

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ないこと、柔軟外皮装着型では骨格リンクと外皮が連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。また外皮あり・なしそれぞれで直進遊泳実験を行い、外皮による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、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

Underwater propulsion systems include screw propeller propulsion and tail fin propulsion using fish-like robots. Screw propellers provide high propulsion efficiency both in the water and underwater, and they are widely used in ships and other vessels. However, from an ecosystem research perspective, screw propellers can affect the surrounding environment and are not ideal for surveys. On the other hand, tail fin propulsion has less environmental impact and offers excellent acceleration and maneuverability, enabling rapid movement toward a target while avoiding obstacles. These advantages make it well-suited for disaster relief, such as in flooding, as well as for studying the ecosystems of underwater organisms. As a result, the development of fish-shaped robots has gained attention for both disaster support and underwater ecosystem research. In our laboratory, we have developed various fish-shaped robots. Specifically, last year, we successfully developed a wire-driven fish robot that enables supple, fish-like movements, as well as a waterproof fish robot with a streamlined, fish-like body and flexible outer skin. However, the wire-driven system had gaps between the links, meaning water could not be splashed off the body. In the flexible skin model, the skeletal links and skin were not synchronized, resulting in limited movement of the body. In this study, we combined these two approaches to develop a wire-driven fish-shaped robot with a flexible outer skin. This innovation allows for supple, fish-like movement while also enabling the robot to splash water off its torso, thus improving swimming performance. The swimming experiments confirmed that the wire-driven system achieved fish-like movements, with the flexible outer skin moving in accordance with the link movements. Additionally, we conducted straight-line swimming experiments with and without the outer skin to assess its impact on swimming performance. The results showed that the swimming speed increased when the outer skin was attached. This increase in speed is likely due to the robot's body becoming more streamlined when the skin was added. Therefore, having a streamlined body is highly effective in improving swimming speed.

目 次

1 緒言	1
2 先行研究	2
2.1 柔軟外皮装着型魚ロボット	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ロボットの開発	6
3.1 本研究の目的	6
3.2 ワイヤ駆動式魚型ロボットの動作原理	6
3.3 試作機	6
3.3.1 試作機の作製・動作	6
3.3.2 試作機から得られた知見	8
3.4 ワイヤ駆動式柔軟外皮装着型魚ロボットの開発	9
3.4.1 頭部	10
3.4.2 胴体部	11
4 結言	12
5 謝辞	13

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、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。そして外皮あり・なしで直進遊泳実験を行い、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た。図 1b 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、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: 柔軟外皮装着型の魚ロボット [9]

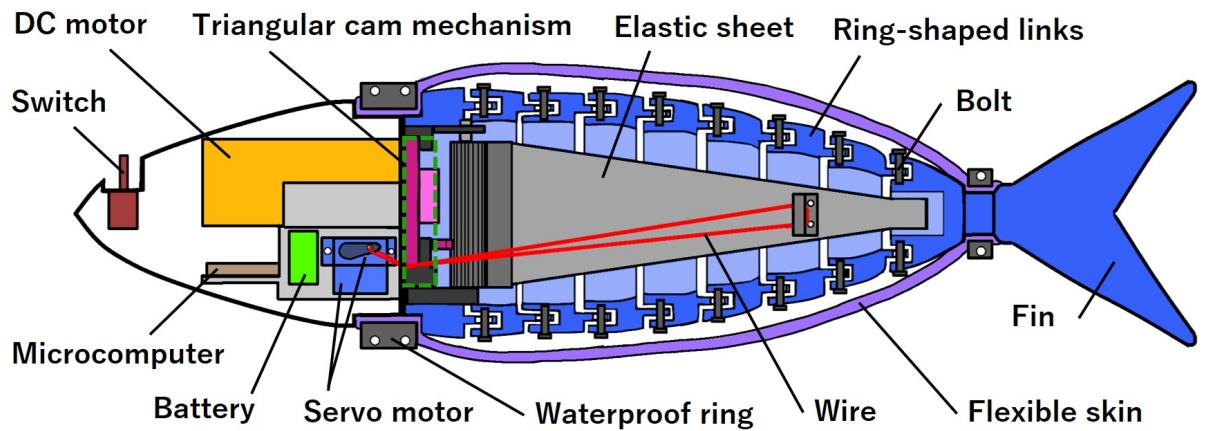


図 2: ロボットの構造 [9]

