

# 網側面自走機構を用いた網補修水中ロボットの開発

藤原慎平<sup>1</sup>

## Development of underwater robot for repairing fishing nets using mobile mechanism with magnet tires

Shinpei Fujiwara<sup>1</sup>

**Abstract** : In the fishery industry, fishing nets tend to be in the water for a long time. Therefore, there is a possibility that the fishing nets will be broken by marine animals or “Kyucho” ; it stands for the violent currents caused by tides or typhoons. It is necessary to repair fishing nets as soon as possible for preventing fishes from escaping to outside of the fishing net. However, a great deal of labor is required to lift and repair fishing nets. In addition, high water pressure and low water temperature may make it difficult for divers to work underwater. Therefore, underwater robot is useful to work instead of divers under such severe situations. The author suggests development of the underwater ROV (Remotely Operated Vehicle) type robot that can move on fishing net with magnet tires and repair the net using manipulators. This paper introduces the development and performance evaluation of the underwater robot using magnetic mobile mechanism.

**Key words** : Fishing nets, Underwater robot, ROV, Mobile mechanism, Magnet tires, Manipulator

### 緒言

海中で何らかの作業を要求される場合、水圧・水温・海流などの海況は無視できない要因となり、場合によっては生身の人間が作業不可となり得る。そしてこのような状況では、海中ロボットを用いた作業が有効となる。水産大国である我が日本国では、水産業用ロボットの実用化を目指して様々な機関で研究開発が行われている。その例としては、海中での給餌により魚類を集めて誘導するロボット<sup>1)</sup>や、海中で養殖網を洗浄するロボットなどが開発されている<sup>2)</sup>。

魚類の養殖や定置網漁業では、漁網を海中に長期間固定する必要がある。そのため貝や藻のような付着物が付きやすく、また急潮や海獣によって網を破られる可能性も高い<sup>3), 4), 5), 6)</sup>。よって、漁網は定期的な洗浄・補修などのメンテナンスが必要である。しかし、網を陸に揚げてこれらのメンテナンス作業をする場合には大きな手間と労力が必要となる。また、海中でダイバーが作業する場合には高水圧や低水温の影響により作業自体が困難となり、最悪の場合ダ

이버が命を落とす危険性がある<sup>7)</sup>。よってこのような過酷な状況下では、ダイバーの代用として作業可能な水中ロボットが有効である<sup>8)</sup>。

本論文では、まず水中に張られた網の側面に張り付いて移動するための自走機構を開発・評価する。自走機構はモータとタイヤを使って移動するタイプで、機構が表裏に分かれており、磁石を内蔵したタイヤによって両機構が網を挟んで張り付くことができる。次にロボット本体まで製作を進め、マニピュレータによる水中での網の補修を試みる。

### 実験装置

#### 自走機構について

海中で漁網の側面に張り付きながら移動するロボットは、スラストを用いるタイプ<sup>9)</sup>が既に考案されている。このロボットは養殖網を海中で洗浄するための高水圧ポンプをそのままスラストの動力として併用し、スラストによる推力で網に張り付き、四輪駆動で移動する。しかしスラ

タを回すと圧力差により吸い込み流れが発生し、シャフト部分にゴミや海藻が絡まることにより機構の停止もしくは故障の恐れがある<sup>10)</sup>。また、スラスタを駆動させるためには動力が必要となるため、網に張り付くだけで電力もしくは燃料を消費し、それらが底を尽きるとロボットは網から剥がれてしまう。

このような問題を解消する新たな機構として、筆者は磁石内蔵タイヤを用いた自走機構を開発した<sup>11)</sup>。機構のタイヤにはネオジウム磁石が埋め込まれており、このネオジウム磁石の磁力により表と裏の機構が網を挟んで張り付き、タイヤを回転させると網の側面に沿って自走するしくみとなる。機構の片側にはタイヤを回すためのアクチュエータが搭載されている。このタイヤの構造をFig.1に示す。

#### 網補修マニピュレータを搭載したロボットについて

前述の網側面自走機構を用いた網補修ロボットを考える。機体の水密を考慮すると、搭載するマニピュレータの構造が複雑、つまり多自由度である場合は浸水の危険性が高まり、さらには強度も低くなるため水圧にも弱くなり、結果メンテナンスに苦勞する。また、多自由度のマニピュレータを搭載すると自走機構を含めた機体も大型にする必

要があり、現場での機体の持ち運びや投入・回収作業を考慮すると現実的ではない。よって、搭載するマニピュレータは多自由度でなく、構造が簡単なものが望ましい。

漁業の現場で実際にダイバーが施す補修とは、網糸を用いて破れを縫い付ける作業を指す。しかし自由度の低いマニピュレータではその作業は困難であるため、本研究でロボットに実現させる作業はダイバーが施す補修の前段階、つまり次にダイバーが潜水するまでの簡易な応急処置とする。

具体的には、まず網の切れ端を機体に持たせて水中へ投入、そのまま自律走行させ、その間操縦者はカメラからの映像をリアルタイムで確認する。カメラは周りの光量を検知して自動的に赤外線モード、つまり暗視モードへと切り替わるため、深度の深い場所でも網の表面の幅約0.4 mまでなら視認できる。破網箇所を発見したら、操縦者が機体をマニュアルモードへと切り替え、補修作業を開始する。持たせた網の切れ端を破網箇所にかぶせ、網の四方をホチキスのような機構でとめて固定する。これにより、破網箇所のさらなる拡大および魚の脱走を防ぐ。これは簡易な補修であるため、後日、海況が安定してからダイバーが補修を施すまでの応急処置とする。作業完了の後、補修用の網

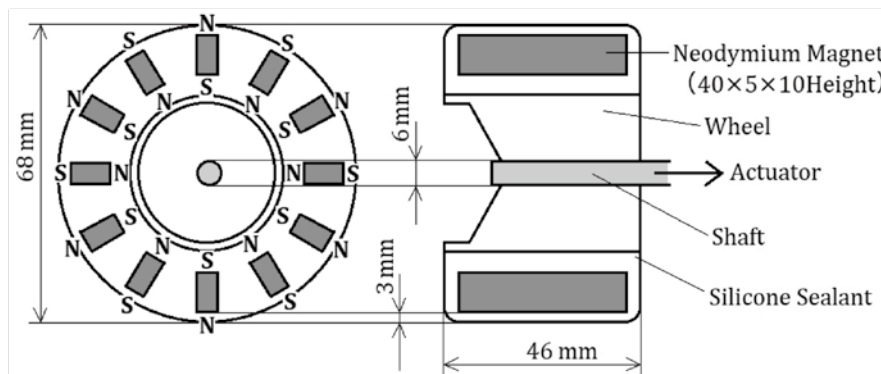


Fig. 1 Cross section of the magnet tire.

