

## 携帯型ステレオカメラを用いた魚類の逃避行動計測の精度検証

山中 遼<sup>1</sup>, 米山 和良<sup>2</sup>, 河端 雄毅<sup>1\*</sup>

## Validation of a portable stereo camera system for measuring escape response of fish

Ryo YAMANAKA<sup>1</sup>, Kazuyoshi KOMEYAMA<sup>2</sup> and Yuuki KAWABATA<sup>1\*</sup>

## Abstract

We investigated whether the escape response of fish could be quantified from the horizontal direction using a portable stereo camera system. First, we constructed a portable stereo camera system equipped with two high-speed cameras, and performed image calibration. Second, the device was pushed toward the red sea bream *Pagrus major* to elicit its escape response. The flight initiation distance, displacement, and escape direction of the red sea bream were calculated from the captured images and compared with the values estimated from the high-speed camera installed above the water tank. The results indicate that these variables can be estimated with high accuracy using the portable stereo camera system.

Key words: C スタート C-start, ステレオカメラ stereo camera, 逃避開始距離 flight initiation distance, 逃避反応 escape response, 逃避方向 escape direction

逃避行動は多くの動物が捕食者などの危険に曝された際に示す行動である。この行動は動物の生残を左右する行動であり、適応度に強く影響するため、魚類を含む様々な種で研究が行われている。<sup>1)</sup> 魚類における逃避行動の研究では、水槽内で落下物や映像等の刺激により逃避行動を誘発する研究が数多く報告されている。<sup>2)</sup> しかし、実際に魚類が生息する野外環境においてその逃避行動を調べた研究は少ない。<sup>3,4)</sup> 野外環境において逃避行動を調べることは、対象種が複雑な生物・物理環境に対してどのように適応し、生残しているかを理解することに繋がるため、その種の生態を理解する上で重要な課題である。また、それは、漁具に対する魚の反応ひいては漁獲プロセスの理解に繋がるため水産学的にも重要な課題である。

一般的に魚類は逃避の際に、刺激と逆側に体を屈曲させることで瞬時に旋回と加速を行う C スタート (逃避反応) を行う。<sup>2)</sup> C スタートは極めて高速の運動であるため、その運動の詳細 (逃避開始距離, 逃避方向, 移動距離等) を記述するためには、高速度カメラで撮影する必要がある。<sup>2)</sup> しかし、野外で高速度カメラによって魚類の逃避行動を撮影することは、機器の設置が困難なことや対象種の

移動範囲を制限できないことなどから、未だ困難を伴う。そのため、野外では、目視によって逃避開始距離 (魚類が危険から逃げ始める距離) のみを調べる研究が大半を占める。<sup>3,4)</sup> さらに、その計測は接近するダイバーの位置と魚類が逃げ始めた位置を目視で推定し、手でそれらの距離を測定するものであるため、正確な値で計測できているとは言い切れない。ごく最近になって野外に高速度カメラを設置して、その撮影範囲内に侵入した魚類に対して映像刺激で逃避行動を誘発する研究が報告されたが、<sup>5)</sup> この方法では撮影範囲が限られるため、対象とする魚種の逃避行動を効率的に計測することができない。

2000 年代より、複数のカメラで撮影された映像から三次元の空間座標を構成するステレオ撮影が魚類研究に応用されはじめた。これまでは、水槽や生簀内での体長計測や移動計測に利用されていたが、<sup>6,7)</sup> 近年、野外研究にも応用されるようになった。<sup>8)</sup> よって、この手法を用いることで、野外で効率的に魚類の逃避行動を計測できる可能性がある。しかし、実際に魚類の逃避行動をステレオ撮影した例は極めて少ないことに加えて、<sup>9)</sup> その逃避行動の計測精度・確度は全く調べられていない。

<sup>1</sup>長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科; <sup>2</sup>北海道大学大学院水産科学研究院

<sup>1</sup>Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University, Bunkyo-machi, Nagasaki 852-8521, Japan;

<sup>2</sup>Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato-cho, Hakodate 041-8611, Japan

\*Email: yuuki-k@nagasaki-u.ac.jp

一般的なステレオ撮影では、上述の野外での逃避行動撮影と同様に、カメラを特定の場所に固定する。しかしこの方法では、対象種が撮影範囲に入るのを待つ必要があるため、効率的にその逃避行動を計測できない。そこで本研究では、カメラを動かして魚類をステレオ撮影できる装置を作製した。この装置を使用することで、対象の魚が撮影範囲に入るのを待たずに、能動的に魚の逃避行動を撮影することができる。

