

水中ロボットを用いた養殖網清掃システムにおける 充電ステーション活用に関する基礎的研究

藤原慎平¹

Abstract : In aquaculture and fixed-net fishing, fishing nets need to be fixed in the water for a long period of time. Therefore, attached organisms such as shellfish, algae, and parasite eggs easily stick to the nets, making periodic cleaning indispensable. A common method is for divers to dive into the water and clean the nets directly with their hands. However, this method is dangerous because it can be fatal to divers due to high water pressure and low water temperature. Therefore, this study considered the possibility of using underwater robot to clean fishery nets in place of divers to avoid these dangers.

A mobile mechanism that can move freely along the sides of fixed fishery net in the water has already been developed in this laboratory. In this study, we propose the cleaning system using autonomous robots that automatically cleans aquaculture nets underwater and the charging station using coils for wireless power supply. This robot and a charging station will be installed on the aquaculture nets, and the robot will be driven periodically to clean the nets underwater with less labor and in a safe manner.

Key words : Fishing net, Aquaculture net, Underwater robot, Mobile mechanism, Cleaning system

緒 言

水産物の養殖や定置網漁業では、漁網を水中に長期間固定する必要があるため貝や藻、寄生虫の卵といった付着生物が網に付きやすく、定期的に洗浄することが必須である。その一般的な対策には、ダイバーが潜水しダイバーの手で直接洗浄する方法がある。しかしこの方法は高水圧や低水温の影響によりダイバーの命に関わる可能性もあり危険である¹⁾。そこで、本研究ではダイバーの代わりに網を洗浄する水中ロボットを活用することでこれらの危険を回避でき、大きな手間も省けると考えた。

この水中ロボットの開発の初期段階として、水中に固定されている網の側面を自由に移動できる自走機構を本研究室で開発した²⁾。網の側面を移動する他のロボットは、実用化されている機体ではヤンマーの製作した養殖網清掃用ロボットが挙げられる³⁾。しかしこのロボットはプロペラを回すことで得られる推力を用いて網に張り付くため、機体の使用中は常にプロペラを回しておく必要があり、そのため消費電力が大きくなる。また、自走式ではなく操縦式のため船の上から操縦する人手が必要である。対して本研究室で開発した自走機構は、磁石を機体の裏と表に内蔵することで網を挟むようにして網の側面に張り付くことができるため、プロペラを必要とせず電力も削減できる。また、

この自走機構には自律走行システムを搭載しており、網の側面をまんべんなく移動させることができるため、操縦者が不要となる。

本研究では、この自走機構を搭載した養殖網清掃ロボットおよび養殖網清掃システムの開発を最終目標とし、ロボットの充電ステーションへの格納および充電方法に関する基礎的な研究について報告する。

養殖網清掃システムについて

開発した自走機構の概要

養殖網の側面に張り付きながら移動および清掃するロボットは、スラストを用いるタイプが既に開発されている。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。しかしスラストを回すと圧力差により吸い込み流れが発生し、シャフト部分に海藻やゴミ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⁴⁾。また、スラスト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、磁石内蔵

タイヤを用いた自走機構を開発した。機構のタイヤにはネオジム磁石が埋め込まれており、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ことができる。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。この磁石内蔵タイヤの構造をFig.1に、自走機構が網の側面を走行する様子をFig.2に示す。

システムの構成

本研究で提案する養殖網清掃システムについて、概要図をFig.3に示す。図中では円筒形の養殖網が描かれており、ロボットの他に網側面の水面付近に水中ロボットを格納・充電するためのステーションを搭載する。洗浄装置を搭載したロボットが養殖網の側面を上下に往復しながら洗浄して進み、ロボットの充電が切れそうになると帰還モードに

移行して自らステーションへ格納され、充電が開始される。

洗浄しながらの走行には、加速度センサと圧力センサを用いた自律走行を採用する。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。これにより、網を基準とした座標系における機体のヨー方向角度を算出する。また、圧力センサにより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ながら、横方向に機体を移動させていく。網上の直進動作では機体のヨー方向角度を変数とした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。ヨー方向角度は、機体の左右のモータ回転数を変えることで変化させていく。この自律走行における走行ルートおよび制御方法に関する概略図をFig.4に示す。

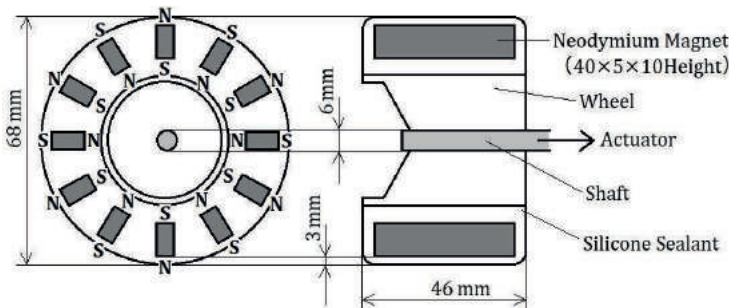


Fig. 1 Cross section of the magnet tire.