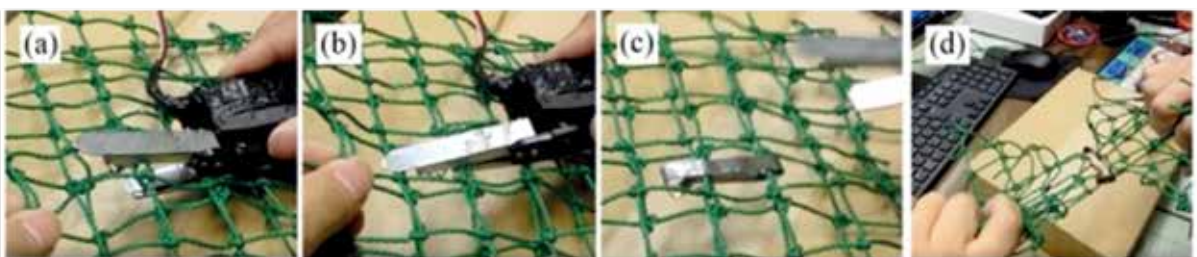


Fig. 2 The process of using connectors to hold the nets together. (a):Set nets and the connector. (b):Connect nets by connector. (c):Remove the connector. (d):Confirm condition of connecting.

と留め具を機体に補充するために海面まで走行し、海面に到達したら船上より腕を伸ばし補充する。補充を終えたら再度自律走行に戻り、網の全範囲を網羅したのち水面へ移動、ボートフック等を使い機体の突起にロープを引っかけて回収する。

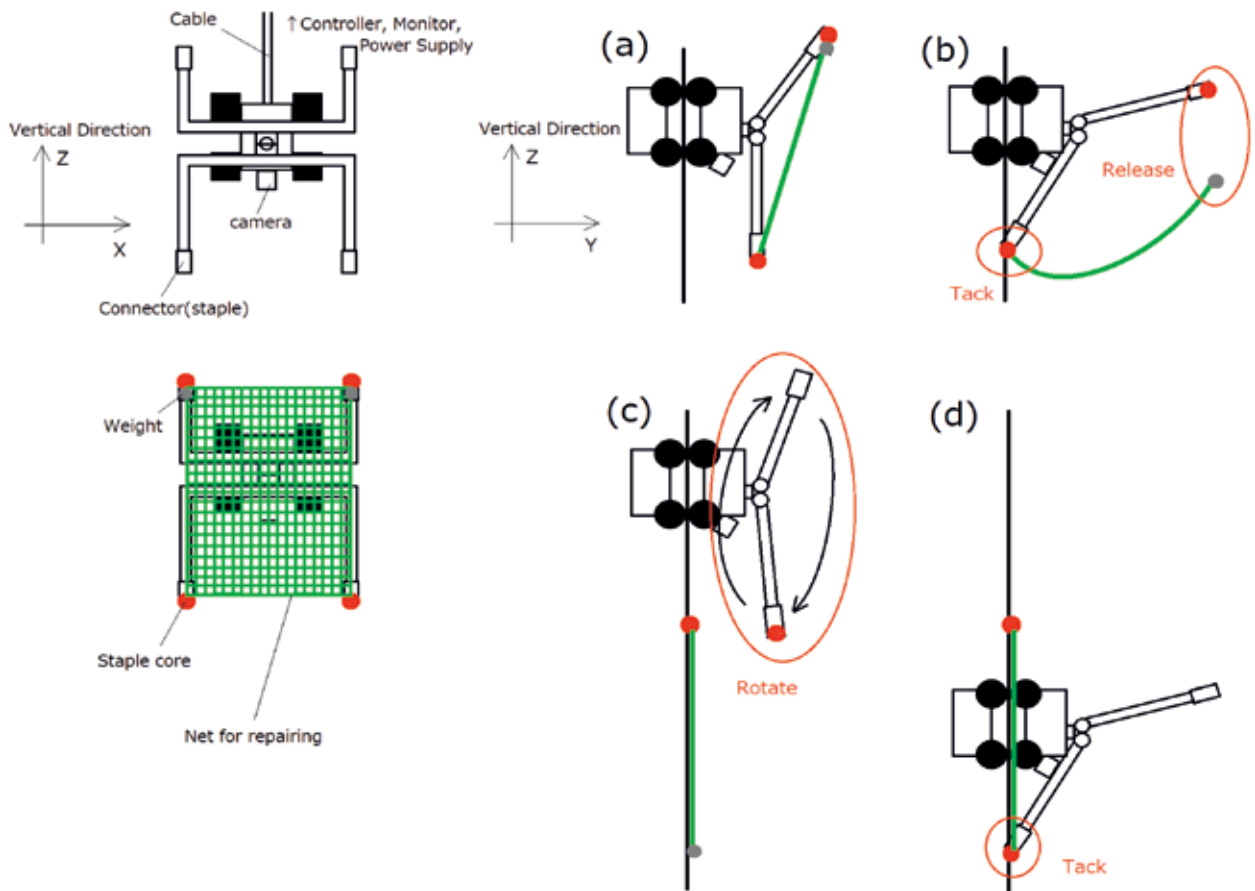
**ロボットの開発**

この作業を実現するためのマニピュレータを考案する。まずはマニピュレータの先端部分、つまり補修用の網を仮止めするための留め具を扱う機構を製作する。アクチュエータにはサーボモータを使用し、これにステンレス製の留め具を装填する。製作した機構により網を仮止めする過程をFig.2に示す。Fig.2の(a)で補修用の網と仮止め用の機構をセット、(b)で機構を動かして留め具により2枚の網を繋ぎ、(c)で仮止め機構を外している。Fig.2の(b)で見えている平らな板はホチキスの芯で例えるとボディであり、(c)の

輪っかのようなパーツがホチキスの芯にあたる。(d)はロボットが行う過程ではないが、2枚の網を引っ張ることで仮止めが成功していることを確認している。2枚の網の面に対して平行と垂直にそれぞれ荷重をかけてみたところ、平行方向では約2.4 kg、垂直方向では約2.2 kgの負荷までは留め具が外れないことが確認できた。これは留め具をひとつ用いた場合の結果であり、実際には留め具を4つ用いるため、さらに強度が上がるのが予想できるが、大型魚が衝突する場合を想定するとさらなる強度が必要であると考えられる。

Fig.2の仮止め機構の他にいくつかアクチュエータを連結したものをマニピュレータとし、このマニピュレータを搭載した機体による仮止めのイメージ図をFig. 3に、このマニピュレータの構造図をFig. 4に、このマニピュレータを搭載した機体をFig. 5に示す。

Fig. 3の(b)では、前方のマニピュレータを傾けて仮止め



**Fig. 3** The image of first aid for broken fishing nets by the developed underwater robot. (a): The frontal manipulator tacks the edge of the small net onto the fixed fishing net for repairing. (b): When one end of the small net is released, the net will cover the broken area. (c): The manipulators are rotated 180 degrees, and the backward manipulator is in front. (d): The backward manipulator tacks the small net onto the fixed fishing net completely.