本研究の目的は、この新たに作製した携帯型ステレオカメラ装置の計測精度を従来の方法と比較して検証することである。水槽内でこの撮影装置を水平方向から接近させることで、魚類の逃避行動を誘発し、ステレオ撮影を行った。撮影した映像からマダイ *Pagrus major* の逃避開始距離、移動距離、逃避方向を算出し、水槽上方に設置したカメラから推定した値（従来の方法）と比較した。

## 方法

ステレオビジョンとは、異なる方向から見た複数の画像を用いて計算により座標を再構築することで三次元の空間座標を得ることである。本研究では、再構築の手法として Direct Linear Transformation (DLT) 法を用いた。DLT 法は、既知の実座標空間を持つ点（較正点）を含む複数の画像から 3 次元座標を再構築する。対象物の三次元の位置座標を推定するためには、2 台のカメラの位置関係が常に同じである必要がある。そこで 2 台のカメラ (GoPro Hero5 か Hero6, Woodman Labs, San Mateo, USA) の位置関係が変化しないように両カメラを装置の台座に完全に固定した。カメラのレンズ間の距離は 21.5 cm に、カメラの解像度は  $1280 \times 720$  pixels に設定した。また、映像解析の際の座標原点を設定するとともに、マダイの逃避行動を誘発し易くするために、両カメラの映像内に収まるように鉈先を装置に固定した。

画像較正は、北海道大学水産学部の 150 cm 水槽（縦 70 cm、横 150 cm、高さ 80 cm）にて行った。画像較正用の立方体フレーム（1 辺 60 cm）を水槽の片側に固定し、逆側に撮影装置を固定した。立方体と撮影装置には較正点を配置した。ステレオ計測を行う空間内に較正点を均等に数多く配置した場合に計測精度が高くなるという説と、計測する空間の外郭に沿うように較正点を配置すると計測精度が高くなるという説がある。<sup>10)</sup> そこで本研究では立方体フレーム枠に沿って較正点を均等に配

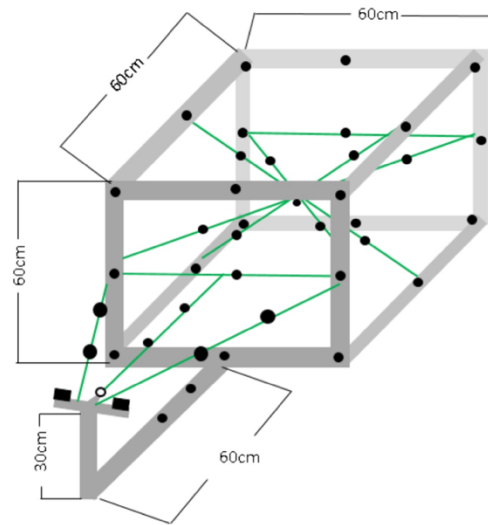


Fig. 1 Sketch of calibration points (filled circles).

置するとともに、配置に偏りが生じないようにフレーム内と撮影装置の鉈先とフレームの間にロープを張りその上にも較正点を配置した (Fig. 1)。較正点は原点である鉈先を含めて計 41 点に配置した。カメラのフレームレートは 120 fps に設定し、約 1 分間動画撮影を行った。撮影後水槽から画像較正用の立方体フレームと撮影装置を取り出し、レーザー距離計 (Leica DISTOTMS910, Leica Geosystems, 東京) を用いて鉈先から各較正点との正確な距離を計測した。Matlab (Mathworks 社, Massachusetts, USA) を用いて、映像から静止画を抽出し、三次元の座標を再構築した。なお、2 台のカメラの時間同期は録画データに含まれる音声データの位相を把握することにより行った。<sup>6)</sup> 各較正点の真の三次元位置と推定位置の差は映像の奥行方向 (x, Fig. 2) で  $0.8 \pm 0.7$  cm、左右方向 (y, Fig. 2) で  $0.5 \pm 0.4$  cm、上下方向 (z, Fig. 2) で  $0.6 \pm 0.4$  cm であった。

続いて、マダイ（全長  $7.0 \pm 0.6$  cm,  $n = 5$ ）の逃避行動を撮影した。実験は 2018 年 5 月 23 日～28 日

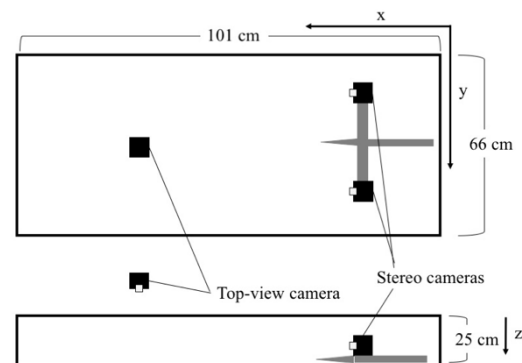


Fig. 2 Sketch of the experimental apparatus. Upper and below figures show the top and side views, respectively.

