

生体模倣(Biomimetic)水中ロボットの検討

ウミサソリ ロボ化石を作る

文と写真 AFK研究所(同) 近藤敏康 イラスト よ志

生き物に学んで様々な物を作る、生体模倣(バイオミメティクス)が再度注目を集めているようです。水中ロボットコンベンション(水中ロボコン)をお手伝いさせていただく中でも色々な生物をイメージした水中ロボットの自作にチャレンジするチームを拝見する事も多くなりました。ま



た入院中の子供達に生きようとする活力を与える為に海の生き物ロボットを作られた、海洋”楽”(かいようがく)研究所の林正道氏に魚ロボットの構造やご苦労を含めた情報もいただきました。その過程で音響・映像機器の世界でも用いられる振動をあえて活かす設計アプローチ、(剛性を求めすぎると音が死ぬ)や冷却を重視したアプローチが生体模倣の水中ロボットを教材

として作るのに有効ではないかと考えました。そこで各種生き物の検討と試作の結果、化石のウミサソリをモデルにしたロボットが「簡単な構造だが泳ぐ、本物感がある」と特に好評だったので、”ロボ化石”としてまとめました。生き物水中ロボット作りに興味を持たれた方や学校のクラ



生体模倣系水中ロボットの例
写真左から

トライボッツモルペン第七世
代、愛知工業大学 ウミガメロ
ボット(2017 国際ロボット展)

1

林正道さんとイルカロボット

ブ活動などの参考に、また本格的な自立型水中ロボット製作に進まれる方々の最初のきっかけになれば幸いです。

古生代のウミサソリ

海の中を遊泳したと考えられる各種生き物の検討と試作を行う中で、現在の魚に比べて動きがシンプルで再現しやすいと思われる古生代の生き物に行き着きました。特に古生代を一時期支配した節足動物のウミサソリならば脳があまり高度ではないため、脳によるコントロールに頼らず形自体にうまく泳ぐ何らかのバランスを取る機能が隠されているのではないかと予想したからです。

そこで、各種文献や博物館の化石、ネットでの化石写真を探す中で化石に残る生き物ウミサソリを題材に生体模倣アプローチで泳ぐロボット(ロボ化石)を作りながら考えてみる事にしました。理由は、三葉虫の様な多数の脚がなくシンプルで作りやすそうな形である事。一時期地球の生き物の頂点にいた捕食者だったようで、ある程度高性能と思われる事。遊泳脚によるパドリング推進、尾を左右に振った推進、身体を上下に振った推進と、三つの推進方式をテストできる事も決め手となりました。

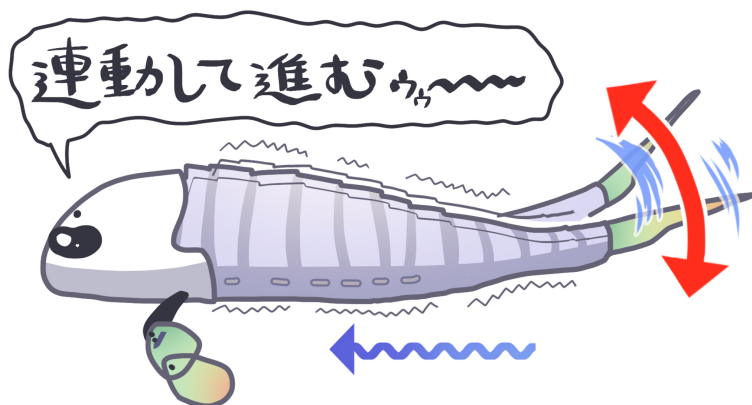
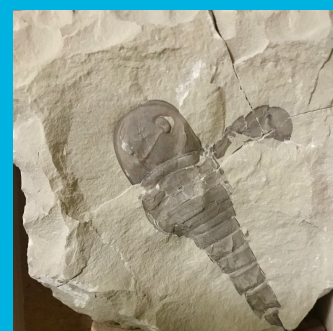


イラスト ウミサソリの動きを考えている時の頭の中の様子

本記事では、他の生き物を題材にした水中ロボットを考える時の参考になるように、製作に至るウミサソリの調査検討過程や、作り方のポイントを紹介します。

もし、これをお読みくださって、ウミサソリロボットを作ろうかと思われたら、ぜひTwitter検索で、ロボ化石までご連絡ください。また日本水中ロボネットのミーティングにご参加ください。お持ちしております。

元にしたウミサソリの化石の
写真(ウクライナより輸入されたもの)



推進力

1. 遊泳脚が前後に動く
 2. 尾が左右に動く
 3. 尾剣が上下に動く
- 腕の位置で、頭が下がる、上がる

1. ウミサソリを再現する為の事前検討

1.1 作り方を考える。

最初に思い浮かぶのはウミサソリのフィギュアを3Dスキャナーで取り込み、画面上で調節してメカニズムを配置、次に樹脂フィラメントを使う低価格の3Dプリンターで出力するという方法です。しかしこの方法だと、地上の置物で一部が動く説明用の模型ならば良いのですが、ほぼ無重力の水中を生き物のように泳がせようとするロボ化石では難しそうです。理由は、低価格の3Dプリンターで出力した物を水に入れた時に、内部の空洞に水が出入りすることで泡が残り、毎回浮力が安定せず微妙な浮力のコントロールが難しいこと。また、衝撃が加わると積層した層ごと剥がれやすいこと、生き物としての柔軟性が得られないことなどです。ある程度、その辺りの問題が解決できる光造形の3Dプリンターによる外装部品を採用しているグループもありますが(トライボットのペンギンロボット第8世代)まだまだ値段が高く一般的ではありません。そこで今回はこの方法ではなく、比重が生き物に近くて衝撃に強く、加工しやすい、ポリプロピレンの樹脂板を使いペーパークラフト的な発想で作ることを考えました。これなら一枚100円程度のポリプロピレン板を、家庭にある道具で加工でき、一般の方にも作っていただけそうという面でも好都合と考えたからです。

1.2. ウミサソリについてネットで調べながら頭の中で構想を練る

できる限りウミサソリについてネットや文献で調べ、化石を観察した上で、ロボ化石としての構想案をまとめました。でも、実際に近い方法で泳がせようと構想を巡らすと、資料からでは分からない疑問点が湧いてきました。そこで、古生物の専門家を探して博物館にメールを送り、幸い群馬県自然史博物館の主幹(学芸員) 高桑祐司博士にご協力頂けることになりました。

1.3. ウミサソリの本物の化石を見ながら専門家の解説を聞き理解を深める。

さっそく、博物館まで行き実際に高桑祐司博士にお会いしました。その結果、ウミサソリについて古生物学の観点からのご意見を頂くとともに、ネット上では見られない貴重な文献情報や化石もご紹介いただきました。特に疑問だった泳ぎ方について、ウミサソリの遊泳脚とワタリガニの遊泳脚の類似性、色についての情報(誰も知らない)など、目からウロコ状態の事も多々ありました。皆さんもぜひお近くの自然史系の博物館へ行かれることをおすすめします。

