

環境に遍在するモノを活用した カモフラージュ水中ロボットの開発

Development of camouflage robot exploiting ubiquitous objects in the environment

○学 島ノ上 諒(名城大) 学 万木 将暉(名城大)
正 新竹 純(電通大) 正 池本 有助(名城大)

Makoto SHIMANOKAMI, Meijo University
Masaki YURUGI, Meijo University
Jun SHINTAKE, The University of Electro-Communications
Yusuke IKEMOTO, Meijo University, ikemoto@meijo-u.ac.jp

To closely monitor living things, it is expected to camouflage and fade the robot into the environment to. To address we focused on giving invisibility by hiding in the environment, rather than mimicry that depends on visibility by changing the color and shape. Therefore, we have developed a camouflage underwater robot that hides itself by utilizing things that are ubiquitous in the environment by the softness of its own body with soft materials. The method is to make the sand soar by generating negative pressure and waves with the softness of the body. Then cover the sand with the sand to camouflage. By giving a phase difference to the movement of the fins, it is found that negative pressure and waves are more likely to occur, improving the efficiency of camouflage.

Key Words: Camouflage, soft robot, underwater robot, invisibility, fluid dynamics

1. 緒言

海中には多種多様な生物が存在し、生態学的な観点から行動をモニタリングする需要が高まっている。水中生物の多くは、他者を察知すると行動を変化させるため、生態を厳密にモニタリングするにはロボットを環境にカモフラージュさせて察知されずにモニタリングを行うことが期待される。

隠れるロボットには色や形状などの見た目が変化する擬態ロボットが存在する[1]。しかしながら、見た目の変化である擬態は生物の知覚能力に依存しており[2]、環境に対しては作用していないと考えられる、つまり、主体の視認能力に依存する。そのため生物のように環境に遍在するモノを活用することにより、観測者の知覚能力に依存する擬態ではなく、環境と生物に対して作用しロボットが環境自体に隠れ、そもそも見えなくする **Invisibility** の能力をロボットに与えることに着目した。

周りの環境を用いてカモフラージュをする生物の例としてエイなどはヒレの動きで負圧や波を発生させることにより、砂を舞わせ自身の体の上に砂をかぶせることでカモフラージュをしている。しかしながら、ロボットを開発する際に金属などの生態系には存在しない固い物体は生物や自然環境を傷つける危険性がある。そのためロボットのボディは柔らかい構造の方が環境に適している。実際に生物的な動きを模倣するために、生物的な動きを再現しやすいソフトマテリアルを用いたソフトロボットの研究が盛んに行われている[3-8]。そのため、環境に悪影響を与えやすい金属を最低限にし、柔らかさをそなえた生物的な動きを持つロボットの開発が求められるため、高い柔軟性をもつソフトマテリアルを用いてロボットの開発を行った。

本研究では環境特性に着目するとともに、ソフトマテリアルの柔らかさによる自身の体の特性を利用し、環境に遍在するモノを活用して身を隠す **Invisibility** の能力を有した水中ロボットを開発することを目的とする。その方法として、エイなどの実際に存在する生物のように、砂を活用しカモフラージュをするロボットの開発を目的とする。

2. 実験方法

2.1 通信方法

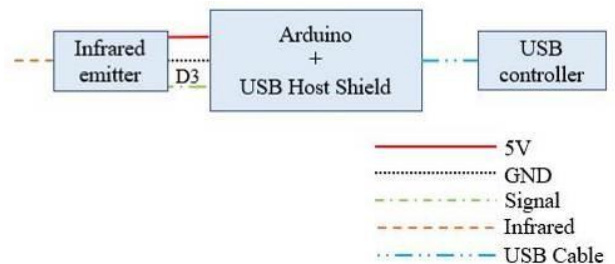


Fig. 1 Infrared emitter system configuration

本研究では水中での動作を想定し、通信方法として、赤外線通信を採用した。理由として、電波などの無線通信だと水中に電波を吸収され、ロボットまで送信できないのに対し、赤外線は水中でも赤外線を吸収されにくく、水中のロボットまで送信できるため通信方法として採用した。操作方法として、プログラムで数値データを生成したのち、数値データを赤外線に変換して発光送信をし、それを受光したロボットに、数値ごとに決められた動作をさせて操作する。