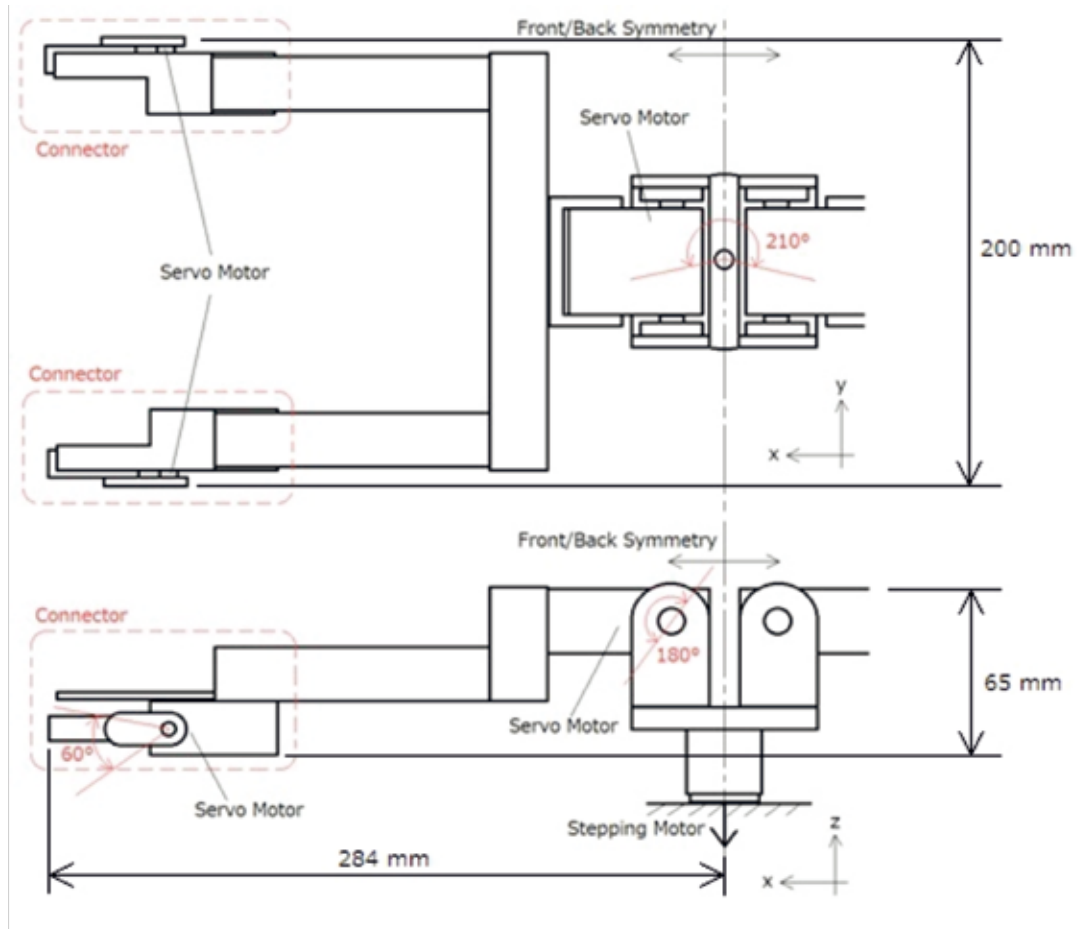


Fig. 4 The structural drawing of the repair manipulator using the prototype connector.

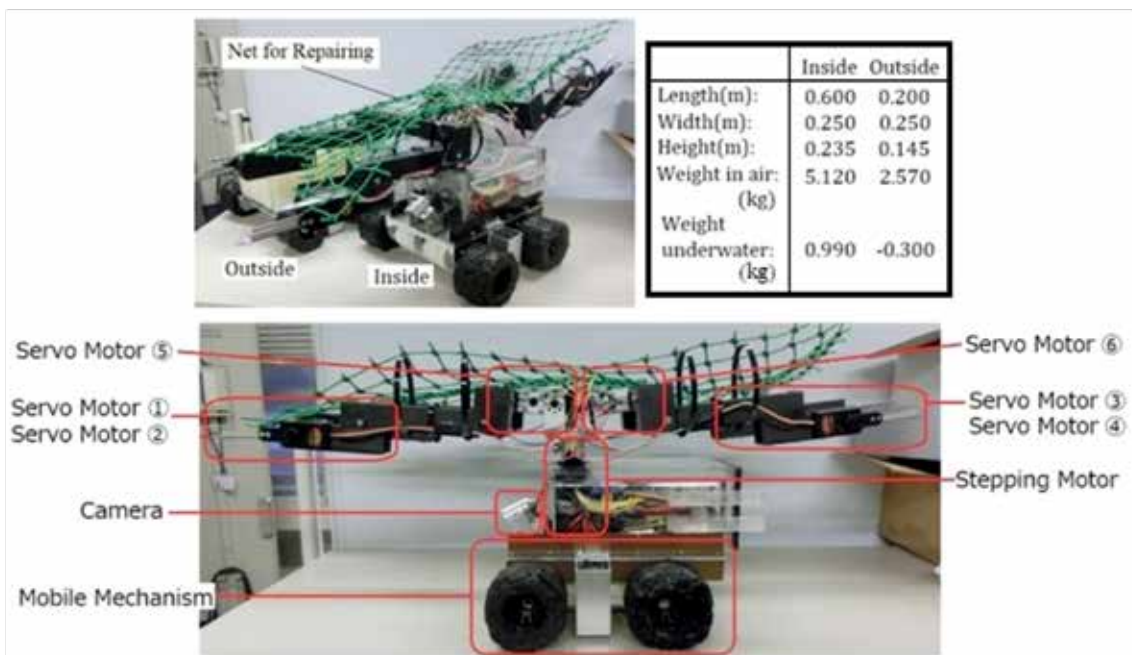


Fig. 5 The underwater robot for repairing fishing nets; inside and outside mechanism using magnet tires.