1.4 新たな情報をもとに泳ぎ方についての構想を再検討。

早速、次の日に築地場外市場に出向き、本物のワタリガニを観察し購入。特に、泳ぐために重要な遊泳脚の構想上の(設計)変更を行いました。

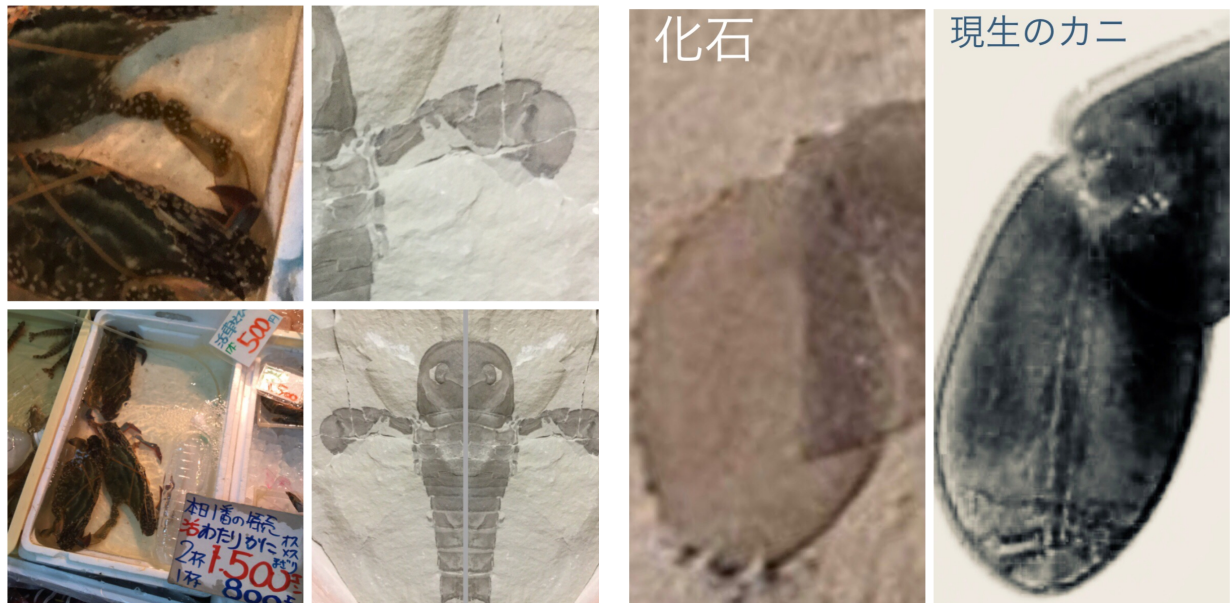


写真 ワタリガニ類の遊泳脚と、ウミサソリの化石の遊泳脚の比較

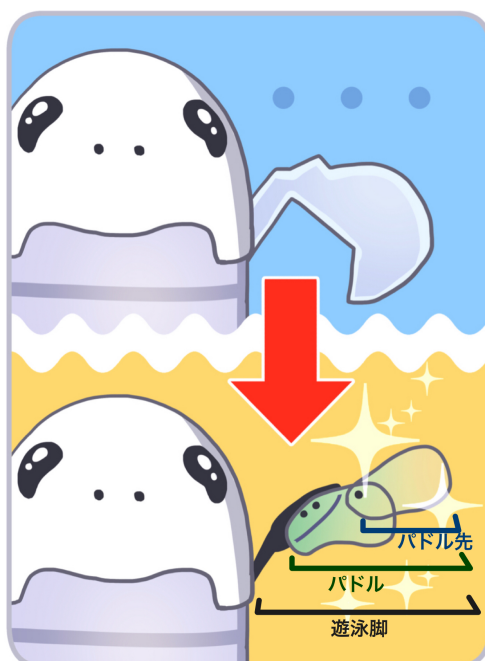
左上(遊泳脚 カラーのみワタリガニ類、他は化石。)

右 (遊泳脚の先端部・パドル状の部分の拡大、左化石、右ワタリガニ類。)

当初、化石のシルエットから、遊泳脚のパドルに見える部分は一体型で、羽ばたくように上下すると考えていました。しかし、本物のワタリガニを築地場外市場で観察した上で改めて化石を注意深く観察すると、遊泳脚には複数の関節が組み合わさってできている腕の部分と、その先に幅広いパドル状の部分、さらにパドル状の部分の先端部には薄い部分がある事に気がきました。

ワタリガニの遊泳脚の動き方を触りながら調べると、遊泳脚の腕の部分は関節を組み合わせる角度が90度ほどは動き、パドルで水を押し出して進んでいた可能性に気がきました。またパドル状

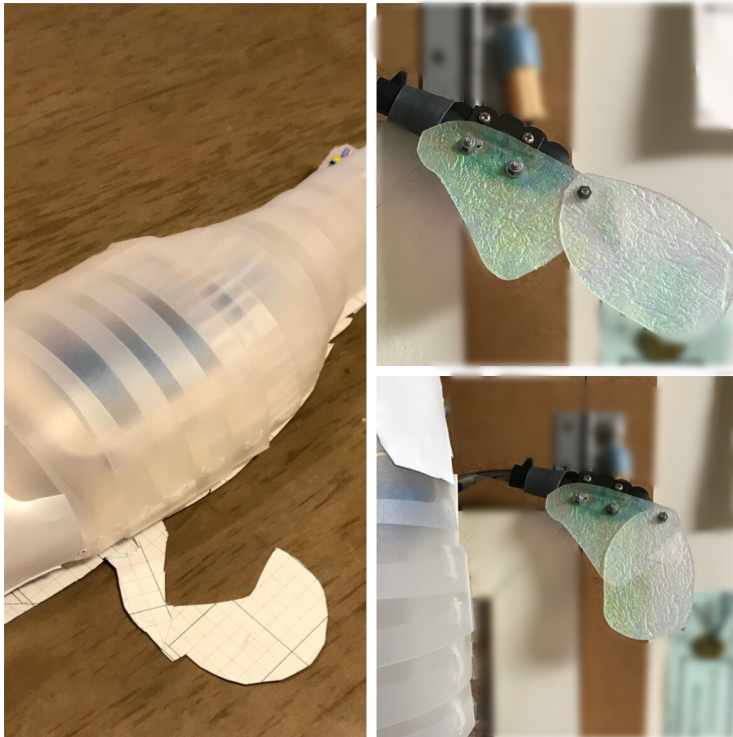
の部分は二つの板が組み合わさって一点で接しパドルの先の部分は回転する事もわかりました。つまり、パドルの先を回転して折りたたみ、水をかく面積を変化させることができそうな事も判明しました。(パドルの先を最大に展開するととても大きい)確かにウミサソリの化石の中にも不釣り合いに遊泳脚の先のパドルが大きな化石があり、何か潰れたのだろうかとも気にも留めていませんでした。私が参考にしたウミサソリの化石は、パドル先を最も折りたたんだ状態だったのだと気づきました。



ワタリガニを見た上で、さらに化石を観察し、ウミサソリの遊泳脚の動きを考えました。その結果、ウミサソリは、羽ばたきではなく水を押し出す、カヌーのパドルリングの動きが適していそうと感じてきました。

写真 イラスト

最初に考えた遊泳脚の設計と、ワタリガニを観察して設計変更した遊泳脚の比較。最初は、先が丸くて一体型で羽ばたく設計。(写真左) 設計変更後、水平方向に動いて、パドル先は閉じたり開いたりできる。



