

令和6年度

卒業研究報告書

題 目

柔軟かつ屈曲可能な胴体を有する魚型ロボットの開発

Development of Fish-Type Robot with Flexible and Bendable Torso

SDGs目標番号: 9

学生氏名（学籍番号）

渡部翔太(D2040)

指導教員

中西大輔

電子制御工学科

概要

水中の推進システムにはスクリュープロペラを用いた推進方法や魚を模したロボットによる尾びれ推進などがあげられる。スクリュープロペラは水上、水中における推進性能が高く、船舶などに広く用いられている。しかし、生態系調査の面で考えると、スクリュープロペラは周辺環境に影響を与え、調査に適しているとは言えない。その一方で尾びれ推進は周辺環境に影響を与えるにくく、尚且つ加速性・旋回性に優れているため障害物を避けながら目的の地点まで速やかな移動を可能にする。以上のことから水害などの災害支援、水中生物の生態系調査の面で魚型ロボットの開発は注目されている。そこで我々の研究室ではこれまで様々な魚型ロボットを開発してきた。特に昨年度は魚らしくしなやかな動きを可能にするワイヤ駆動式の魚型ロボットと、完全防水可能かつ魚らしい流線形のボディを有する柔軟外皮装着型の魚型ロボットの開発に成功した。しかし、ワイヤ駆動式ではリンク間に隙間があり胴体部で水をかけていいこと、柔軟外皮装着型では骨格リンクと外皮が運動せず胴体部が動かないという問題があった。そこで本研究ではこれら2つの研究を組み合わせ、柔軟外皮を備えたワイヤ駆動式魚型ロボットを開発した。これにより魚らしいしなやかな動きを可能にしつつ、胴体部でも水をかけるようにすることで遊泳性能の向上を目指した。遊泳実験においては、ワイヤ駆動によって魚らしくしなやかな動作を実現し、かつ柔軟外皮がリンクの動きに追従して動作することを確認できた。また柔軟外皮あり・なしそれぞれで直進遊泳実験を行い、柔軟外皮が遊泳性能に与える影響について検証を行った。結果として、柔軟外皮を装着することによって遊泳速度が向上することを確認した。速度が向上した要因としては、ロボットのボディが柔軟外皮を装着することによって流線形になったことが考えられる。したがって流線形のボディを備えることは、遊泳速度を向上させるのに非常に有効であると考えられる。

Abstract

The propulsion system in water includes methods such as using screw propellers for propulsion and robot fish that mimic fish's tail fin propulsion. Screw propellers are widely used in ships and other watercraft due to their high propulsion performance both on and under the water. However, from the perspective of ecological surveys, screw propellers are not ideal as they can impact the surrounding environment, making them unsuitable for research. On the other hand, tail fin propulsion has minimal impact on the environment and offers excellent acceleration and maneuverability, enabling swift movement while avoiding obstacles to reach a desired location. Therefore, the development of fish-like robots has garnered attention for disaster support, underwater biological ecosystem surveys, and similar applications. In our laboratory, we have developed various types of fish-like robots. Specifically, last year, we succeeded in developing a wire-driven fish robot that enables smooth, fish-like movement, and a flexible outer-skin fish robot that has a streamlined body and is completely waterproof. However, the wire-driven type had gaps between the links, and the body could not spray water, while the flexible outer-skin type faced the issue of the skeleton links and outer skin not being synchronized, causing the body to be unable to swim. In this study, we combined these two designs to develop a wire-driven fish-like robot with a flexible outer skin. This approach allows for fish-like, flexible movement while ensuring that water can be sprayed from the body, improving swimming performance. In swimming experiments, we confirmed that the wire-driven mechanism achieved fish-like, fluid motion and that the flexible outer skin followed the movement of the links. We also conducted straight-line swimming tests both with and without the flexible outer skin to examine its impact on swimming performance. The results showed that the swimming speed improved when the flexible outer skin was used. The reason for this speed increase is likely because the body became more streamlined with the addition of the flexible outer skin. Therefore, equipping the robot with a streamlined body is highly effective in improving swimming speed.

目 次

1 緒言	1
2 先行研究	2
2.1 柔軟外皮装着型魚口ボット	2
2.1.1 頭部	3
2.1.2 胴体部	3
2.2 遊泳実験	3
2.2.1 実験条件	3
2.2.2 実験結果	4
2.3 得られた知見	5
3 柔軟外皮を備えたワイヤ駆動式魚口ボットの開発	6
3.1 ワイヤ駆動式魚型ロボットの動作原理	6
3.2 試作機	6
3.2.1 試作機の作製	6
3.2.2 防水テスト・遊泳テスト	8
3.2.3 試作機から得られた知見	8
4 柔軟外皮装着型ワイヤ駆動式魚口ボット	9
4.1 ロボット概要	9
4.2 頭部	10
4.3 胴体部	12
4.4 柔軟外皮	13
5 遊泳実験	15
5.1 実験条件	15
5.2 実験結果	16
5.3 考察	19
5.4 今後の展望	22
6 結言	23
7 謝辞	24
8 参考文献	25
A 付録	26
A.1 外皮作成方法	26
A.2 作製した基板	26

1 緒言

水中の推進システムにはスクリュープロペラを用いた推進方法や魚を模したロボットによる尾びれ推進などがあげられる [1]. スクリュープロペラは水上、水中における推進性能が高く、船舶などに広く用いられている。しかし、生態系調査の面で考えると、スクリュープロペラは周辺の植物や水中動物などを巻き込んで水中の環境に影響を与え、騒音によって周辺生物を驚かせるなど、調査に適しているとは言えない。その一方で尾びれ推進は周辺生物を巻き込むなど環境に影響を与えるにくく、尚且つ加速性・旋回性に優れているため障害物を避けながら目的の地点まで高機動な遊泳を可能にする。以上のことから水害などの災害支援、水中生物の生態系調査の面で魚型ロボットの開発は注目されている [2] [3].

そこで我々の研究室ではこれまで様々な魚型ロボットを開発してきた。駆動機構として弾性体を用いた飛び移り座屈機構を採用した魚ロボット [4] [5] や、それに加えて屈曲可能な胴体構造を有する魚ロボット [6-8] の開発に成功してきた。さらに昨年度卒業研究では駆動機構としてワイヤ駆動方式を用いたより魚らしい形状を持つ魚ロボットの開発に成功し、魚のように胴体を屈曲させてしなやかに遊泳を行うことができた。しかし、これらの魚ロボットには弾性体に追従する骨格リンクの隙間に水が入り込み、結果的に弾性体のみで水をかいてしまい、体全体でかくことができていないという課題があった。

一方で同じく昨年度卒業研究（先行研究 [9]）ではこの課題を解決するために、胴体部全体をシリコン製の柔軟外皮で覆った魚型ロボットの開発が行われた。柔軟外皮は魚らしい流線型のフォルムの実現のみならず、従来のOリングを用いた手法よりも容易かつ確実性の高い防水性能を実現した。しかし、遊泳に関しては骨格リンクの動きに柔軟外皮が追従せず、胴体部を振って泳ぐことはできなかった。そのため遊泳速度が大きく低下し、柔軟外皮が遊泳速度に対してどのように影響を与えるのか検証することができなかった。

そこで本研究では、しなやかな遊泳が可能なワイヤ駆動方式と、流線形の胴体フォルムを実現可能な柔軟外皮を組み合わせた魚型ロボットを開発する。ロボットはアジのスキャンデータを基に作成し、先行研究 [10] によって提唱されたアジ型遊泳の定義のもとに、胴体後ろ半分を屈曲させることで遊泳を行う。そして柔軟外皮あり・なしで直進遊泳実験を行い、柔軟外皮が遊泳性能に与える影響について検証・考察を行う。

2 先行研究

本章では、本研究で開発したロボットのベースとなった機体を先行研究を用いて述べ、それぞれの実験結果とそこから得られた知見をまとめます。

2.1 柔軟外皮装着型魚ロボット

先行研究 [9] で開発された機体を図 1 [9] に、構造を図 2 [9] に示す。先行研究 [9] ではハマチをモデルにしてロボットを作製していました。図 1(b) は魚型ロボットに柔軟外皮を取り付けたものであり、水中に沈めること及び水中での姿勢維持を目的として、柔軟外皮を固定する防水リングにおもりが取り付けてある。おもりの重さは頭部と尾びれ部分でそれぞれ 296 g, 150 g である。本機体は全長 477 mm, 重さ 1080 g, おもりを含めた重さが 1526 g となっている。本機体は頭部と胴体部の大きく二つに分けることができる。



図 1: 柔軟外皮装着型魚ロボット [9]

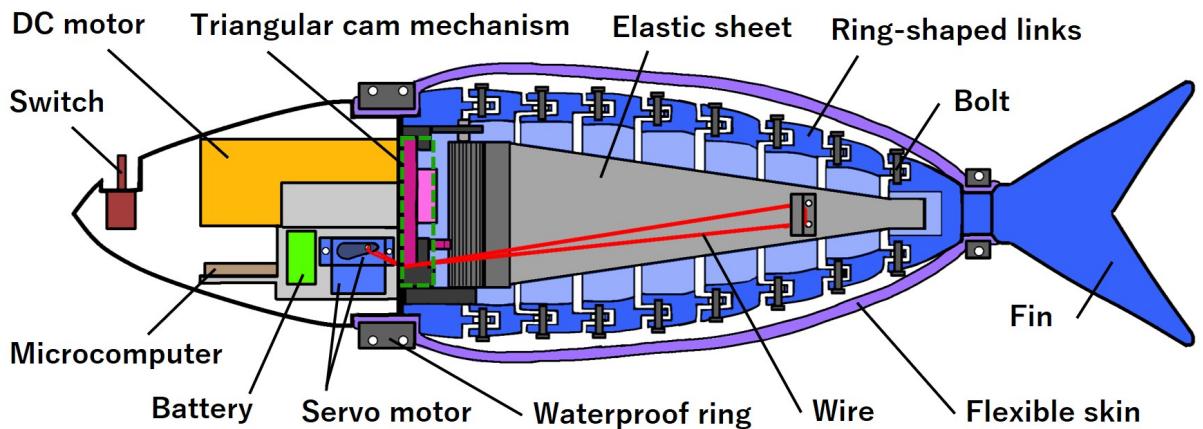


図 2: 柔軟外皮装着型魚ロボットの構造 [9]