機構と補修用網の前端を漁網に重ね、そのまま2台の仮止め機構を用いて補修用網の前端と漁網を2か所繋ぐ。(b)では同時に、後方のマニピュレータを操作して補修用網を漁網に覆い被せる。このとき、補修用網が浮いてしまうと被せることができないため、補修用網の水中重量は正である必要がある。Fig. 3の(c)はマニピュレータ全体を180度回転させている様子である。各仮止め機構に留め具は1つつしかセットできないため、残った箇所の仮止めは後方の2台の仮止め機構が受け持つ。Fig. 3の(d)で残りの2か所を仮止めし、仮止め箇所が4か所となったところでこの区画の応急処置は完了とする。

Fig. 5において、機体に搭載したアクチュエータは、最終的に自走機構用の直流モータ4台、仮止め機構を含めたマニピュレータ用にサーボモータ6台とステッピングモータ1台となった。Fig. 5の機体には補修用の網を載せてあり、マニピュレータで掴んで運ぶ。水圧の影響を考慮するとマニピュレータは高強度のものが望ましいが、浮力と重力のバランスを考えると軽量にしたいため、マニピュレータの腕には強度が高く軽いカーボンロッドを用いており、ロッド内は発泡ウレタンを充填してさらに強度をあげている。機体前方にあるカメラで網表面とマニピュレータの先端の位置を視認しながら、パソコンからマニピュレータをマニュアル操作する。Inside機体が四輪駆動であるため直流モータは4台であるが、前輪と後輪は回転方向が同じになるため、モータドライバは左右合わせて2台となる。また、Fig. 5のサーボモータ①、②、③、④は仮止め機構を駆動させるためのアクチュエータ、サーボモータ⑤と⑥およびステッピングモータは仮止め機構の位置決めをするためのアクチュエータである。サーボモータ①と②が機体前方、サーボモータ③と④が機体後方の仮止め機構に搭載されている。

## 実験方法

### 自走機構の性能評価

水中での機構の動きを確認するため、深さ0.7 mの水槽で駆動を行う。水槽内に網を固定し、網側面で機構を駆動させる。外部電源にはカー用バッテリーを使用し、ノートPCからコマンドを送り制御する。確認する動作は前後進速度および旋回時の回頭角速度と旋回半径とする。前後進速度は網の目合の長さをもとに算出し、回頭角速度は三点式角度計測ソフトにより機構につけたマーカーをもとに算出する。用いた水槽の大きさの都合上、使用する網の大きさに制限があるため、旋回半径 $r$ はFig. 6に示す方法で算出する。

Fig. 6の概略図において  $\theta$  を回頭角度、 $x$  を横方向移動距離とする。この概略図をもとに旋回半径 $r$ を求める場合、以下のような式が成り立つ。

$$r = \frac{x}{1 - \cos \theta} \quad \dots\dots(1)$$

### 漁網における自律走行について

本機体は実海域に保持されている定置網や養殖網での駆動を想定して製作しており、機体に搭載したカメラによって網の側面を可能な限りまんべんなく視認する必要がある。マニピュレータを使った作業は人間の操縦により行えば確実であるが、自走機構により網上を探索する作業に関しては、カメラによる映像確認は人間が受け持ち、走行は自律走行にすべきだと考えた。網側面での自律走行ルートおよび制御方法に関する概略図をFig. 7に示す。

この制御では、センサとして加速度センサと圧力センサを用いる。加速度センサにより機体の角度を算出し、Fig.

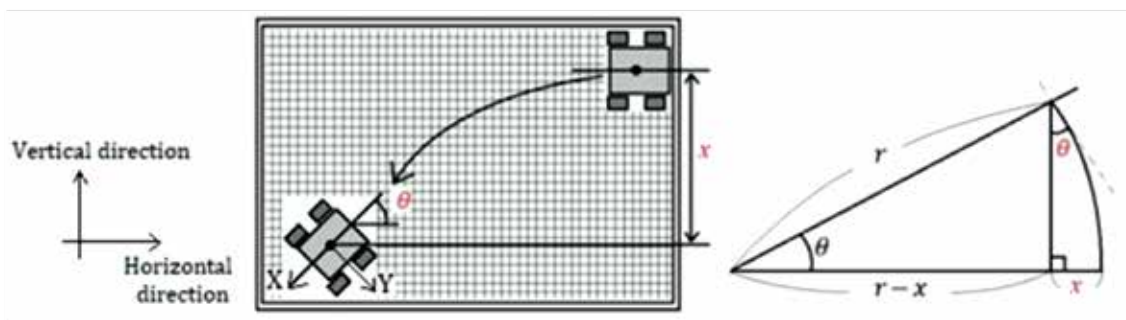


Fig. 6 Schematic view for calculating the turning radius  $r$ . The net such as the left figure is fixed underwater vertically.

7における直進や旋回の制御に角度データを用いる。計測した圧力を用いて水深を算出し、事前に設定された2つの水深の間を行き来させる。網上の直進動作ではPID制御を採用し、旋回動作は加速度センサにより180度方向転換を検知したのちに動作完了とし、直進動作に戻る。機体には2自由度が計測可能な加速度センサを搭載し、機体を基準とした座標系における前後方向と横方向を計測する。機体前後方向加速度を $A_x$ 、機体横方向加速度を $A_y$ 、機体の前後進による加速度を $A_f$ とすると、鉛直方法を基準とした機体のヨー方向角度 $\theta$ は式(2)のようになる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x - A_f}\right) \quad \dots\dots(2)$$

上式において、機体横方向の重力加速度成分が $A_y$ 、機体前後方向の重力加速度成分が $A_x - A_f$ となり、 $A_f$ はモータのエンコーダを用いて算出する。求めた角度を時間 $t$ の関数 $\theta(t)$ とすると、PID制御における操作量 $u(t)$ を表す式は以下のようになり、ヨー方向角度 $\theta$ の目標値をゼロにし、直進す

るための式である。操作量 $u(t)$ は左右のモータの回転数の差を表し、以下の式は機体進行方向の制御となる。

$$u(t) = k_p\theta(t) + k_i \int_0^t \theta(t)dt + k_d \frac{d\theta(t)}{dt} \quad \dots\dots(3)$$

式(3)において、 $k_p$ は比例ゲイン、 $k_i$ は積分ゲイン、 $k_d$ は微分ゲインとなり、限界感度法をもとにした各パラメータは以下のようになる<sup>12)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} k_p &= 0.6k_{pc} \\ k_i &= \frac{k_p}{T_i}, \quad \text{ただし } T_i = 0.5T_c \\ k_d &= k_p T_D, \quad \text{ただし } T_D = 0.125T_c \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

式(4)において、 $k_{pc}$ は比例制御を用いた予備実験での安定限界となる比例ゲイン、 $T_c$ はそのときの持続振動の周期、 $T_i$ は積分時間、 $T_D$ は微分時間である。

自律走行実現のために機構を改良する。各センサを搭載し、高い水圧に耐えられるよう外殻を作り変え、外部ケーブルの長さを60 mに変更した。改良した機体の外観をFig.