2.2 赤外線送信機の開発

開発する赤外線送信機の回路図を図1に示す。図1の回路図をもとにデバイスを組み合わせて開発した。送信機を操作しやすくするため、ArduinoにUSB Host Shieldを組み合わせてコントローラを接続できるようにし、プログラムで接続したコントローラのボタンごとに数値を割り振り、ボタンを押すことで割り振られた数値をArduinoで赤外線に変換し送信をするようにした。受信側のロボットは受信した数値ごとにサーボモータの稼働の仕方の変更を行えるようにし、無線で操作が可能となった。

2.3 カモフラージュ水中ロボットの開発

2.3.1 ロボットの構成

ロボットの回路図を図2示す。図2の回路図をもとにサーボモータとサーボホーンを組み合わせた物をソフトマテリアル内に組み込み、水の外にマイコンを設置し、ロボットとマイコ

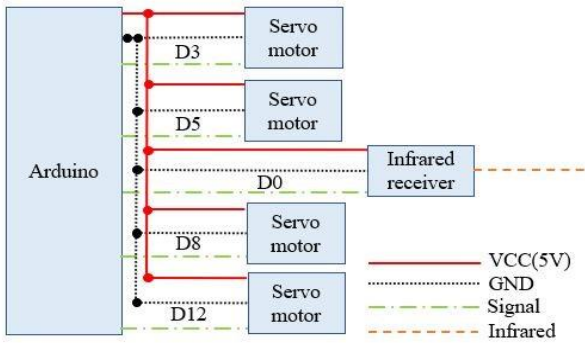


Fig.2 System configuration of the developed robot

ケーブルで有線接続する方法を採用した。使用するマイコンは Arduino を採用し、通信用の赤外線レシーバを取り付けた。砂に潜るのに有効な条件を解析するため、プログラムを常に書き換えるように開発し有効な動作の解析を効率化した。

2.3.2 ロボットの開発

本研究ではロボットのボディに図 3 のソフトマテリアルである Ecoflex00-10 を採用した。Ecoflex00-10 は Ecoflex の中で高い柔軟性があるため、ヒレに振動を伝え、波と負圧を発生させる点で柔らかい材料の方が適していると考え採用した。また、サーボモータからヒレ部分に対しての力の伝達効率を向上させるために軟骨を導入した[9]。使用する軟骨には Ecoflex よりも硬さがある図3の SILPOT 184 を採用した。軟骨の開発工程を図4に示す。アクリル製の型に SILPOT 184 を流し込んで軟骨パーツを成形した。サーボモータを4つずつ用意し、図5のような型に4つが点対称になるように配置をしたのち、製作した軟骨パーツを設置して、配置が崩れないように Ecoflex00-10 を流し込み成形をした。ロボットの完成図を図6に示す。