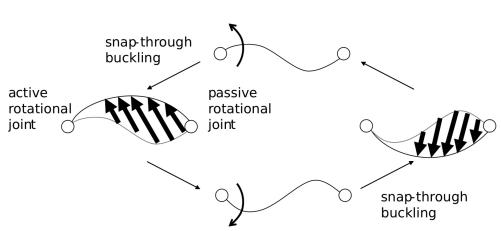


図 3: 飛び移り座屈発生機構の模式図 [9]

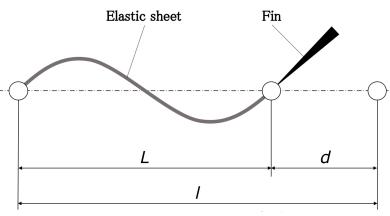


図 4: たわみ長さの定義 [9]

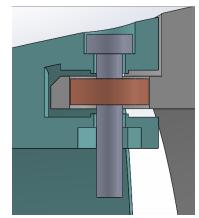


図 5: 関節の構造 [9]

2.1.1 頭部

本機体の頭部には、DC モータ（タミヤ社，AO-8033），サーボモータ（Tower Pro 社，MG92B）二つ，マイコン（M5Stack Technology 社，M5STACK-K051），モータ用 Lipo バッテリ（Hyperion 社，G5 50Cmax 7.4 V-240 mAh），マイコン用 Lipo バッテリ（DATA POWERTECHNOLOGY 社，DTP502535），スイッチが入っている。モータは頭部に収まるものの中でもトルクの強いものが用いられている。また、上に挙げたスイッチ以外の部品はすべて頭部の外殻ではなく内側のふたに取り付けられている。

2.1.2 胴体部

まず、先行研究 [9] で駆動機構として用いられた飛び移り座屈について記す。飛び移り座屈とは、弾性を有する柔軟体の変形によって発生する連続的な現象であり、瞬間的に大きな力を発生させることができる（図 3）。先行研究ではサーボモータを用いて弾性体をたわませ、DC モータを用いて弾性体を変形させることで飛び移り座屈を発生させている。ここで実験に用いる語句とパラメータを定義する。弾性体の自然長を l 、弾性体をたわませた際の軸間距離を L 、弾性体がどの程度たわんでいるかを示すたわみ長さを d として、たわみ長さを $d = l - L$ と定義する（図 4）。

次に胴体部について、胴体部は屈曲可能な 8 関節 9 リンク構造になっており、リンクの接続部は図 5 のようにペアリング（内径 3 mm）とボルト（M2）で接続されている。また、すべてのリンクで合計 90° 曲げるため一関節あたり 11.25° 曲がるよう設計されている。90° という値は、実際のハマチの動く様子から決定している。なお、各リンクには機体を水中に沈めるために板おもり（22 g）を合計 10 枚張り付けてある。次に、飛び移り座屈に用いる弾性体について記す。ここでの弾性体とは外力により曲がる薄い板のことを指す。先行研究では 0.2 mm 厚のステンレス（岩田製作所，SUS02）に加え、弾性を強めるために 1 mm 厚のポリプロピレン（セイワ・プロ社，23-589）を貼り合わせたものを使用している。

2.2 遊泳実験

2.2.1 実験条件

直進遊泳をさせるため、サーボモータを 90° 回し、たわみ長さを 10 mm に固定した。その上で DC モータに印加する電圧を 1.5 V, 2.0 V, 2.5 V に変化させて遊泳を行った。また、

機体内部に防水シールを貼り、遊泳時においても防水ができているか確認する。

2.2.2 実験結果

印加電圧 1.5 V 時の遊泳の様子を図 6 に示す。遊泳には成功したが、遊泳の軌道が少し曲がってしまっていることがわかる。次に印加電圧と遊泳速度の関係を図 7 に示す。電圧が大きくなるにつれて、遊泳速度も大きくなっていることがわかる。本機体の最高遊泳速度は印加電圧 2.5 V 時の 43 mm/s であった。直進遊泳をするはずが少し曲がってしまったことについて、これは、弾性体をたわませる二つの糸の長さが異なることが原因として考えられる。弾性体をたわませる力が左右で違ったことにより飛び移り座屈で発生する力にも左右で差が出てしまうので、結果曲がってしまったと考えられる。次に遊泳速度が遅い原因として 2 つ考えられる。1 つ目はたわみ長さが小さかったことである。たわみ長さや尾びれの振れ角が大きい程飛び移り座屈を発生させたときに放出する力は大きくなるが、飛び移り座屈を発生させるために必要な力も大きくなる。また 2 つ目の原因として、外皮とリンクの間に余分な隙間があったため、リンクの動きを外皮に伝えることができなかつたということが考えられる。遊泳実験を行った後機体を開けてみると、防水シールはわずかに染

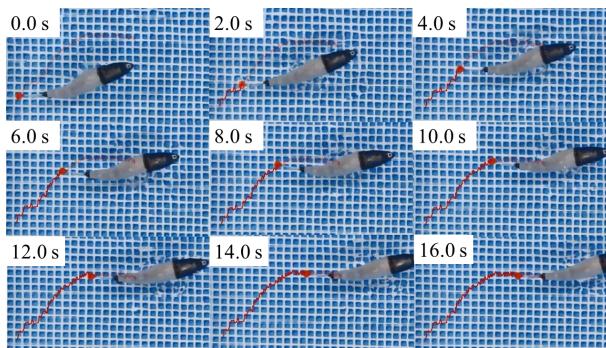


図 6: 遊泳実験の様子 [9]

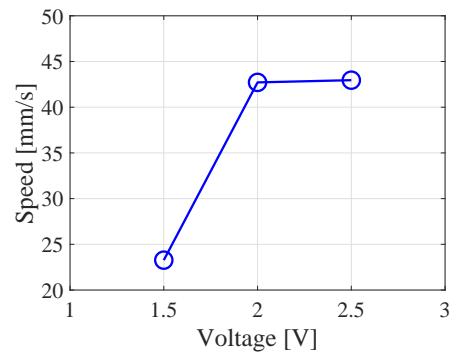
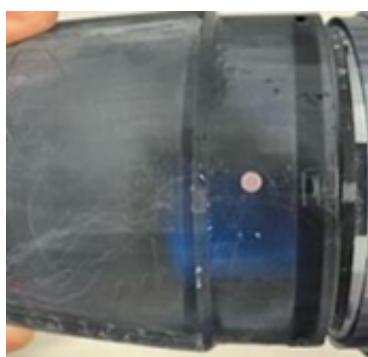


図 7: 印加電圧と遊泳速度の関係 [9]



(a) 赤く染まった防水シール



(b) 機体内部の防水シール



(c) 尾びれ側の防水シール

図 8: 遊泳実験後の防水シールの様子 [9]

まったく一か所を除いてすべて白いままであった（図8）。このことから、機体内部の防水に成功したことが分かる。

2.3 得られた知見

先行研究では柔軟外皮を開発し、柔軟外皮を用いての完全防水に成功した。しかし、柔軟外皮と骨格リンクに隙間ができてしまい、リンクの動きに柔軟外皮を追従させることができなかった。柔軟外皮をリンクに密着させる、または柔軟外皮とリンクを追従させるための構造を開発することによってリンクの動きを柔軟外皮に伝えることが可能だと考える。また、柔軟外皮を用いて胴体部に防水を行っていたため、胴体が浮袋になり重りを多く付ける必要があった。これについては胴体部を柔軟外皮で包んだ上で中に水を入れて浸水させることで、遊泳姿勢を重りを使わずに安定させることができると考える。

3 柔軟外皮を備えたワイヤ駆動式魚口ロボットの開発

前章で述べたように、先行研究 [9] では屈曲可能な胴体を持ち、柔軟外皮を装着して完全防水を可能にした魚口ロボットの開発に成功した。しかし、リンクと柔軟外皮に隙間ができてしまい、リンクの動きを柔軟外皮にうまく伝えることができなかった。そこで本研究では魚らしいしなやかな動きを可能にするワイヤ駆動式の魚口ロボットをベースにリンクに柔軟外皮を追従させ、尾びれのみならず胴体部まで振って泳ぐことが可能なロボットの開発を目指す。本章ではその予備的な開発として、昨年度卒業研究を参考に柔軟外皮を持たないワイヤ駆動式魚型ロボットを開発し、柔軟外皮をどのように組み合わせるべきかなどについて検討を行う。

3.1 ワイヤ駆動式魚型ロボットの動作原理

昨年度卒業研究で提案され、本研究でも採用したワイヤ駆動の動作原理を記す。ロボット前方にはプーリを取り付けたサーボモータを配置し、胴体部には弾性体とそれに固定した骨格リンクを配置する。ワイヤはプーリーから骨格リンクに設けられた穴を通り尾びれ付け根まで伸びており、プーリーを回してワイヤを巻き取ることによって弾性体が曲がり、胴体部を屈曲させることができる。それを左右に繰り返すことで遊泳を可能にする（図9）。

3.2 試作機

3.2.1 試作機の作製

まず、昨年度卒業研究を参考にして試作機を作製した。図10に外観を、図11に構造を示す。構造図は昨年度のものを引用しており、flex sencerは取り付けていない。全長は 530 mm、重量は 478 g である。試作機は頭部と胴体部の二つの部分で構成している。

頭部には制御回路とバッテリーを搭載しており、えらにあたる部分には防水仕様（IP67）のサーボモータ（Flash Hobby, M45CHW）を配置している。サーボモータは 270° 回転できるようになっている。使用マイコンは M5Stamp Pico（M5Stack Technology 社）、使用