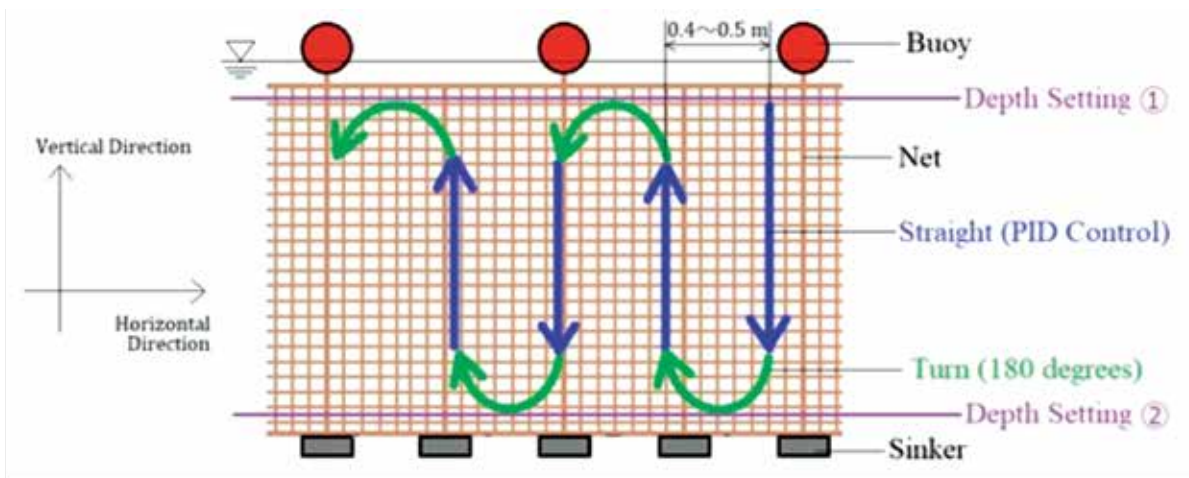


Fig. 7 Schematic view of operating route on fishing net underwater while performing autonomous running that PID control and turning motion are combined.



Fig. 8 Improved mobile mechanisms; inside and outside mechanism using magnet tires.

8に示す。使用する圧力センサには水深約70 mまで作動可能なものを選定し、機体の外殻は水深60 mまで耐えられるよう改良を施した。また、何らかの要因で機体が網から剥がれてしまった場合を想定し、Fig. 8のOutsideは水に浮くよう設計、Insideはケーブルを手繰ることによってそれぞれ回収可能である。

**自律走行のための予備実験**

自律走行のための予備実験として、最初に圧力センサの動作チェックを行う。深さ5 mのプールにセンサが搭載されたInsideの機体を沈めて固定する。実際に沈める深さは0 m, 1 m, 2 m, 3 mとし、0.1秒ごとの各深度での圧力センサの指示値を確認する。

次に、前述の $k_{pc}$ および $T_c$ を求めるための実験を行う。深さ5 mのプールに幅1 m×深さ5 mの漁網を固定し、機体を水平より30度傾けた状態から発進させ、加速度センサにより機体のヨー方向の目標を水平方向に設定し、比例制御により水平方向へ直進させて、比例ゲインを変化させることで安定限界を推定する。よって、この実験におけるヨー方向角度は、式(2)で定義した $\theta$ とは異なる。この実験のセットアップをFig. 9に示す。制御方向に対する外力（浮力と重力の合力）の向きが式(3)の状況とは変わるが、浮力と重力の差が微小となるよう設計しているため、外力は軽微であると仮定する。

**自律走行実験**

前述のFig. 7に示す自律走行実験を行う。深さ5 mのプール内に、網糸とアンカーを使って5 m×5 mの漁網を固定する。2つの水深設定値はそれぞれ0.2 mと2.0 mとし、この設定水深の間を行き来しながら網上を横方向に移動していく。

**補修用網の仮止め実験**

Fig. 5の機体を用いて、水中で補修用の網を繋ぎとめることが可能かどうか確認する。深さ1.3 mのプールに1 m×5 mの漁網を固定し、プールサイドに外部電源、ノートパソコン、カメラのモニターを置く。外部電源は持ち運びが容易なものが望ましいため、電圧が定格出力12 V、電流が最大10 A出力、重さ約10 kgのカー用バッテリーを使用する。網を持たせた機体を水中へ投入し、モニターの水中映像を見ながら機体を操作して補修用の網を固定された漁網の一区画に繋ぎとめる。