Fig.3 Soft material

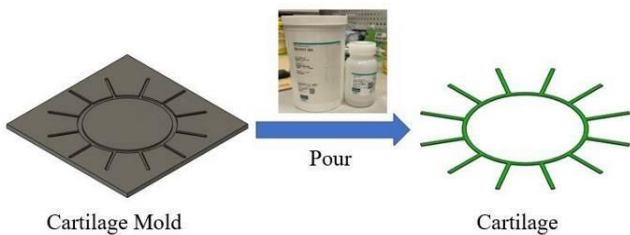


Fig.4 Cartilage manufacturing procedure

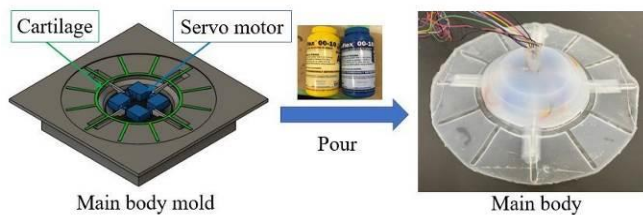


Fig.5 Main body molding procedure

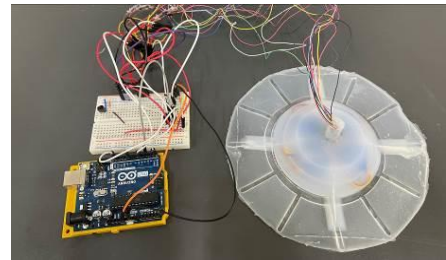


Fig.6 The overview of the robot system

2.4 実験環境の製作

本研究では実験環境として水槽を使用し、水中環境を再現した。その実験環境の様子を図7に示す。実験時に水圧差が発生しないように水槽に目印としてテープを貼り、水位が一定になるようにした。実験には海底環境に近づけるためにゼオライト鉱石を砂状にしたものを用いた。ゼオライト鉱石とは火山により発生した火山灰が水圧によって固まってできたもので、海や湖に存在する砂もゼオライト鉱石のものが存在するため、実験に採用した。今回の実験では砂が舞いやすい周波数や位相差を調べるために 0.8[mm]~0.1[mm]で揃え、粒子径の差を 1[mm]以内にして粒子径の差による影響が小さくなるようにした。また、準備時に発生する水流を抑制し濁りを防止するために仕切りを水槽内に入れた。



Fig.7 Experiment environment

2.5 実験方法

本実験ではサーボモータを動力源として駆動させるため、サーボモータの角度を $\theta[^\circ]$ として時間 $t[s]$ で制御をし、動力をヒレ部分に伝達する。サーボモータのホームポジションを $\theta_0[^\circ]$ 、サーボモータの周波数を $f[Hz]$ 、振幅を $A[^\circ]$ 、位相差を $\varphi[^\circ]$ としてサーボモータを時間制御する角度の式を式(1)に示す。

$$\theta = \theta_0 + A \sin(360ft + \varphi) \quad (1)$$

本実験ではヒレの直径を 170[mm]、高さ 20[mm] で開発をし、振幅が $A=50[^\circ]$ の時、周波数 $f=0.5, 1.0, 1.5, 2.0[Hz]$ で、サーボモータごとに位相差 0 の場合を実験 1、位相差 π の場合を実験 2 として実験を行い、砂のかぶり方に変化があるのかを確認した。サーボモータの基準の状態を $\varphi=0[^\circ]$ として、実験 1 におけるサーボモータの位相状態を図 8(A)、実験 2 におけるサーボモータの位相状態を図 8(B)に示す。本実験では 2 種類の位相差と 4 種類の周波数の組み合わせで計 8 パターンの実験を行い、各 10 回ずつ計測し、計 80 回実験を行った。

2.5 実験解析方法

実験で得られた 80 個の実験画像を MATLAB で画像解析を行った。その方法として画像の砂地の RGB 値を用いてロボットと砂地のしきい値を設定し、ロボットと砂地を差別化することによって、ロボットの隠れ度合いを視認性に対するパーセンテージ(本実験ではカモフラージュ率とする)で評価をした。

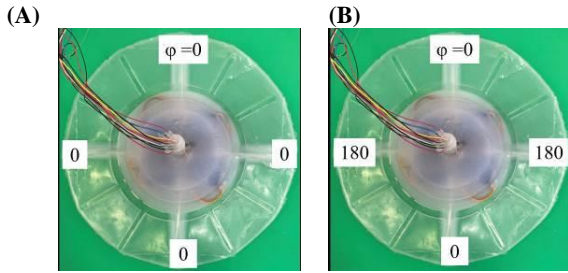


Fig.8 (A)Phase difference state of Experiment 1
(B)Phase difference state of Experiment 2

また、それぞれのパターンにおけるカモフラージュ率の平均値を算出したのち、カモフラージュ率の差が有意なのかを検証するために、ANOVA 検定(分散分析)を行い、有意水準を 0.05 として実験結果に有意差が存在するのかの検証を行った。

2.5 実験解析方法

実験で得られた 80 個の実験画像を MATLAB で画像解析を行った。その方法として画像の砂地の RGB 値を用いてロボットと砂地のしきい値を設定し、ロボットと砂地を差別化することによって、ロボットの隠れ度合いを視認性に対するパーセンテージ(本実験ではカモフラージュ率とする)で評価をした。

また、それぞれのパターンにおけるカモフラージュ率の平均値を算出したのち、カモフラージュ率の差が有意なのかを検証するために、ANOVA 検定(分散分析)を行い、有意水準を 0.05 として実験結果に有意差が存在するのかの検証を行った。

3. 実験結果

3.1 実験 1(位相差 0)の実験結果

実験 1 ではサーボモータに位相差が 0 の状態で実験を行った。 $f=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ [Hz]ごとの実験を 1 分間計測し、各 10 回ずつ、計 40 回実験を行った。実験 1 の時間経過を図 9,10,11,12 に示す。