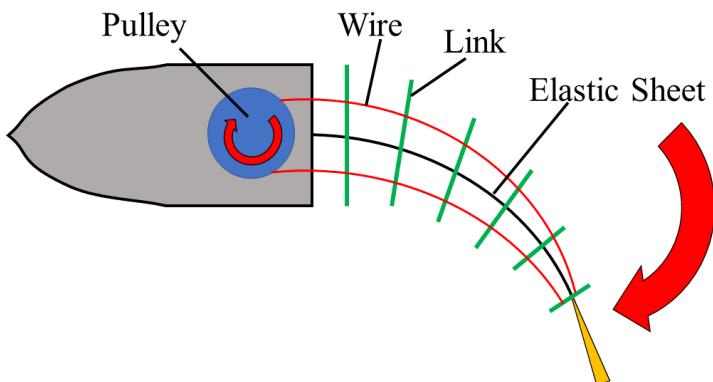


図9: ワイヤ駆動のイメージ



図 10: 試作機の外観

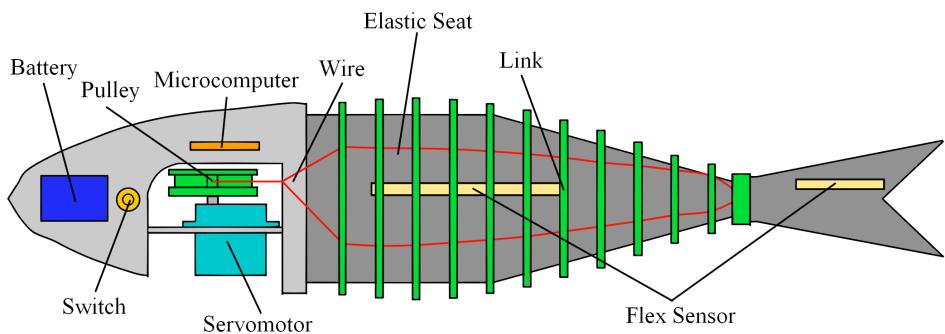


図 11: 試作機の構造（昨年度先行研究より）



図 12: 頭部断面のようす

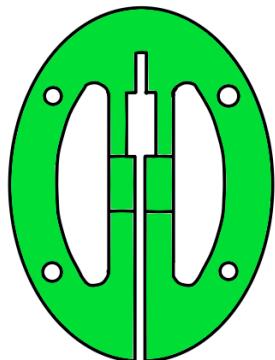


図 13: 骨格リンク

バッテリーはマイコン用の 3.7 V, サーボモータ用の 7.4 V の二つの Li-ion バッテリーを使用している。そのため、頭部は防水が必要となり、頭部の断面に O リングをはめ込むことによって防水を行っている。頭部はネジ穴が空いたものと、ナット用の穴が空いたものに分かれており、これらは M1.7 ネジで固定される。胴体部は骨格リンク（PLA 樹脂）と弾性体（ポリプロピレン板, 厚さ 0.75 mm), 尾びれ (TPU 樹脂, 厚さ 2 mm) で構成されており、骨格リンクは図 13 のように楕円形にして作製し、ワイヤ（ポリエスチル製, 0.40 mm) を通す穴を開けている。



図 14: 頭部下方浸水のようす

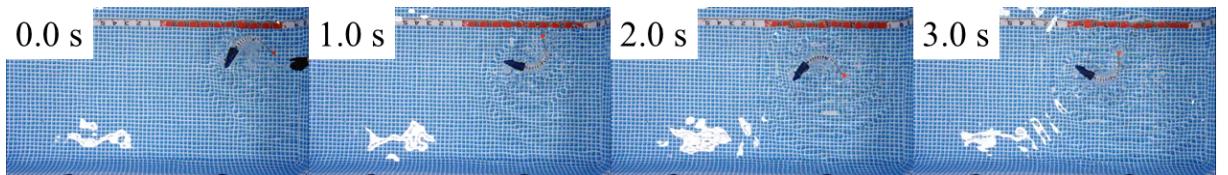


図 15: 遊泳テストの様子

3.2.2 防水テスト・遊泳テスト

機体完成後、防水テストと遊泳テストを行った。まず防水テストは水没すると赤くなるシールを頭部内部に貼り、水深 120 mm の水槽で 2 分間沈める防水テストを 7 回行った。テストごとにねじの締め具合や頭部の歪みを直しながらテストをしたが、完全な防水はできず、7 回目で頭部下方のみの浸水にとどまったのでこれで防水できていると判断した（図 14）。次に遊泳テストを行った。遊泳テストの様子を図 15 に示す。遊泳時に遊泳が止まることが事もなく、昨年度卒業研究のように魚らしいしなやかな遊泳をすることができた。

3.2.3 試作機から得られた知見

試作機の作製・動作確認を通して得られた知見を述べる。まず、頭部をネジと O リングを用いて防水する方法は完全な防水に至らないと考えられる。また、頭部を固定するネジが多いと、バッテリー交換がしにくく、メンテナンス性が悪くなるということも分かった。以上のことから防水方法を変更し、メンテナンス性を向上させた頭部に改良することが必要だと考える。そこで防水を比較的容易にでき、完全防水を実現できるシリコン製の柔軟外皮を用いて頭部の防水を行うようにする。また、骨格リンクをはめられるような溝を胴体にかぶせる柔軟外皮の内部に作製することでリンクと外皮の追従を行う。

4 柔軟外皮装着型ワイヤ駆動式魚口ボット

本章では先行研究 [9] や試作ロボットから得られた知見をもとに開発した、柔軟外皮とリンクが連動し、完全防水可能かつメンテナンス性を向上させた柔軟外皮装着型のワイヤ駆動式魚口ボットについて述べる。

4.1 口ボット概要

図 16(a) に開発した機体の外観を、図 16(c) に構造を示す。開発した魚口ボットは体長 470 mm、重量は重り (25 g) を含めて 710 g である。ロボットの外形は昨年度卒業研究において

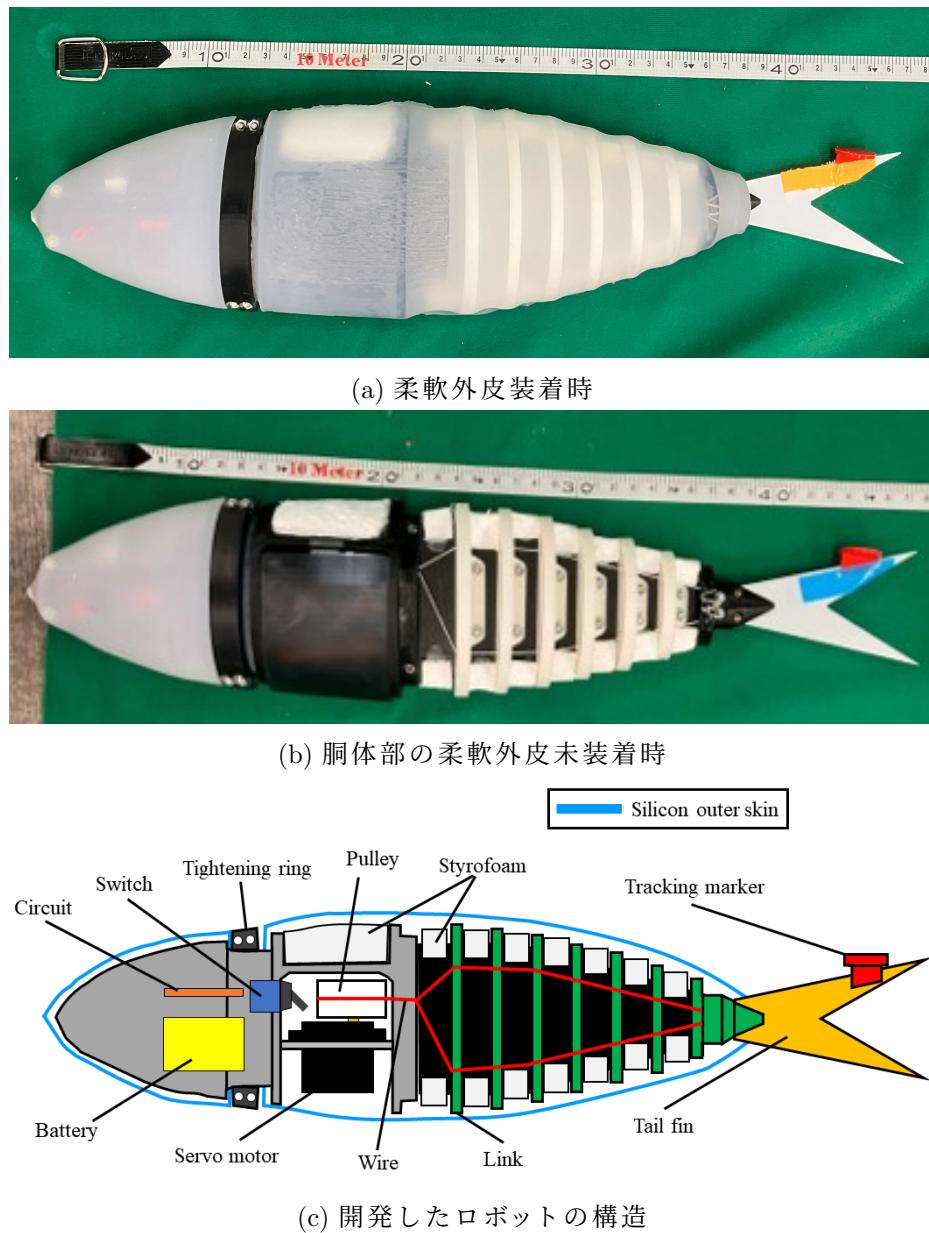


図 16: 開発した柔軟外皮装着型ワイヤ駆動式魚口ボット

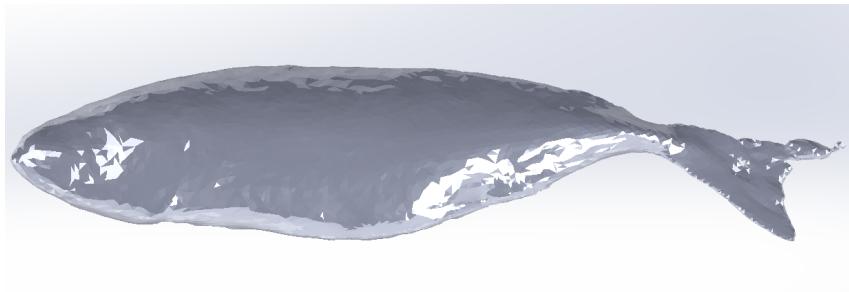


図 17: アジの 3D スキャンデータ

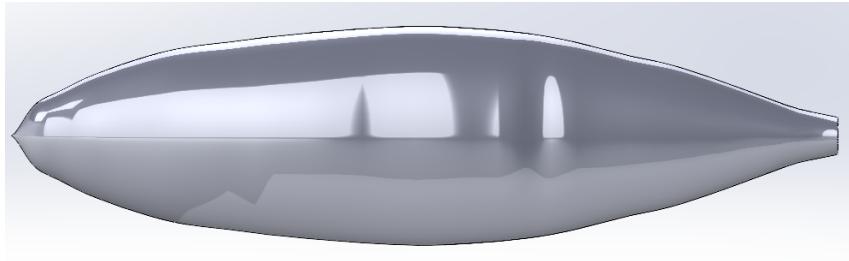


図 18: アジの 3D モデルデータ

アジのスキャンデータ（図 17）から作製したモデルデータ（図 18）をもとに作製し、サイズは 2 倍とした。本機体は頭部・胴体部・外皮の 3 つからなり、頭部と胴体部をそれぞれ別の柔軟外皮で包む構造になっている。また、頭部は防水区画とし、胴体部は水中姿勢を水平にするために浸水させた。