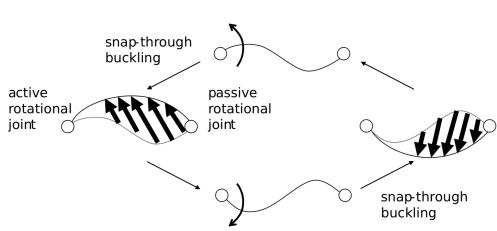


図 3: 飛び移り座屈発生機構の模式図 [9]

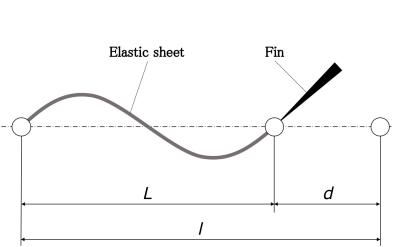


図 4: たわみ長さの定義 [9]

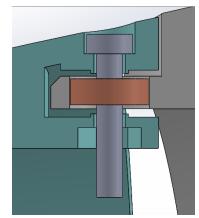


図 5: 関節の構造 [9]

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。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。図 3 に飛び移り座屈発生機構の模式図を示す。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。

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 のようにベアリング（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°だけ回し、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。また、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。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まっ

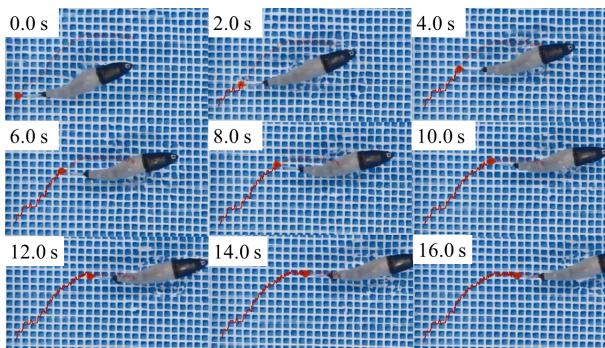


図 6: 遊泳実験の様子 [9]

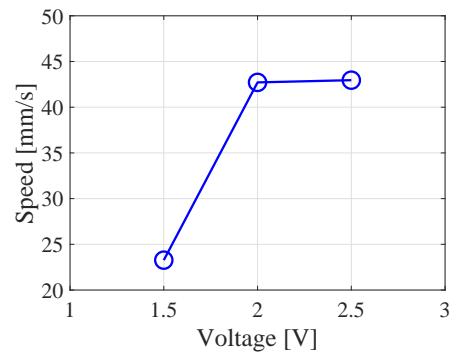


図 7: 印加電圧と遊泳速度の関係 [9]



(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]

た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、リンクの動きに外皮を追従させることができなかった。外皮をリンクに密着させる、または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外皮に伝えることが可能だと考えられる。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

3.1 本研究の目的

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、リンクと外皮に隙間ができてしまい、リンクの動きを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。さらに外皮の有無による遊泳性能の向上の変化について実機実験によって検証する。

3.2 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。ロボット前方にはブーリー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。ワイヤはブーリーから骨格リンクに設けられた穴を通って尾びれ付け根まで伸びており、ブ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。

3.3 試作機

3.3.1 試作機の作製・動作

まず、昨年度の先行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。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。使用マイコンは M5Stamp Pico (M5Stack Technology 社)、使用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