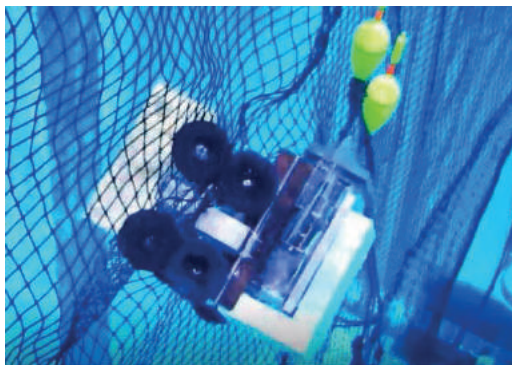


Fig. 2 Running the mobile mechanism using the magnet tires.

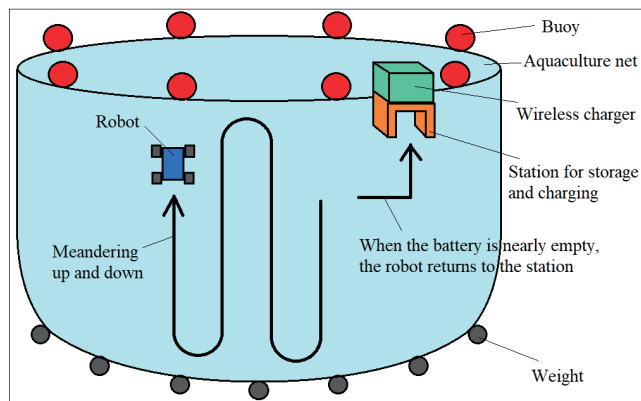


Fig. 3 Rough sketch of the aquaculture net cleaning system using underwater robot.

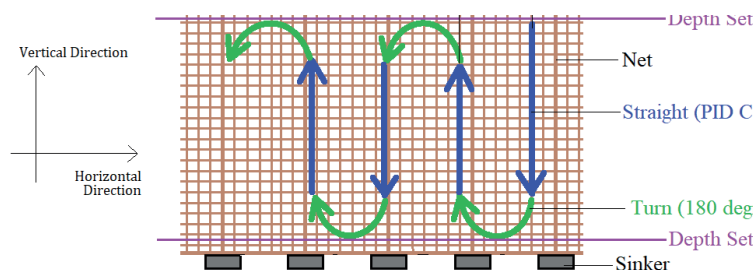


Fig. 4 Schematic view of operating route on fishing net underwater while performing autonomous running that PID control and turning motion are combined.

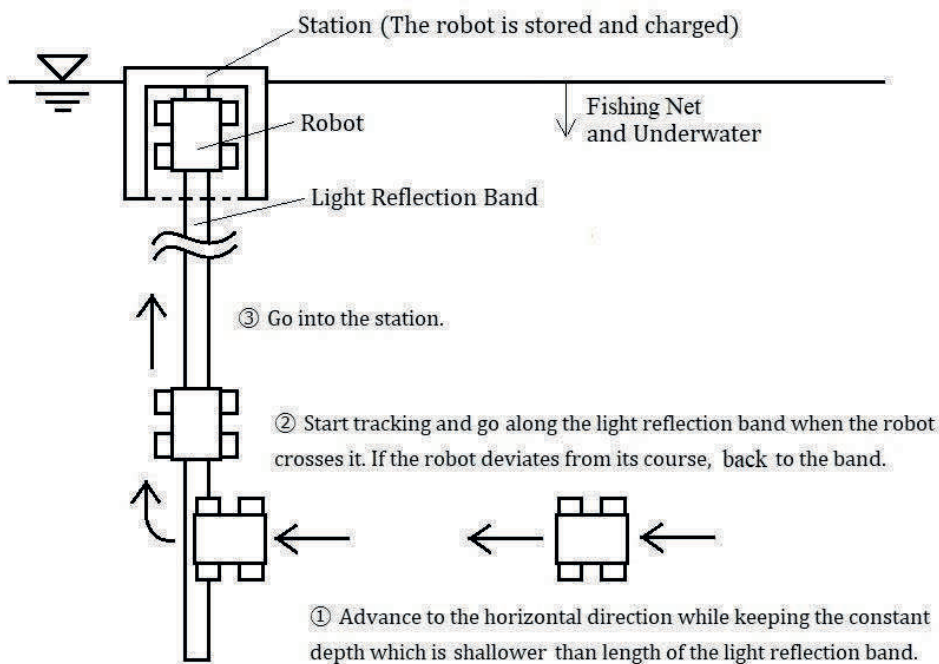


Fig. 5 Flowchart of the return mode driving.

