

# 中～大型魚養殖における水中ロボットを用いた 斃死魚回収システムに関する 構成と基礎的研究

藤原慎平<sup>1</sup>

## Idea and basic research on the dead fish collection system using underwater robot in medium to large fish aquaculture

Shinpei Fujiwara<sup>1</sup>

**Abstract**: In aquaculture, leaving dead fish that have sunk to the bottom of the net for a long time causes harmful components from the dead fish body. This risk making other fish in the aquaculture net sick. The early collection of dead fishes is required, but when divers work in the sea, high water pressure and low water temperatures make it difficult for them to work for a long time, and the work efficiency of the entire aquaculture facility is reduced due to the need for manpower.

To protect aquaculture fishes from disease, it is useful to install devices and robots to detect and collect the dead fish at an early stage. If the target is small fishes, there is a pumping method. But if the target is medium to large fishes, it is not reasonable. Therefore, we devised a system for collecting dead fishes using AUV(autonomous underwater vehicle) and wire. This report describes the configuration and operation of this system, and conducts simple experiments to confirm its feasibility.

**Key words**: Aquaculture, Underwater robot, AUV, Collection of dead fishes, Work efficiency

### 緒 言

魚類の養殖において、養殖網の底に沈んだ魚の死骸を長期間放置することにより、魚体内部で有毒な物質（アンモニウムイオン等）や感染症の元となる細菌（コイヘルペスウイルス等）が発生し、養殖網内部の他の個体に悪影響を及ぼす危険がある。これは一尾あたりが高額な大型魚でも同様であり、養殖業者は日々奮闘している。斃死魚の早期回収が求められるが、海中でダイバーが作業する場合には、海況によっては高水圧や低水温の影響により作業が困難になる可能性も考えられる。またこの作業に人員を割く必要があるため、養殖施設全体の作業効率も下がる。

これらへの対策として、早期に斃死魚を発見・回収するシステムの導入は有用と考えられる。対象が小型魚の場合はポンプで吸引する手段があるが、中～大型魚の場合は必

要となるポンプのサイズや動力を考えると合理的ではない。現行ではアーム型のマニピュレータを搭載した大型ROV(Remotely Operated Vehicle)を使って斃死魚回収の研究が進められているが、機体が大型ゆえ取り回しが容易ではなく、またROVなので操縦者が必要となる<sup>1)</sup>。本研究ではこの研究と差別化を図るため、操縦者のいない小型AUV (Autonomous Underwater Vehicle)とワイヤーを用いた斃死魚回収システムを考案した。本報告では、このシステムの構成と運用方法について述べ、システムを構成する各機構のプロトタイプを製作し、運用の可否を確認するために回収するための機構を備えた機体とワイヤーの代用を用意し、対象魚を回収できるか見極めるための簡易的な実験を実施する。

2023年8月28日受付, 2023年12月11日受理

<sup>1</sup> 水産大学校海洋機械工学科 (Department of Ocean Mechanical Engineering)

† 別刷り請求先 (corresponding author): fujiwara@fish-u.ac.jp

## システムについて

### システム全体の構成としくみ

斃死魚回収システムで使用する水中ロボットの概要図をFig.1に、システム全体の概要図をFig.2に示す。Fig.1のドローン型AUVには機体底面にカメラ、ライト、そして斃死魚回収に用いるための鉞が備わっており、複数の鉞はワイヤーで連結されている。サーボモータを用いた機構とスラスターの鉛直方向推力により鉞を対象となる斃死魚に突き刺すことができる。Fig.2左図の構成では、機体とワイヤーの他に養殖網の淵にウィンチを設置し、これはワイヤーを巻き取るために用いる。Fig.2右図Phase 1～Phase 4は斃死魚回収の順序を示しており、Phase 1で機体が底付近を底面に沿って移動していき、Phase 2でカメラとライトにより対象の斃死魚を発見、Phase 3で斃死魚に鉞を打ち込みそのまま次の走行に移り、Phase 4で底面を走破したら水面に浮上して、無線でウィンチに巻き取り指示を与える。底面をまんべんなく走行するために、機体にはジャイロセンサーと測距センサーを搭載する。市販の測距センサーは赤外線を用いるタイプが多く、水中では赤外線は水分子に吸収される傾向が強いため多少不向きであるが、計測範囲は0.5m程度を想定しているため放射強度の高い赤

外線センサーであれば活用できると考えられる。また、ウィンチで回収した斃死魚は陸揚げできる訳ではなく水面までの回収に留まるため、最終的には人力で船上に揚げる必要がある。鉞は搭載できる数に限りがあるものの、大型魚の場合は網の中の個体数が小型魚と比べ少なく、一度に斃死する数も少ないと考えられる。

### 水中ロボットの運動方程式の検討

Fig.1に示すドローン型AUVは4台のスラスターの回転軸が全て同じ方向を向いており、これは水中ドローンよりは空中ドローンの形状に近い。一般的な水中ドローンはスラスターの向きが2～3方向に分かれているものが多いが、これは全方向からの水流に対応しながらのホバリングを実現するためである。しかし本研究では、AUVから斃死魚に対して鉞を突き刺す際に、鉛直上向きのスラスター推力が小さいと力負けして鉞が対象魚に刺さらないため、鉛直上向きに大きな推力を確保すべく4台のスラスターの向きを揃えている。また、生け簀内は外に比べて海流の影響が少ないと推測し、横方向に大きな推力は必要ないと判断した。

