明するアプローチとして、実際の魚に働きかけを行い、その反応を観測するというプロセスを積み重ねることで、魚群の振る舞いをモデル化することを考える。各個体のダイナミクス、および個体間の相互作用に関するモデルの推定を、各個体の計測・追跡、刺激提示、反応観測というループを長期間行うことや、提示・撮影環境を並列化して大量のデータを取得し機械学習の手法を利用することで実現したいと考える。

群れの一部に働きかける方法として、本研究では、魚群に対し、同種の個体を模したものを導入することとする。この人為的に操作可能な個体をここでは「疑似個体」と呼ぶことにする。疑似個体の実現には、いくつかの方法が考えられるが、本研究では特にディスプレイを用いて提示した同種の魚画像を用いることとする。疑似個体の実現方法

¹ 京都大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Kyoto University

a) kanetika@vision.kuee.kyoto-u.ac.jp

b) kawashima@i.kyoto-u.ac.jp

c) tm@i.kyoto-u.ac.jp

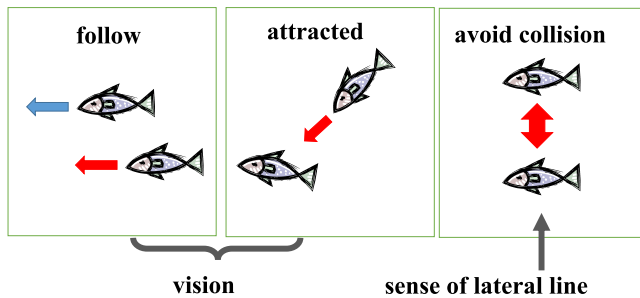


図1 群れを維持する3つの機構。視覚により追従と接近が生じ、側線感覚により反発が生じる。

としてロボットを用いることも考えられるが、本研究では次のような理由からディスプレイによる提示を用いる。

まず、実際に群れ作用を引き起こせるかについて述べる。例えば魚型ロボットを群に近づけるといった方法では、魚に対して視覚刺激と側線感覚による刺激を与えることができる。群れの維持は「追従」「接近」「反発」の3つの作用により維持されている[5](図1)が、「追従」「接近」は主に視覚により作用すること、「反発」は主に側線感覚による作用であるが、視覚からと側線感覚からの情報が競合する場合は視覚による情報が優先されることから、側線感覚を生じないディスプレイによる働きかけであっても、実際の個体と同様に群れ行動を誘発することができる。

次に、提示の性能の点を考える。群れに対する働きかけはロボットの制御性能に依存し、さらに複数のロボットを協調制御すること自体が難しい問題である。一方で、映像による刺激では、提示可能なパターンの自由度が高く、たとえば同魚種の疑似個体の様々な動きを映像として生成・提示するといったことも可能であり、その疑似個体から成る魚群の個体数も容易に変更できる。さらに、ロボットに比べれば遅延が少なく応答が良いこと、故障が起こりにくいことなどの利点がある。

そこで本研究では、ディスプレイ上に表示した魚画像の動きを疑似個体として用いる方式の有効性を明らかにするために、魚群の反応をカメラにより観測するカメラ・ディスプレイシステムを実際に構築し、このシステムがどの程度魚群の反応を引き起こすことができるかを確認する。

以下、2節では本研究の状況設定を述べるとともに、本研究における計測システムの設計について述べる。3節では混合モデルを用いた魚群中の複数個体の追跡手法について述べる。4節では実験の設定および結果についての考察を行う。5節では本研究の結論を述べるとともに、今後の展望について触れる。

2. 魚群と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

魚群とのインタラクション解析のためのカメラ・ディス

プレイシステムに要求される項目には次のようなものがある。

- (1) 高い耐久性を持っていること:これは、魚群のモデル獲得には長期の提示・観察を必要とするからである。
- (2) 汎用性:体長2-4cmの様々な種類の魚に対して、インタラクションをとりながらモデル獲得が行える、できるだけシンプルな構成とすること。

このような理由から、本研究では、図2に示すような最小のシステム構成とした。疑似個体の提示は、水槽に隣接させて設置するディスプレイによって行う。提示に対する魚群の反応は、複数台のカメラを水中でのキャリブレーション[6]を行ったうえで用い、各個体の3次元追跡を行うことも可能であるが、魚の映像に対する反応をみるにはディスプレイと魚の距離は十分近いことが望ましい。そこで本研究では、水槽にセパレータを入れ、魚の動きを2次元に制限することとした。するとディスプレイに平行な平面内の移動を計測すればよく、単視点のカメラを利用できる。

魚の動きを2次元に制限する際、次の2つの設定が考えられる。

- (1) 移動面を水平面に制限した水槽を用意し、真下から映像の提示を行い、真上からカメラによる位置計測を行う。
- (2) 移動を垂直面に制限した水槽を用意し、真横から映像の提示を行い、水槽に関して反対の方向からカメラによる位置計測を行う。