に行った。縦 101 cm, 横 66 cm, 高さ 30 cm の水槽に海水を水深約 25 cm になるように入れた。本手法(側方からステレオカメラで撮影)と通常的手法(上方から 1 台のカメラで撮影)を比較するために、水槽上方にステレオ撮影用カメラと同様のカメラ 1 台をレンズが下向きになるようにして設置した (Fig. 2)。なお、カメラの画角で広角モードを使用すると映像の歪みによって位置座標の推定が困難になるため、画角は狭角モードに設定した。供試魚 1 尾を馴致用に立てた塩ビパイプ(外径 8.4 cm)の中に入れ 10 分間馴致を行った。馴致後、塩ビパイプを取り除き、マダイに素早く(約 1.2 m/s)撮影装置を接近させて逃避行動を誘発した。塩ビパイプを取り除いた直後に上方のカメラの撮影範囲からマダイが出た場合は、カメラの撮影範囲に入るのを待ってから装置を接近させた。全ての個体で 1 回ずつ実験を行った後、全ての個体を飼育水槽に戻し 1 時間以上の時間を空けてから再度同じ方法で実験を行った。この試行を繰り返すことで、1 尾に対して 6 回ずつ、計 30 回の実験を行った。30 の映像のうち、上方のカメラと側方のカメラの映像を確認し、マダイが逃避しなかったもの、上方のカメラの撮影範囲にマダイが写っていなかったもの、側方からの撮影で片側のカメラにしかマダイが写っていなかったものを除き、計 15 の映像を解析に用いた。

得られた映像から、次の 3 つの変数を算出した。逃避開始距離: 逃避を開始した時のマダイの重心(映像内のマダイの面積から推定される重心)と銜先との距離、移動距離: 逃避を開始した時のマダイの重心と逃避開始から 83 ミリ秒後のマダイの重心との距離、逃避方向: 逃避開始時の銜先とマダイの重心を結んだ直線と、逃避開始時のマダイの重心と逃避開始から 83 ミリ秒後のマダイの重心を結んだ直線のなす角。なお、83 ミリ秒 (20 フレーム) に設定したのは、マダイの逃避行動 (C スタート) における 1 度目の体の屈曲が確実に終了していたためである。

上方からの映像の解析は Matlab と映像解析ソフト Kinovea (ver. 0.8.25, [www.kinovea.org](http://www.kinovea.org)) を用いて行った。逃避を始めた瞬間と逃避開始から 83 ミリ秒後の画像からマダイの重心と銜先の座標を取得することで、上記 3 つの変数を算出した。ステレオ撮影装置の映像の解析は、Matlab により行った。マダイが逃避を開始した瞬間の静止画と 83 ミリ秒後の静止画から銜先とマダイの重心の位置座標を算出し、3 つの変数を算出した。なお、移動距離と逃

避方向では、撮影中に映像の座標軸が回転し得るため、画像上の動かない 2 点の座標を用いることで回転補正を行った。逃避開始時とその 83 ミリ秒後の画像上で、水槽内の動かない 2 点の座標間のベクトルを抽出し、それらのベクトルの回転角を算出した。そして、83 ミリ秒後の静止画から求めたマダイの重心の座標にその回転角度の補正を加えた。なお、本解析に使用した DLT 法では画像校正時の校正エリアの内側では確度が高いが、計測点が校正エリアの外側になると確度が低下する。<sup>10)</sup> 本実験では、15 個の映像のうち 4 つの映像において逃避開始から 83 ミリ秒後に動かない 2 点のどちらかが校正エリアの外側になっていたため、移動距離と逃避方向は 4 つの映像を除外して算出した。

ステレオ装置による推定の精度と確度を調べるために、算出した 3 つの変数において、ステレオ装置によって推定した値と上方の映像から推定した値(真値)を比較した。上方の映像から推定した値を説明変数 (X 軸) とし、ステレオ装置によって推定した値を目的変数 (Y 軸) として、単回帰分析を行った。ステレオ撮影の推定精度は、その決定係数により調べた。また、その回帰直線と  $Y=X$  の直線を比較することで、ステレオ撮影の推定確度を調べた。なお、本研究ではカメラからの距離を用いて逃避方向(角度)を推定したため、逃避方向が  $90^\circ$  に近づくほど誤差が大きくなると考えられた。そのため、以上の解析は、逃避方向の正弦を用いて実施した。