充電方法

このシステムを実現させるためにはロボットの定期的な充電が必要となり、充電用のステーションを養殖網の水面付近に設置する。このとき水中で充電を行うことを考えると、充電器との電気的な接点を持つことは避けたい。そこで、充電には電磁誘導を利用した非接触での充電を考える。充電ステーションとロボットの双方にコイルを搭載し、電気的な接触を持つことなく、ロボット内部のバッテリーを充電する。相互誘導により発生する起電力を表す式を式(1)に示す。 e_2 は相互誘導起電力、 M は相互インダクタンス、 I_1 は送電側コイルに流れる電流、 t は時間、 ϕ_2 は受電側コイルの磁束、 N_2 は受電側コイルの巻き数を表す。

$$e_2 = -M \frac{dI_1}{dt} = -N_2 \frac{d\phi_2}{dt} \quad (1)$$

さらに細かく考えると、相互誘導は電場と磁場を空間に輻射する波動エネルギーであり、そのエネルギーの一部は空間に移ったままとなるため、空間における抵抗成分となる放射抵抗が存在する。効率よく充電するためには、電磁誘導コイルの放射抵抗をなるべく小さくすることが望ましいが、放射抵抗はコイル径と周波数に依存する。そのため、放射抵抗を下げて効率よく電力を供給するためには、コイル径と周波数をなるべく小さくすることが望ましい⁹⁾。

ステーションへの格納方法

ロボットの充電のためにはロボットをステーションへ格納する必要がある。コイルを用いたワイヤレス充電では、双方のコイルの横ずれや間隔が大きくなると充電効率が大きく下がるため、格納には高い精度が求められる。

水中での相対測位の手法には、主に音響的手法と視覚的手法がある。前者は遠距離でも適用可能だが分解能が低く、後者は高分解能であるが至近距離でしか適用できないという特徴がある。過去の水中ロボットの格納実験では、音響的手法と視覚的手法の両方を取り入れた高精度な制御も行われている⁶⁾。

しかし、本システムは養殖網で使用するため、ステーションの裏側へ回ると網や内側にいる養殖魚が障害物になってしまうので音響は不向きである。また、養殖網の周りは給餌した際の残餌が富栄養化をもたらし、さらに水面付近は日光も照射するため、季節によっては動物・植物プランクトンがともに多くなり、透明度が低くなるため画像認識などの視覚的手法も難しい。これらの理由により、本システムではロボット格納のためにライトレース制御を採用する。トレース用のラインには5cm×1mのポリエチレン製バンドを用いるが、清掃ロボットを短い周期で定期的に駆動させることを想定し、このバンドは付着物の無い綺麗な状態を保つことができるものと仮定する。

このライトレースのイメージ図をFig.5に示す。パッ

テリの容量が少なくなるとロボットはステーション帰還モードに移行する。圧力センサを用いて一定の深さを保ちながら水平方向へ移動し、トレース用のバンドを横切るときにバンドの追跡を開始し、そのままステーションへ向かう。ステーションでの走行の自動停止には、タイヤのモータに搭載してあるエンコーダを用いることで、ステーション壁面に接触した際にタイヤの回転数の低下を検知できるため、そのタイミングでモータへの電力供給を止める。ライントレース中に脱線した場合は再度一定水深で走行し、初めのフェイズに戻る。

実 験

ロボットへのワイヤレス充電実験

ロボットへのワイヤレス充電の性能を調べるための電力測定を陸上、真水中、海水中にて行う。送電側と受電側の2つのコイルを用意し、送電側は充電ステーション用の電源に、受電側はロボットの内部に搭載する。この充電用電源には高周波数電源を採用し、効率の良い送電を行う。高周波電源は、出力が $\pm 50V$ (実効値 $35.3V$)で周波数が $60\sim 100\text{ kHz}$ で可変である。コイルは直径 60 mm でインダクタンスが約 $5\ \mu\text{ H}$ のものを採用した。深さ 0.2 m の小さな水槽に2つのコイルを入れ、コイル間の距離を $1\text{ cm}\sim 5\text{ cm}$ 、電源の周波数を $60\sim 100\text{ kHz}$ で変化させ、陸上、真水中、海水中それぞれの状態で受電電力と送電効率を導出していく。この実験における受電電力を式(2)に、送電効率を式(3)

に示す。 V_1 は送電側電圧、 I_1 は送電側電流、 V_2 は受電側電圧、 I_2 は受電側電流、 W は受電電力、 η は送電効率とする。

$$W = V_2 I_2 \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1} \quad (3)$$

この実験の簡易的な電気回路図をFig.6に示す。図において、左側のコイルが送電側、右側が受電側となり、受電側にはコイルの他に可変抵抗器を組み込んだ整流回路を搭載している。この可変抵抗器をあらかじめ調整しておくことにより、ロボットへの充電電圧を直流 $8.6\sim 39.5V$ の間で設定できる。

ワイヤレス充電実験の結果

受電電力の計測結果をFig.7に、送電効率の計測結果をFig.8に示す。陸、真水中、海水中で比較したところ、受電電力および送電効率ともに大きな差異は見られなかった。コイル間の距離で比較すると、近い方が数値が高いことは当然として、受電電力は 80 kHz で距離が 3 cm 以上離れると著しく低下し、それ以外の周波数では距離が 2 cm 以上離れると著しく低下することが確認できた。電源の周波数で比較すると、 $80\sim 90\text{ kHz}$ で充電したほうが受電電力、送電効率ともに高い数値を確認できた。