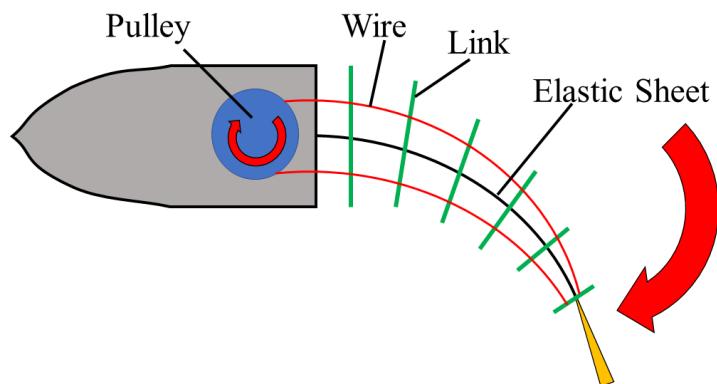


図 9: ワイヤ駆動のイメージ



図 10: 試作機の外観

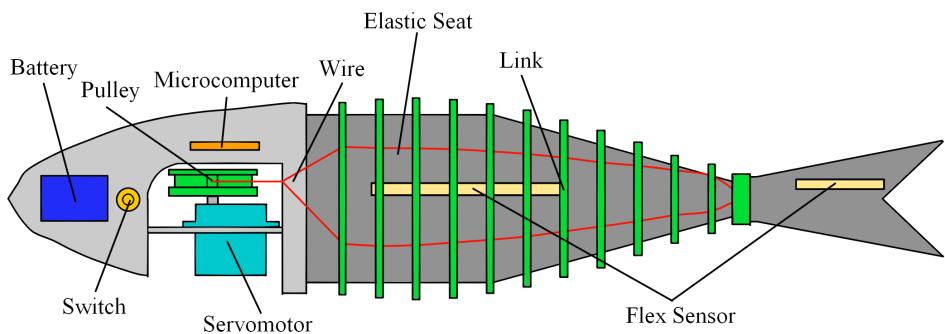


図 11: 試作機の構造



図 12: 頭部断面のようす

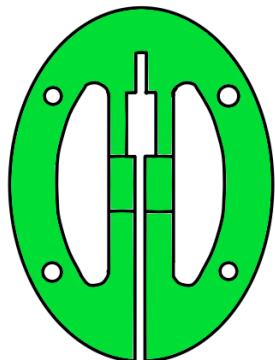


図 13: 骨格リンク

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0.75mm）、尾びれ（TPU樹脂、厚さ2mm）で構成されており、骨格リンクは図のように橢円形にして作製し、ワイヤ（ポリエスチル製、0.40mm）を通す穴を空けている。ロボット作製後、遊泳テストを行った（図14）。

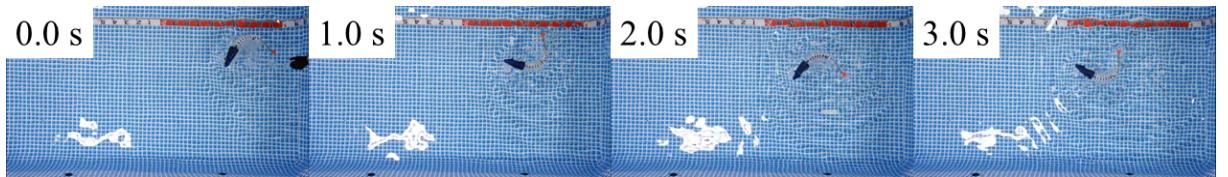


図 14: 遊泳テストの様子



図 15: 頭部下方浸水のようす

3.3.2 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こととして、まず頭部をネジとOリングを用いて防水する方法は限度があることが分かった。試作機には防水箇所確認のため水没すると赤くなるシールを貼っており、推進120 mmの水槽で2分間沈める防水実験を7回行った。しかし、ネジの締め方や締め具合を何度か調整しても図のように頭部下方は赤くなる、つまり浸水してしまい、完全な防水機能を有することはできていなかった。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わかった。

3.4 ワイヤ駆動式柔軟外皮装着型魚ロボットの開発

ここからは本研究で開発した機体について述べる。図16に開発した機体の外観を、図16cに構造を示す。開発した魚ロボットは体長470 mm、重量は重りを含めて710 gである。ロボットの外形は先行研究において作製されたアジのモデルデータをもとに作製し、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。