## 結果・考察

3 つの変数におけるステレオ装置によって推定した値と上方の映像から推定した値の関係を Fig. 3 に示す。すべての変数において、両者の間に強い正の相関がみられた(逃避開始距離,  $r=0.98, p<0.01$ ; 移動距離,  $r=0.92, p<0.01$ ; 逃避方向,  $r=0.93, p<0.01$ )。ただし、逃避開始距離の決定係数は 0.96 と極めて高かったが、回帰直線の傾きが 1 より有意に小さく ( $t=-2.42, d.f.=13, p<0.05$ )、値が大きくなるにつれて正確度 ( $\Leftrightarrow Y=X$  の直線と回帰直線の差) が低下する傾向にあった。これは左右のカメラの画像内における位置座標の違いから奥行の距離を算出するため、カメラからの距離が大きくなるにつれてその違いが検出しづらくなるという特性によるものだと考えられる。野外研究に応用するにあたっては、本研究のように水槽内で回帰直線を求めて、その式を用いて得られたデータを補正する必要がある。

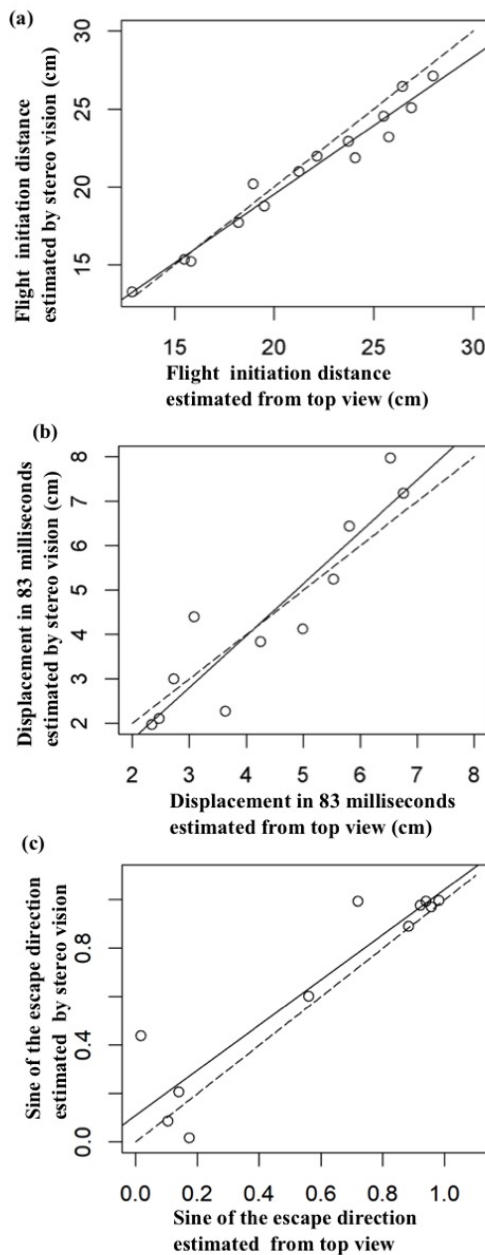


Fig. 3 Comparisons between the variables estimated from the top-view camera and those estimated by the stereo vision. (a) Flight initiation distance. (b) Fish displacement in 83 milliseconds. (c) Sine of the escape direction of the fish relative to the stimulus. Solid and dashed lines represent the ordinary linear regression and  $Y=X$  lines, respectively.

移動距離と逃避方向においては、回帰直線と  $Y=X$  の直線の間、傾き（移動距離： $t = 1.01$ ,  $d.f. = 9$ ,  $p = 0.23$ ; 逃避方向： $t = -0.53$ ,  $d.f. = 9$ ,  $p = 0.33$ ）、切片（移動距離： $t = -0.89$ ,  $d.f. = 9$ ,  $p = 0.40$ ; 逃避方向： $t = 1.25$ ,  $d.f. = 9$ ,  $p = 0.24$ ）ともに有意な差はなかった。しかし、移動距離の決定係数は 0.84、逃避方向の決定係数は 0.86 であり、逃避開始距離の