4.2 頭部

頭部はフレーム部分とシリコン製の外皮部分からなる。フレーム部分は光造形方式の 3D プリンタで作製しており、胴体前部と一体となっている。フレーム内部にはバッテリーと制御回路を搭載しており、使用するバッテリー、マイコン共に試作機と同じものを用いた。バッテリーとマイコンを搭載する都合上頭部を防水する必要があり、試作機から得た知見をもとに今回は O リングによる防水ではなく、シリコン製の柔軟外皮を用いて防水を行った。防水方法としてはシリコン製の柔軟外皮を頭部にかぶせ、根元を防水リングによって締め付けることで防水を行った（図 19）。防水リングのサイズは [11] を参考に締め付ける部分が短径、長径ともに 10 % つぶせるように設計した。また、試作機と同様に防水実験を 1 回行ったが、内部に貼ったシールはどれも赤く染まらず、完全な防水ができた（図 20）。また、フレーム部分は上部と下部のカバーが開くようになっており、メンテナンス性向上のためにねじ止めではなくワンタッチでカバーを開閉できるようにしている（図 21, 22）。それに加えて制御回路とバッテリーを取り出しやすくするためにねじで固定するのではなく、図 23, 図 24 のように溝にはめストップバーをつけることで頭部に配置している。

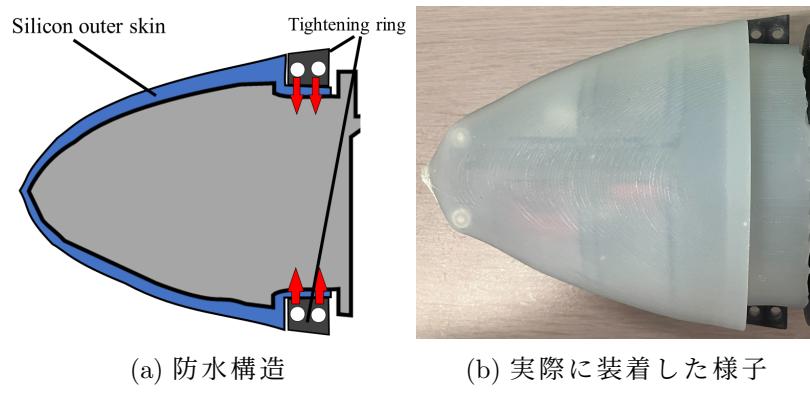


図 19: 頭部防水

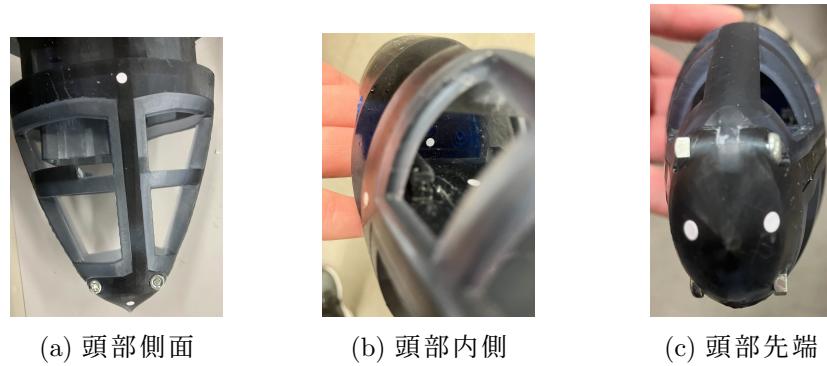
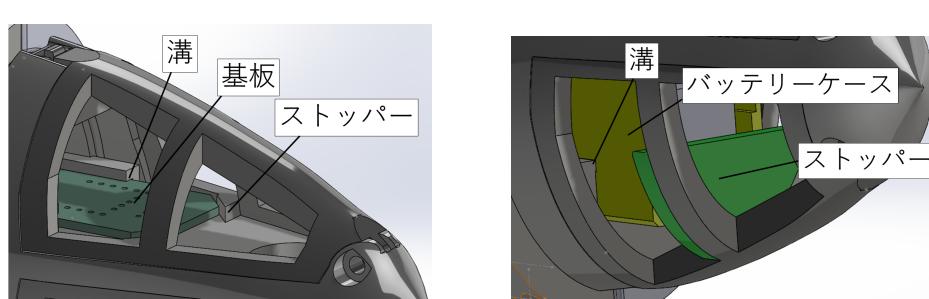
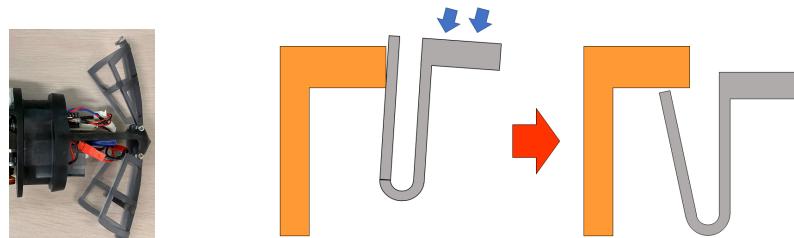


図 20: 防水実験後のシールの様子



4.3 胴体部

胴体部は細かく分けて駆動部、弾性体部、尾びれ部で構成されている。駆動部は頭部と一体化しており、試作機と同じサーボモータを配置し、プーリー（PLA樹脂）を取り付けている。昨年度卒業研究では頭部にサーボモータを配置していたが、今回は先行研究[10]で示された胴体後半部のみ体をしならせ遊泳するアジ型遊泳の特徴に従い、胴体後半部のみを屈曲できるような位置にサーボモータを配置した。また、サーボモータの信号線を制御回路側につなげるために防水キャップコン（オーム電機、OA-WS04M-20/25）を取り付けた。さらに電源スイッチも配置している（図25）。また、駆動部には図26のようなカバーをかぶせ魚らしい形状になるようにしている。

弾性体部は弾性体（ポリプロピレン板、厚さ0.75 mm）と骨格リンク（PLA樹脂）、ワイヤ（ポリエチル製、0.40 mm）で構成している。骨格リンクは厚みを6mmで作製し、14 mm間隔を空けながら配置した。リンクには図のようにワイヤを通すために2 mmの穴を4カ所開けており、さらに胴体内部を浸水させるために大きめの穴を6個開けている（図27）。また、リンクと弾性体はネジを用いて二点止めし、外皮の動きによってリンクがずれないよう工夫した（図28）。

尾びれ部は図29のように尾びれ本体（ポリスチレン製薄板、厚さ0.3 mm）と骨格リンクの一部で構成している。尾びれに関しては先行研究[2]より推進性能が高いと示された材料と厚みを使用しており、形状に関してはアジの3Dスキャンデータからサイズを決定した。

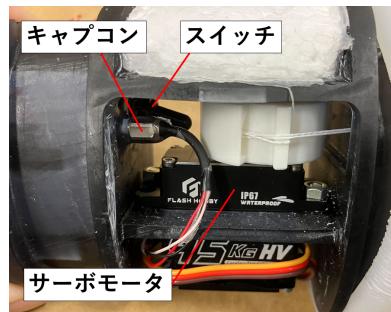


図 25: 駆動部



図 26: 駆動部カバー

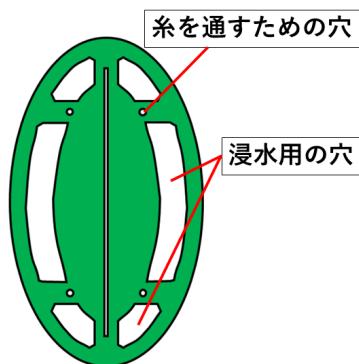


図 27: 骨格リンク



図 28: 弾性体部



図 29: 尾びれ部

骨格リンクは尾びれを固定するための固定部を設け、尾びれが折れないようにTPU樹脂で作製し、根元を三角形状にすることで折り目がつかないようにした。また、尾びれにはトラッキング用のマーカー(PLA樹脂)を取り付けた。

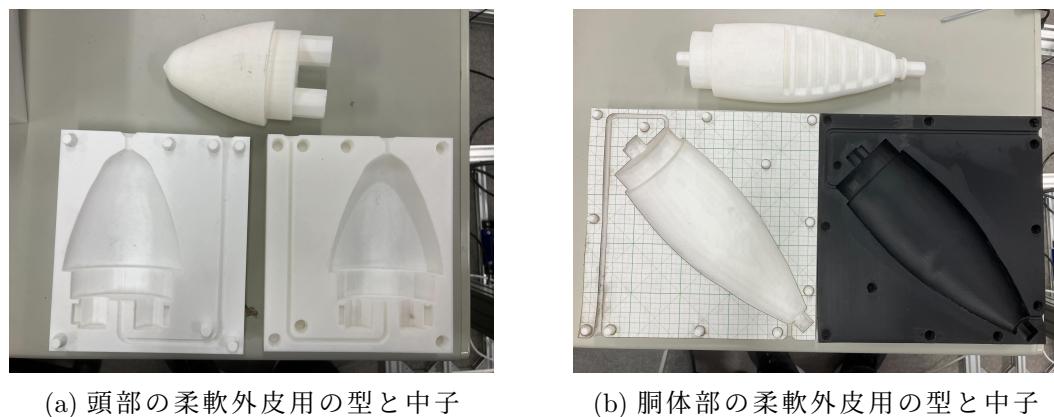
4.4 柔軟外皮

柔軟外皮は頭部と胴体部用に二つ作製した。今回は先行研究[9]を参考に柔軟外皮を作製するため鋳造のように型にシリコン(Smooth-On社, ECOFLEX30)を流し入れることによって柔軟外皮の作製を行った。図30に作製・使用した型と中子をそれぞれ示す。ここで中子とは鋳造において中空部を作るために使われているもので、型の間にはめ込んで使用する。この製作方法において柔軟外皮の外寸サイズを決定するのは型に作るくぼみ、内寸サイズを決定するのは中子となる。したがってここから型のくぼみのサイズを柔軟外皮の外寸、中子のサイズを柔軟外皮の内寸と呼ぶ。