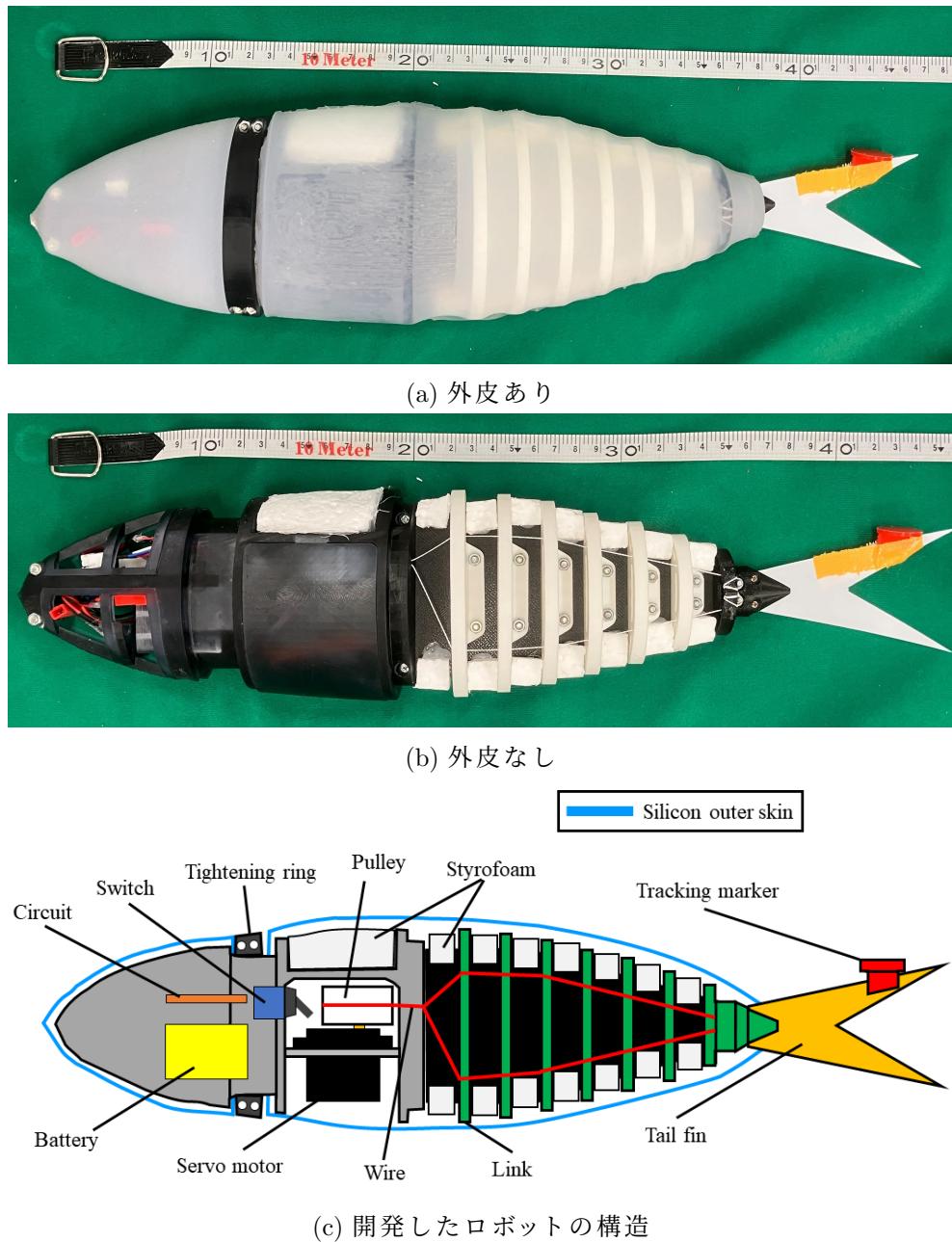


図16: 開発したロボット

3.4.1 頭部

頭部は光造形方式の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。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から変更はしていない。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う（図17）。防水リングのサイズはをもと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18）。