1.5 ウミサソリの泳ぎ方についての論文を探す

ウミサソリの英訳のSea Scorpionではなく、固有の種類を表すEurypterus remipes、

やEurypterid、他のウミサソリの種類名などで文献検索する事で、泳ぎ方について記述された海外の論文や、さまざまな化石を元に泳いでいる姿の再現を試みた動画なども見つかることができました。それらによるとカヌーのパドル型の泳ぎ方をメインに、尾の上下左右運動などしていた事が分かって来ました。この内容は水に住む昆虫のゲンゴロウの泳ぎと似ていると感じ、これらの泳ぎ方の再現を試みる事にしました。

1.6 思わぬ効果

実際に作って泳がせてみると、パドルの先が良く障害物に当たります。ワタリガニを参考にしたパドルと、パドル先の可変機構を搭載した結果、障害物に一度当たると、フリッパーが自然に回転し折りたたまれて、それ以上遊泳脚が障害物に当たって破損しにくくなる効果があるのに気づきました。壊れにくい構造は、新しい試みをする時にも大胆にチャレンジができるため、ワタリガニとウミサソリの遊泳脚の類似性についての示唆は、開発時にプールの壁にパドルが激突しても壊れにくい構造と言う意味でもとてもありがたいご指摘でした。

2.構想をまとめ、ウミサソリロボットを具体的に検討

色々と情報が集まって来た中で、今回のウミサソリロボットに採用する設計上の考え方を整理しました。その上で考え方に沿って設計をスタートさせました。ほぼ水中で無重力状態になる水中ロボットでは、このプロセスを省いてなんとなく”ふわっと”はじめると、うまくバランスが取れず永遠に完成しなくなる可能性も出てきます。時間をかけ、PDCA+気づき！をしばらく繰り返しました。この辺り、多少バランスが悪くても踏ん張ればなんとかなる、地上のロボットとは違うところです。

2.1 製作するウミサソリロボットのポイント

- ・ウミサソリ(Sea-Scorpion)は古生代の生き物で、化石にのみ残る生き物。
- ・アメリカ、ヨーロッパなどで多数化石が産出する、ユーリプテルス種をモデルにする。

ウミサソリ ユーリプテルス種の化石は、群馬県立自然史博物館、多摩六都科学館、国立科学博物館地球館B2でも見ることができます。最終的には縁あって安く購入する事もできました。今回は安価で購入できた小型のウミサソリの化石を元に、成長した大人の姿で大きく再現しました。

またウミサソリのフィギュア(チョコエッグ食玩として以前販売されていたもの)も参考にしました。重りをつけると、超小型水中グライダーになりました。

2.2 現代のサソリ、カブトガニ、ワタリガニ、ゲンゴロウなどに、強い関連を感じさせる形態特徴も参考にする

写真 アメリカ産カブトガニ (熱帯魚店でペットとして数千円で販売もされています)



サソリ→胴体の柔軟性や全体の形態に類似性・カブトガニ→尾の先の動きと形状、硬さ、動き・ワタリガニの遊泳脚→遊泳脚、ゲンゴロウ→二本の遊泳脚の動かし方、泳ぎ方

2.3 化石から比率を想像し再現するアプローチ。

化石は、ほぼどこかがつぶれた状態なので、そのまま作るわけにはいきません。そこで、古生物の専門家の示唆も受けつつ3D化する必要がありました。

また、市販のフィギュアなどの中には、かっこよさを重視していて、古生物学的に疑問なものもある様です。ネットにある再現CGも実際に泳がせて作ったわけではないのでのみにせず、化石を調べること、古生物の専門家の意見を聞くこと、泳ぐ生き物として成立するか、さらにはメカを組み込んだ時の比重も考えることが必須です。

特に、身体の素材に使う樹脂の比重、強度、柔軟性、厚みがポイントになります。

その為に、エビ、カニを食べた後の殻も貴重な資料となりました。毛ガニ、タラバガニ、ボタンエビ、ロブスター、伊勢海老の殻の提供を受け、検討し、様々な樹脂素材の中から、0.75mm厚

のポリプロピレンシートと、0.3mm塩ビシート、極薄の構造色シート、ポリプロピレン用接着剤、2mm厚の低発泡スチロール板を組み合わせ使用しました。

逆に検討したが使用しなかったのが、FRP板、PLAフィラメント、アルミ板、圧縮木材板、ゴム板、アクリル板、ポリカーボネート板、プラ板、100円均一の白い樹脂まな板、などです。



写真 ウミサソリ、ユーリプテルス種の化石 (潰れていない側を両側に展開)



写真 資料にした、生ボタンエビの殻
少し臭うので、密閉して保管した
紫外線を当てると一部が光る、

2.4 本当に生きていたウミサソリの大きさのロボットを作る

ウミサソリ には多くの種類がありますが、今回は最大1m程とも言われていて、最も出土化石が多いユーリプテルス種をモデルとしました。その他に、人間よりも大きな種類のウミサソリ の化石も見つかっています。



イラスト

人間と比較した巨大ウミサソリ、ハサミのある種類
には人の身長くらいある化石も見つかっているそう
だ。

2.5 ウミサソリの推進機能の以下のパターンを再現

ウミサソリ の化石や古生物の論文を見て、再現させる可動部を以下に決め、再現することにしました。

- 左右に、遊泳脚(ワタリガニと酷似した形状のパドル付き、ゲンゴロウの動きも参考にする)
- 遊泳脚の付け根の腕は太く、前後に動かすと重心が変化していたと思われるので再現する。

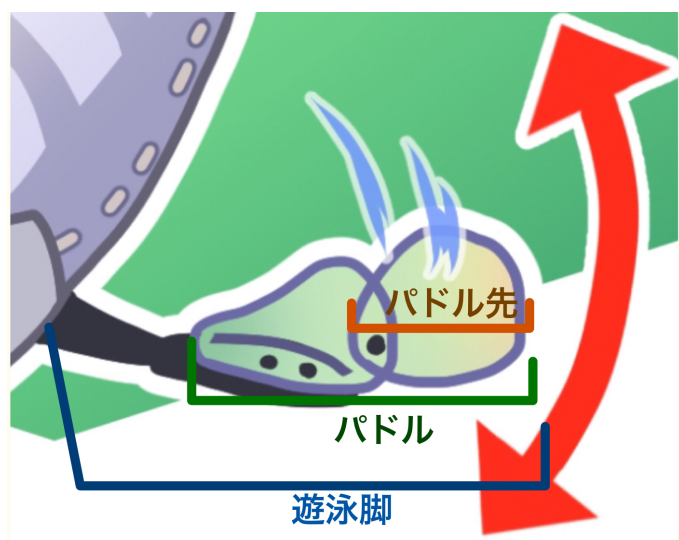
- 尾を左右に振った推進(尾を動かすと、尾の先の部分との接続部が逆方向に若干折れ曲がる)
- 尾の先の部分(カブトガニの尾と酷似した形状)が上下する。(カブトガニと同様の動き)
- 尾の先端を上下に動かす事で身体も微妙に上下にしながら推進力を得ていたと思われる。



2.6 ウミサソリのメインの推進機構である遊泳脚はカヌーのパドル型に

ウミサソリの遊泳脚は実際には、複数の関節が組み合わさって、カヌーのパドル型で泳いでいたようですが、シンプルで壊れにくい構造でカヌーのパドル型の泳ぎを再現すべく以下のように考えました。下のイラストのように、便宜上・遊泳脚・パドル・パドル先と定義して説明します。