まず頭部用の柔軟外皮について、柔軟外皮の内寸は柔軟外皮と頭部が密着するようにアジの3Dモデルの頭部のサイズをそのまま使用した。外寸については体高方向に2mm、体幅方向に3mmの厚みになるようにアジのモデルデータの頭部をx軸方向に1.15倍、y軸方向に1.09倍、z軸方向に1.07倍したサイズを使用した。

次に胴体部の柔軟外皮について述べる。リンクの動きに柔軟外皮を追従させるために柔軟外皮内部に骨格リンクをはめ込めるような溝を作製し、しわができるないように柔軟外皮の内寸をロボットの胴体サイズの90%のサイズで作製した。サイズを小さめに作製することにより常に外皮にテンションがかかり、しわが寄らないようになった。溝の間隔もロボット胴体サイズの90%になるようにリンク間距離14mmの90%の長さにあたる12.6mm間隔で作製した。溝の深さは骨格リンクに通すワイヤに干渉しないかつ溝から外れないように5mmで設計した。図31に作製した柔軟外皮を示す。

胴体部の柔軟外皮はリンクを溝にはめ込むことである程度固定される。また柔軟外皮の頭部側の端を防水リングを締め付ける溝の部分にひっかける事によってさらに固定をしている(図32の赤丸の部分がひっかけている箇所)。



(a) 頭部の柔軟外皮用の型と中子

(b) 胸体部の柔軟外皮用の型と中子

図 30: 作製した型と中子



図 31: 作製した外皮

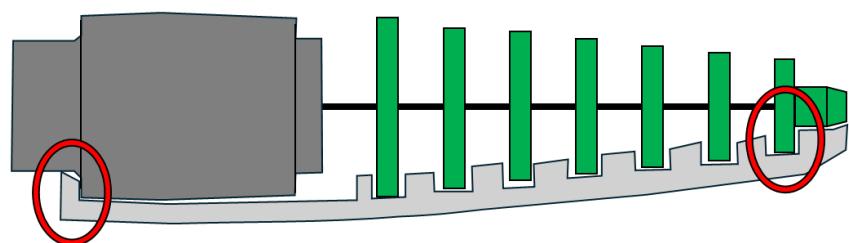


図 32: 胸体部の柔軟外皮の固定

5 遊泳実験

外皮の有無による遊泳性能への影響を検証するために、柔軟外皮未装着時と柔軟外皮装着時それぞれで直進遊泳実験を行った。

5.1 実験条件

実験においてはサーボモータにステップ状の入力を与え、ワイヤを断続的に左右に巻き取ることで胴体を振る動作を実現した（図33）。 T [ms] は入力の周期、 θ [deg] はブーリの回転角（糸の巻き取り量）を表している。遊泳実験ではこの周期から決定される尾びれ周波数と、ワイヤの巻き取り量から決定される尾びれ振幅の2つをパラメータとした。尾びれ周波数は尾びれを振る頻度を決定するパラメータであり、 $f = 1/T$ [Hz] で算出する。尾び

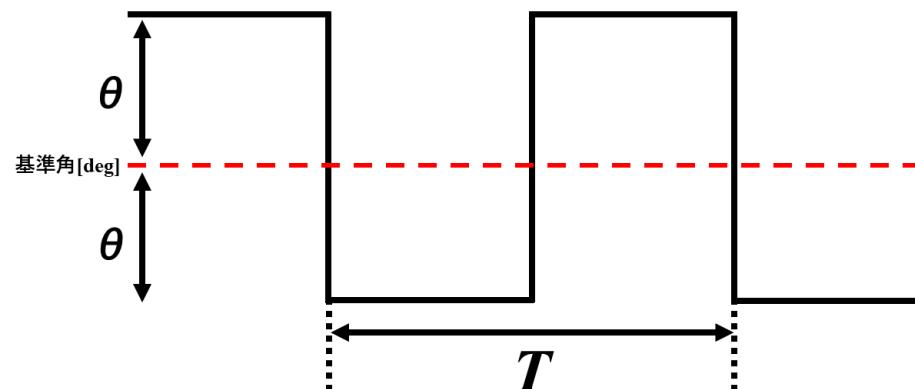


図 33: サーボへの制御入力

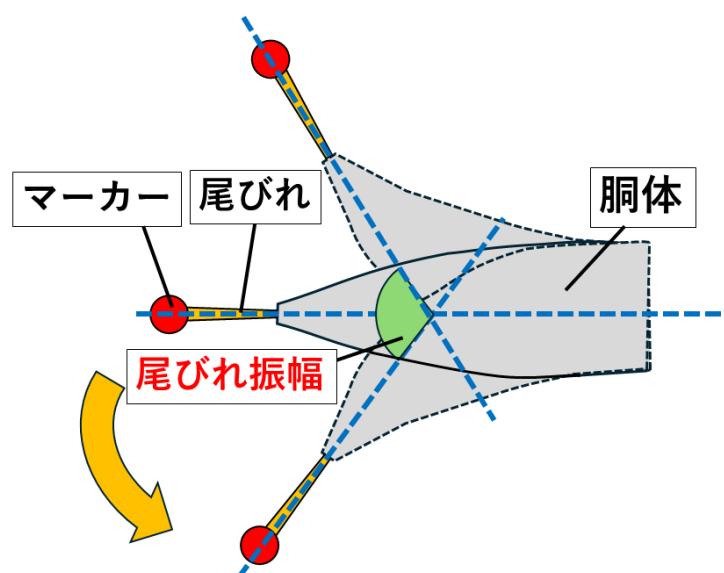


図 34: 尾びれ振幅

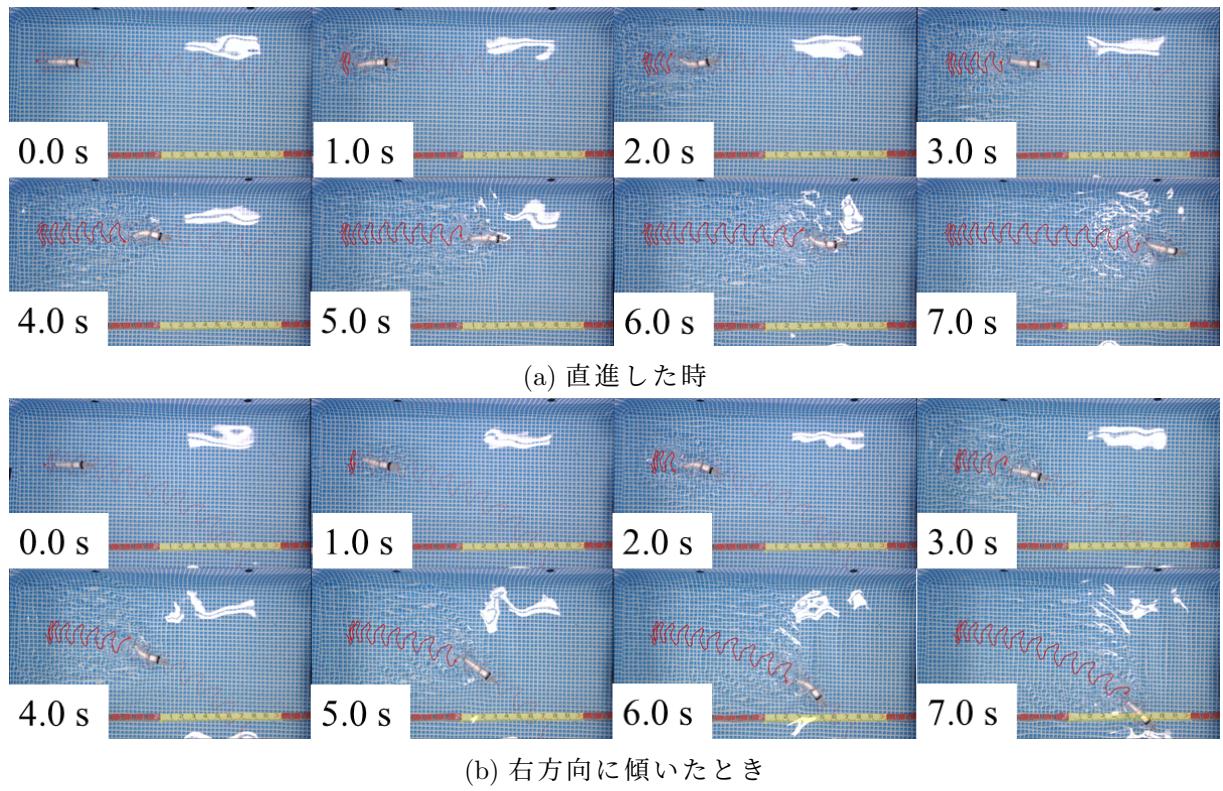
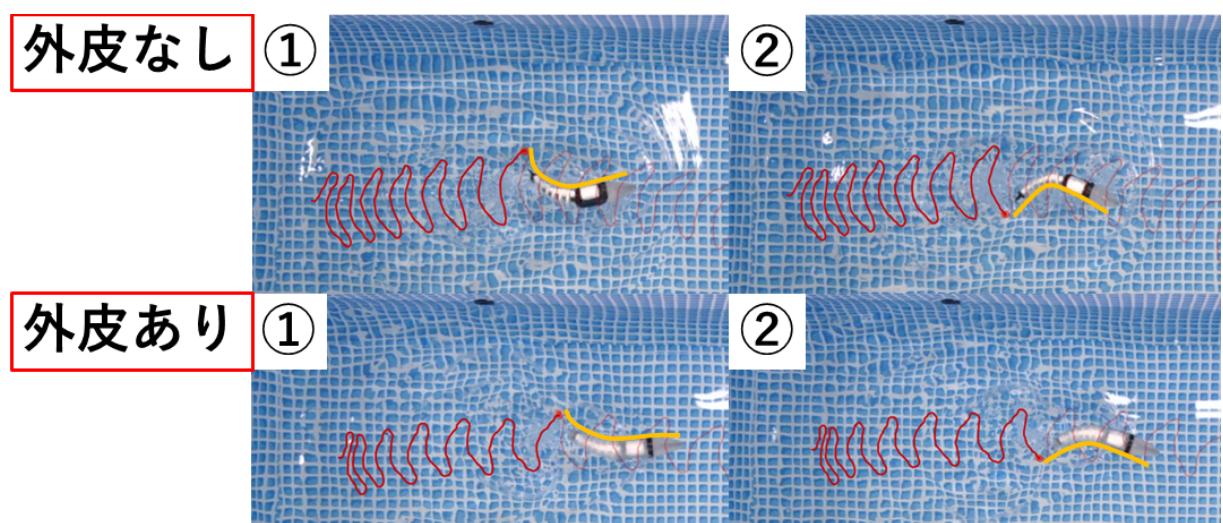
れ振幅は体をどのくらい屈曲させるかのパラメータであり、ワイヤの巻き取り量が多いほど大きくなる（図34）。柔軟外皮未装着の状態で、空中にて動作させた様子からトラッキングソフト「kinovea」を用いて調べた結果、プーリの回転角が 30° , 45° , 60° のとき、尾びれ振幅はそれぞれ 81° , 114° , 168° であったため、尾びれ振幅についてはこの3種類を実験に用いることとした。