また、使用したロボットの待機電力は 3.3 W であり、これを上回る条件は $80\sim 90\text{ kHz}$ で距離が 2 cm 以内であること

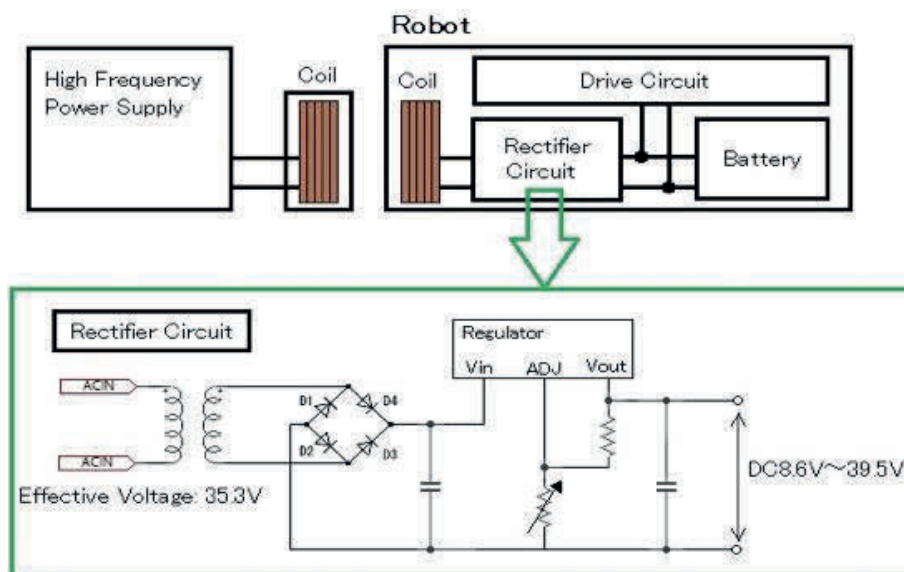


Fig. 6 Circuit diagram of the converter.

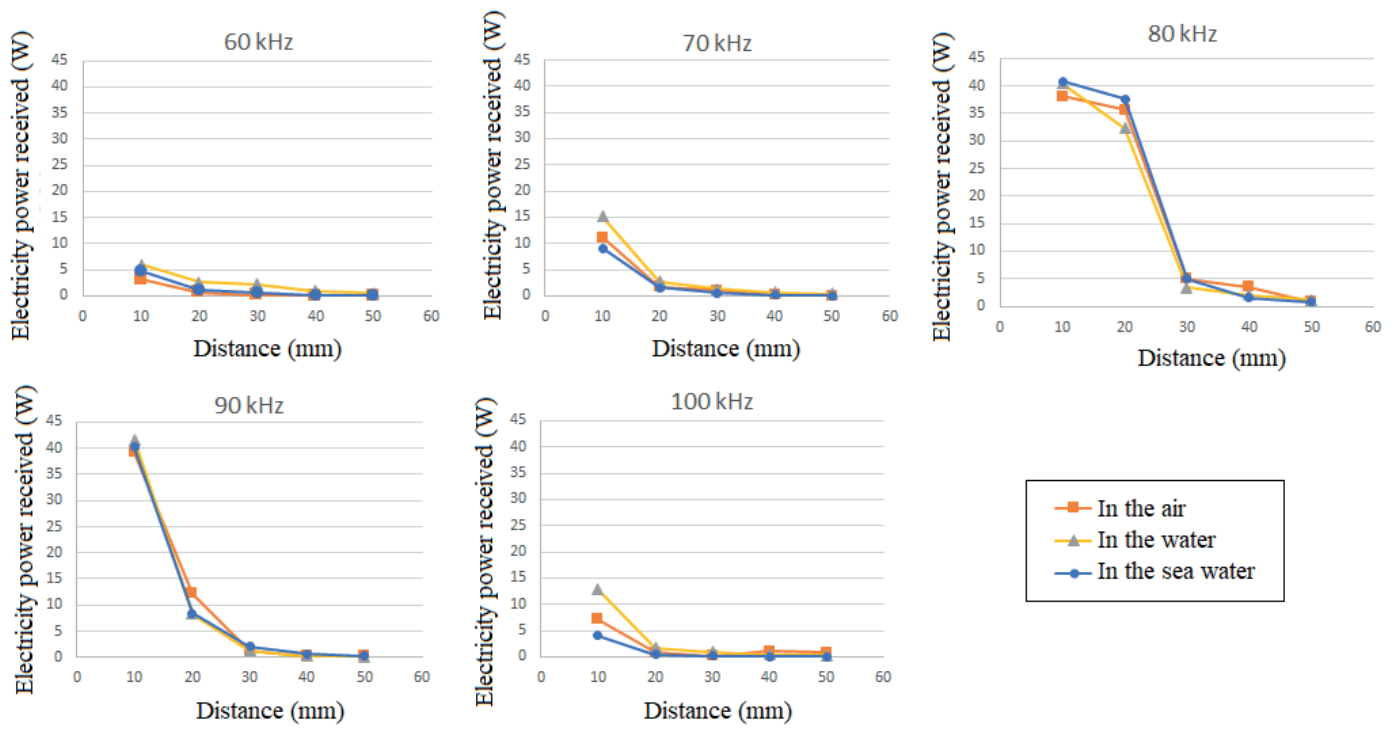


Fig. 7 Measured results of power received.