ウミサソリ 遊泳脚の構造(片腕)



遊泳脚はカヌーのパドル型の動き



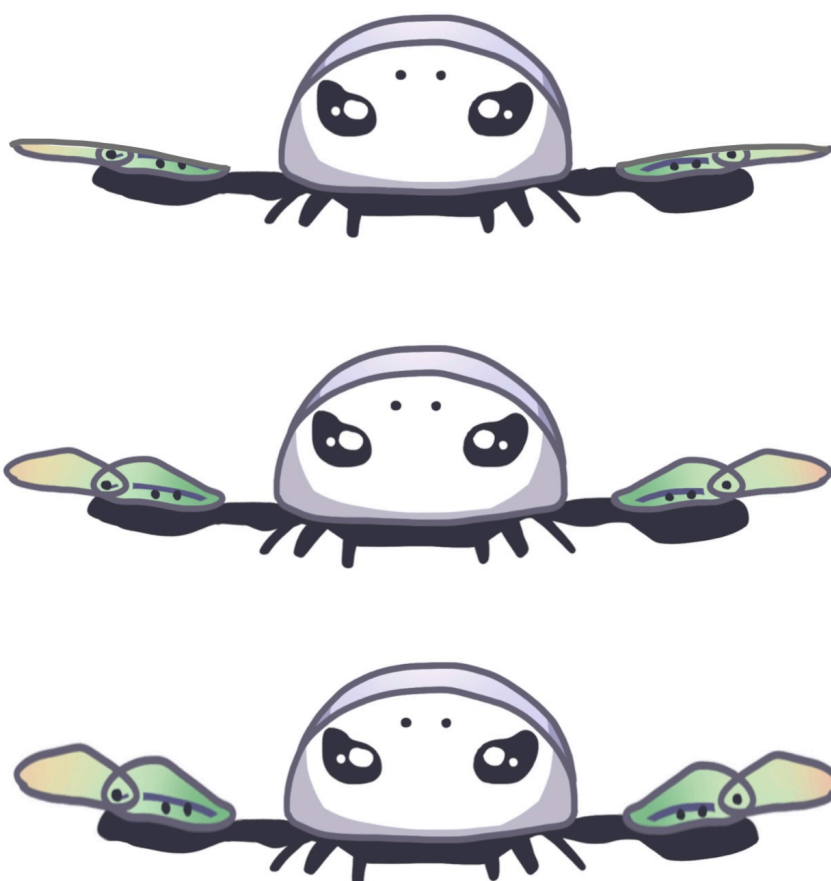
2.7 遊泳脚+パドルのメカニズムをカヌーをこぐように簡略化して再現

遊泳脚は、ウミサソリ の化石やワタリガニを見ると、実際には複数の関節でパドルの角度を変化させていたようですが、その中でカヌーのパドル型に動く部分に着目、以下のようにシンプルに再現を試みました。

遊泳脚は片側毎に一台のサーボモーター(サーボ)で水平に動き、水の抵抗を利用してパドルの角度が自動で変化する様工夫しました。

- 1.進行方向に水平にサーボモーター(サーボ)を片側ひとつずつ設置
- 2.サーボホーンを片側だけ延長して遊泳脚とする。
- 3.遊泳脚に、蝶番を介してパドルを取り付ける。つつ
- 4.パドル先は別部品とし回転するように一点で接続する。
- 5.パドルは水を押す事でほぼ直角に立ち上がりストッパーでそれ以上開かないようにすることで水を押し出す。

遊泳脚は前後にのみ動く。遊泳脚を前に動かすとパドルが閉じ、後ろに動かすと水圧でパドルが開きます。



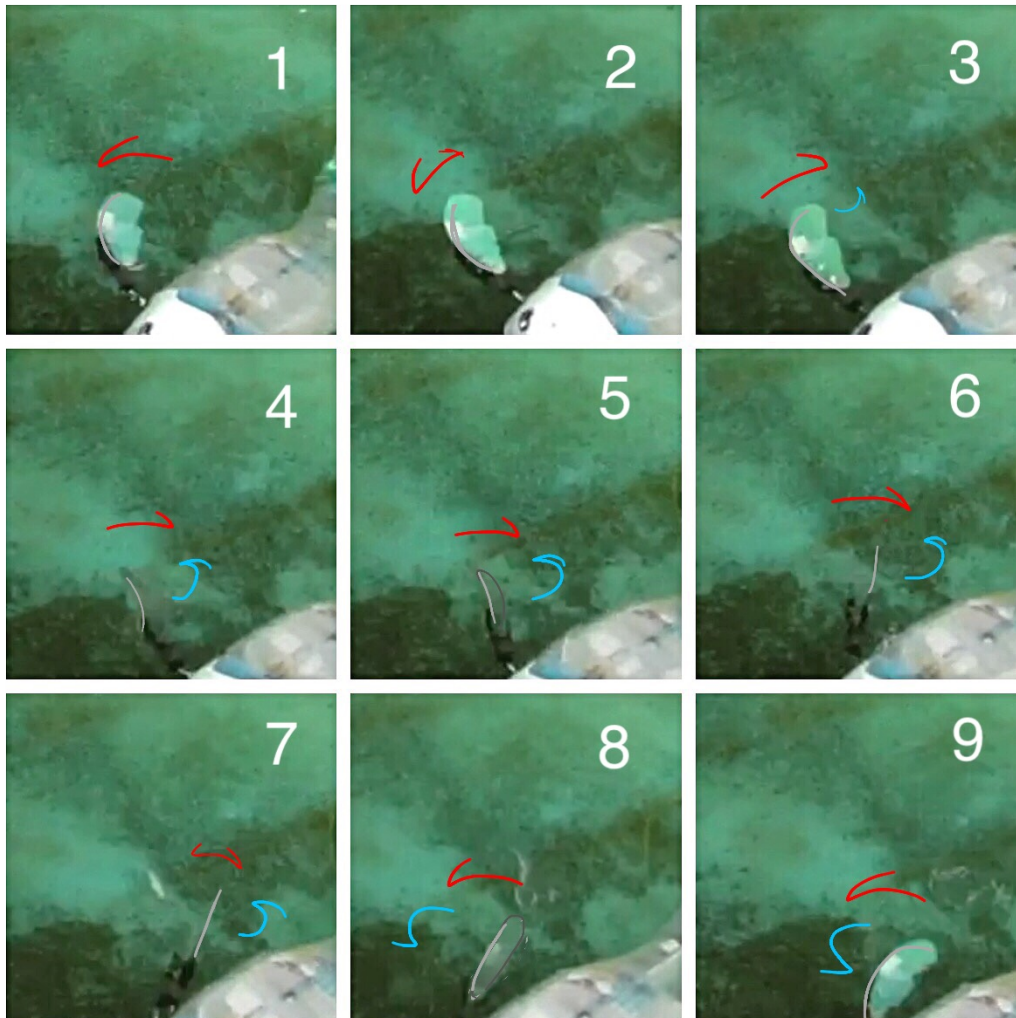
上 遊泳脚を前に動かす時にはパドルが閉じて水の抵抗が少なくなる

中 遊泳脚を後ろに動かしはじめるとパドルが水圧で立ち上がりはじめる

下 遊泳脚をさらに後ろに動かすとパドルが完全に立ち上がり水を押し出し進む

参考:ウミサソリ の実際の泳ぎ方(遊泳脚の動き方)