本研究においては、実際に使用魚種をこれら2つの環境中に配置し、水平の水槽においては同じ魚群を前もって真上から撮影した動画を、垂直の水槽においては同じ魚群を前もって真横から撮影した動画を提示し、反応性をみるという簡単な検証を行った。その結果、使用魚種が示す反応がより大きい(2)の設定を用いることとした(図2)。

この設定において、魚は撮影画像の面内の方向、つまり、縦方向と横方向の平面内のみを移動する。図2のように、水槽の長手方向に x 座標を、高さ方向に y 座標をとり、2次元平面内での移動のみを考える。

ディスプレイによる提示系とカメラによる計測系の時間同期の方法であるが、今回はリアルタイムインタラクションまでは扱わないものとし、計測画像を解析する際に、提示側との対応をとることができれば十分であると考えられる。そこで、ディスプレイに魚画像とともに提示側のフレームごとに固有なIDを表示して、同時にテキストファイルに魚画像の座標とIDの組を記録しておく。各撮影フレームでの映像刺激中の魚画像の位置は、撮影画像中に映り込んだIDとテキストファイルのIDを解析の際に対応させることで得る。このため、文字が撮影画面上に映り込むことになるが、3節で述べる追跡処理では、前処理として背景差分を用いているため、これら映り込んだ文字や、物理的な支持機構などは追跡結果に影響を及ぼさない。また、水面

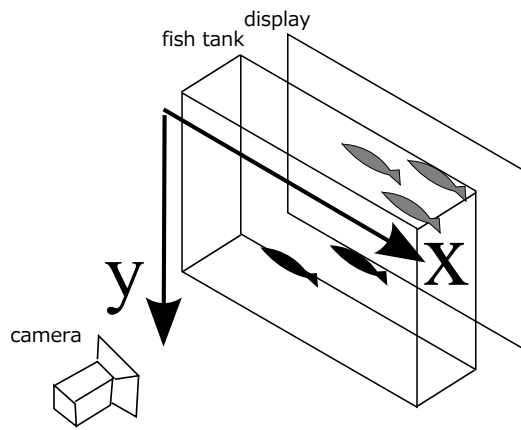


図 2 カメラ・ディスプレイシステムの概要及び座標の設定

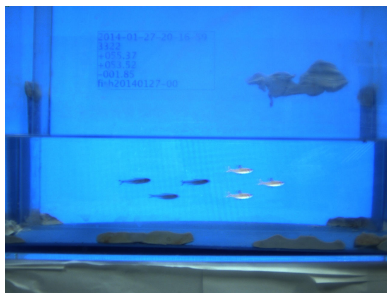


図 3 実際の撮影画像. ディスプレイ面に背景色を表示している. 中央左に見える 3 つの黒い影が実際の魚である. 中央右の 3 つはディスプレイで提示した魚画像である. 左上には時間同期のための ID や, 撮影時刻などを表示している.

の揺らぎは魚群が動くことにより生ずるが, 追跡の段階において水中領域を切り出しており影響しない.

3. 混合モデルに基づく魚群の 2 次元追跡

本節では, 本研究において使用する魚群の 2 次元追跡手法について述べる. 図 4 に追跡の流れを示す.

3.1 複数個体追跡

本研究では, 複数の魚の動きを同時計測する. t 番目のフレームでのカラー画像を P_t として長さ T のカラー画像列を $P_{1:T} = (P_1, P_2, \dots, P_T)$ のように表す. このとき, $P_{1:T}$ に対して既知の個体数 K の魚を追跡し, 魚の座標系列 $(x_{t,k}, y_{t,k})$ ($t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K$) を求める問題を, ここでは複数個体追跡と呼ぶ.

この複数個体追跡においては, 各フレームで複数個体の検出ができ, フレーム間で検出した個体同士の対応付けが行える必要がある. また, 水槽を扁平なものにし, 奥行き方向での移動を極力制限しているが, 魚同士が画像上で重なり合う可能性もある. そのため, 画像上で複数の個体が重なるときも, これが部分的であれば正しく対応付けできることが望ましい.

