

(続紙 1)

京都大学	博士（ 人間・環境学 ）	氏名	寺山 慧
論文題目	Vision-based Measurement Methods for Schools of Fish and Analysis of their Behaviors (動画画像処理に基づく魚群の計測手法と行動解析)		
(論文内容の要旨) 本論文は、大規模で密度の高い魚群の動画からその行動を計測する手法を開発し、それらを水族館にて撮影した動画に適用して魚群の行動解析を行った結果をまとめたものである。 本研究では、群れ画像を魚の密度で「比較的疎」「比較的密」の二種類に分類し、前者に関しては個体の追跡手法及び行動（尾びれ振動等）の計測手法を、後者に関しては群れの速度場を計測する手法などを提案し、それらの手法の検証を行った。計測対象として長崎県九十九島海きらら水族館にてトーラス形状を保ったまま回転しているマイワシ数千匹からなる群れなどの撮影を行い、それらの動画に提案手法を適用して行動解析を行った。また提案手法により長時間にわたって連続的に速度場を計測し、群れの速度構造の時間変化などの解析を行った。 第1章は導入、第2章は関連研究の紹介、第3章はこの研究で撮影された動画の説明である。第4章では、比較的疎な魚の群れ画像の中で孤立して泳いでいる魚に対し、魚の泳ぎの基本的特徴である、尾びれの振動数、及び、惰性泳行期間を測定する手法を提案している。この手法は、粒子フィルター（particle filter）に基づいたものである。水族館で撮影した実際の群れの画像に対してこの手法を適用した結果、尾びれの振動数の誤差は 0.126Hz であり、惰性泳行期間検出の適合率と再現率は0.945 及び 0.879 であった。これらの結果は、この手法が実用に耐えうるものであることを示唆している。 第5章では、比較的疎な魚の群れ画像に対する個体の追跡手法を提案している。これは、見え（appearance）モデルに基づくものであり、個体同士の重なり・交差に対して頑健である。実際の画像において、KLTトラッカを用いて追跡した場合と比較して実験を行ったところ、KLTトラッカでは2、3匹の重なりのある画像に関してまったく追跡ができなかったのに対し、本手法では、2匹のものでは5シーンのうち80%、3匹のものでは5シーンのうち100%の正確さで追跡された。 第6章では、比較的密な魚の群れ画像に対して平均速度の分布を計測する手法を提案している。この手法は、人の目による追跡が困難なような同質の魚からなる高い密度の群れで、他種の魚が頻繁にカメラの前を横切って対象の魚の群れを隠す場合でも速度場を求めることができるものである。この手法はオプティカルフロー計測に基づいており、トーラス状に回転する魚群に対して、そのおおよその遊泳速度と進行方向			

を推定可能であること等の条件のもと、対象となる魚の動きに対応すると推定されたフローのみを抽出し、平均速度の分布を計測している。提案手法を人工的に作成した画像に適用したところ、正しい値が測定された。また、実際の魚の画像に適用した結果と群れの一部の魚を手で追跡しながら速度を計測した結果を比較したところ、誤差は4% 以下であった。

この手法をトーラス状に回転しているマイワシ及びカタクチイワシの画像に適用することにより、ローテーションカーブ（群れの中心からの距離と魚の速度との関係）を得ることができ、外側の個体の方が内側の個体よりも速く泳いでいることがわかった。この速度構造は本研究によってはじめて明らかにされたものである。また、速度ベクトルの垂線が集まる位置を最小二乗法で求めることにより、群れの形状が変化したり、群れの中心が移動したりしている画像から回転の中心を求める効率的な手法を確立した。これにより、回転している魚群の長時間の画像に対する自動的なローテーションカーブの測定が可能となった。また、中心からの垂線の解離度から回転の乱れを検出できることがわかった。回転する魚の群れを扇形状に切った各切片における魚の挙動も計測し、その中心からの平均距離の分散から、大きな魚が画像を遮った事象を検出できることがわかった。

第7章では、前章までに確立された計測手法を用いてトーラス状に回転しているマイワシの群れの画像を解析することにより、速度構造とその時間変化について調べている。まず、比較的疎な魚の群れの画像に対して体長と泳ぐ速度の分布を調べ、体長の分布は一様であり、体長に関わらず外側の個体の方が内側の個体よりも速く泳ぐことがわかった。また、比較的密な魚の群れを長時間計測した画像においてローテーションカーブの時間変化を調べた。それにより、回転する魚の群れは、短時間（数秒）及び長時間（数時間）での速度構造の変化を起こしていることがわかった。こうした変化に対応しながら、この計測システムは回転する魚の群れの運動解析を行うことができ、線形に外側の方が速いというローテーションカーブの構造は速度構造の変化に関わらず、常に保たれていることなどがわかった。