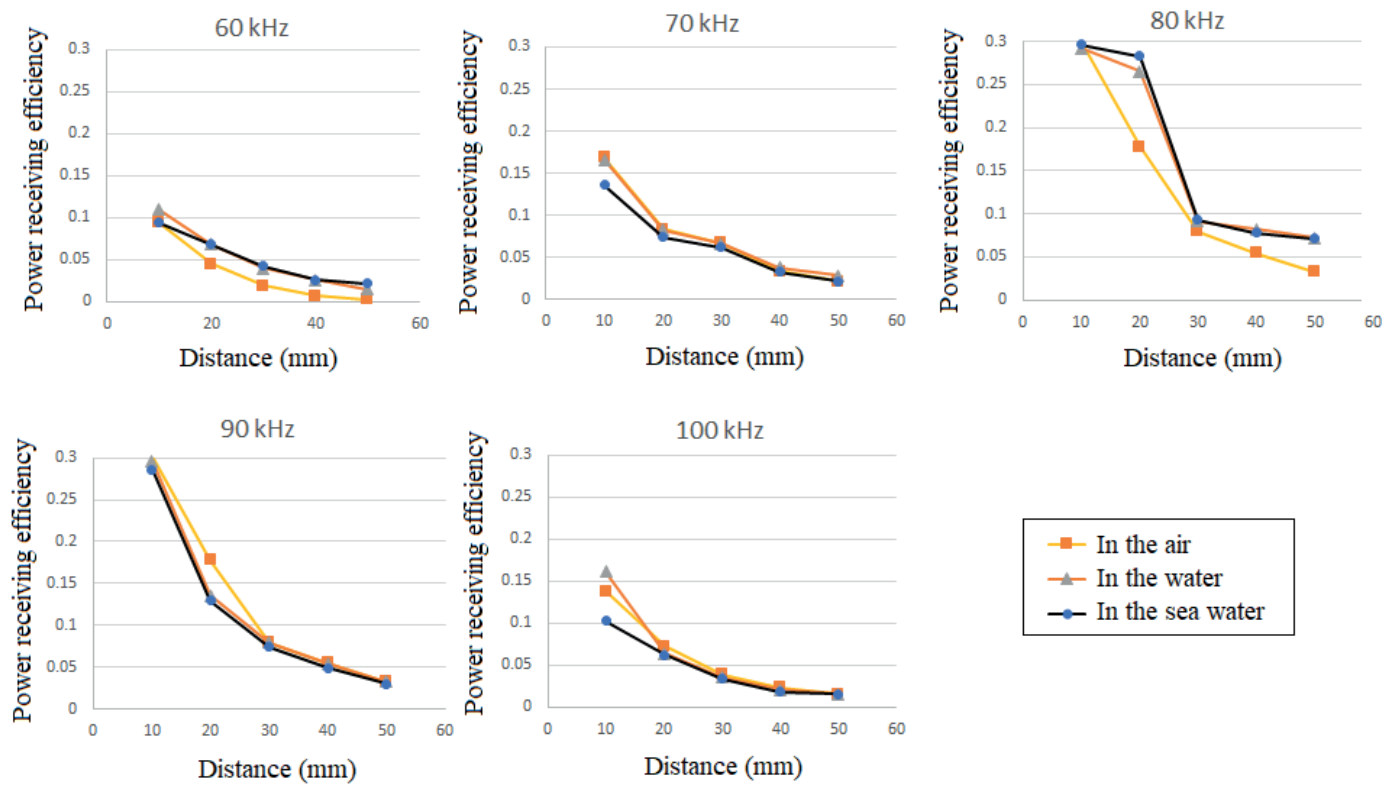


Fig. 8 Measured results of power receiving efficiency.

が確認できた。距離に関しては短いほうが受電コイル側で強い磁束を確保でき、周波数に関してはこの送電コイルの共振周波数が80~90kHzの間にあるためと考えられる。

網の上での水中ライトレース実験

一般的にライトレースといえば強度の低い赤外線センサを用いて床に貼り付けた黒色テープに沿って走行してゆくものを指すが、本研究では強度の高い赤外線センサを用

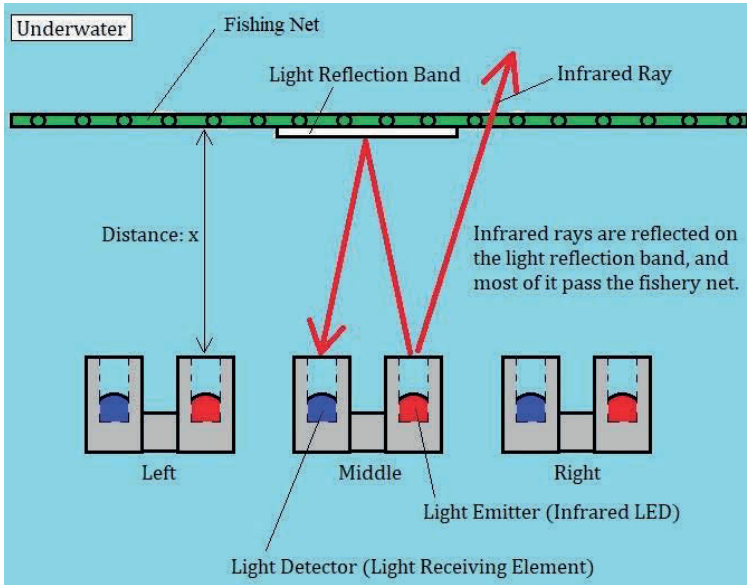


Fig. 9 Method of detecting reflective bands on nets underwater.