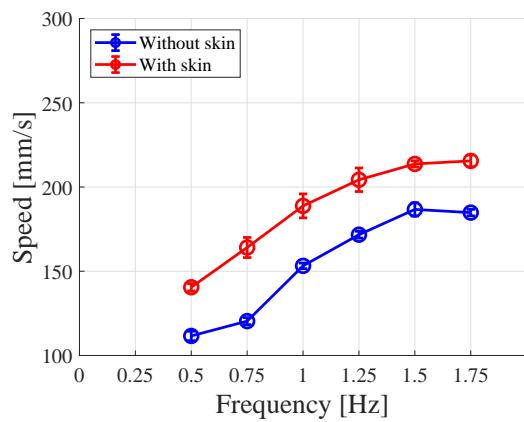
実験は直進遊泳とした。尾びれ振幅は 81° , 114° , 168° の3パターン、尾びれ周波数は0.5～1.75 Hzまで0.25 Hz刻みで6パターン、さらに柔軟外皮の有無で2パターン、合計36パターンのパラメータセットについて実験を行った。実験は各パラメータセットにつき3回行い、得られた遊泳速度のデータから平均、分散、標準偏差を算出した。遊泳実験は室内に設置された $1.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ のプールにて行い、その様子を天井に取り付けたカメラにて撮影を行った。その動画から、ロボット尾びれに取り付けたマーカーをkinoveaでトラッキングして尾ビレ軌跡を取得する。さらに尾びれ軌跡のトラッキングデータを二次近似し、積分して遊泳距離を算出し、遊泳時間で除算して遊泳速度を算出する。なお遊泳開始直後を過渡状態とみなし、遊泳速度は遊泳開始時点から500～1500 mmの範囲のデータを用いて算出した。

5.2 実験結果

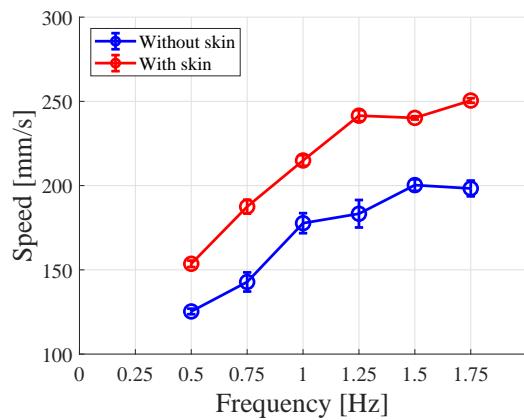
図35に柔軟外皮を装着した状態で尾びれ振幅 168° 、尾びれ周波数1.75 Hzの時の遊泳実験の様子を示す。全ての遊泳実験において頭部に浸水することなく、バッテリーの交換やメンテナンスなども試作機と比べてスムーズに行うことができた。また、柔軟外皮はリンクにうまく追従して遊泳し、胴体を屈曲させたときにしわがよることもなかった。しかし、遊泳時の様子を見ると同じパラメータでも図36のように柔軟外皮装着時に尾びれの振りの大きさが未装着時よりも小さくなる傾向があった。また、すべての遊泳実験で図35(a)のように直進させたかったが、図35(b)のように進行方向が右に傾いたり左に傾いたりしてしまう時があった。

次に実験結果から遊泳速度を計測した結果を図37に示す。グラフのエラーバーは標準偏差を示している。グラフから、まず柔軟外皮あり・なし両方に共通して尾びれ周波数が高くなるほど遊泳速度が大きくなっていることがわかる。また、すべての実験において柔軟外皮装着状態の方が未装着時よりも遊泳速度が速くなっている。さらに尾びれ振幅が大きくなるにつれて柔軟外皮装着時と未装着時における速度差が大きくなることも分かった。しかし、柔軟外皮未装着の状態だと振幅が大きくなってしまって最高速度にそこまで差が生まれていないことがわかる。また、今回の実験において最高速度は柔軟外皮を装着し、振幅 168° 、周波数1.75 Hz時の 278.2 mm/s であった。

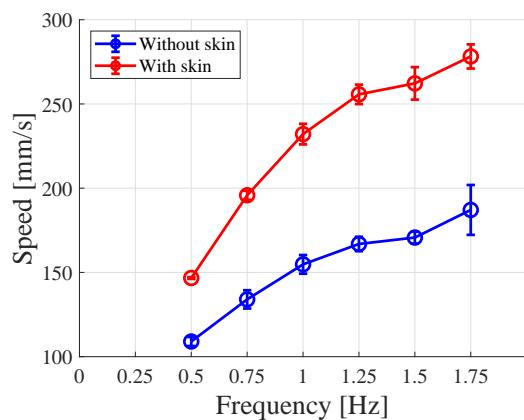
図 35: 振幅 168° , 周波数 1.75 Hz の時の遊泳実験の様子図 36: 振幅 168° , 周波数 1.75 Hz のときの柔軟外皮あり・なしそれぞれの遊泳実験の様子



(a) 尾びれ振幅 81° の場合



(b) 尾びれ振幅 114° の場合



(c) 尾びれ振幅 168° の場合

図 37: 遊泳速度、尾びれ振幅および尾びれ周波数の関係

5.3 考察

まず、柔軟外皮あり・なしで尾びれの振り幅に差が出てしまった（図36）ことについて考察する。原因としては柔軟外皮に作った溝が胴体の屈曲を阻害し、本来胴体が屈曲するはずだった位置まで動くことができなかつたと考えられる（図38）。実際に柔軟外皮を装着した状態で空中で振幅を測定した結果、ブーリの回転角が 30° , 45° , 60° のとき、尾びれ振幅はそれぞれ 81° , 88° , 128° となった。本来の尾びれ振幅 81° , 114° , 168° と比較すると約 40° 差があることがわかった（表1）。ここで柔軟外皮なし・サーボ巻取り角 30° の時 81° 、柔軟外皮あり・サーボ巻取り角 45° の時 88° であり、比較的尾びれ振幅の条件としては近いことに着目する。このときの最高遊泳速度は外皮なしのとき 186.7 mm/s 、外皮ありのとき 250.5 mm/s で外皮ありの条件の方が速い。これらのことから、柔軟外皮をつけることにより尾びれ振幅が小さくなってしまうというデメリットはあるものの、遊泳速度に関しては柔軟外皮をつけることによって向上すると言える。また尾びれ振幅が小さくならないような構造を実現することができれば、今回の結果よりもさらに優れた遊泳性能を示すと考えられる。

次に遊泳時に進行方向が傾いた（図35）ことについて考察する。昨年度卒業研究ではワイヤーの張力が左右に偏ることによって進行方向が傾いていたため、今回の実験では、ワイヤーの張力が左右に偏るのを防ぐために、サーボモータの基準角度を変更することで左右の張力が偏らないようプログラムを組んでいた。しかし、基準角をプログラムで調整しても進行方向が少し傾いたり、遊泳実験をしている最中に今まで直進していた設定の時に