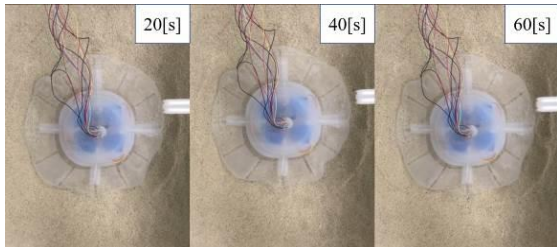


Fig.9 Experimental result of $f=0.5$ [Hz]

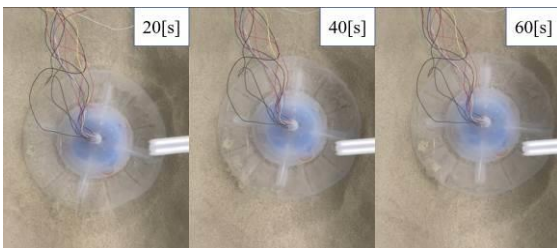


Fig.10 Experimental result of $f=1.0$ [Hz]

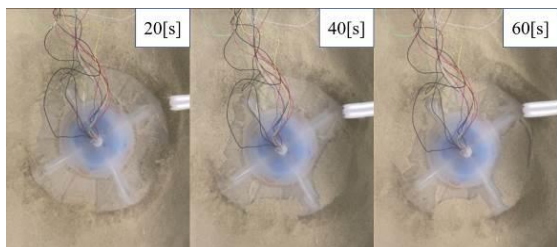


Fig.11 Experimental result of $f=1.5$ [Hz]

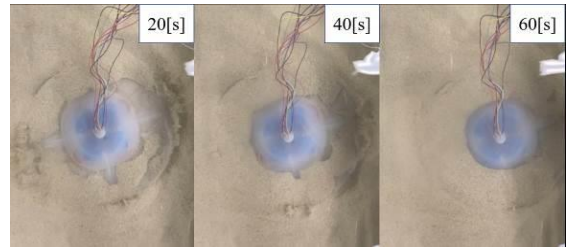


Fig.12 Experimental result of $f=2.0$ [Hz]

3.2 実験 2(位相差 π)の実験結果

実験 2 ではサーボモータに位相差が π の状態で実験を行った。 $f=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ [Hz]ごとの実験を 1 分間計測し、各 10 回ずつ、計 40 回実験を行った。実験 2 の時間経過を図 15,16,17,18 に示す。

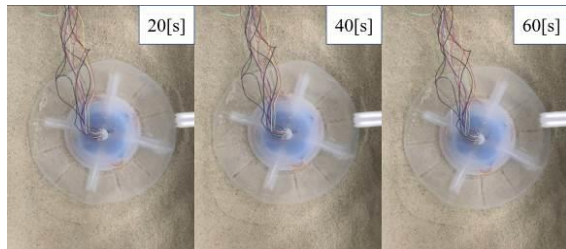


Fig.13 Experimental result of $f=0.5$ [Hz]

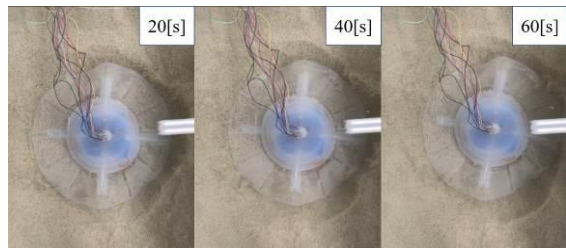


Fig.14 Experimental result of $f=1.0$ [Hz]

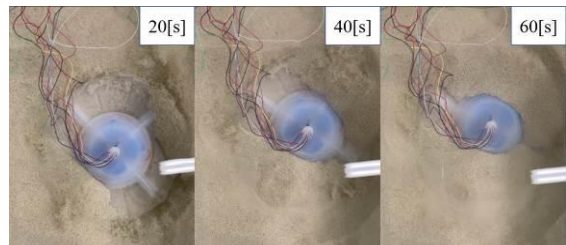


Fig.15 Experimental result of $f=1.5$ [Hz]