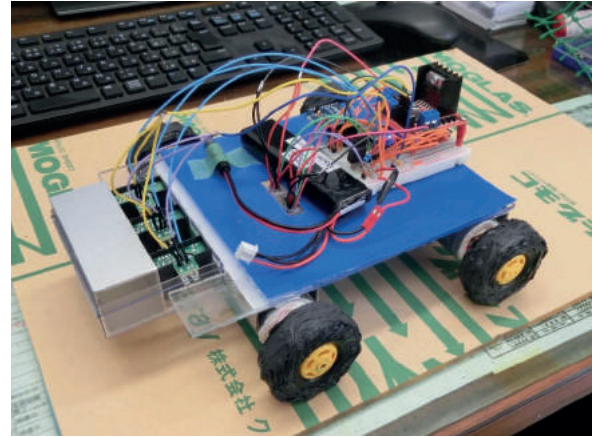


Fig. 10 Experimental robot used for line tracing on nets underwater.

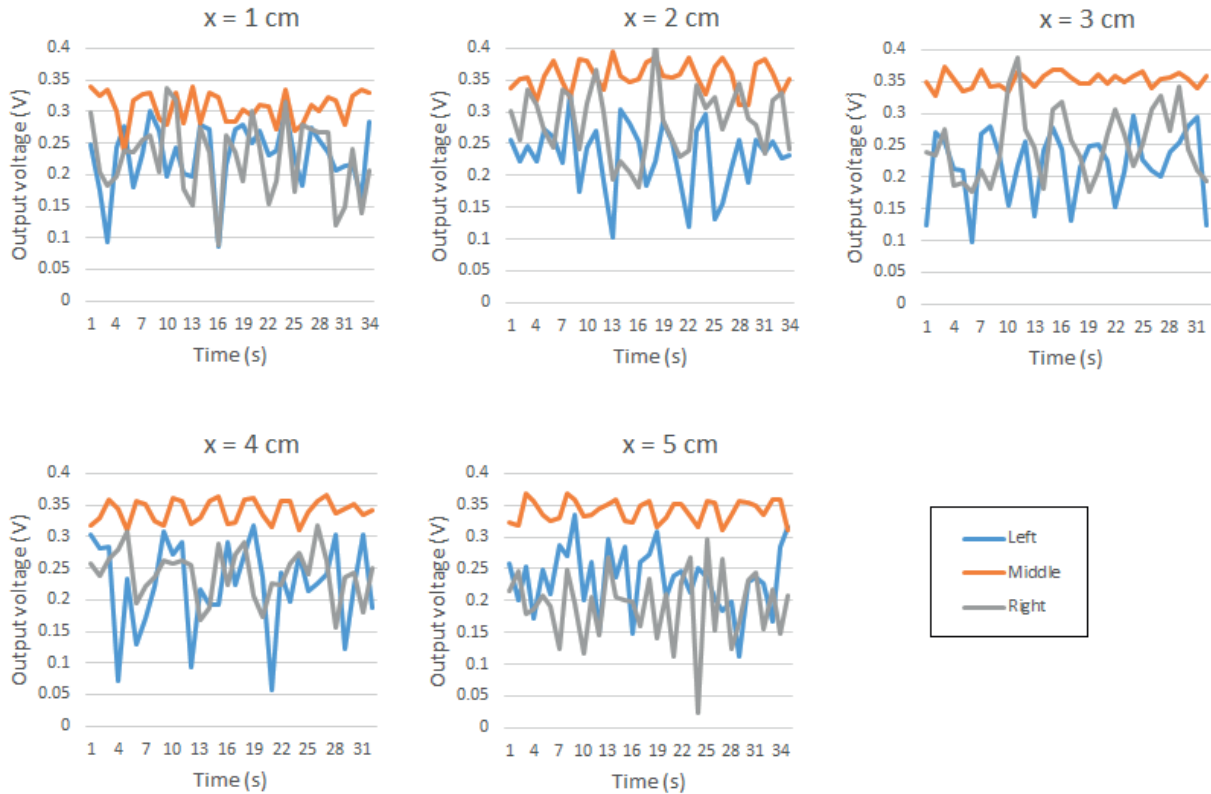


Fig. 11 Outputs of infrared sensors underwater without moving average.