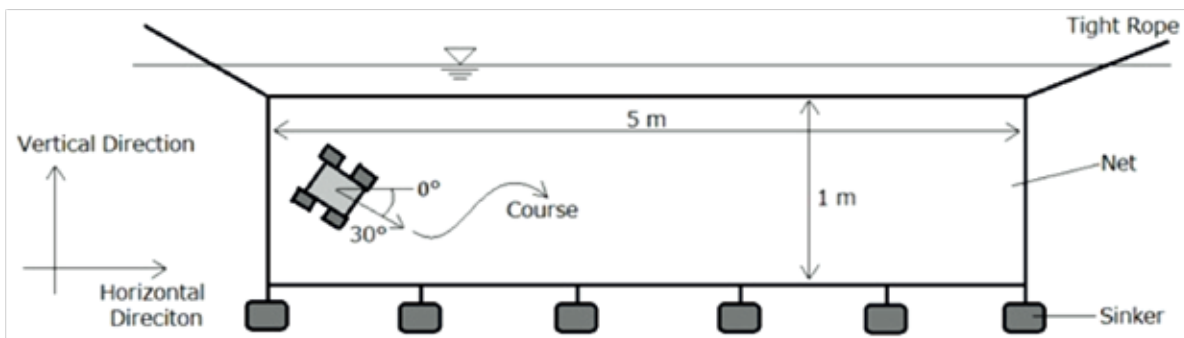
**実験結果**

**自走機構の性能評価の結果**

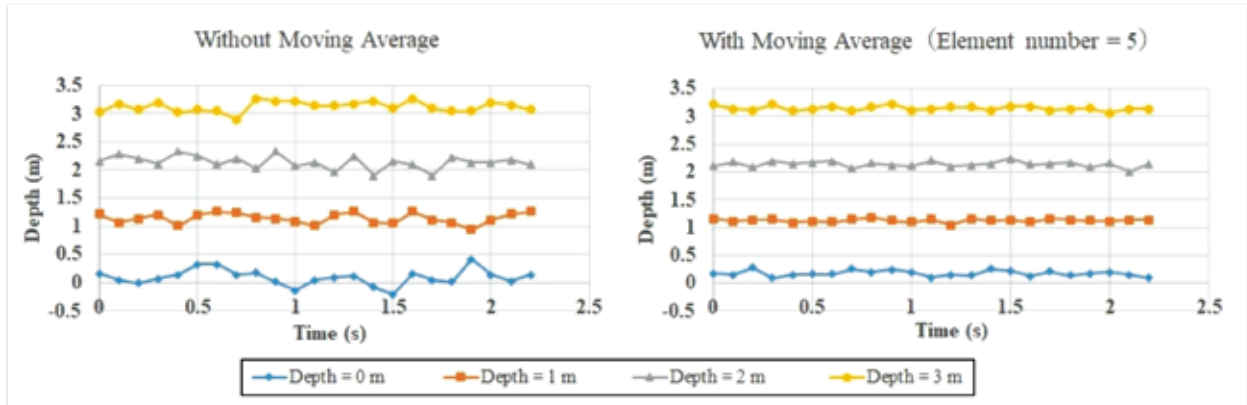
(1)式による算出より、自走機構の前進速度は最大0.20 m/s、後進速度は0.18 m/s、回頭角速度は左旋回で最大0.34 deg/s、右旋回は0.28 deg/s、旋回半径は左旋回で最小188 mm、右旋回で223 mmとなった。左右の旋回能力に差が生じた原因としては、製作したタイヤの形状が左右で微妙に異なっていたこと、また外部ケーブルによる張力が左右片側に偏っていたことが挙げられる。

**自律走行のための予備実験の結果**

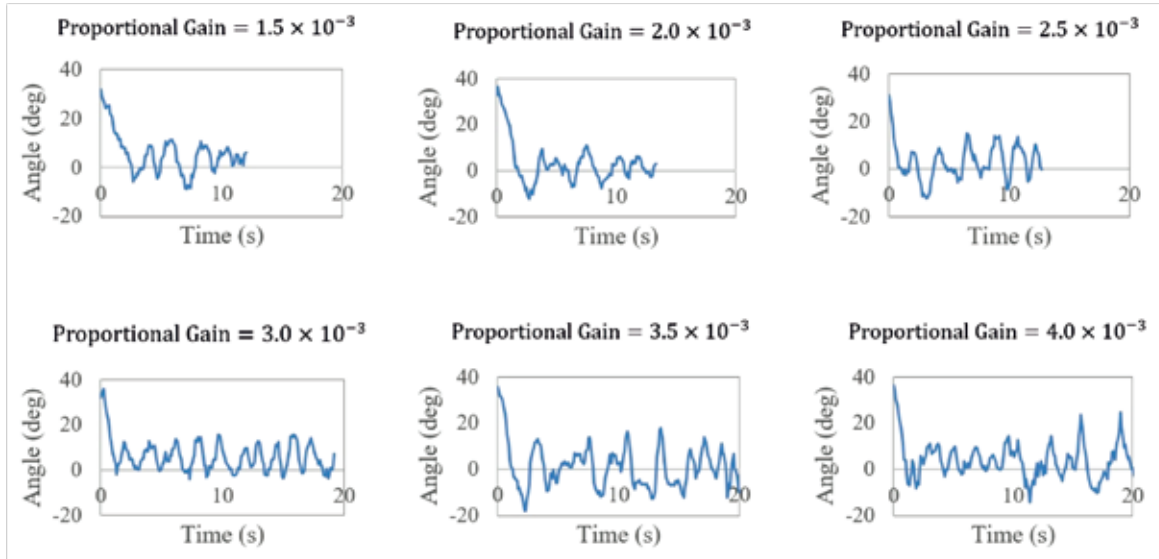
圧力センサの動作チェックの結果をFig. 10に示す。Fig. 10の左のグラフは移動平均を用いなかった場合、Fig. 10の右のグラフは5次の移動平均を用いた場合での水深データであり、データが収束するまでははじめの0.5秒間のデータは省いている。移動平均無しの場合には最大+0.41 mの誤差が、移動平均を用いると最大+0.25 mの誤差が現れた。移動平均ありのグラフでは出力値の安定化が確認でき、自



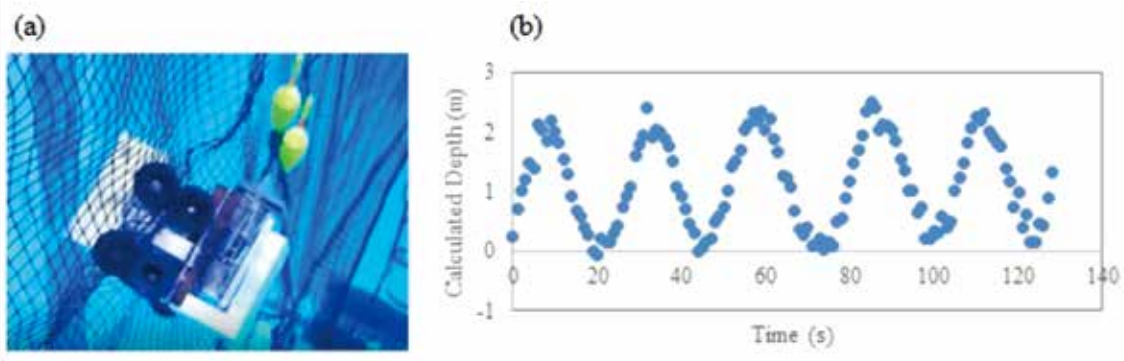
**Fig. 9** Schematic view of operating route on fishing net underwater while performing proportional control. That starting condition: yaw angle of the robot is 30 degrees.



**Fig. 10** Outputs of the pressure sensor in water with moving average procedure and without it. According to the graph with moving average, it becomes smoother than the graph without moving average.



**Fig. 11** Yaw angles of the mobile mechanism on fishing net while performing proportional control. The oscillating becomes steady among  $2.5 \times 10^{-3} \sim 3.5 \times 10^{-3}$  proportional gains.