それ (0.96) と比較して低い傾向にあった。この違いは、変数の推定に用いた画像と位置座標の数の違いによるものだと考えられる。逃避開始距離の推定では、マダイが逃避した瞬間の静止画のみから、マダイの重心のみの位置座標を抽出して計算に用いた。一方で、移動距離と逃避方向の推定では、逃避した瞬間の静止画とその 83 ミリ秒後の静止画から、マダイの重心の位置座標を抽出して計算に用いた。さらに、それぞれの静止画から動かない 2 点の座標を抽出し、回転補正に用いた。そのため、移動距離と逃避方向では、計 6 つの座標の誤差が蓄積し、逃避開始距離と比べて比較的低い測定精度になったと考えられる。これらの精度を向上させるには、静止画から推定する位置のひとつひとつをより正確な位置に近づける必要がある。例えば、連続する複数フレームで座標を検出し、その平均値を用いる方法などが考えられるが、<sup>7,11)</sup> 今後の課題である。

本研究により、携帯型ステレオカメラによって、比較的高い精度で魚類の逃避行動を計測できることが分かった。また、本手法の利点として、2 台のカメラを強固に固定した上で、水槽内で位置座標の較正を行えば、野外環境で較正することなく逃避行動が計測可能なことが挙げられる。今後、本手法を用いて、異なる刺激や環境要因が魚類の逃避行動に及ぼす影響を野外で明らかにすることが期待される。また、本手法では魚類の体長も同時に推定できるため、魚類の体長と逃避行動の関係性の解明にも応用可能であろう。

## 謝辞

本実験を実施するにあたり、ステレオ撮影や三次元解析について北海道大学大学院水産科学院海洋生物資源科学専攻水産工学講座の学生の方々に有益な助言を頂きました。この場を借りて厚くお礼を申し上げます。本研究の一部は JSPS 科研費 (17K17949, 19H04936 to Y.K.) の助成により実施した。なお、本研究は長崎大学水産学部魚類実験要項に従って実施した (承認番号 NF-0002 号)。

## 参考文献

- 1) Cooper W, Blumstein DT. Escaping from predators. Cambridge University Press, Cambridge. 2015
- 2) Domenici P. Escape responses in fish: kinematics, performance and behavior. In:

- Domenici P, Kapoor BG (eds). *Fish Locomotion. An Eco-Ethological Perspective*. Science Publishers, New Hampshire. 2010; 123-170.
- 3) Gotanda KM, Turgeon K, Kramer DL. Body size and reserve protection affect flight initiation distance in parrotfishes. *Behav Ecol. Sociobiol.* 2009; **63**: 1563-1572.
  - 4) Bergseth BJ, Williamson DH, Frisch AJ, Russ GR. Protected areas preserve natural behaviour of a targeted fish species on coral reefs. *Biol. Conserv.* 2016; **198**: 202-209.
  - 5) Hein AM, Gil MA, Twomey CR, Couzin ID, Levin SA. Conserved behavioral circuits govern high-speed decision-making in wild fish shoals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 2018; **115**: 12224-12228.
  - 6) 米山和良, 國澤慎太郎, 外菌博人, 小谷知也, 今村昭則, 松岡達郎. 画像解析による水槽内を遊泳するクロマグロ稚魚の 3 次元位置の検出. *数理水産科学* 2015; **12**: 51-61 (in Japanese with English abstract).
  - 7) Sakamoto M, Komeyama K, Tamaru O, Torisawa S, Takagi T. Particle filter for automated measurement of chub mackerel trajectory using stereo vision. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2018; **84**: 787-795. (in Japanese with English abstract)
  - 8) Cathcart K, Shin SY, Milton J, Ellerby D. Field swimming performance of bluegill sunfish, *Lepomis macrochirus*: implications for field activity cost estimates and laboratory measures of swimming performance. *Ecol. Evol.* 2017; **7**: 8657-8666.
  - 9) Stamoulis KA, Harvey ES, Friedlander AM, Williams ID, Weng KC, Wiggins C, Wagner GW, Conklin EJ. Flight behavior of targeted fishes depends on variables other than fishing. *Ecol. Indicators* 2019; **96**: 579-590.
  - 10) 高橋秀行, 澤田浩一, 高尾芳三, 安部幸樹. J-QUEST ステレオ TV カメラシステムの立体計測精度の検証. *水工研技報* 2005; **27**: 81-92 (in Japanese with English abstract).
  - 11) Tanaka T, Komeyama K, Torisawa S, Yamaguchi T, Asami S, Takagi T. Performance of a multi-stereovision technique to enhance the accuracy of fish body measurement for aquaculture management. *Nippon Suisan Gakkaishi* 2019; **85**: 314-320 (in Japanese with English abstract).