いることで、水中かつ網側面という外乱・減衰が大きい環境下でも走行可能なライントレースを実現する。赤外線センサには、測距センサSharp GP2Y0A02YKを採用した。このセンサは陸上では150cmまで測定可能であるが、水中では赤外線の減衰が大きいため、測定可能距離は大きく狭まることが予想される。

このライントレースにおける対象検知の方法をFig.9に、この実験で使用する実験機の写真をFig.10に示す。網にはトレース対象となる反射バンドを設置しておく。赤外線センサの送信部から赤外線を放出し、対象に当たって返ってきた赤外線を受信部で検知する。反射バンドに当たった赤外線は検知され、それ以外の赤外線は網のすき間を掻い潜る。センサは左・中央・右の3つとし、対象となる反射バンドを中央のセンサのみで検知するよう、実験機の左右のタイヤの回転数を制御する。実験機は水中で使用するため、センサ周りに防水加工を施す。

はじめに、Fig.9のように反射バンドの真上に中央のセンサがくるよう停止させている状態で、センサ計測部と網までの距離 x を1cm～5cmの間で変化させ、3つのセンサで計測した出力値を比較し、最適な網—センサ間の距離を確認する。次に、その最適な網—センサ間距離を維持した

状態で実験機にライントレースさせる。また、計測のサンプリング周期は0.2秒とした。

ライントレース実験の結果

網の上での水中計測実験にて、赤外線センサの出力値をFig.11に示す。距離 x が1～3cmの時には左右のセンサ出力値が中央のセンサ出力値を超える瞬間が確認された。左右のセンサ出力値の最大変動幅は0.10～0.15Vとなり、対して中央のセンサ出力値の最大変動幅は0.05V未満となり安定している。

この実験で得られたデータは誤差が大きいと判断し、ライントレースの制御にそのまま使用することは不向きであると考えたため、制御プログラムに要素数3の移動平均を取り入れた。移動平均を使って出力したデータをFig.12に示す。これにより変動幅を抑え、左右のセンサ出力値が中央のセンサ出力値を超える瞬間は $x = 1$ cmの場合でのみとなった。Fig.12より、中央と左右の出力値の差が最も大きいデータは距離 $x = 5$ cmであったため、正確なライントレースを実現するためには $x = 5$ cmが有効であると判断し、実験機を駆動させた。制御プログラムにはPID制御を採用し、操作量 $u(t)$ を表す式(4)は以下ようになった。操

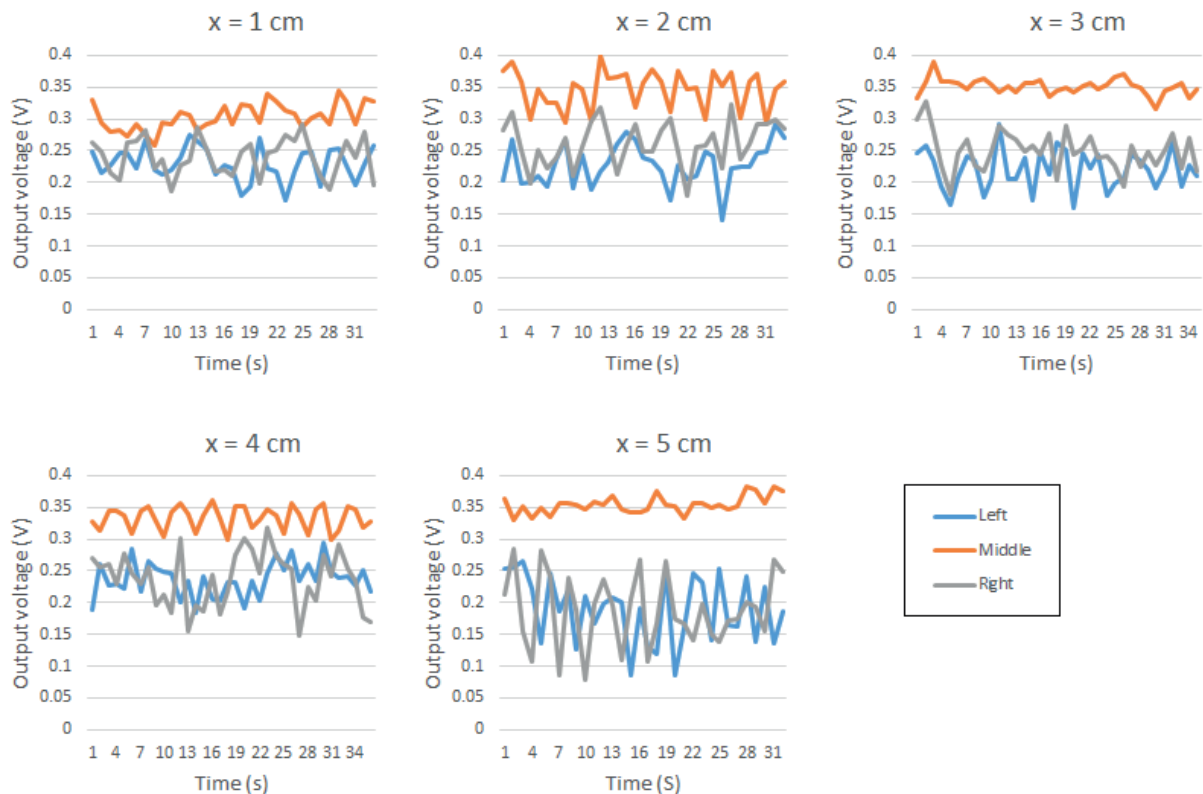


Fig. 12 Outputs of infrared sensors underwater with moving average ($n=3$).