本研究ではこれらの要件を満たすために, 各フレームでの背景差分で得られた 2 値画像上の魚の領域の分布を混

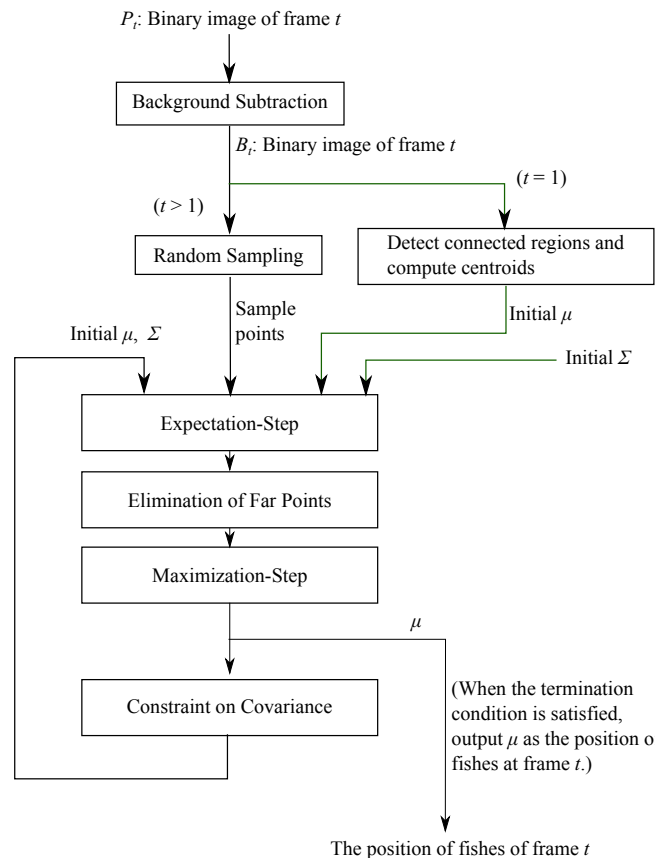


図 4 複数個体追跡の流れ. この図は t 番目のフレームにおける手順を表している.

合ガウス分布と対応させる. 各フレームの画像から, 対応する混合ガウス分布のパラメータを推定する手法として, Expectation-Maximization (EM) アルゴリズム [7] を用いることとする. 混合ガウス分布との対応付けの詳細は 3.2 節で, EM アルゴリズムの詳細は 3.4.1 節で述べる.

3.2 混合モデルに基づく魚群の 2 次元追跡

今, 2 次元の混合ガウス分布を考え, 各混合要素を, 撮影画像の 2 次元空間上における魚の領域に対応させることとする. 各ガウス分布の中心, つまり平均 $\mu_k \in \mathbb{R}^2$ が, 画像上での各個体の座標を表していると考え.

このような対応付けは文献 [8] でも用いられているが, 本研究の状況では, 以下の理由から妥当であると言える.

魚の側方形状が楕円に近い 横から見た魚の形状は楕円に近く, 背景差分による検出領域もまた楕円に近いものとなる. したがって, 元画像系列から背景差分などで個体の領域を検出したのち, この領域の点群に対してガウス分布を当てはめることで, 個体検出ができることを考える.

ガウス分布の分散と魚形状の対応 各ガウス分布の共分散行列の要素に対して制約を加えることで, 分散を楕円の形状とみなした際の形状に制約を加えることができ, より魚の形状に対応するパラメータが推定できる.

初期値を利用したフレーム間対応付け 3.4節で述べるように、ひとつ前のフレームの推定結果の分布パラメータを現在のフレームにおける推定の初期値として用いることができるため、フレーム間の対応付けが可能である。

混合モデルと魚同士の重なり 混合ガウス分布は混合モデルであるため、部分的に個体同士が重なっていたとしても、最も尤もらしい重なり方のガウス分布を推定することができる。

3.3 追跡アルゴリズム

長さ T のカラー画像列 $P_{1:T} = (P_1, P_2, \dots, P_T)$ に対して既知の個体数 K の魚を追跡する。ただし、 $\mu_{t,k}$ および $\Sigma_{t,k}$ は、 t フレーム目の画像における、 k 番目の個体に対応するガウス分布の平均および分散を示す。このアルゴリズムにおいては、混合比 π_k は $\pi_k = 1/3$ と固定して考える。

追跡のアルゴリズムは、背景差分を用いて $P_{1:T}$ から生成した2値画像列 $B_{1:T}$ を入力とし、各個体の重心 $\mu_{1:T,k}$ を出力するものである。

各時刻 t ごとに、前の時刻 $t-1$ における結果 $\mu_{t-1,k}, \Sigma_{t-1,k}$ を初期値として、EM アルゴリズムによる混合ガウス分布の推定を行う。

3.4 混合モデルの推定手法

3.4.1 EM アルゴリズム

現在のフレームに対応する混合ガウス分布のパラメータを推定する手法として用いた EM アルゴリズムについて、混合ガウス分布と画像上の魚の形状を対応させるために用いた共分散の形に対する制約の詳細について述べる。EM アルゴリズムは一般には、潜在変数を持つ確率モデルの最尤解を求める手法であるが、本研究では混合要素の数が既知の混合ガウス分布に対して、分布のパラメータを潜在変数とみることで、EM アルゴリズムを適用し、パラメータのうち尤度関数を最大にするものを見つけるために用いている。