よって本検討で採用するドローン型AUVの運動方程式には空中ドローンと同等のもの、つまり同じ回転軸方向の

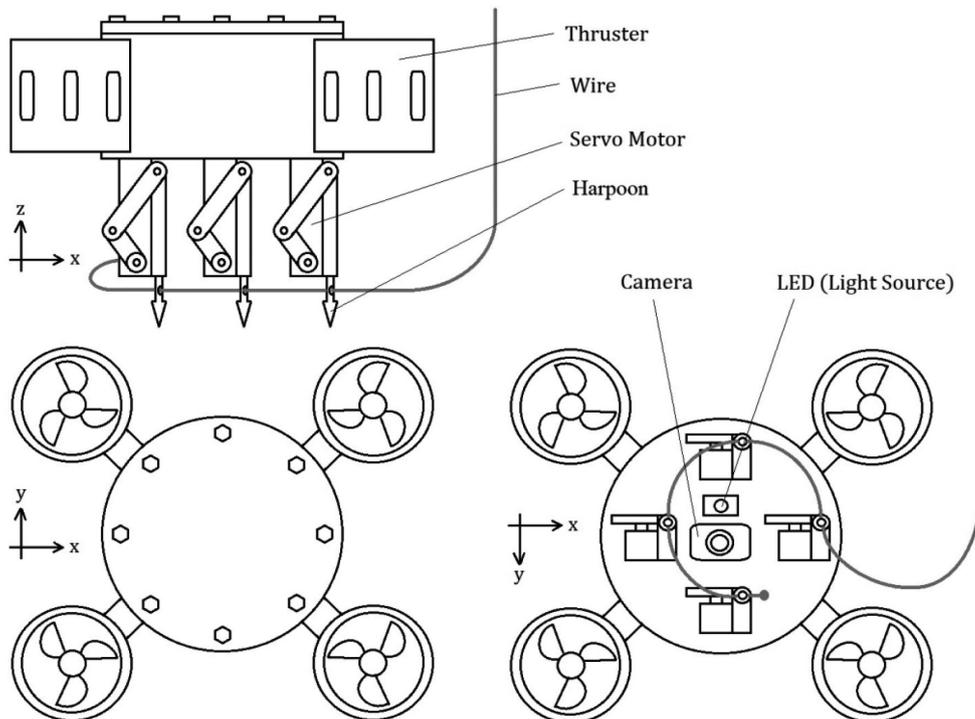
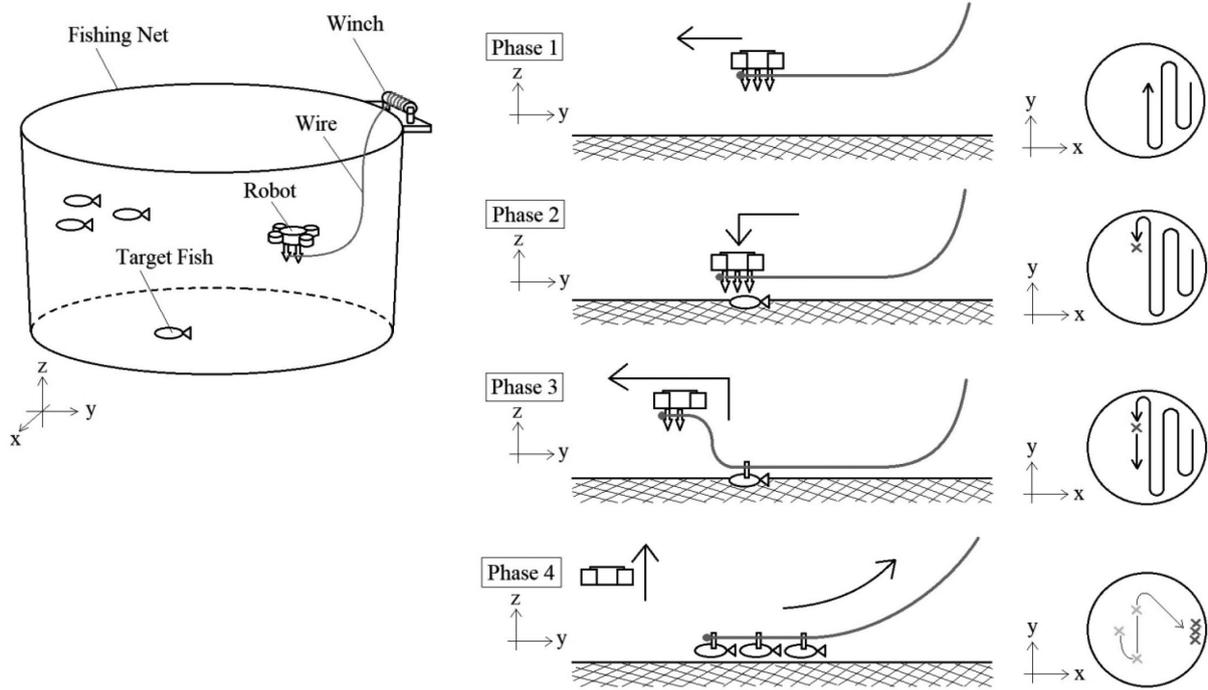


Fig. 1 AUV to collect dead fishes. It is equipped with camera, LED light, four thrusters, and mechanisms to spear harpoons to fishes.