(論文審査の結果の要旨)

群れ行動は、鳥や魚などの動物、また人の集団にも普遍的に見られる現象である。群れの中での個体の追跡や群れの解析、さらに、群れを成すメカニズムなどに関しては、生物学や計算機科学をはじめ、統計物理学、行動経済学、水産学など様々な分野から研究が行われている。しかしながら、魚群、特に大規模で密度の高い群れに関しては、その計測が難しいことなどから、他の群れに比べ実証的な研究は未だ十分に進んでいない。申請者は、大規模で密度の高い魚群を含む魚群の動画に対する幾つかの計測手法を開発した。そして、それらの手法を実際の魚の群れ画像に適用し、魚群の行動解析を行った。

本研究の大きな特色の一つは、本研究が計算機科学の一分野である動画の解析技術の研究と、魚群の行動解析という生物に関する研究の境界に位置することである。実際、この研究は、前者の研究を行っている本研究科共生人間学専攻数理科学講座の日置尋久研究室と、後者の研究を行っている本研究科相関環境学専攻自然環境動態論講座の阪上雅昭研究室、さらに学外で前者の研究を行っている近畿大学総合理工学研究科の波部斉研究室ら、研究科内外の研究室との学際的な共同研究として行われた。

本研究のもう一つの特色は、魚の群れに関して、データの取得、動画解析手法の開発、そして群れ行動の解析という、研究の全体を扱ったものであることである。申請者は阪上研究室と共に、長崎県九十九島海きらら水族館を10回以上訪問し、トーラス状に回転しているマイワシ数千匹からなる群れなどの魚群の撮影を行った。水中という三次元空間で密な群れを作る魚の動画は、個体の重なりが激しく起こり、個体を目で追尾することすら困難である。また、水族館の水槽は、実験室と異なり撮影のための特殊な状況を作れない、自然により近い環境である。そこでは、解析の対象ではない魚がカメラの前に現れるなどの障害を克服する必要がある。そのような動画に対して解析を行う先行研究は存在せず、動画の解析手法を一から考案する必要があった。申請者は、群れの画像を群れの密度で「比較的疎」「比較的密」の二種類に分類し、前者に関しては個体の追跡手法や行動（尾びれ振動等）の計測手法を考案し、後者に関しては群れの速度場などを計測する手法を提案した。そして、提案手法をシミュレーションにより作成された動画に適用したり、実際の動画に適用して得られた結果と人手による計測の結果と比較したりすることにより、それらの計測手法の有効性を検証した。

比較的密な群れに対する速度場の計測では、個々の追跡が不可能な画像から平均的な速度を求めるのにオプティカルフロー計測を用いた。局所的に一樣に動いている複数の個体の平均速度を求めるのにこの手法を用いるアイデアは斬新であり、また、検証結果より、信頼できる計測が達成されているといえる。障害物となる魚が現れたり、群れの形が動的に変化したりするのに対応しながら長時間の計測を自動的に行うための工夫もなされている。さらに、この計測により、トーラス状に回転しているマ

イワシやカタクチイワシの群れでは、外側の個体の方が内側の個体よりも速く泳いでいることなど、魚群の行動について新しい知見を得ることができた。これらの点から、この手法及びそれを用いて行われた計測は高く評価できる。

比較的密な魚の群れの長時間にわたる画像に対してこの計測を自動で行うことにより、長い時間での魚群の状態の変化を調べることができるようになった。これは、動画を用いた魚群の監視や成長の計測など、多くの応用につながる可能性がある。また、申請者が考案した手法やそれを発展させた手法をさらに多くの画像に適用することにより、魚群の行動についての研究が発展させられると期待できる。また本研究で撮影された動画自体も関連研究分野にとって貴重なデータとなると考えられる。

このように、本研究において考案・実装された動画解析の手法は本研究科数理学講座数理情報論分野の研究として高く評価できる。それだけではなく、これは人間・環境学研究科内外の研究室を巻き込んだ学際的な研究であり、学際研究を理念とする本研究科の研究としても高く評価できる。よって、本論文は博士（人間・環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降