**Fig. 12** Several data of the mobile mechanisms on fishing net while autonomous running that PID control and turning motion are combined. (a): Photo of the mobile mechanisms on fishing net while autonomous running. (b):Plots of calculated depth while autonomous running between 0.2 m depth and 2.0 m depth.



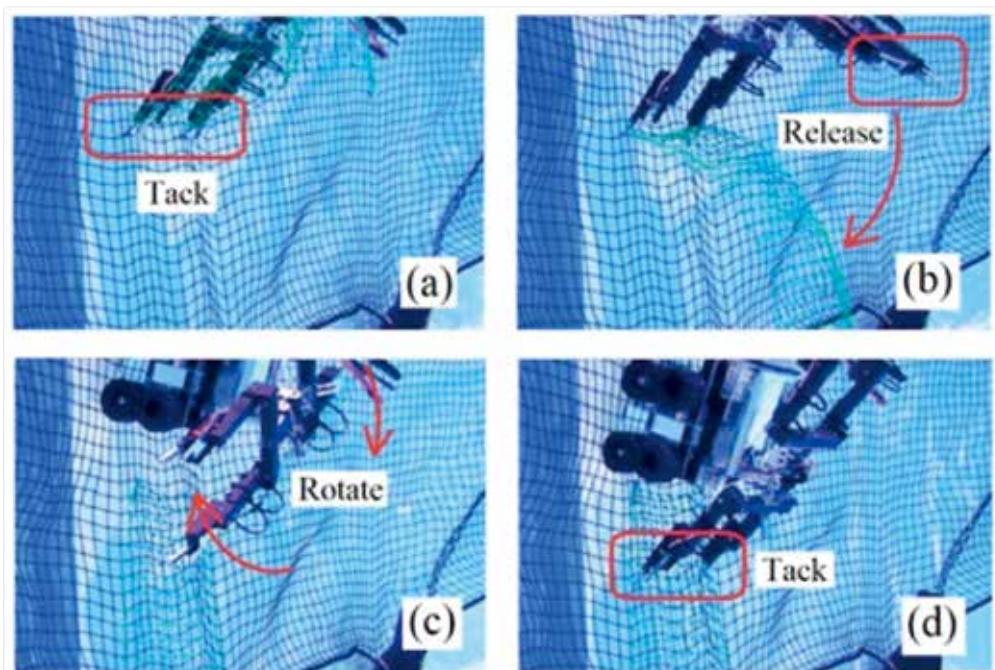
律走行時にはこの5次の移動平均を制御用データとして扱う。

次に、比例制御における各比例ゲインでの実験結果を Fig. 11に示す。この実験において、幅1 mの網から機体が脱線しそうになると機体を停止させるため、Fig. 11の各パターンで時間の終わりが異なる。機体ヨー方向角度の目標値は0度に設定しており、約35度の状態から始動させる。Fig. 11のグラフより、比例ゲインが $1.5 \times 10^3 \sim 2.0 \times 10^3$  の場合には時間が経つにつれて角度が収束し、比例ゲインが

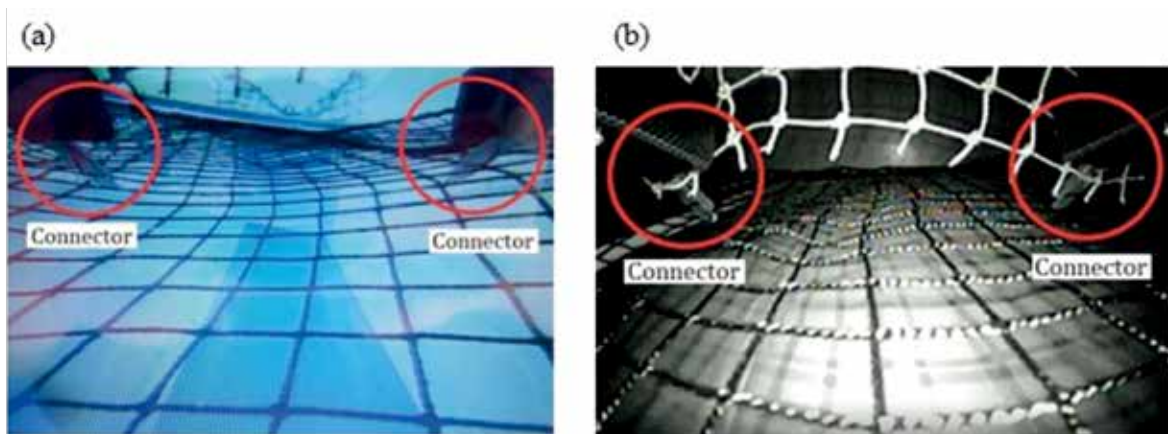
$4.0 \times 10^3$  の場合では発散している。比例ゲインが $2.5 \times 10^3 \sim 3.5 \times 10^3$  の間では振動が定常となり、特にゲインが $3.0 \times 10^3$  の場合にグラフが安定しているため、式(4)では  $k_{pc}=3.0 \times 10^3, T_c=2.0$  とする。

**自律走行実験の結果**

この実験における機体の水中写真と、水深データの1秒おきのプロットをFig. 12に示す。Fig. 12の(a)はFig. 7の自律走行の旋回動作中の様子であり、写真に写っている漁網



**Fig. 13** The process of first aid for broken fishing nets by the developed underwater robot. (a): The frontal manipulator tacks the edge of the small net onto the fixed fishing net for repairing. (b): When one end of the small net is released, the net will cover the broken area. (c): The manipulators are rotated 180 degrees, and the backward manipulator is in front. (d): The backward manipulator tacks the small net onto the fixed fishing net completely.



**Fig. 14** The images from the underwater camera mounted in front of the robot. (a): The images in shallow water and daytime. (b): The images in deep sea area or at night; conditions with little or no light intensity.