**Fig. 2** Constitution and drive order of the dead fish collection system. Phase1: Robot moves the bottom of the aquaculture net. Phase2: Robot discovers a dead fish using a camera and a LED light. Phase3: Robot spears a dead fish with a harpoon and shift to the next run. Phase4: Robot goes up on the surface of the water and sends instruction to reel wire to a winch using wireless communication.

4台のプロペラを有するマルチコプター型ドローンの運動方程式が適用できると判断した。Fig.3にドローンの運動方程式における座標系を示す<sup>23)</sup>。

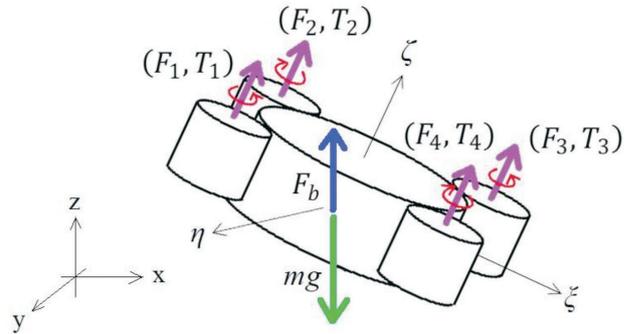
Fig.3における $(\xi, \eta, \zeta)$ はドローンのベースに配置された局所座標系であり、ドローンの重心を原点とする。4台のスラスターに対応する位置に $\zeta$ 軸方向の推力 $F_i$ とスラスターの回転によって生じる $\zeta$ 軸まわりのトルク $T_i$ を与える。また、全体座標系 $(x, y, z)$ の $z$ 方向においてはドローンに重力 $mg$ と浮力 $F_b$ が働く。

これらの条件を元に、ドローンの並進運動方程式を式(1)に、回転運動方程式を式(2)に示す<sup>23)</sup>。

$$(m+m_{ax})a_x=F_x, (m+m_{ay})a_y=F_y, (m+m_{az})a_z=F_z \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} I_\xi \dot{\omega}_\xi &= T_\xi + (I_\eta - I_\zeta) \omega_\eta \omega_\zeta \\ I_\eta \dot{\omega}_\eta &= T_\eta + (I_\zeta - I_\xi) \omega_\zeta \omega_\xi \\ I_\zeta \dot{\omega}_\zeta &= T_\zeta + (I_\xi - I_\eta) \omega_\xi \omega_\eta \end{aligned} \right\} (2)$$

式(1)において、 $m$ はドローンの質量、 $m_{ax}, m_{ay}, m_{az}$ は全体座標系 $(x, y, z)$ で表したドローンの付加質量、 $a_x, a_y, a_z$ は全体座標系 $(x, y, z)$ で表した加速度成分、 $F_x, F_y, F_z$ は重心に作用する合力を全体座標系で表した成分であり、 $x, y$



**Fig. 3** Simplified drone model with four thrusts and torques, gravity, buoyancy.

方向では流体による抗力を、 $z$ 方向では抗力に加えスラスター推力、重力 $mg$ 、浮力 $F_b$ を含む。

式(2)において、 $I_\xi, I_\eta, I_\zeta$ は回転の主軸まわりの慣性モーメント、 $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ は主軸まわりの角速度、 $\dot{\omega}_\xi, \dot{\omega}_\eta, \dot{\omega}_\zeta$ は主軸まわりの角加速度、 $T_\xi, T_\eta, T_\zeta$ はスラスターによるトルクを示す。本研究の用途ではドローンの回転運動はほぼ使わず並進移動のみで運動制御を目指すため、付加慣性モーメントの影響は極めて小さいと仮定して無視できるものとする。また、ワイヤーは十分にたわんだ状態でドローンを駆動させるため、ワイヤーの張力も無視できるものと仮定している。

また、流体による抗力 $F_d^\xi, F_d^\eta, F_d^\zeta$ は簡単化のために並進運動のみに与え、次式(3)のように局所座標系方向の抗力成分のみを考慮する。

$$\left. \begin{aligned} F_d^\xi &= \rho C_D^\xi (v_\xi - U_\xi)^2 A_\xi / 2 \\ F_d^\eta &= \rho C_D^\eta (v_\eta - U_\eta)^2 A_\eta / 2 \\ F_d^\zeta &= \rho C_D^\zeta (v_\zeta - U_\zeta)^2 A_\zeta / 2 \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで $\rho$ は流体（真水または海水）の密度、 $v_\xi, v_\eta, v_\zeta$ は一様流れを想定したドローン速度の $\xi, \eta, \zeta$ 成分、 $U_\xi, U_\eta, U_\zeta$ はドローンの周りを流れる水流の流速の $\xi, \eta, \zeta$ 成分、 $A_\xi, A_\eta, A_\zeta$ は $\xi, \eta, \zeta$ 軸からみた投影面積、 $C_D^\xi, C_D^\eta, C_D^\zeta$ は $\xi, \eta, \zeta$ 軸からみた抗力係数である。