遊泳脚の動きとパドルの動きを連続して撮影したものです。



1. 遊泳脚を前に動かすと、パドルが水平になり水の抵抗が少なくなる
 2. 遊泳脚が最も前に移動
 3. 遊泳脚を後ろに動かすと、パドルが立ち上がりはじめる
 4. 遊泳脚をさらに後ろに動かすと、パドルが立ち上がり、水を押してしなる
 5. 遊泳脚をさらに後ろに動かすと、パドルはしなりながら一瞬遅れてついてくる
 6. 遊泳脚がさらに後ろに移動
 7. 遊泳脚が最も後ろに移動
 8. 遊泳脚を前に動かすと、パドルが折りたたまれながら体から離れる
 9. パドルが折りたたまれながら、遊泳脚が1.の状態にもどる
- (パドルには構造色シートを貼り付けて、強度調整と見て動作が分かるようにしてあります)

特に、遊泳脚の動きにワンテンポ遅れてパドルの先が付いてくる動きが推進力に貢献しているようです。ご興味のある方は、パドルの強度やしなり方を変化させて、何パターンか試し比較すると、理解が深まるのではと思います。やってみられたら是非お教えてください。

2.8 サーボモーター(サーボ)と復元する力の強い尾のフレーム(板バネ)で尾を再現

弓のように復元する力の強い尾のフレームをサーボモーター(サーボ)で片側にしならせた後、元に戻す時にフレームが復元する力も利用して反対側に動かす。これを繰り返して尾を動かすカラクリを考えました。その為、サーボをいくつもつなげる設計ではなく、一つのサーボで、柔軟性のある尾のフレーム先端を引っ張る構造になっています。これは、アニマトロニクスに使われる設計方法を元に工夫して、サーボ一つで動くようになっています。

この方式では、尾の部分的なしなり量の大きさをサーボのプログラム制御で実現するのには適さないものの、尾の構造を分割し、セクション毎にリミッターやガイドを作ることである程度尾の特性を変化させる事が可能です。

今回は、構造的に本物らしくしなる尾をサーボでスムーズに動かす為のプログラムが必要ないこと、少ないサーボで実現し、消費電力、発熱、材料費も抑えられること、さらに壊れにくくなることなどトータルでの信頼性の向上も狙っています。

このメカニズムでも尾はとてもスムーズにしなるので、ぜひお試しください。

以下のイメージで作られています。写真も参考になさってください。

-尾は、蛇腹状に左右に動く本体部と、一体型の先端部が中間部で接続する構造。

-先端部の付け根は左右にしなりを持って曲がり、上下はサーボで動く。先端部先もしなる。

-尾本体部のフレームが、弓なりに曲がり復元する力、さらには固有振動を利用する。

-サーボで尾本体フレーム先端部をテザーで引く構造。

(サーボの負担を軽減させると共に、動きのリアルさ、強い推進力を狙う)

-身体部分のフレームの端に、L金具二個で2mm厚のプラボードで製作した尾のフレームを直角に固定し、しなりの力をボディーフレームに伝える。

-尾のフレームの高さ方向を先に向かって細くする事で柔軟性を調整。

-弓のようにしなる尾のフレームの先に重りをつける事で尾の振動を強める事を狙う。

-尾のフレームの先端に、サーボを取り付け、重りを兼ねさせる。

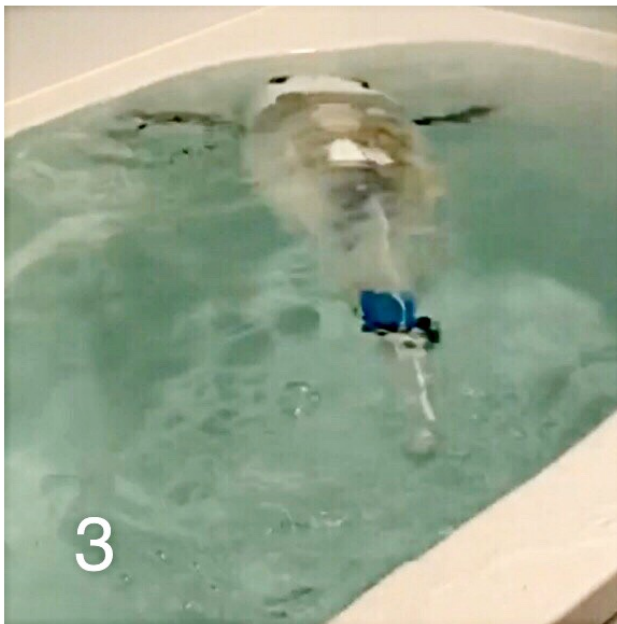
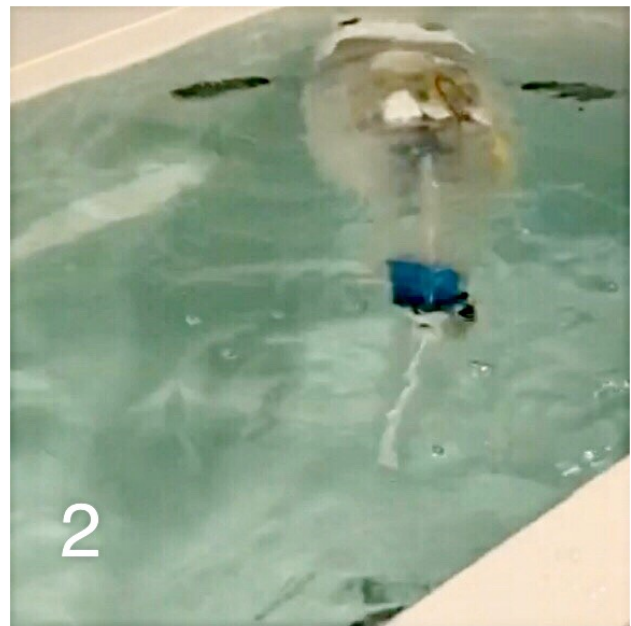
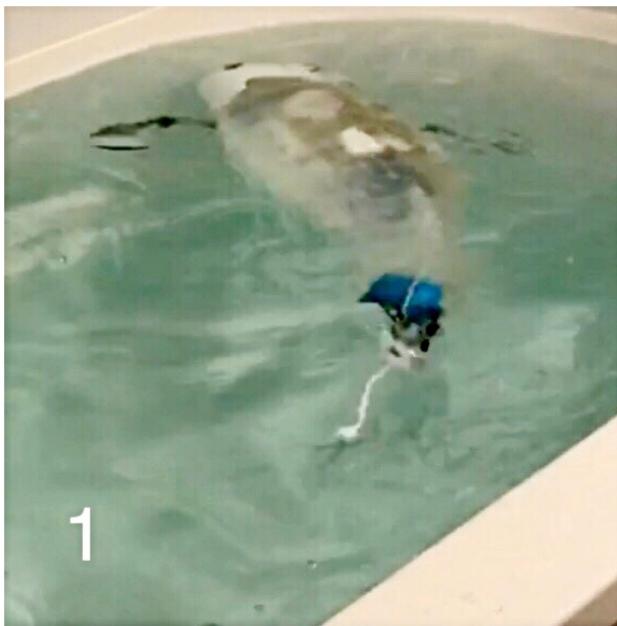
-尾のフレームの先端のサーボに、上下方向に動く尾の先端部を取り付ける。