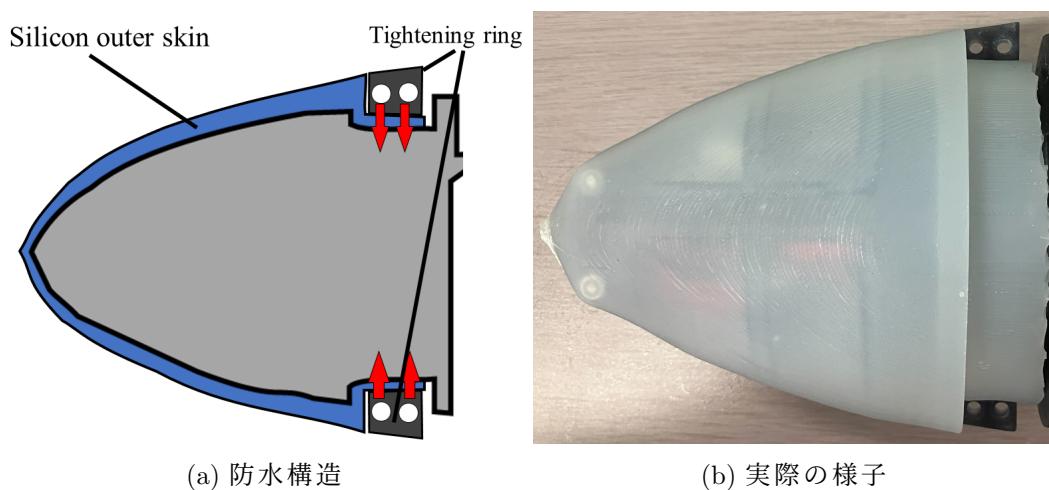


図17: 頭部防水について

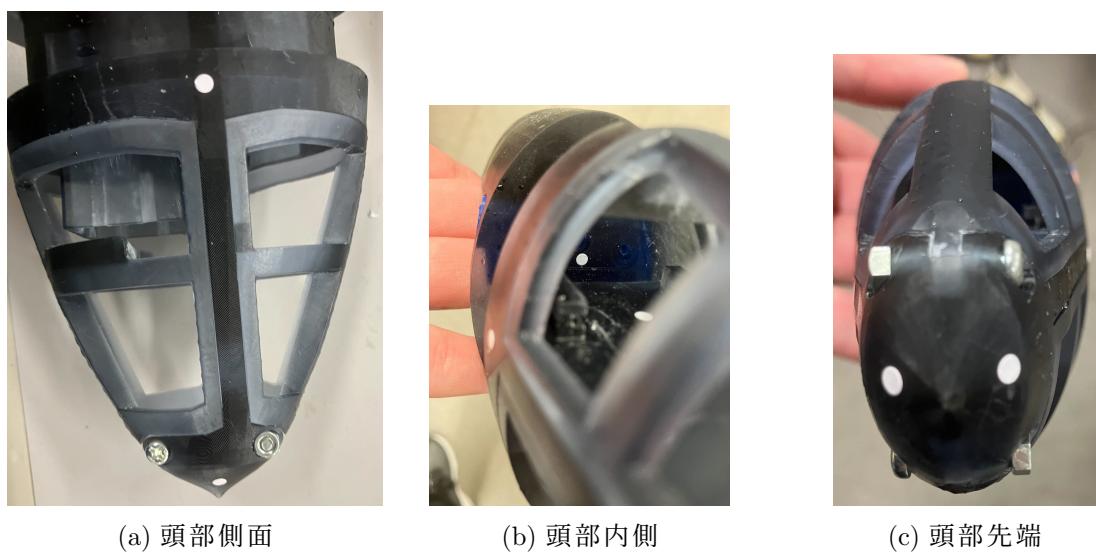


図18: 防水実験後のシールの様子



図 19: 頭部開放時の様子

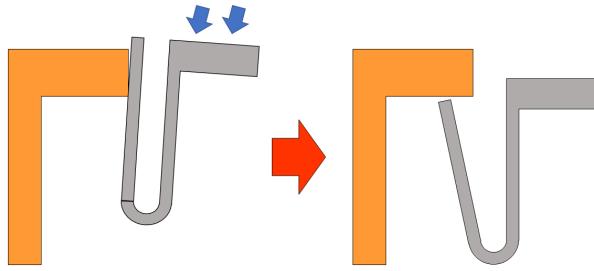


図 20: ワンタッチロックの仕組み

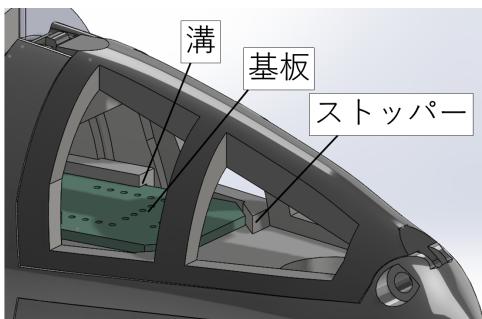


図 21: 基板固定方法

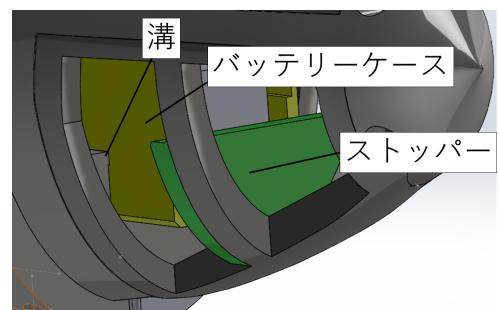


図 22: バッテリー固定方法

また、頭部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 19, 20）。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 21, 図 22 のように溝にはめストッパーをつけることで頭部に配置している。

3.4.2 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。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）を配置し、さらに電源スイッチも配置している。また、駆動部には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（ポリエスチル製、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。また、リンクと弾性体はネジを用いて二点止めし、外皮の動きがリンクの固定状態に影響を与えないようにした。

4 結言

5 謝辞

- [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.