3.4.2 予測を用いた個体追跡

これまでに説明したアルゴリズムでは、フレーム間の情報を EM アルゴリズムの初期値以外には使用していないため、複数の個体が大きく重なった場合、個体が入れ替わることがある。そこで、EM アルゴリズムの M-Step において、観測データからの推定結果 $\mu_{ML,t}$ を使うのではなく、直前数フレームから線形に予測した $\mu_{pred,t}$ を生成し、さらにこれを各ガウス分布間の分布の近さに応じて適応的に用いる。つまり、注目する分布の初期値を設定する際に、ほかの分布から十分離れていれば、ひとつ前のフレームにおける推定結果を重視し、もしほかの分布に近い、もしくは重なっていれば、過去数フレームからの線形予測を重視することとする。これにより、予測により生ずる観測結果

からの追跡のずれを防ぎつつ、個体への入れ替わりが起きやすい場面では予測を強めて入れ替わりを低減するようにする。このように適応的に設定する各分布の中心 $\mu_{MAP,t}$ は次のように定める。

$$\mu_{MAP,t} = \alpha_t \mu_{pred,t} + (1 - \alpha_t) \mu_{ML,t} \quad (1)$$

ここで $\alpha_t \in [0, 1]$ はフレームごとに変化させる重みである。この重みを後述する各分布間の距離に応じて定める。

この分布間の距離をどう求めるかであるが、単純に中心間の距離を用いると、分布が楕円であるため重なり程度の距離と重心間の距離が単純に比例せず、不都合が生ずる。しかし、一般に楕円同士の重なり計算は複雑である [9]。そこで、本研究では2つのガウス分布の間の距離を求めるために Bhattacharyya 距離を用いる。これは、2つのガウス分布 $N(\mu_A, \Sigma_A), N(\mu_B, \Sigma_B)$ に対して、次のように定義される。

$$D_B = \frac{1}{8} (\mu_A - \mu_B)^T \Sigma_{AB}^{-1} (\mu_A - \mu_B) + \ln \frac{|\Sigma_{AB}|^{\frac{1}{2}}}{|\Sigma_A|^{\frac{1}{4}} |\Sigma_B|^{\frac{1}{4}}}, \quad (2)$$

$$\text{where } \Sigma_{AB} = (\Sigma_A + \Sigma_B)/2$$

このように定まる D_B から、シグモイド関数を用いて α_t の値を定めている。

3.4.3 固有値による共分散行列の制約

3.2節で述べたように、魚の個体追跡において撮影画像における魚の領域を、ガウス分布に対応付けている。このとき、ガウス分布の共分散は、ガウス分布の広がり方、つまり、画像中の魚の領域の大きさや向きを表す。この共分散が、魚の領域形状からかけ離れた値になるのを防ぐため、EM アルゴリズムによるガウス分布の当てはめの中で、共分散行列の値を一定範囲内に制限することとする。

4. 映像刺激に対する魚群の反応評価

映像による擬似個体の導入により、魚群の反応が見られるかどうかの検証を行った。

2節で述べたように、本研究では水槽にセパレータを入れ、魚の動きを図2の xy 平面に制限する。このとき、魚はじっと静止しているか、水槽の x 方向を往復するように動く。映像刺激をこのような往復運動としたときに、もしディスプレイ上の往復運動する魚画像に対して実際の魚が共に群れを作ろうとするならば、画像の動きに同期し、同じ往復の周期、位置を保つと期待される。このことから、次のような仮説を置く。

仮説: ある一定の周波数で移動する同種個体の映像を刺激として提示した魚群は、提示映像と同じ周波数成分が強くなるとともに、各個体の動きの位相は、提示映像の位相に顕著に近くなる。

刺激映像の周波数・位相に同調するならば、提示の周波数・位相をランダムに変化させ、魚群の追従をみることも考えられるが、解析を容易にするため一定の周波数及び位相を用いる。

映像刺激のうち、魚の画像は使用魚種の個体を実際に撮影したものを用いる。背景色は、使用魚種が比較的浅い場所に生息していることをふまえ、色による動きの違いについて簡単な検証を行ったうえで、最も魚群の動きが活発となった色を用いる。実際の背景及び魚画像を図5に示す。

4.1 実験方法

実験の詳細について述べる。使用魚種は、一般に入手可能な小型の熱帯魚のうち、群れる性質が強いものとして、ラミーノーズ・テトラ (学名 *Hemigrammus bleheri*) を用いた。使用魚種 3 個体 *1 からなる魚群を水槽中に置いた。飼育および実験に用いた水槽は、透明なアクリル製で、サイズは幅 35cm、奥行き 20cm、高さ 30cm である。実験を行う際は水槽内に透明なアクリル板のセパレータを入れ、奥行きが実質 5cm となるようにした。また、この際、側面から水槽外が見えないように不透明な板を入れた。