-尾の先端部を取り付けるサーボホーンを、柔軟性のある樹脂で製作し、積層する事で硬さとしなり易さを調整。

-尾の先端部は、PP板をV字型に曲げて、上下方向の剛性確保と左右方向の剛性を下げる。

-尾先端部の取り付け部付け根で上下左右に曲がる特性を両立させる事で、上下と左右に尾を振った時にも推進力を得る。

-尾を上下に動かす時は、ボディー本体も上下にしなる事でより強い力で水をかき出す事を狙う



写真

尾の片側部分の動き、1.2.3.4.の順で進む

2.9 .ロボ化石の構造を考案

ロボ化石の用途を、生物模倣水中ロボットを作られる方や学校のクラブ活動での教材と想定し、間違って組み立てても壊れにくく修正しやすいこと、低価格で作れ、強度や加工精度はギリギリを追求せずにすることを考えました。そのうえで、どうしても強度や精度が必要な部分は工作機械が無くても作れるよう、精度がよく量産されている製品やその一部分を分解し、部品として応用する構造とする方針を立てました。

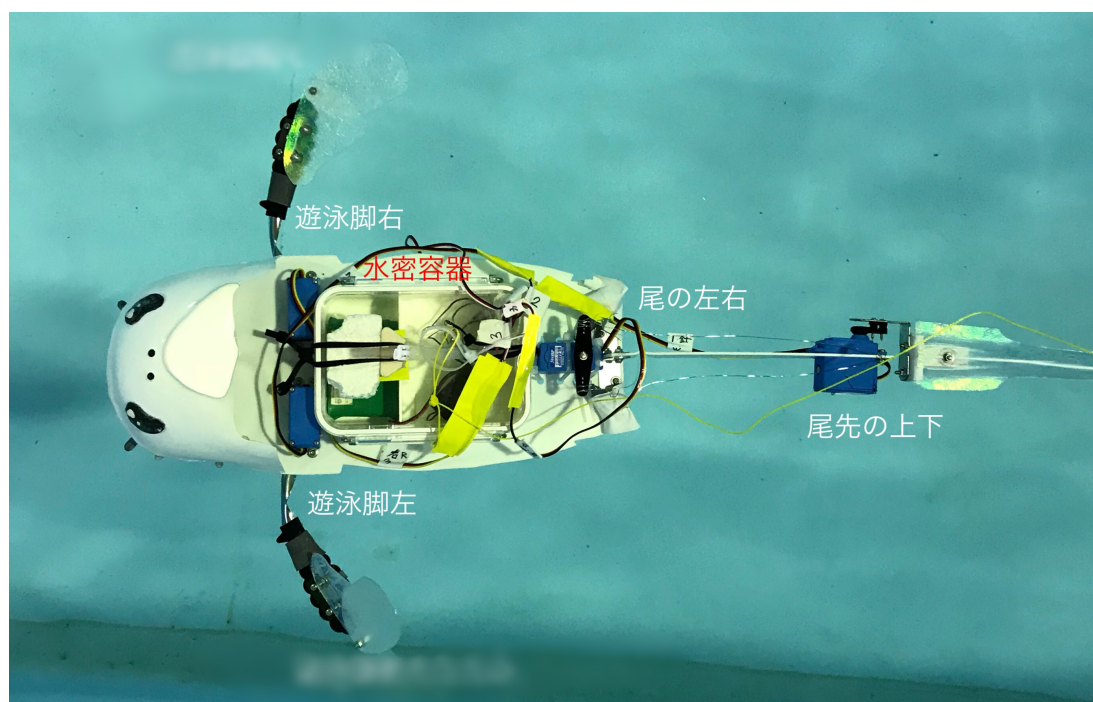


写真 ロボ化石ウミサソリの内部構造

ロボ化石、ウミサソリ の構造のポイント

- ・ 節足動物の外皮と似た柔軟性を再現

ウミサソリ の表皮を、水と比重が近く節足動物の外皮と似た柔軟性があるポリプロピレンの薄板で構成。

- ・ 柔軟性のある樹脂板のシャシーと蛇腹状の外皮でウミサソリの柔軟性を再現

- ・ 泳ぐ姿や骨格から分析し、動きに合わせて防水サーボ(モーター)を配置

- ・ 連続運転可能、調整の容易さ、乾燥重量の軽さ、故障しにくく、整備しやすい構造とする

防水サーボモーターを水冷、部分防水部分の容量の確保と開け閉めのしやすさにより実現。

- ・ **サーボモーター(サーボ)二つでも、基本的な潜行、浮上、前進を行える構成**

- ・ 最小構成はサーボモーター遊泳脚左右の二つ。

サーボが二つだと、車ラジコン用の送受信機などが安く入手できるので好都合です。そこで水棲昆虫のゲンゴロウを参考に以下の工夫をしました。

基本構成 →サーボ二個 (左右の遊泳脚に各一個、合計二個)

左右の遊泳脚を動かすサーボ →両方動かすと推進力となり、片方だけ動かすと左右に曲がる。

(水中での頭の上げ下げの為のきっかけ作り補助)

-大きく分厚い遊泳脚と、その先の薄い柔軟性のあるパドル部を前後に大きく移動する事で、重心が変化。(前に移動すると頭が下がる、後ろに移動すると頭が上がる)

オプション構成 →サーボを二個追加、合計四個 (よりスムーズに機敏に泳ぐ)

尾を左右に動かすサーボ、→ 曲がる時の舵、左右姿勢バランスを取る 推進力の補助

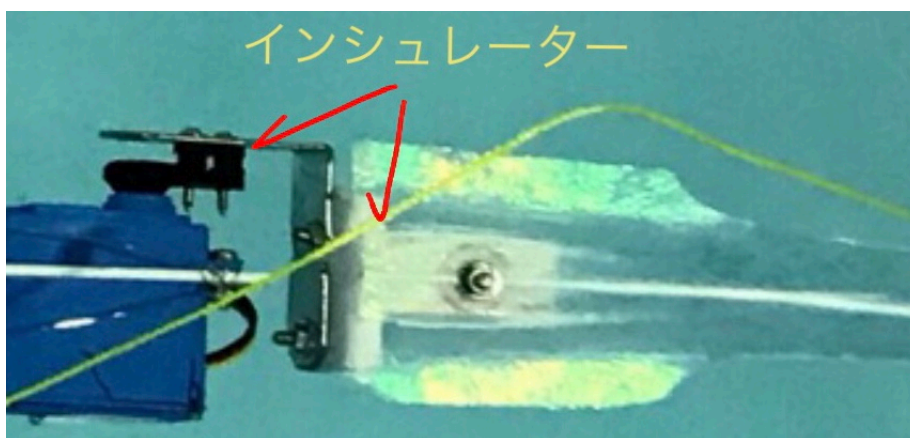
尾を上下に動かすサーボ、→ 潜行、浮上など、水中での頭の上げ下げの為のきっかけ付け、推進力の補助

- ・ **あえて反りや振動を起こす復元性のある樹脂フレームに水中サーボを取り付ける**

-尾先を上下に連続して振ると、上下方向の力が尾本体板バネからボディー本体フレームに伝わる。

-ボディー本体フレームの端に取り付けられたL金具を介して、上下方向にしなる本体フレームと、その動きを規制しない蛇腹構造のボディーがしなりと復元を繰り返し、推進力となる。