以上の式(1)～(3)より、ドローン型AUVの運動方程式を組み立て、今後の製作にて運動制御プログラムを作成するための足掛かりとする方針をたてた。初期条件として必要な情報の一部にはスラスターの推力とトルクが挙げられ、これらは運動方程式の引用元ではプロペラの回転数をもとに算出していたが、本研究では分力計を用いた水中試験によりこれらを計測する予定である。

**画像データの圧縮**

AUVで網の底に沈んだへい死魚を発見して回収するシステムを実現するための画像認識における必須条件として、一つ目にリアルタイム認識であること、そして二つ目にロボット内部のマイクロコントローラのみで完結していることが挙げられる。

一つ目が必須である理由は、ロボットが移動しながらの認識になるため、そして鉛の照準を合わせながら対象魚に打ち込むためである。現在、出荷する水産物や農作物を選

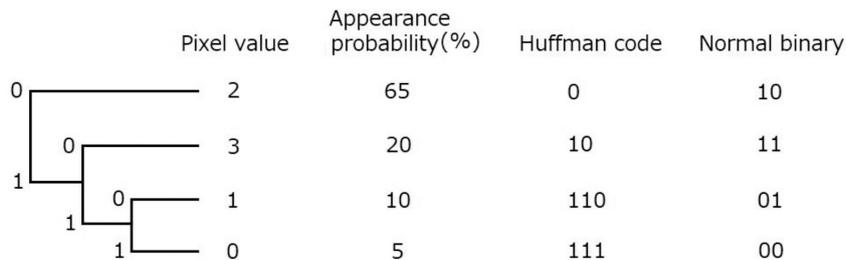
別する目的で実用化されている画像認識は、応答までに数秒の遅れがあるため、このシステムでは適用できない。

二つ目が必須である理由は、本ロボットは水中ロボットであり、陸上とのネットワークが遮断された状態で運用するためである。実用化されている外部ネットワークを通じて判別するシステムでは、高精度な画像認識が可能である。しかし水中では電波が使えないため外部ネットワークは使用できない。ケーブルを用いて水面から電波を飛ばす方法も考えられるが、ただでさえロボットにはワイヤーを装着しているため、運動の妨げになる要素は可能な限り排除したいところである。

これらの理由により、リアルタイムかつ内蔵マイクロコントローラのみでの画像認識が求められ、これを実現するためにはマイクロコントローラ内で扱うデータ量をいかに圧縮し軽くできるかが重要となる。そこで本検討では、カメラから画素データを得る際にハフマン符号化法を用いることで、画素データの圧縮を試みた。ハフマン符号化法とは、データの出現頻度に着目したデータ圧縮方法で、出現頻度が高いデータには少ないビットの符号を、出現頻度が低いデータには大きなビットの符号を割り当てる方法である4)。例えばFig.4のように、それぞれの値を持つ4つ画素の出現確率が与えられた場合、これらをそのまま符号化(2進数に変換する)を実行すると小さい値でも桁数は2桁で統一されるため、単位データあたりのビット数は2ビットとなる。対してハフマン符号化を実行した場合、単位データあたりのビット数はFig.4の出現確率とハフマンコードの欄より、 $1 \text{桁} \times 0.65 + 2 \text{桁} \times 0.2 + 3 \text{桁} \times 0.1 + 3 \text{桁} \times 0.05 = 1.5$ となり、そのまま符号化する場合よりも単位データあたりのビット数を0.5だけ小さくすることができる。ハフマン符号化の流れとしては、まず各データを出現確率の高い順

Example

Pixel value	0	1	2	3
Appearance probability(%)	5	10	65	20



**Fig. 4** Concept of the Huffman encoding. First, each data set is arranged in order of appearance probability to create a tree structure. Next, 0 and 1 are assigned to the branches, and the Huffman code is completed by tracing the routes.