映像刺激は水槽に密着させて設置したディスプレイ *2 より提示する。刺激提示は同種の魚の画像を、ディスプレイ上で出現・移動・消滅させることによって行った。開始から魚画像を出現させるまでの区間を「提示前 (Before)」, 魚画像を周期的に移動させている区間を「提示中 (On)」, 魚画像を消してから区間を「提示後 (After)」と呼ぶことにする。この一連の提示による実験を 3 回行った。それぞれを「シーケンス 1」「シーケンス 2」「シーケンス 3」と呼ぶことにする。

提示する疑似個体としては使用魚種の画像を用い、3 つの魚画像で固定の隊列を組ませた。画像の配置の様子を図5に示す。そして、3 匹全体の重心からの相対的な位置を保ったまま、重心の y 座標を一定として、 x 座標のみを図6に示すように動かした。この動作は水槽を左右方向に 15 往復するもので、移動の動きは関数として単純なものとするため、等速直線運動とし、左右に到着して 0.75 秒静止するようにした。シーケンス 1, シーケンス 2, シーケンス 3

*1 3 個体とした理由は、1 個体のみもしくは 2 個体のみを水槽中に置いた際、魚が水槽の底で動かず、映像刺激への反応も見せなかったためである。

*2 イーヤマ製 タッチパネルディスプレイ ProLite T2735MSC, Full HD(1920×1080), コントラスト 3000:1(標準), 輝度 260cd/m², 応答速度 5ms. 水槽に接する部分は 1093pixels × 932pixels, 0.311mm/pixel, 最大フレームレート 60fps

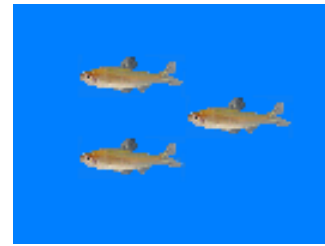


図 5 映像刺激中の魚画像の配置. 実際のディスプレイに提示した刺激映像のキャプチャ画像である。

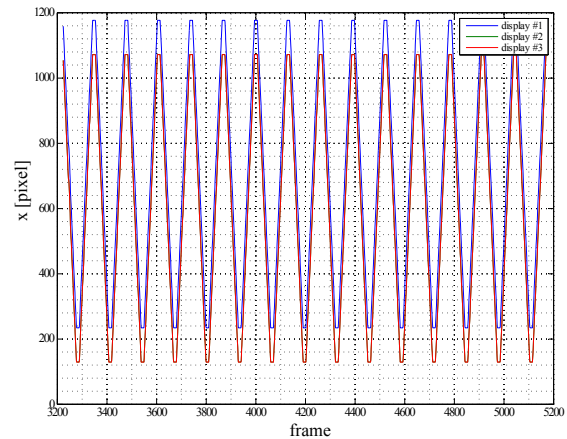


図 6 シーケンス 2 における疑似個体の動き

でこの提示の周期をそれぞれ 7.5 秒, 8.7 秒, 7.5 秒とした。

提示前, 提示中, 提示後の全区間を連続してカメラ *3 で撮影し, 前節で述べた追跡手法を用いて魚の座標系列を得た。撮影は 15 フレーム/秒で行った。

4.2 分析方法

提示前, 提示中, 提示後の 3 区間に対して, 次に述べる 2 種類の解析を行った。

(1) 短時間フーリエ解析に基づく周波数成分の時間変化の解析:

本実験の解析では窓幅 512 フレーム (34.1 秒), 窓のシフト量 16 フレーム (1.1 秒) で短時間フーリエ変換を行った。フレームレートが 15fps であるから, サンプリング周波数は $f_s = 15\text{Hz}$ となり, フーリエ解析の周波数間隔は $2.9 \times 10^{-2}\text{Hz}$ となる。提示映像の周波数はシーケンス 1 およびシーケンス 3 では $f_{t1} = 1.3 \times 10^{-1}\text{Hz}$ となり, シーケンス 2 では $f_{t2} = 1.1 \times 10^{-1}\text{Hz}$ となる。

(2) 映像に対する魚群の反応の検定:

あらかじめ提示刺激が正弦波であるとみたときの位相を求め, この位相を持つ正弦波と, 注目する個体の軌跡との相互相関をとる。この相互相関の注目する区

*3 Point Gray Research 社製 Chameleon CMLN-13S2C(解像度 1296 × 964, カラー, 最大解像度時フレームレート 18fps, 1/3 インチ CCD, USB2.0 インターフェース), レンズは FUJINON 社製 DV5x3.6R4B-2 1:1.8/36-18mm 1/2" CS