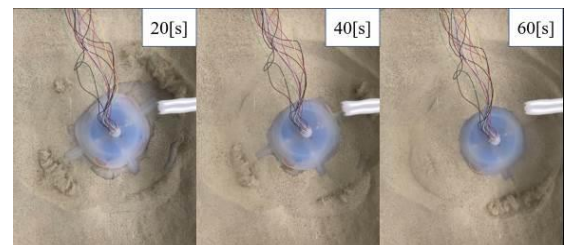


Fig.16 Experimental result of $f=2.0$ [Hz]

3.3 実験解析結果

背景が完全に砂地のみになった状態を 100[%]としてカモフラージュ率を算出し、位相差が π の場合と 0 の場合の周波数ごとの平均値を図 17 に示す。今回の実験の 0.5[Hz],1.0[Hz]では砂がほとんど被らないため、カモフラージュ率は水中ロボットの大きさから 62.1[%]として一定値とみなす。

また、カモフラージュ率の差に有意性があるのかを検証するために、ANOVA 検定から P 値を算出し、有意水準 0.05 との比較の結果を表 1 に示す。今回の実験の 0.5[Hz]、1.0[Hz]では砂がほとんど被らないため、差がないとみなした。

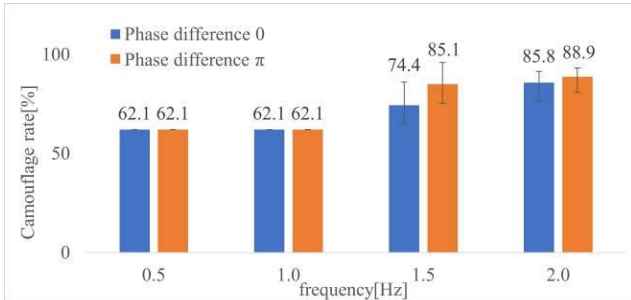


Fig.17 Camouflage rate for each frequency

Table.1 Experimental P-level

	P-level
1.5 [Hz] with no phase difference and 1.5 [Hz] with phase difference	P=0.003<0.05
2.0 [Hz] with no phase difference and 2.0 [Hz] with phase difference	P=0.107>0.05
1.5 [Hz] with no phase difference and 2.0 [Hz] with no phase difference	P=0.000158<0.05
1.5 [Hz] with phase difference and 2.0 [Hz] with phase difference	P=0.170>0.05

4. 考察

砂の被り度合いを図 9~16 と図 17 のグラフで比較をすると、f=0.5[Hz]と f=1.0[Hz]では砂がほぼ被っておらず、f=1.5[Hz]では位相差が π の方が多く被っており、f=2.0[Hz]ではほぼ同じ被りかたであることが確認された。f=0.5[Hz]と f=1.0[Hz]では時間経過しても砂はほとんど被っておらず、その要因として f=0.5[Hz]と f=1.0[Hz]では周期が遅いため、負圧と波が小さく発生したため砂が舞わなかったと考えられる。また、f=1.5[Hz]からは位相差が π の場合と 0 の場合の両方で砂が少し被り始めていることから周波数が f=1.0[Hz]から f=1.5[Hz]の間で砂が被り始める周波数があると予測され、周波数の増加でヒレに勢いがついたことで負圧と波が発生しやすくなったことが砂の被り始めた要因として考えられる。

f=1.5[Hz]では図 11 と図 15 を比較すると砂の被る量が異なり、また、表 1 における 1.5[Hz]での位相差が π の場合と 0 の場合の P 値が有意水準 0.05 よりも十分小さい P=0.003 ため、差があることが検出され、位相差が π の場合の方が効率よくカモフラージュされていることが判明した。その要因として、図 8(A)のように位相差が 0 の場合だと、負圧で発生した波が全方向に分散して流出するのに対し、図 8(B)のように位相差が π ある場合だと 2 つのサーボホーンは閉じている状態なので 2 方向に波が集中して流出するため、水の流れが生じ、勢いよく砂が舞ったため、効率よくカモフラージュできたと考えられる。

位相差が π の場合の f=1.5, 2.0[Hz]では表 1 での位相差が π ある場合の f=1.5, 2.0[Hz]での P 値を見ると、有意水準 0.05 よりも大きいため、カモフラージュ率に有意差がないことが判明した。その要因として位相差が π の状態で周波数が大きくなるとヒレの動きが高速になることにより波が次々と発生し、発生する波同士が干渉しあうことで波がかき乱されて砂が舞いやすさが向上しにくくなったと考えられる。そのため位相差が π の場合の f=1.5[Hz]と f=2.0[Hz]では被り方の変化があまりないと考えられる。