に並べ、Fig.4の下表のようなツリー構造を作成する。次にツリーの枝分かれする箇所に0と1を割り当て、ツリーを辿ったときに現れる符号がハフマン符号となる。

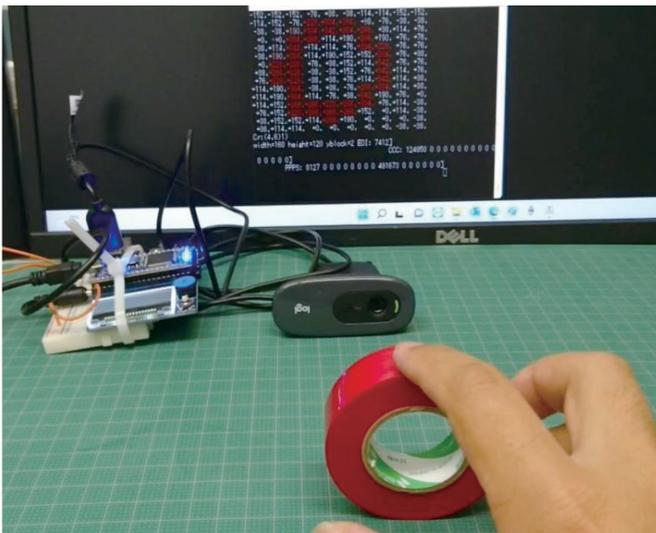
**画像認識方法の検討**

このハフマン符号化法を用いて、実際にマイクロコントローラ単体でのリアルタイム画像認識の可否を確認するための試験を行った。マイクロコントローラとしてはmbed NXP LPC1768を、撮影カメラとしてはLogicool C270 HD 720pを使用した。マイクロコントローラは動作周波数96MHz、RAMは64kB、そしてUSB接続でカメラを接続可能である。動作確認のため、赤色を検知するプログラムを作成し、検知する赤色画素の閾値は200、データをとる周期は0.5秒とした。Fig.5は赤いビニールテープをカメラの前で転がしてみたときの映像で、奥のパソコン画面では設

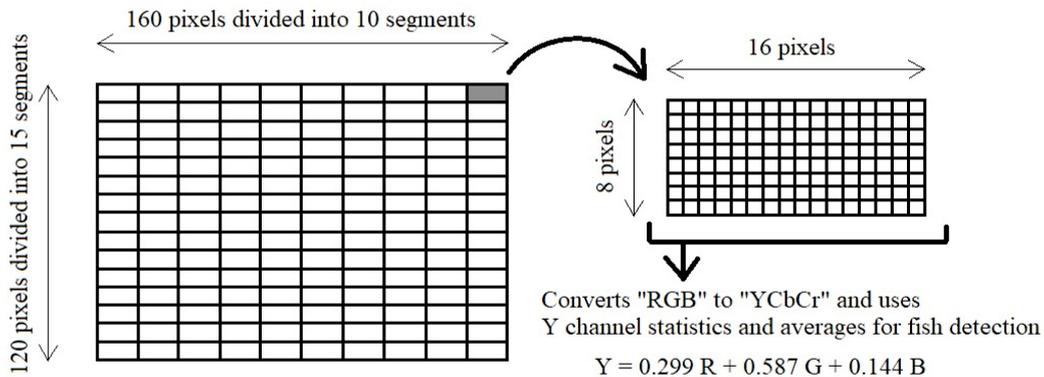
定した閾値を越えた箇所のみ数値が赤色になっており、ビニールテープの丸い形状が検出されていることが確認できる。応答までの時間は0.5~0.7秒で、水中ロボットの移動速度が空中ドローンに比べてそこまで速くないことより、移動しながらの検知は十分可能であると推測できる。

次に、この画像認識を実際の魚でも適用可能にするため、プログラムに改良を施す。本システムの対象となる養殖魚はマグロ (*Thunnus thynnus*)、ブリ (*Seriola quinqueradiata*)、カンパチ (*Seriola dumerili*)、マダイ (*Pagrus major*)などが挙げられ、これらの魚に共通する画素を検知するプログラムを検討した。通常、カメラから得るデータは赤/緑/青の強さで表すRGB方式が用いられる。しかし水中で対象魚を検知する場合、緑と青は海藻や水の色と被ってしまうため水中での検知には不向きであり、また赤は対象魚の種類が限られてしまう。そこで、画素のデータをRGBからYCbCrに変換する方法を採用した。YCbCrにおいて、Yは輝度、Cbは青の色差、Crは赤の色差を表し、輝度とは人間の目が明るさとして感じる数値である。魚の体表面は滑らかな形状のものが多く、魚にライトを当てた際に発生する照り返しを輝度として検知することで、多くの対象魚に適用できる画像認識プログラムになると考えた。Fig.6は作成したプログラムの概念図であり、元々縦120×横160画素であった画像データを図のように分割し、それぞれの区画の画素においてRGBからYCbCrへの変換を施し、Yチャンネルの統計量と平均値をプログラムに用いた。

このプログラムの有用性を確認するため、実際に魚を使った画像認識実験を行った。Fig.7はこの実験の概要図であり、水中に固定した漁網の上に鮮魚を置き、漁網の下には黒いフェルトシートを敷き、上からカメラとライトにより対象魚の画像認識を行った。実際の水域において透明度が高い場合、カメラで上から見下ろすと水底は光が吸収



**Fig. 5** The red tape is detected by image recognition. The response time was 0.5 to 0.7 seconds, indicating that image recognition was possible in almost real time.