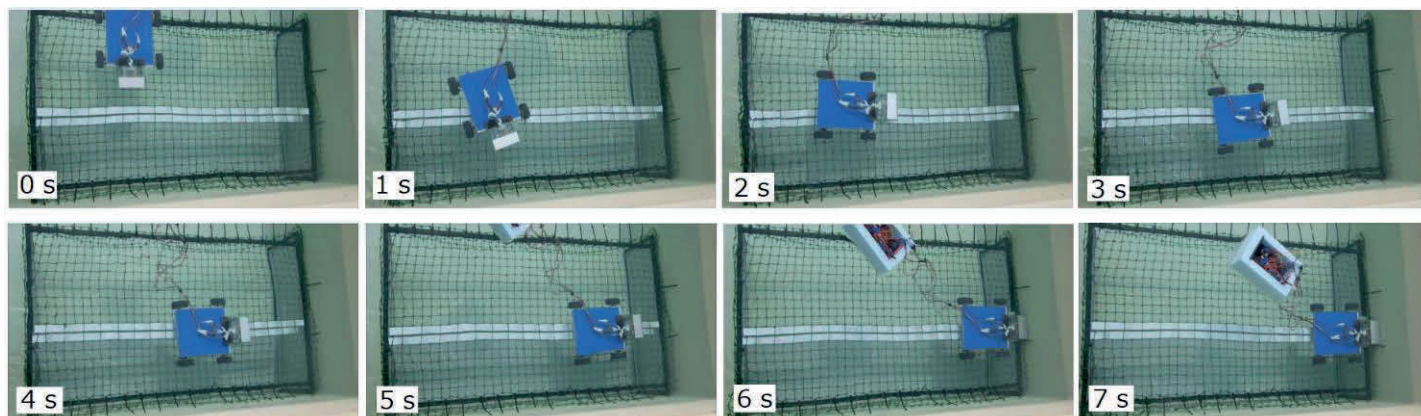


Fig. 13 Screenshot of line tracing using experimental robot underwater.

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である。式(4)において、 t は時間、 k_p は比例ゲイン、 k_i は積分ゲイン、 k_d は微分ゲイン、 V_L は左センサの出力値、 V_R は右センサの出力値とする。また、中央センサの出力値を V_M とすると、この式の中では V_M は不要となるが、制御プログラムの中では V_M の値をもとに脱線の判断をするため、必要な数値である。このラインレースの1秒おきのスクリーンショットをFig.13に示す。

$$u(t) = k_p(V_L - V_R) + k_i \int_0^t (V_L - V_R) dt + k_d \frac{d}{dt} (V_L - V_R) \quad (4)$$

考察と結言

本論文では、磁石搭載の自走機構を用いた養殖網清掃ロボットおよび養殖網清掃システムの開発のため、ロボットの充電ステーションでの充電および自動格納を実現するための基礎的な実験を行った。

ワイヤレス充電の実験においては、陸、真水中、海水中で比較したところ、受電電力および送電効率ともに大きな差異は見られなかった。これは、充電のためにはコイル間の距離を近くする必要があり、本実験での最大5cmという距離も比較的近い距離であったため、電磁波の伝達距離が短く放射抵抗の影響がほとんど現れなかったためと考えられる。コイル間の距離は2cm以内、周波数は80~90kHzで充電したほうが受電電力、送電効率ともに高い数値を確認できた。距離に関しては短いほうが受電コイル側で強い磁束を確保でき、周波数に関してはこの送電コイルの共振周波数が80~90kHzの間にあるためと考えられる。また、使用したロボットの待機電力は3.3 Wであり、これを上回る

条件は80~90kHzで距離が2cm以内であったため、提案したシステムにてこのロボットを充電する場合は、これらの条件を満たす必要があることがわかった。

網の上での水中ラインレースの実験では、初めに得られたデータは誤差が大きいと判断し、制御プログラムに要素数3の移動平均を取り入れた。移動平均を使ったデータでは変動幅を抑えることができ、この実験で中央と左右の出力値の差が最も大きかったデータは距離 $x = 5\text{cm}$ であったため、正確なラインレースを実現するためには距離 $x = 5\text{cm}$ が有効であると判断した。実験機を用いた水中ラインレースでは、対象となる反射バンドから脱線することなくラインレースができていたことが確認でき、本制御方法が養殖網でのロボット格納に有効であると考えられる。

今後の研究では、今回報告したワイヤレス充電およびラインレースの機能に加え、過去に開発した磁石内蔵タイヤによる網側面自走機構も搭載した水中ロボットを製作し、水中に保持した網での自律走行、格納、充電の可否を確認する必要がある。また、ワイヤレス充電においては目標値の設定のため、モデルとして養殖網のサイズや清掃中の機体の消費電力、バッテリー容量なども具体的に決定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、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と技術職員、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。

文 献

- 1) 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)
- 2) 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)**, 91-94 (2019)
- 3) 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)
- 4) 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)
- 5) 萩原誠, 海老原格, 水谷孝一, 若槻尚斗：海中における自律型水中ロボットへのワイヤレス給電およびデータ通信の基礎的検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, **20**, 537-539, (2015)
- 6) 伊東高明, 松田匠未, 卷俊宏：海底ステーション間を移動するAUVのナビゲーション手法, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, **2A2-G07**, (2017)