間内での区間長で正規化した値を求め、この値について t 検定を行う。

(2) については具体的には以下のように行う。まず、提示した映像刺激の魚画像の x 座標系列を $x_{r,t}$ として、この信号が正弦波であると見たとき振幅および位相 θ_r を求める。提示時間 $[t_b, t_e]$ とするとき、既知の角周波数 ω_r を用いて、最小二乗法により次の値が最も小さくなる時の θ_r を求める（なお、サンプリング周期 $T_s = 1/f_s$ である）。

$$\sum_{t=t_b}^{t_e} (x_{r,t} - \cos(\omega_r T_s t + \theta_r))^2 \quad (3)$$

次に、2つの区間 $[b_1, e_1]$, $[b_2, e_2]$ （以降ではこれをそれぞれ単に区間 1, 区間 2 と呼ぶ）の有差を評価する際に、提示した刺激との相互相関を利用する。これは、各時刻 $t \in [b_i, e_i]$ ($i = 1, 2$) における $s_{k,t} = x_{k,t} \cos(\omega_r T_s t + \theta_r)$ をそれぞれサンプルとみなすことで検定を行う。このとき、 $s_{k,t}$ のそれぞれの区間内平均

$$m_{k,i} = \frac{1}{e_i - b_i + 1} \sum_{t=b_i}^{e_i} s_{k,t} \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

を考え、平均 $m_{k,1}$ と $m_{k,2}$ が有意に異なるかどうかを t 検定を通じて個体 k ごとに調べる。

4.3 結果と考察

4.3.1 計測結果

魚群中の個体の x 座標時間変化を図 7 に示す。魚群の動きはどのシーケンスにおいても、周期はさまざまであるが、4節のはじめに述べたように、 x 軸方向で往復運動を繰り返す傾向がみられた。

はじめに、4.2 節の (1) で述べたような往復運動の周期をみるため、 x 座標方向の速度の短時間フーリエ解析を行い、周波数成分の大きさを見た。すると大きく分けて2つのケースがみられた。1つは、図 9 に示すシーケンス 3 の個体 3 のように、提示中の区間の一部において提示した運動の周波数成分が大きくなる場合が見られた。一方、シーケンス 2 の個体 3 のように、周波数成分について提示の有無で変化が小さい場合もあった（図 8）。

そこで、各個体 k について、4.2 節に述べたように提示の位相との相互相関を調べた。提示前、提示中、提示後のそれぞれの区間における式 4 の値 $m_{k,before}$, $m_{k,on}$, $m_{k,after}$ を図 10 に示す。シーケンス 1 では、提示前はどの個体も値はゼロに近い。提示中は個体 1 及び個体 3 は、提示前に比して大きな値をとっている。提示後は個体 1 と個体 2 では相関の値はゼロ付近だが、個体 3 では負の値となっている。シーケンス 2 では個体 1, 個体 2, 個体 3 のいずれも、提示前は負であり、提示中は正の値となり、提示後はゼロ

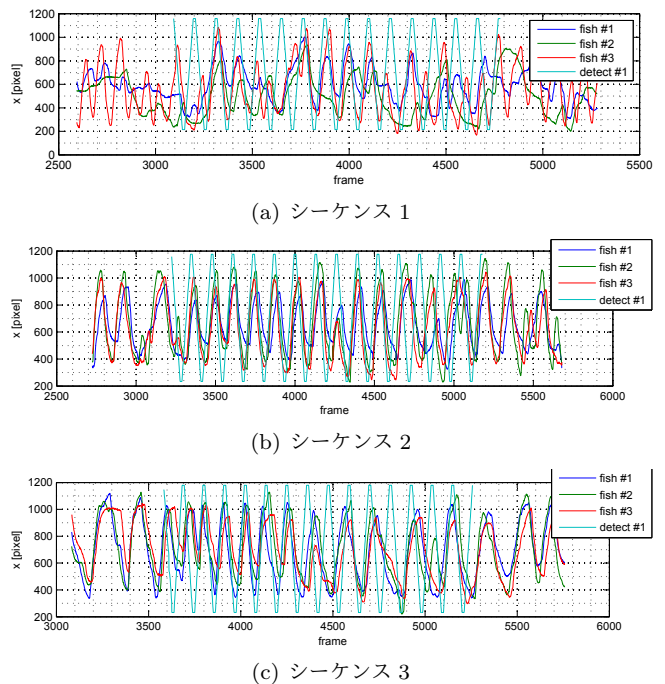


図 7 提示中の区間と、その前後 500 フレームにおける各シーケンスの x 座標の時間変化。横軸はフレーム番号、縦軸は x 座標である。

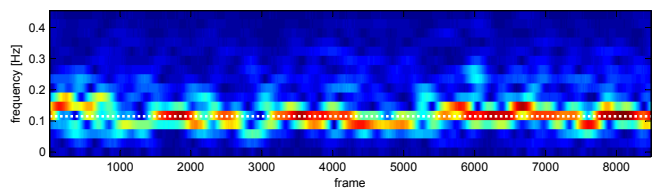


図 8 シーケンス 2 の個体 3 の x 方向速度スペクトログラム。横軸はフレーム番号、縦軸は周波数である。白点線は刺激映像の周期 $f_{r2} = 1.1 \times 10^{-1} \text{Hz}$ を示す。色は振幅スペクトルの強さを表し、青はゼロ、赤いほど振幅スペクトルが強い。