**Fig. 6** Schematic diagram of image recognition for finding fish.

されて黒く見えるため、その状況を再現するために光を吸収するフェルトシートを敷いている。実験設備はそこまで大きくないため、今回は対象魚として全長約20cmのマアジ (*Trachurus japonicus*) を用意した。Fig.8は実験で得た画像データであり、各区分における輝度の平均値が表示されている。本プログラムにおける輝度値は-128~127で表示しており、閾値は80としているため、Fig.8の中の赤色の数値はこの閾値80を越えている区分になる。Fig.8の画面中央部に固まった赤色数値の区分がマアジの魚体の流線形状に近いと判断し、画面中央にマアジを検知できていることが確認できた。

### 斃死魚の刺突機構の検討

回収方法に関しては前述の通り、ワイヤーで連結された鉗を対象魚に打ち込み、ウィンチでワイヤーを巻き取るこ

とで対象魚を回収する方法を考える。本研究にて考案した、対象魚を刺突するための機構をFig.9に示す。ロボット下部に搭載するこの刺突機構は、サーボモータ、シリンダー、2つのネオジウム磁石、ステンレスの鉗で構成されており、今回はサーボモータとしてFutaba製 S9571SV (トルク: 定格電圧下にて10.6 kgf・cm) を用いている。鉗を対象魚に刺すことで鉗がシリンダーから外れるしくみである。

ここで、刺突機構含むロボットに働く力のつり合いをFig.10に示す。 $l$ はサーボモータの腕の長さ、 $F_s$ は $l$ を腕とした場合のサーボモータの発生力、 $\theta$ は刺突する瞬間の腕の角度、 $F_i$ は各スラスターの推力、 $mg$ は重力、 $F_b$ は浮力を示す。鉗を対象魚に刺突する瞬間には、ロボットが力負けしてz軸上向きに動いてしまうと鉗が刺さらないため、Fig.10におけるz軸方向の力がつり合うか、もしくはz軸下向きの力が勝る必要がある。式(4)に刺突する瞬間のロ

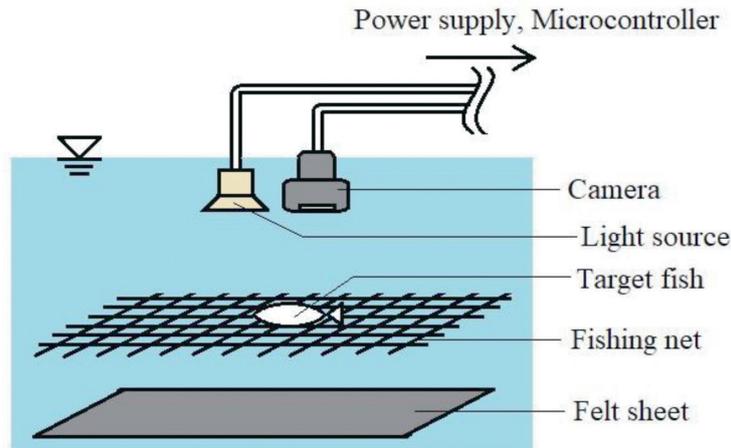


Fig. 7 Schematic diagram of an experiment to detect fish on fishing net.



Fig. 8 Image data from an experiment to detect fish. The target fish is in the center of the screen.

ボットの力の等式を示し、 $n$  はスラスターの個数とする。  
 また必要な刺突力がわかれば、Fig.10よりサーボモータに  
 必要なトルクを算出することができる。

$$F_s \cos \theta + F_b = \sum_{k=1}^n F_i + mg \quad (4)$$

### 斃死魚回収のための簡易実験

前章の画像認識と刺突機構を用いて、斃死魚回収の可否  
 を確認するための簡易実験を行った。Fig.11のようなロ  
 ボットの殻を製作し、その中にマイクロコントローラ、バッ  
 テリー、カメラ、LEDライトを入れ、外側の下部には刺  
 突機構を2台搭載した。前章では刺突機構の鉤はワイヤー  
 で連結すると述べたが、今回は簡易的な実験のためナイロ  
 ンラインで代用した。この機体を用いて、陸上で網の上に

置いた2匹の対象魚をカメラで認識して刺突し、ナイロン  
 ラインを巻き取ることで対象魚を2匹とも回収できるか確  
 認を行う。

実験の手順は、まず陸上で漁網を張り、その上に全長約  
 20cmの2匹のマアジを並べ、人が機体を持ちながら漁網  
 の面に対して平行に動かしていく。その過程でマアジが刺  
 突機構の真下にあることをカメラで検知すると、刺突機構  
 が発動して鉤をマアジに打ち込んでいく。このとき、式(4)  
 のように機体周りの力はつり合うと仮定し、刺突機構の発  
 動時には人がしっかりと機体を掴み、並進移動しないよう  
 固定する。最後にナイロンラインを巻き取り、鉤が外れず  
 にマアジを回収することができるか確認する。

この実験を20回行ったところ、うち11回が2匹とも回収  
 成功、4回が片方刺さり損ね、残り5回が刺さったものの  
 回収時に鉤が抜けてしまうといった結果となった。Fig.12  
 は2匹とも回収成功した場合の写真で、(a)図ではマアジに

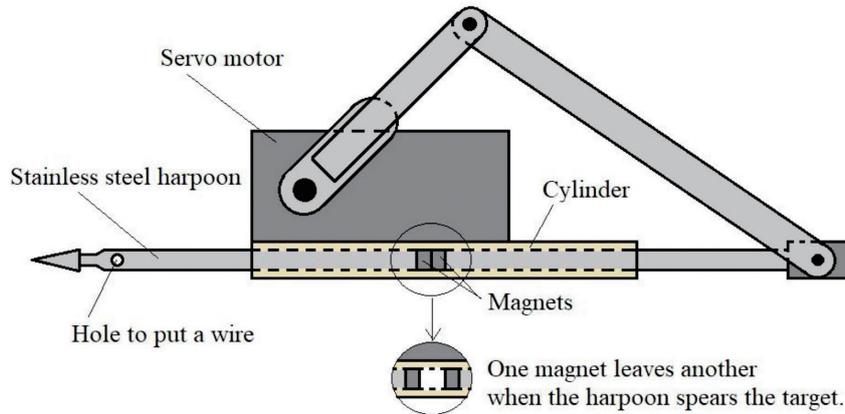


Fig. 9 Mechanism for spearing target fishes.