-尾先のサーボとサーボホーン取り付け部をインシュレーターを介して接続する事で、尾や尾先の不要な振動の吸収と共にサーボに無理な力がかかった時の保護を行う。



(インシュレーターとは、主に柔らかいゴムなどでできたクッション状の振動吸収部品で振動を抑制する為に、車のエンジンの取り付け部や高速回転するDVD/BDドライブなどに用いられています)

・やじろべえの原理で自動復元力を利用し、特別な回路や、プログラムなしに、安定したバランス、姿勢制御ができ、教育用の簡易なスクラッチ言語でも十分に泳ぐ安定性を実現。

-左右バランス→やじろべえの支点がボディーの背中部分に、おもりが両腕に来るように設定。

-前後バランス→やじろべえの支点が左右遊泳脚の根元の背中部分に、おもりがボディーフレーム前後端に来るように設定。

-前後バランスのおもりは、極力遠くに置く事で、遊泳脚を前後に漕いでいる時にも、ピッチングしづらくするように調整。

水に入れ若干浮く状態で支点を上から指で押してバランスを微調整。

イラスト上

ウミサソリ を前から見て、やじろべえの支点が背中、遊泳脚がおもりとなる



イラスト下

ウミサソリ を横から見て、やじろべえの支点が、腕の付け根、頭と胴体の後ろがおもりとなる



・ウミサソリロボットの比重

ウミサソリを水とほぼ同じ比重と想定し、防水区画以外のボディー内に水を入れる事で重りの軽量化を実現しています。これにより、移動時には水を容易に抜けるので軽く壊れにくい工夫を兼ねています。浮力は中性浮力(水中で浮きも沈みもしない状態)を中心に、底に住むタイプのウミサソリは若干重く、遊泳タイプは若干軽いと想定しました。潜水方式は、ダイナミカルダイブ方式で、通常は水面に浮上または水底に沈下していて、泳ぐ力で浮上か潜行し、浮力調整のために容量を変化できる空気タンクは持たない構成です。ラジコン潜水艦的にはウェットハル方式で、電池と受信機または教育用マイコンのみOリング付き容器で防水する構造としました。

地上重量 1.2kg

サイズ 全長80X全幅17cm. (遊泳脚を広げる55cm) X全高10cm. (尾を立てる27cm)

防水形式 ウミサソリ系生体模倣用部分防水構造 防水サーボ4個 防水箱1個

3.製作のポイント

3-1.購入しやすい材料で作る

製作するウミサソリロボットのポイントを整理した上で、どのように実現するか、まずは頭で考えた上で、アイディアスケッチを書き、その上で作りやすいか実用的な強度はあるかなどを考えて行きました。このプロセスの中で、部分的な試作や過去の経験で実現可能かなど、何度も検討を続けました。

今回は、ホームセンターや100円均一ショップ、ネット通販で手に入りやすい材料のみで作る事にもこだわりました。特にフレーム部材、尾のバネ部材は、素材のしなやかさが直接ウミサソリの性能に関係するので、作られる時には指定のものをおすすめいたします。アルミやアクリル板、FRP、エンジニアリングプラスチックなどでがっしりと作りたくなるかも知れませんが、生き物らしさにつながる部分なので、グッとこらえてしなやかで柔らかい構造、比重が似た素材をお試してください。

防水サーボ以外は比較的低価格です。防水サーボは次の水中ロボットを作る時にも使えますので、学校などでは長い目で見てまとめて購入する事もお勧めします。

(今後、安いミニサーボを防水加工した、小型化の検討も行いたいと思っています)

材料は以下の通りです。(いくつか落ちがあるかもしれませんが)

-フレーム部材 低発泡スチロール板 (プラボード2mm厚 B4サイズ タミヤ)

-尾のバネ部材 同上 (予備部材としてより柔らかい、PP製まな板も用意、が適さず)

-ボディー部材 390x550mm 0.75mm PP(ポリプロピレン) 板 ダイソー

- 遊泳脚フリッパー部分 同上
- 尾の部材 塩ビA3クリアファイル表紙 ダイソー
- 頭部部材 お面 ハロウィンピエロのおでこの部分 ダイソー
- 金具部材 ホームセンターのL金具小 x4
- 遊泳脚 ミニトングを真ん中で切り曲げて流用 キャンドゥ
- 羽ばたき機構部材 蝶番小 ホームセンター
- ナベネジ、ナット M3 -8mm. 10mm.
- ウォータープルーフサーボ ハイテック HS-646WPを6Vで使用 X2 ~4個
- 防水容器 (弁当箱)岩崎工業 B-2302NW [ランチボックス パワーラインキーパー 2号]改造
この中に単三電池5本とラジコン受信機または、教育用マイコンを格納します。
- タイラップ再利用可能 セリア
- タイラップ再利用不可 中、小 セリア
- 水中ボンド エポキシ
- 強力瞬間接着剤ゼリー状
- 弾性接着剤
- ビニールテープ
- ステンレス線 0.45x10m
- プラスチック角棒5mm 30cm
- 重り 釣り用

3-2.加工に特殊な工具を使用しない。

今回はあえて、中高生でも作れる様に工作用紙、PP板をハサミで切り抜き、低発泡のスチロール樹脂の薄板をノコギリを使って切る方法を試しています。

とはいえ、電動ドリルがあると楽になりますので使用工具に含めました。

使用工具

- キッチンハサミ (多用途) ダイソー
- コードレス電動ドリル ボッシュ
- 金属定規 長いもの
- ドライバー
- ペンチ
- プラボード用ノコギリ
- グルーガン
- 金ノコギリの刃
- 調理用の鍋
- 湯沸かしポット

3-3. シンプルな構成で作りやすさと、電費の良さを同時に成立させる

柔らかな構造ですので、製作途中で力がかかり過ぎて壊れてしまう事は少ないです。また、固定には接着剤ではなく、タイラップを利用して、失敗しても再チャレンジしやすく工夫しました。具体的には以下の通りです。

- ボディー及びフレームは上下にしなる構造。
- フレームは、2mm厚のプラボード単板、防水容器固定用ガイドにプラ角棒を接着。

写真

フレーム製作中



- 防水容器は、再利用可能なタイラップで固定し、ネジなどでは固定せずにフレームのしなりを完全には否定しない取り付け方法を採用しました。



写真

PP板の曲げ加工中

- ボディーは、帯状にPP板を切り、半月型に曲げた後、鍋に入れ、熱湯を注ぎ放置し形状を記憶させました。(0.75mmPP材は120℃まで対応となっても、曲げたまま100℃の熱湯の中に入れ、放置し、冷却すると形状をある程度記憶する性質を応用)

-曲げたボディーのパーツは、両側面を重ね合わせながら穴を開けタイラップで固定しつなげる事で、柔軟性を確保しました。

最新情報はこちらに掲載しています

ロボ化石 Twitter

4.浮力とバランス調整の実際

水中生き物ロボ化石の最終的な性能は、実際に水に入れての浮力とバランス調整に左右されます。

ここでは、初泳ぎ→簡易調整→耐久性テスト→最終確認の各動画をご紹介しますので、ぜひ比較してみてください。また、水温や潜らせたい水深毎に微調整することをお勧めします。今回は、若干水に沈む様に作り、毎回状況に合わせて小さな浮力体を重心の上に取り付けて調整しています。ですので、毎回最初に水に入れるときには、ほぼ中性浮力の水系を命綱としてつけています。