位相差 0 の場合での f=1.5, 2.0[Hz]では表 1 での位相差が 0 の場合の f=1.5, 2.0[Hz]での P 値を見ると、有意水準 0.05 よりも十

分小さいため、カモフラージュ率に有意差があることが判明した。その要因として位相差が 0 のため、位相差が π の場合ほど波は発生しないため、干渉しにくく、また、周波数が大きくなったことによりヒレの動きが高速になることで振動が加わり、砂の被り方に差が出たと考えられる。

2.0[Hz]では位相差 π の場合と 0 の場合では表 1 における 2.0[Hz]での位相差が π の場合と 0 の場合の P 値を見ると、有意水準 0.05 よりも大きいため、位相差によるカモフラージュ率に差がないことが判明した。その要因として、負圧と波による砂を舞わせる挙動からヒレの高速稼働における振動による潜砂に近づいたため、f=2.0[Hz]では砂の被り方が同じ程度になり、また振動による潜砂では砂に潜るための周波数(振動数)が低いため位相差が π の場合では砂の被りやすさが向上しにくくなった要因と考えられる。

5. 結言

本研究ではソフトマテリアル製のボディによる柔軟性で負圧と波を発生させることにより、砂などの環境に遍在するモノを活用したカモフラージュロボットの開発を行い、それぞれの周波数と位相状態で砂の被り割合を検証した。

実験結果から f=1.5[Hz]で位相差の影響が大きくでていることから、周波数 f=1.5[Hz]の付近では位相差がある方が負圧と波が発生しやすくなりカモフラージュを効率的に行えることが確認された。また、f=2.0[Hz]付近では負圧と波によるカモフラージュから振動によるカモフラージュに変化したと予想されることから振動数の観点からも効率的にカモフラージュをさせる方法を検証することが今後の課題として挙げられる。

今後は、砂でカモフラージュを行った後に砂から脱出ができないことが現在課題として存在しており、位相差や砂が舞わない周波数を発見することにより脱出する方法を確立することを目指す。

6. 謝辞

本研究は科研費 (19H02118) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Stephen A. Morin, et al. "Camouflage and Display for Soft Machines", Science Vol. 337, Issue 6096, pp. 828-832, 2012
- [2] Font, E. "Mimicry, Camouflage and Perceptual Exploitation: the Evolution of Deception in Nature", Biosemiotics 12, 7-24 (2019), doi : <https://doi.org/10.1007/s12304-018-9339-6>
- [3] Jun Shintake, Vito Cacucciolo, Herbert Shea, Dario Floreano, "Soft Biomimetic Fish Robot Made of Dielectric Elastomer Actuators", Soft Robotics Vol. 5, No.4, Aug 2018, 466-474
- [4] Sung-Hyuk Song, et al. "Turtle mimetic soft robot with two swimming gaits", Bioinspiration & Biomimetics Vol. 11, No.3, 4 May 2016
- [5] F. Xu, H. Wang, J. Wang, K. W. S. Au and W. Chen, "Underwater Dynamic Visual Servoing for a Soft Robot Arm With Online Distortion Correction," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 24, no. 3, pp. 979-989, June 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2908242.
- [6] Robert K. Katzschmann, Joseph DelPreto, Robert MacCurdy Daniela Rus, "Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish", Science Robotics Vol. 3, Issue 16, eaar3449, 21 Mar 2018
- [7] M Cianchetti, et al "Bioinspired locomotion and grasping in water: the soft eight-arm OCTOPUS robot", Bioinspiration & Biomimetics, Volume 10, Number 3, 13 May 2015
- [8] Krishna Manaswi Digumarti, Andrew T. Conn and Jonathan Rossiter, "EuMoBot: replicating euglenoid movement in a soft robot", Royal Society, Volume 15, Issue 148, 21 November 2018, doi : <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0301>
- [9] 万木将輝, 三品博暉, 新竹純, 池本有助 "硬さと柔らかさを両立するヒレを搭載したエイ型水中ロボットの開発", ROBOMECH2020