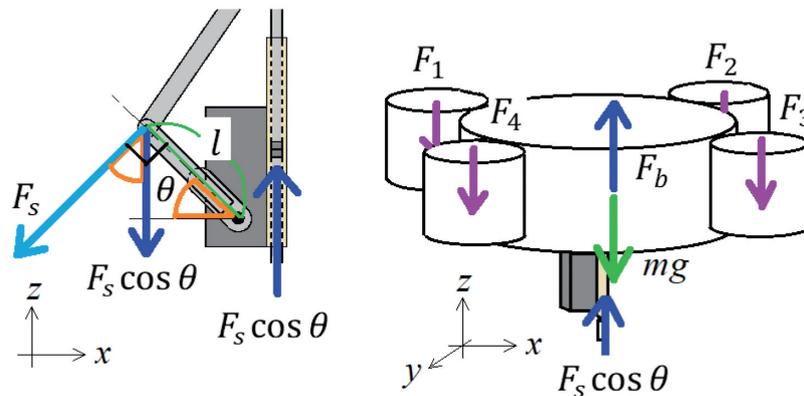


Fig.10 Balance of forces acting on AUV with the spearing mechanism.

鉾を打ち込んでいる様子が、(b)図ではナイロンラインを巻き上げて2匹のマアジがまとめて回収されている様子が写っている。

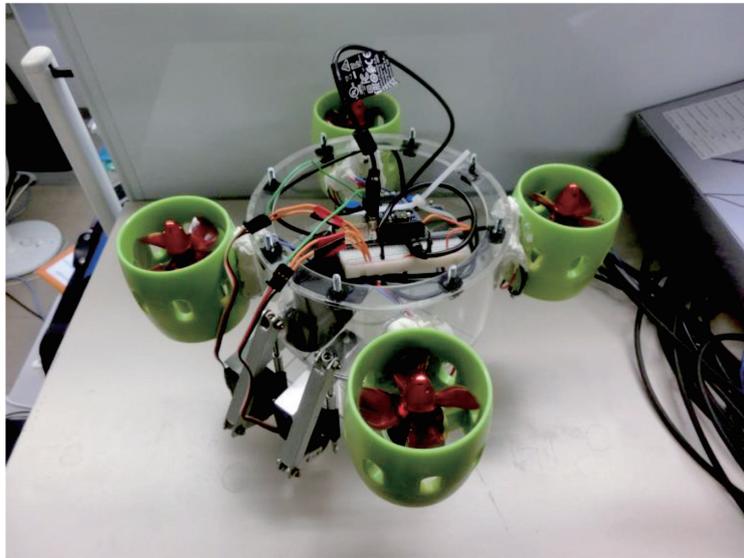
### 考察と結言

本報告では、操縦者のいない小型AUVとワイヤーを用いた斃死魚回収システムを考案し、このシステムの構成と運用方法について考察し、運用の可否を確認するための簡易的な実験を実施した。

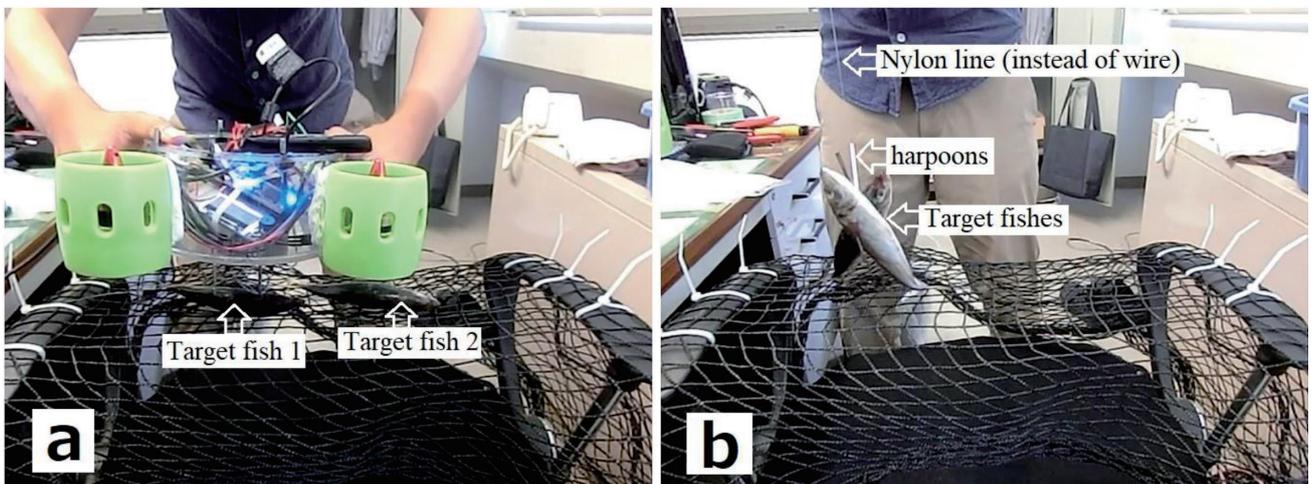
システムはAUV、ワイヤー、ウィンチで構成され、AUVには機体底面にカメラ、ライト、そして斃死魚回収