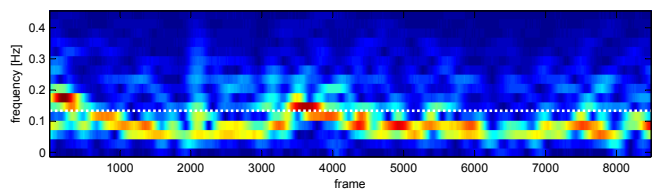


図 9 シーケンス 3 の個体 3 の x 方向速度スペクトログラム。横軸はフレーム番号、縦軸は周波数である。白点線は刺激映像の周期 $f_{r3} = 1.3 \times 10^{-1} \text{Hz}$ を示す。色は振幅スペクトルの強さを表し、青はゼロ、赤いほど振幅スペクトルが強い。

に近い値となっている。シーケンス 3 では、いずれの個体についても、提示前は正の小さな値、提示中は正の大きな値、提示後では負の値をとっている。

これら $m_{k,before}$, $m_{k,on}$, $m_{k,after}$ に関して、同じ個体について、提示前と提示中、提示中と提示後の分布 $\{s_t\}$ について、帰無仮説を「2 つ区間の分布 $\{s_t\}$ の平均 m が等しい」と設定し、ウェルチの t 検定を行った。この検定の結果を表 1(a), 表 1(b) および表 1(c) に示す。

シーケンス 1 では個体により検定の結果が異なる。個体

2ではどちらも有意な変化が見られなかった。個体1及び個体3では提示前と提示中、提示中と提示後のいずれも有意に平均値が変化している。これより、個体1及び個体3に関しては提示前は相関が小さく、提示中は相関が正に大きくなり、提示後は負に大きくなったこととなり、提示により相関に変化が生じた。個体2では相関により変化が生じたとは結論できない。

シーケンス2ではいずれの魚についても提示前と提示中、提示中と提示後では平均が異なるという結果が得られた。提示中の相関は提示前もしくは提示後と比べ優位に高く、いずれの個体も提示した疑似個体の動きに同期する傾向がみられた。

シーケンス3においても個体により検定結果が異なった。個体2は提示前と提示中、提示中と提示後において有意に平均が変化した。個体1及び個体3では、提示中と提示後は平均が有意に変化した。提示前と提示中では有意であったとは言えなかった。

4.3.2 考察

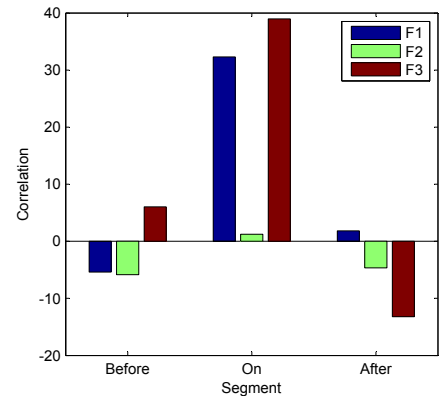
個体差の影響 本研究では3個体を用いて3シーケンスの実験を行ったが、各シーケンスにおいて個体間で振る舞いが異なった。例えば、シーケンス1では個体1と個体3は提示に追従する傾向が見られたが、個体2は他の2個体に比べて提示に対する相関が小さかった。今回は、使用した3個体以外でこのような傾向がみられるかについて検証は行えなかったが、このような個体の振る舞いの差異は、魚群の異なる振る舞いにつながる可能性があるため、多くの個体をサンプルとした検証が求められる。

リアルタイムシステム 本研究でのシーケンスにおいて、実際の魚が提示画像を追い抜き、その結果同期が外れることがあった。提示中の区間において、詳細に相関をみると、提示中の前半では強い相関がみられたが、このような追い抜きのため、提示の後半で同期が外れたため、相関が弱くなるがあった。これは、実際の魚が単に映像に追従しようとしただけでなく、映像を含めた群れ全体を先導して引っ張ろうとしたにもかかわらず、映像の魚が反応しなかったために同期が外れた可能性がある。各個体の位置に応じて映像側が動きを変化させ、相互適応的に魚群とのインタラクションが行えるシステム構築によりこの検証を行いたい。