は張力不足によりたわんでいるが、機体は問題なく駆動できていることがわかる。また機体後方のケーブルに黄色いフロートが2つ繋がれているが、これはケーブルがタイヤに絡まないようにするためのものである。Fig. 12の(b)のグラフでは横軸を時間、縦軸を圧力センサより割り出した水深の瞬時値とする。このグラフより、設定水深間での自律走行が確認でき、水深2 mまで行き来する場合での1周期は約25秒ほどであることがわかる。今回使用した圧力センサは $\pm 0.35$  mまでの誤差が出る仕様であったため、制御に使用される移動平均を用いた水深0.20 m付近にて、移動平均なしの瞬時値が水面より上を指していることは想定内である。

### 補修用網の仮止め実験の結果

水中で網を繋ぎとめる手順をFig. 13に示す。Fig. 13の(a)では、前方のマニピュレータを傾けて仮止め機構と補修用網の前端を漁網に重ね、そのまま2台の仮止め機構を用いて補修用網の前端と漁網を2カ所繋ぐ。この時、サーボモータ2台を同時に動かすと必要なトルクが得られないため、前述のように片方ずつ駆動させる。Fig. 13の(b)では、後方のマニピュレータを操作して補修用網を漁網に覆い被せる。このとき、補修用網が浮いてしまうと被せることができなため、補修用網の水中重量は正である必要がある。Fig. 13の(c)はマニピュレータ全体を180度回転させている様子である。各仮止め機構に留め具は1つずつしかセットできないため、残った箇所の仮止めは後方の2台の仮止め機構が受け持つ。Fig. 13の(d)で残りの2カ所を仮止めし、仮止め箇所が4カ所となったところでこの区画の応急処置は完了とし、補修用網と留め具を追加するために水面へと戻る。機体前方に取り付けたカメラからの映像はFig. 14のようになる。Fig. 14において、(a)は浅場かつ日中、つまり十分な光量のある状況での映像である。Fig. 14の(b)は深場もしくは夜間、つまり光量が限りなく0に近い状況での映像であり、赤外線モードを用いて夜間に別の施設にて、実験設備の証明を消して撮影している。Fig. 14の両方の図より、ともに仮止め機構の先端と漁網が視認できることがわかった。実験の結果、水中で補修用網の四隅を漁網に仮止めできることが確認できた。

## 結 言

本論文では、養殖や定置網漁業において何らかの要因で網が破れた場合の応急処置として、ダイバーの代わりに水中で破網箇所を補修するロボットの開発を試みた。ネオジム磁石が内蔵されたタイヤを用いた網側面自走機構を開発、その運動性能を確認し、実海域での養殖網や定置網で操業する場合を想定した自律走行実験を行った。次に補修用の網を漁網に被せて四隅を留めるための仮止め機構を考案し、これを取り入れた網補修水中ロボットを製作し、本機体で網補修実験を行った。

考案した網側面自走機構の運動性能を確認した結果、前進速度は最大0.20 m/s、後進速度は0.18 m/s、回頭角速度は左旋回で最大0.34 deg/s、右旋回は0.28 deg/s、旋回半径は左旋回で最小188 mm、右旋回で223 mmとなった。

次に実海域での操業を想定した自律走行法を考え、それを実現するために2つの予備実験を実施した。1つ目には圧力センサの計測確認を実施し、正常に作動していることを確認した。2つ目には比例制御による安定限界の確認を行い、安定限界となる比例ゲインおよびその時の持続振動の周期を求めることができた。予備実験の結果をもとに自律走行プログラムを作成し、自走機構の自律走行実験を実施した。指定した水深の間を行き来しながら横に移動するルートでの自律走行を再現できることを確認した。

補修用の網を漁網に留めるための仮止め機構を考案し、留め具を装填した仮止め機構を用いて網どうしを留めることに成功した。しかし大型魚の衝突を想定した場合はさらなる強度が必要であり、改良の必要がある。さらに、仮止め機構を含むマニピュレータと網側面自走機構を組み合わせた網補修水中ロボットを考案、製作した。このロボットを用いて、水中での補修作業の可否を確認するための実験を行い、補修用網の四隅を漁網に固定できることを確認した。

本研究においていくつかの課題点も残った。まず、網のたわみが極端に大きな場所では両面の機構が網から剥がれてしまうケースがあった。これはたわんだ網が重なり、網が三枚分の厚みとなった箇所を自走機構が両面から挟むことにより剥がれやすくなると考えられる。同様に、網に大きな付着物（海藻の塊や牡蠣殻など）がある場合、自走機構がそれらを挟んで進もうとすると両面の機構が網から剥がれる危険性がある。これらの解消法として、機体の大型化が挙げられるため、今後は大型機体のプロトタイプを用

いた実海域実験を進めていく必要がある。

また、補修作業において、流れの速い海域では補修用網やケーブルに大きな流体力が働き、動作に支障が出る可能性が高い。これに関しては、機体の無線化や補修方法の再考をする必要がある。

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、水槽設備の利用を許可して頂いた水産大学校の下川伸也教授および酒井健一講師と技術職員の方々、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、プールの使用を承諾して下さった同校の小竹直樹講師、サポートをして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) Kondo, H., Shimizu, E., Choi, J., Nakane, K., Matsushima, M., Nagahashi, K., Nishida, Y., Matsui, R.: Biointeractive Autonomous Underwater Vehicle "BA-1". Institute of Electrical and Electronics Engineers (2010)
- 2) 尾坂滝太郎: 自走式養殖網水中洗浄ロボットの開発, *Research Journal of Food and agriculture*, **31**(2), 36-39 (2008)
- 3) 丸山克彦: 定置網の急潮被害の実態, 日本水産学会, **75**(5), 881-882 (2009)
- 4) 船越裕紀, 上野陽一郎: 丹後半島沿岸の定置網における急潮被害と流速の鉛直構造との関係, *水産海洋研究*, **84**(4), 261-270 (2020)
- 5) 和田一雄, 藤田尚夫: 北海道日本海側におけるトド・オットセイの漁業被害域分布と被害防除策: 聞き込みによる実態調査を中心に, *利尻研究*, **32**, 77-83 (2013)
- 6) 笹川康雄: トドの破網力と底建網への被害対策, *北海道大学水産学部研究彙報*, **40**(2), 116-124 (1989)
- 7) 市野澤潤平: 減圧症リスクとダイブ・コンピュータ～観光ダイビングにおける身体感覚/能力の増強とリスク認知～, *国立民族学博物館研究報告*, **43**(4), 779-844 (2019)
- 8) 森隼人, 高木基樹, 佐藤和幸, 三好扶: 水産資源の管理支援用水中ロボットの開発: 第1報: 深さ及び姿勢制御, *ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集*, 2A1-C10 (2015)
- 9) 尾坂滝太郎: 養殖網の洗浄技術と自走式養殖網水中洗浄ロボットについて, *海洋水産エンジニアリング*, **9**(84), 58-65 (2009)
- 10) 塩谷義: ファンエンジンの異物吸込みによる羽根の衝突破壊, *日本航空宇宙学会誌*, **35**(397) (1987)
- 11) 藤原慎平: 磁石内臓タイヤを用いた網側面水中自走機構の開発, *日本水産工学会誌*, **56**(2) (2019)
- 12) 川田昌克, 西岡勝博: MATLAB/Simulinkによるわかりやすい制御工学, 89-91 (2001)