に用いるための鉾が備わっており、複数の鉾はワイヤーで連結されていて、サーボモータを用いた機構とスラスターの鉛直方向推力により鉾を対象となる斃死魚に突き刺すことができる。斃死魚の探索、刺突を終えると、機体は水面に浮上し、無線でウィンチに巻き取り指示を与え、斃死魚の水面までの移動が完了する。

本システムで用いるAUVは空中ドローンの形状に近いいため、運動制御に用いるための運動方程式には同じ回転軸方向の4台のプロペラを有するマルチコプター型ドローンの運動方程式が適用できると判断した。運動方程式を組み立て、今後の製作にて運動制御プログラムを作成するための足掛かりとする方針をたてた。初期条件として必要な情



**Fig. 11** Robot temporarily assembled for use in a simple experiment. Microcontroller, battery, camera, and LED light are equipped inside. Two spearing mechanisms are equipped outside.



**Fig. 12** Photos of the simplified experiment. (a):Spearing one target fish. (b): Reeling in the nylon line and retrieving two target fishes.

報の一部にはスラスターの推力とトルクが挙げられ、これらは運動方程式の引用元ではプロペラの回転数をもとに算出していたが、本研究では分力計を用いた水中試験によりこれらを計測する予定である。

提案したシステムを実現するための画像認識は、リアルタイムかつ内蔵マイクロコントローラのみでの画像認識が求められ、これを実現するためにハフマン符号化法を用いて画素データの圧縮を試みた。実際にマイクロコントローラ単体でのリアルタイム画像認識の可否を確認するための試験を行った結果、対象を検知することができ、応答までの時間は0.5~0.7秒で、ロボットが移動しながらの検知は十分可能であると判断した。次に実際の魚でも適用可能にするため、RGBからYCbCrに画素を変換し、Y値を用いることで多くの種類の魚に適用できる画像認識プログラムを作成した。マアジを用いて実験した結果、リアルタイムでのマアジの検知が確認できた。

対象魚を刺突するための機構を考案、製作した。ロボット下部に搭載する刺突機構は、サーボモータ、シリンダー、2つのネオジウム磁石、ステンレスの銚で構成されており、銚を対象魚に刺すことで銚がシリンダーから外れるしくみとした。銚を対象魚に刺突する瞬間には、ロボットが力負けて上下に動いてしまうと銚が刺さらないため、上下方向の力が釣り合うか、もしくは上向きの力が勝る必要がある。よって対象魚に銚を刺すために必要な刺突力を調べ、それをもとにスラスターに必要な推力とサーボモータに必要なトルクを算出する必要がある。

最後に、画像認識と刺突機構を用いて、斃死魚回収の可否を確認するための簡易実験を行った。ロボットの殻を製作し、その中にマイクロコントローラ、バッテリー、カメラ、LEDライトを入れ、外側の下部には刺突機構を2台搭載した。ワイヤーはナイロンラインで代用し、陸上で網の上に置いた2匹の対象魚をカメラで認識して刺突し、ナイロンラインを巻き取ることで対象魚を2匹とも回収でき

るか確認を行った。この実験を20回行ったところ、うち11回が2匹とも回収成功、4回が片方刺さり損ね、残り5回が刺さったものの回収時に銚が抜けてしまうといった結果となった。刺さり損ねた原因としては、網がたわんでおり刺突の衝撃を吸収したことが考えられ、対策としてスラスター推力を使って銚を機体全体で押し込むように駆動させた方が良いと思われる。また回収時に銚が抜けてしまう原因として、一つ目は自作した銚の「かえし」のつくりが悪いこと、二つ目はマアジの腹部の軟らかい部位に刺したことで身が破れてしまうことが挙げられる。これらへの対策として、銚の形状を改良し、画像認識においては対象魚の中央もしくは比較的硬い部位を検知できるようなプログラムを作成する必要があると考えられる。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、工作施設の利用を許可して頂いた同校の田村賢准教授および椎木友朗講師、実験のサポートをいただいた同校藤原研究室の学生に心より感謝の意を表する。

## 文 献

- 1) (株)マリン・ワーク・ジャパン：ROVを用いた大型へい死魚の効率的な回収方法の検討，令和4年度海の次世代モビリティの利活用に関する実証事業報告（2023）
- 2) 野村卓史，小林俊熙：ドローンの飛翔モデルに関する基礎的検討，平成29年度日本風工学会年次研究発表会，149-150（2017）
- 3) Luukkonen T: "Modelling and Control of Quadcopter", Aalto University（2011）
- 4) 今井秀樹：情報理論 改訂2版，オーム社（2019）