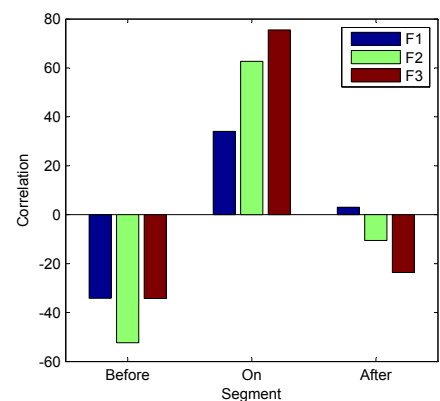
5. 結論

魚群のメカニズムの理解において、映像による疑似個体の動きの提示と、それに対する実際の魚の反応を観察するためのシステムを提案し、その有効性について検証した。その結果、実際の魚は映像中の疑似個体の動きに対して同期するように反応する傾向が確認された。

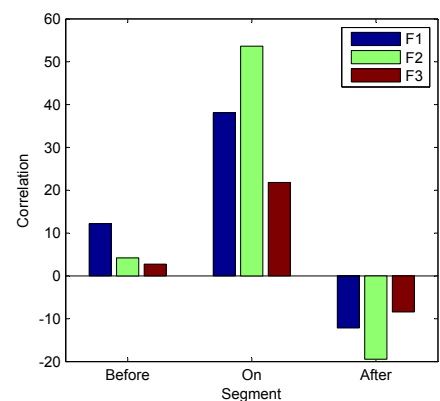
今後は疑似個体の映像を一方向的に提示するだけでな



(a) シーケンス 1



(b) シーケンス 2



(c) シーケンス 3

図 10 各シーケンスにおける式 4 の値。Before は提示前、On は提示中、After は提示後の区間であり、グラフは、各個体 1 (F1)、個体 2 (F2)、個体 3 (F3) ごとの、それぞれの区間における $m_{k,before}$, $m_{k,on}$, $m_{k,after}$ を表す。

く、魚の位置や速度、動きのパターンなどの状態に応じて疑似個体の動きをリアルタイムにフードバック制御する、魚群とのインタラクション解析および魚群制御の可能性を探っていく予定である。

表 1 各シーケンスの検定結果. *は有意水準 5%で有意差があることを示す.

(a) シーケンス 1 の検定結果

	$m_{\text{before}} - m_{\text{on}}$	$m_{\text{on}} - m_{\text{after}}$
個体 1	*	*
個体 2		
個体 3	*	*

(b) シーケンス 2 の検定結果

	$m_{\text{before}} - m_{\text{on}}$	$m_{\text{on}} - m_{\text{after}}$
個体 1	*	*
個体 2	*	*
個体 3	*	*

(c) シーケンス 3 の検定結果

	$m_{\text{before}} - m_{\text{on}}$	$m_{\text{on}} - m_{\text{after}}$
個体 1		*
個体 2	*	*
個体 3		*

参考文献

- [1] Partridge, B. L.: Structure and function of fish schools, *Scientific American*, Vol. 246, No. 6, pp. 114–123 (1982). (今福 道夫 訳, 「魚はどのように群れを維持するか, 『日経サイエンス, Vol. 8,(1982), pp.28-32) .
- [2] Reynolds, C. W.: Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model, *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 25–34 (1987).
- [3] 寺山 慧, 炭谷竜太, 阪上雅昭: オプティカルフローを用いた魚群のローテーションカーブの推定, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol. 2014-CVIM-190, No. 17, pp. 1–81 (2014).
- [4] Swain, D. T., Couzin, I. D. and Leonard, N. E.: Real-time feedback-controlled robotic fish for behavioral experiments with fish schools, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 1, pp. 150–163 (2012).
- [5] 有元貴文: 魚はなぜ群れで泳ぐか, 大修館書店 (2007).
- [6] Yano, T., Nobuhara, S. and Matsuyama, T.: 3D Shape from Silhouettes in Water for Online Novel-View Synthesis, *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, Vol. 5, pp. 65–69 (2013).
- [7] Bishop, C. M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer-Verlag New York, LLC (2006). (元田 浩 ほか 監訳, パターン認識と機械学習 下, (丸善出版株式会社,2012)) .
- [8] Xiong, G., Feng, C. and Ji, L.: Dynamical Gaussian mixture model for tracking elliptical living objects, *Pattern Recognition Letters*, Vol. 27, pp. 838–842 (2006).
- [9] Jia, X., Choi, Y. K., Mourrain, B. and Wang, W.: An Algebraic Approach to Continuous Collision Detection for Ellipsoids, *Computer Aided Geometric Design*, Vol. 28, No. 3, pp. 164–176 (2011).