表 1: サーボ巻き取り角と尾びれ振幅の関係

サーボ巻き取り角 [deg]	実験で使用した振幅 [deg]	外皮装着時の振幅 [deg]
30	81	62
45	114	88
60	168	128

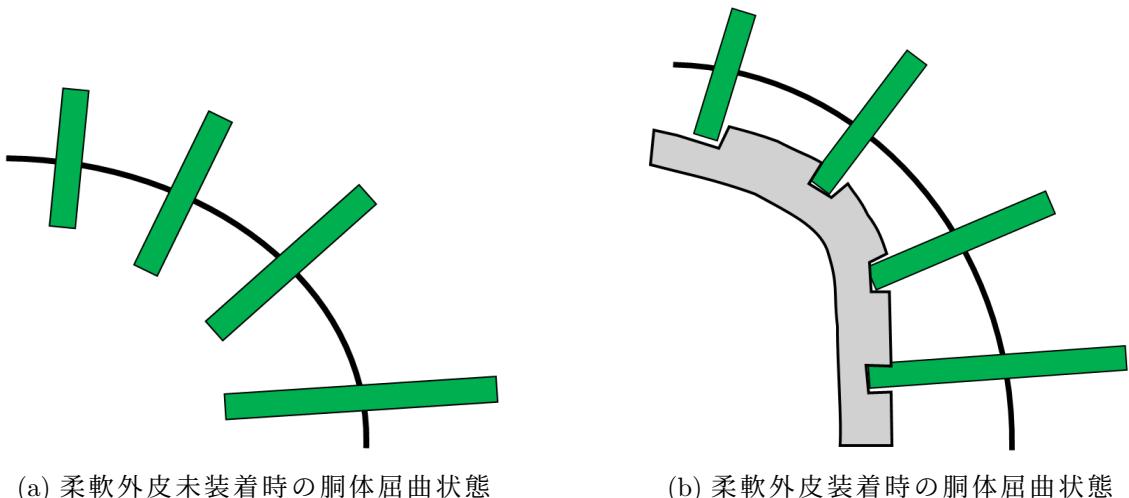


図 38: 柔軟外皮による胴体屈曲への影響

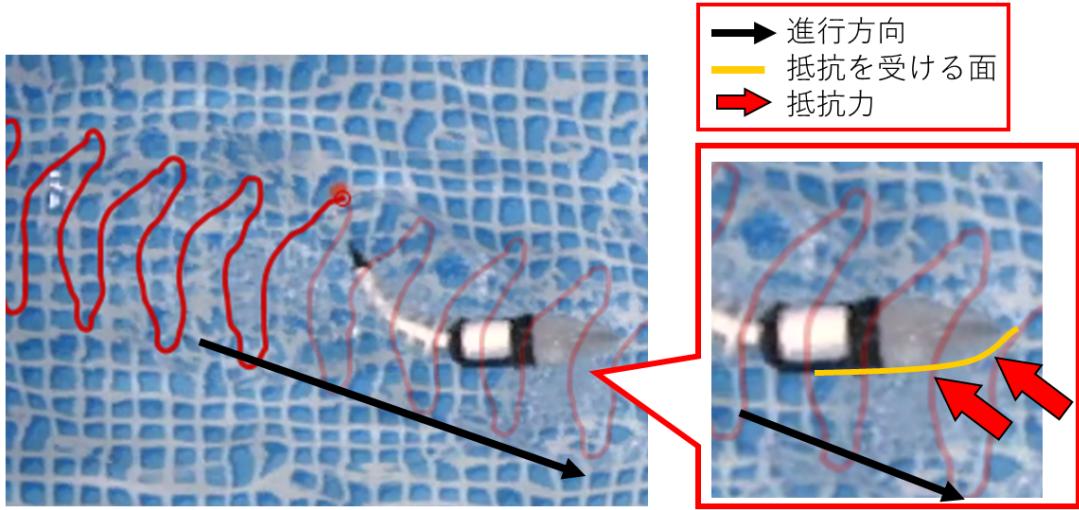


図 39: 柔軟外皮未装着時に受ける抵抗

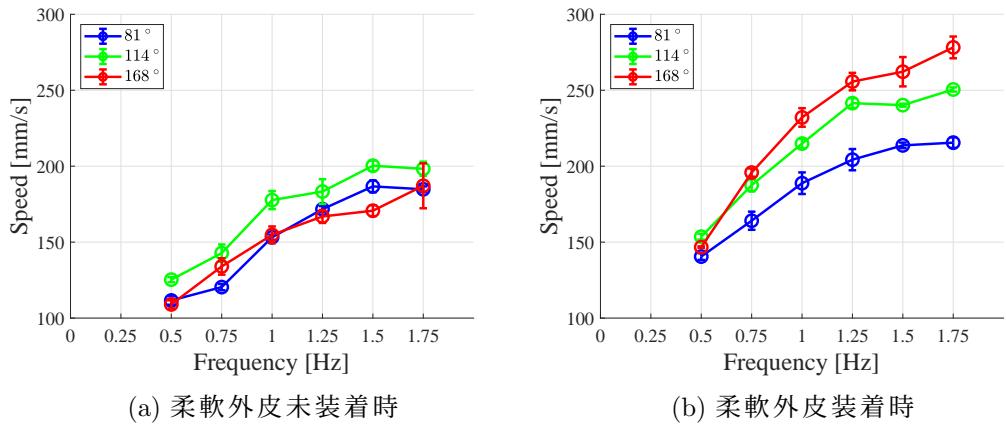


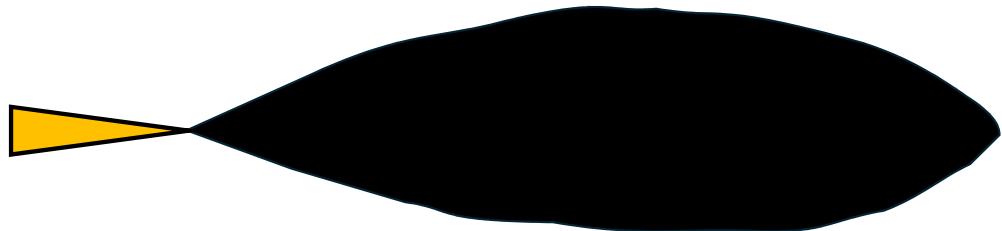
図 40: 柔軟外皮未装着時・装着時それぞれの遊泳速度、尾びれ振幅および尾びれ周波数の関係

進行方向が曲がってしまうことがあった。原因として考えられることは2つある。1つ目は柔軟外皮を装着することによって胴体を屈曲させるためのトルクが増大し、それに伴って糸が伸びた、またはたるんでしまったということが考えられる。2つ目はスタート時の姿勢が若干左右どちらかに傾いてしまったことにより、結果として左右に進行方向が傾いているように見えたと考えられる。改善策として、糸の張力を一定にできる治具をロボットに取り付ける、もしくは使用するワイヤを現在使用しているワイヤよりも強度が高いものに変更するといったことがあげられる。

次に柔軟外皮なしの状態の時に振幅の変化によってそこまで速度に大きな変化が無かった(図37)ことについて考察する。柔軟外皮無しで振幅168°、周波数1.75 Hz時の遊泳時の様子を見てみると(図39)推進時に体が大きく屈曲してしまい、進行方向からの抵抗力を頭部と胴体部の一部で受けてしまっていることがわかる。これによって本来その振幅で得られるはずだった推進力が低減し、遊泳速度が振幅によって変化しなかったと考えられる。

次に高周波数域において柔軟外皮が遊泳性能に与える影響について考察する。図40に柔

外皮有り 流線形のボディ



外皮無し 半流線型のボディ

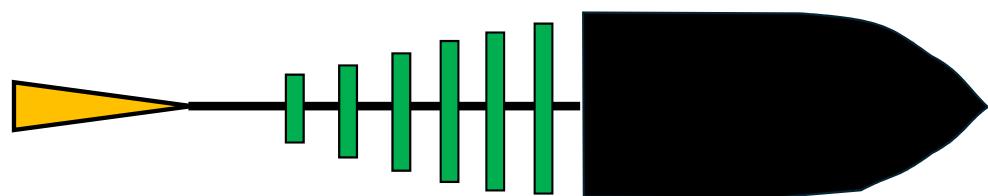


図 41: 外皮の有無によるボディの違い

軟外皮あり・なしそれぞれの結果を1つのグラフにまとめたものを示す。グラフから低周波数域においては柔軟外皮あり・なし両方において振幅による速度の変化はそれほど大きくなかった。しかし、高周波数域を見てみると、柔軟外皮未装着時では振幅によってそこまで遊泳速度に差がないのに対し、柔軟外皮装着時は振幅が大きくなるほど遊泳速度に差が出ていることがわかる。このことから高周波数域において柔軟外皮は遊泳性能に大きな影響を与えると考えられる。

最後に柔軟外皮を装着することによってなぜ遊泳速度が向上したのかについて考察する。要因として考えられるのは柔軟外皮装着時と未装着時でボディが異なっていることである。柔軟外皮未装着時のボディは半流線型のボディになっているのに対し、柔軟外皮装着時は流線型のボディになっている（図 41）。ここで流線型のボディはほかの形状に比べて物体の正面と背面の圧力差によって生じる圧力抵抗を低減することができる。したがって、ロボットのボディを流線型にすることによって水中で受ける抵抗力が減り、その分推進力が増大したと考えられる。このことから、魚型ロボットに流線型のボディを備えることは遊泳性能の向上につながるといえる。

5.4 今後の展望

本研究では魚ロボットを用いて直進遊泳実験を行い、結果としてリンクの動きに追従できる柔軟外皮の開発に成功し、柔軟外皮によって遊泳速度が向上することも確かめられた。しかし、柔軟外皮によって胴体の屈曲が阻害され、目的の振幅を得られないという問題があった。これについては柔軟外皮内部に作る溝の幅をあえてリンクより広めの幅で作製するか、サーボモータをより高トルクなものに変更することで解決できると考えられる。

ハード面では、本実験で用いた防水処理（IP67）を施されていたサーボモータが2回水没してしまったので、防水規格がIP68のモータに変更した方がよいと考える。また、本研究の実験結果から柔軟外皮装着時は周波数が高く、尾びれ振幅が大きいほど遊泳速度が向上するということがわかったが、この結果をもとにさらに速い速度で遊泳させようと周波数をだんだん高くすると、サーボモータが指令角度に到達する前に次の動作に移り、結果として尾びれ振幅が小さくなってしまう可能性がある。そこで今後はより多くの周波数で実験が可能になるようにサーボモータよりも細かな制御が可能なブラシレスDCモータを使用し、遊泳速度の向上を図りたい。

また、遊泳形態について、本研究では直進性能しか検証できていないため、急旋回実験を行って旋回速度や旋回角度などの旋回性能を検証したい。そして最終的には柔軟外皮の表面にウロコを配置し、対衝撃性能や遊泳性能への影響を検証し、魚らしい見た目を持った高機動性を有する魚ロボットの開発を目指す。

6 結言

本研究では柔軟外皮を有するワイヤ駆動式魚型ロボットを開発し、外皮による遊泳性能の検証を行った。遊泳実験ではリンクの動きに追従して外皮が動作することを確認でき、先行研究 [9]での課題を解決できた。また、シリコン製の柔軟外皮によって完全な防水を実現でき、これによって頭部のメンテナンス性も向上し、バッテリー交換も容易に行うことができた。

実験結果からは、外皮を装着することにより遊泳速度が向上し、尚且つ高周波域において遊泳性能に大きな影響を与えることがわかった。このことから、外皮を装着して流線形のボディを魚ロボットに備えさせることは、遊泳性能を向上させるのに非常に有効であると考えられる。

今後は急旋回実験や自由軌道実験を行い、さらなる性能の検証や泳ぎ方による遊泳性能への影響を検証する必要性がある。また、アクチュエータを変更することでさらに推進性能を向上させ、高速遊泳の実現を目指す。そして最終的にはウロコを装着して、魚らしい見た目を持った高機動性を有する魚ロボットの開発を目指す。

7 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの場面で助言、提案をしてくださった中西大輔先生に心から感謝申し上げます。また、共に研究し、様々なご協力をいただきました中西研究室の皆様に、心から感謝いたします。

8 参考文献

- [1] 平田宏一, 春海一佳, 瀧本忠教, 田村兼吉, 牧野雅彦, 児玉良明, 富田宏. 魚ロボットに関する基礎的研究. 海上技術安全研究所報告, Vol. 2, No. 3, pp. 281-307, 2003.
- [2] 高田洋吾, 中西志允, 荒木良介, 脇坂知行. Piv 測定と 3 次元数値解析による小型魚ロボット周りの水の流動状態と推進能力の検討(機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 76, No. 763, pp. 665-672, 2010.
- [3] 高田洋吾, 中村毅志, 小山圭介, 田尻智紀. 色情報に基づく小型魚ロボット focus の目標物追従制御. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 792, pp. 2924-2934, 2012.
- [4] 中西大輔, 山根拓真, 末岡裕一郎, モータ・ワイヤ駆動併用型飛び移り座屈機構を用いた魚型ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020, 1P1-C04, 2020
- [5] 末岡裕一郎, 花原健太郎, 中西大輔, 大須賀公一. ワイヤ駆動の飛び移り座屈機構を搭載した魚型ロボットの大振幅遊泳. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2020, 1P1-C05. 一般社団法人日本機械学会, 2020.
- [6] 板垣達也, 中西大輔. しなやかな胴体を有する飛び移り座屈駆動式魚型ロボットの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2021, 2P3-H10. 一般社団法人日本機械学会, 2021.
- [7] 中西大輔, 吉岡祐亮, ワイヤ駆動と連続飛び移り座屈機構を併用した魚型ロボットの開発, 第 23 回 公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 1P3-H05, 2022.
- [8] 中西大輔, 高橋海成, 飛び移り座屈駆動式魚型ロボットによる旋回遊泳の実現, 第 24 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), 2C4-05, 2023.
- [9] 中西大輔, 石原康平, 柔軟外皮を有する飛び移り座屈駆動式魚型ロボットの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024, 2P2-B10, 2024.
- [10] 神部勉, 魚の運動と渦. nagare, 1976, 8.3: 2-10.
- [11] 朝日電装株式会社, "シール技術", 要素技術, https://www.ad-asahidenso.co.jp/technology/water-proof_dust-proof/sealing/, (参照 2024-12-13)

A 付録

A.1 外皮作成方法

本研究において、外皮は先行研究 [9] を参考に作製したが、型の準備手順を一部変更したので以下に記す。

1. 型やシリコンと振れる面に離型剤 (GSI クレオス社, VM008) を塗る。これは、外皮が完成した際にシリコンが型や中子からはがれやすくなるために使用する。
2. 離型剤が乾いたら型で中子を挟む。この時、先行研究 [9] ではゴムシートを挟んでシリコンが漏れ出ないようにしていたが、本研究では図 1 のような厚紙 (大創産業社製、工作用紙) を使用した。
3. 型を板で挟み、板ごと万力で固定したら型の準備は完了。

A.2 作製した基板

本研究で作製した基板について述べる。本基板は基板 CAD 「EAGLE」で設計を行い、基板加工機 (LPLF ProtMat S43) を使用して作製した。駆動部と制御部は電気的に絶縁し、フォトカプラ (Isocom Components 製、TLP621-2) を用いて制御信号をモータ側に伝えている。図 2 に設計した基板を、図 3 に回路のブロック図を示す。

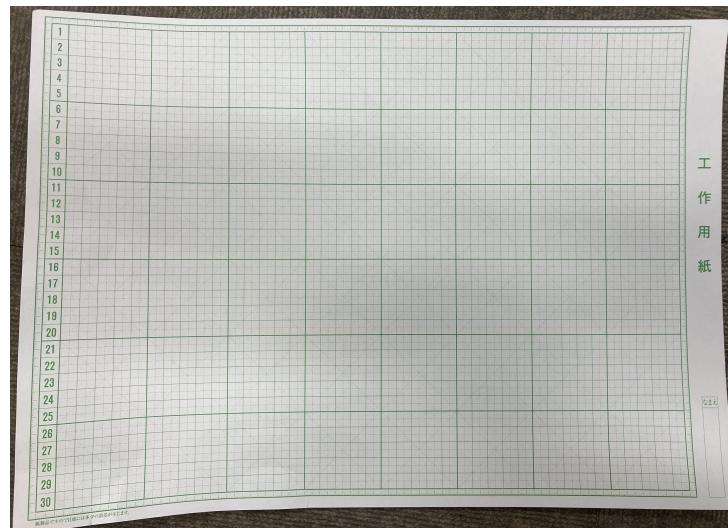


図 1: 使用した厚紙

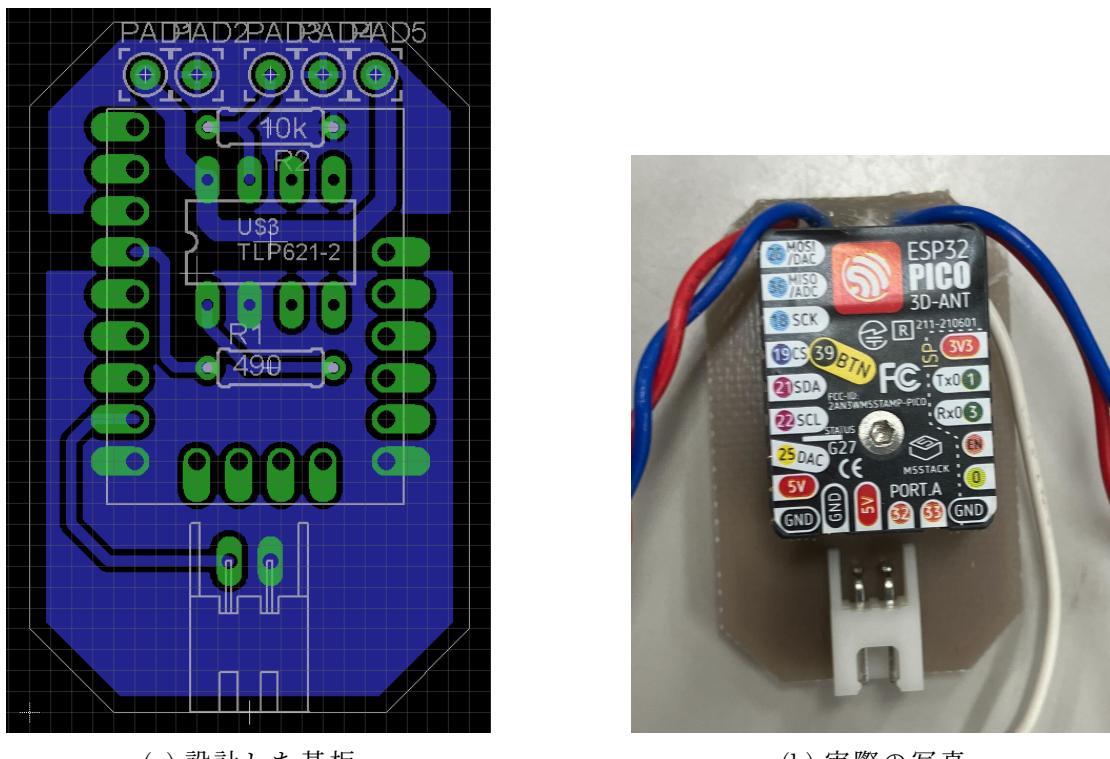


図 2: 作製した基板

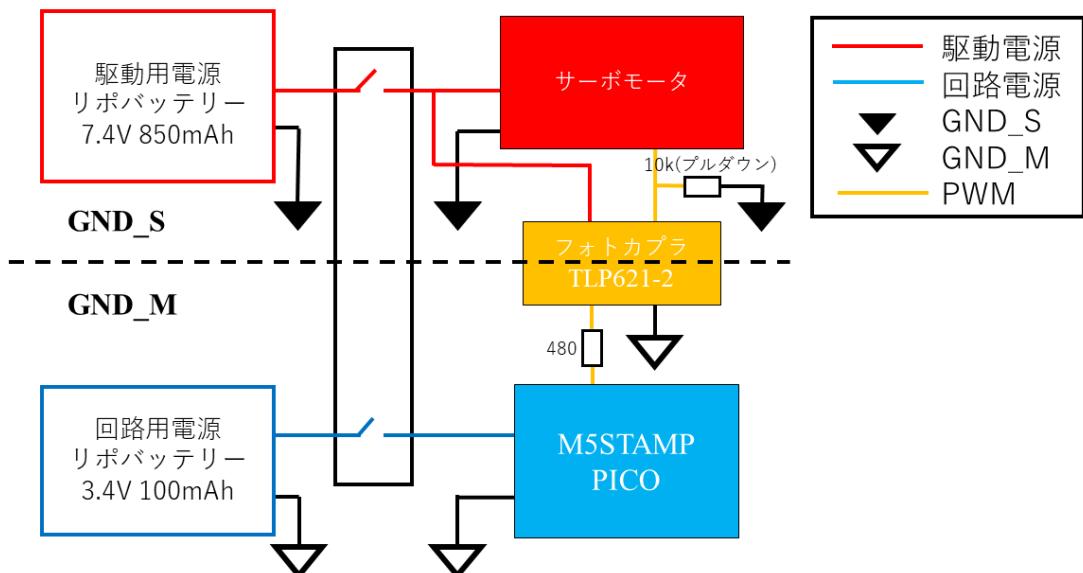


図 3: 基板の構成