テスト中の映像

運動性能の最終確認中 (ほぼ完成)

<https://mobile.twitter.com/2cvkoleo/status/942670594209755136/video/1>

耐久性テスト中

<https://mobile.twitter.com/2cvkoleo/status/938641037970440192/video/1>

簡易調整中

一通りの制作とテストが終了し、左右バランスの細部調整中
(撮影 日本水中ロボネット水中ビークルフリーミーティングにて浅野氏)

<https://youtu.be/hd0IF9TpL4Q>

初泳ぎ

大きな重りを下面にぶら下げて、適宜比重とバランスを調整中、この時は尾を左右には動かさず、ゲンゴロウ同様に左右ゆつえいきやくを中心にテスト

(撮影 日本水中ロボネット水中ビークルフリーミーティングにて浅野氏)

youtu.be/ieDLb_Tvl1I

5.防水の考え方と製作のポイント(とりあえずで作ると、全てを失う)

水中生き物ロボ化石を作る上で、乗り越えなければならないのが防水に代表される、水中ならではの工作や運用ノウハウです。詳しくは、日本水中ロボネットの公開資料の中に各種ノウハウがありますのでご参照ください。尚防水にはエポキシパテ、バスコーク、エポキシ接着剤EP001、ゼリー状瞬間接着剤、などが一般的に使われています。今回は、水中エポキシパテでケーブル取り入れ口付近を隙間なく固め(日常生活防水レベル)、乾燥後さらにゼリー状瞬間接着剤で水中エポキシパテの上をコーティング(水深3mまでで数時間の防水を確認)実施しました。ケーブルからの毛細管現象は、毎回使用後に乾燥させて対処しています。ケーブル途中にハンダを染み込ませるなどの対策をされる方もおられます。

今回気をつけたポイントのみご紹介します。

- ・ 蓋を開け閉めしたら、必ず防水の確認をする。
- ・ 防水の確認をしやすい構造をあらかじめ作り込む。

(例)

防水エリアに、あえて直径1mm程度の穴を開けておき、極細ストローを隙間なく差し込み、口で吸うと、口の中の繊細な感覚の変化で(センサー)で容易に空気漏れが確認できる。使用時は防水テープなどで防水する。

- ・ 防水ケースの固定は防水ケースの変形に注意する。

(例)

防水ケースを頑丈に固定したつもりでも、取り付け方によっては水中でケースを歪ませてしまい、水漏れが起きることがあるので取り付け方法は注意が必要です。

- ・ 電気系の接続部の防水に注意する。

(例)

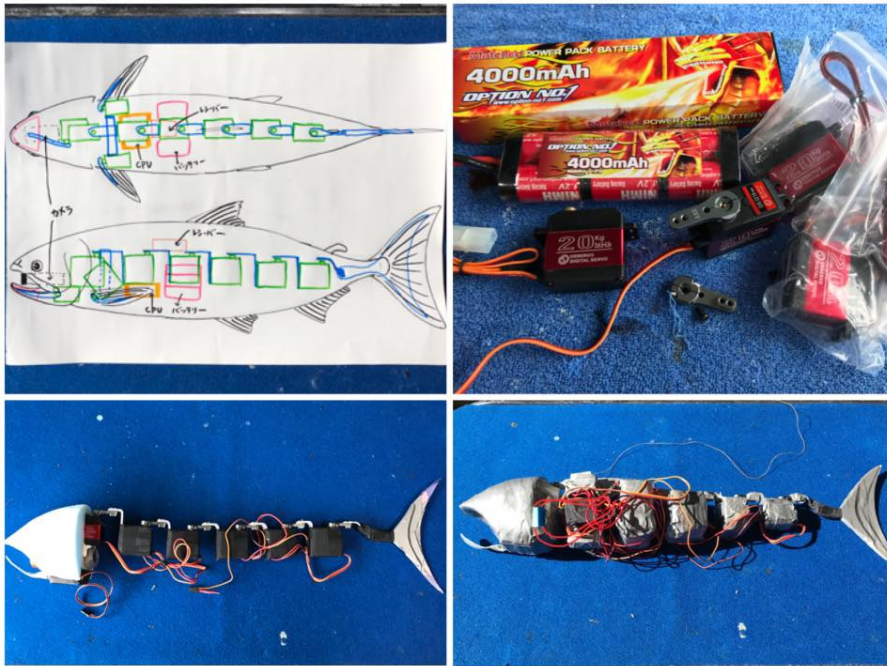
徹底的に防水する方法と、ある程度外しやすくして毎回外して乾燥、通電グリス塗布など適材適所で考える事もオススメです。

- ・ ケーブルからの漏水、毛管現象、ケーブル取り付けの隙間からの漏水にも注意する。

6.水中生き物系ロボットの構造例

ロボ化石用のメカニズムを考える上で参考にさせていただきました、海洋楽研究所式の水生物ロボットと、学生チーム、Trybots (トライボッツ) のペンギンロボット「モルペン」を一部ご紹介いたします。

海洋楽研究所式 水中生物ロボット、産卵中のシャケと一緒に泳いだ撮影可能なロボット



林正道氏の海洋楽教室にも何度か参加させて頂きました。海の生き物についての解説とともに次々にさまざまな水中生物ロボットを泳がせ、子供達に触らせて大いに盛り上がっていました。また、多くの支援者の方々が裏方として活躍されておられ、素晴らしい活動でした。

海洋楽研究所式 水中生物ロボットは、海洋楽教室での使用に最適化された素晴らしい水中生物ロボ

ットです。この構造を発展させ愛知工業大学古橋研究室水中ロボットプロジェクトさんが、コンピューター制御を組み込み、泳ぎ方を解析、再現したイルカやウミガメロボットを作られ、沖縄での水中ロボコンでも大活躍されています。

海洋楽研究所式 水中生物ロボットから学ばせて頂いたポイント

- ・ 魚の形をしたロボットの表皮が、伸縮性のある発泡ゴム(ウエットスーツの薄い素材)でできており、内部のメカニズムの動きに合わせて伸縮できる。
- ・ 水中生物ロボットの表皮で防水されており、内部は密閉構造となっている。
- ・ 内部にサーボや受信機、バッテリーを、骨に見立てたペットボトルや肉に見立てた綿で包む構造で魚の形を形成。
- ・ 比重を生き物と揃える為に、個々のサーボにおもりを取り付けている。
- ・ 個々のサーボをアルミ板とクッション材で接続し、テープで止めて構成。
- ・ 尾の動きは、サーボを必要に応じてつなげ、必要な動作角度、パワー、動きを得る。
- ・ 水中の生き物を泳ぐ姿や骨格から分析し、動きに合わせてサーボを配置接続。
- ・ バッテリーは外部に配線を出し、取り外ししなくても充電可能な構造。
- ・ 防水と着色について、伸縮可能な独自のテクニックを開発され、絵心のある林さんならではのリアルな外見を持つ。(液体ラテックスとアクリル塗料などを配合)
- ・ 放熱が追いつかず10分以上連続して泳がせると内部でサーボが焼きつくこともある。
- ・ 修理や比重調整の度に表皮を切り、おもりを調整、再度表皮の接着が必要。
- ・ 生き物に合わせた比重の水中生物ロボットなので重い。
- ・ 落下させたり、持ち方が悪いとサーボを壊しやすい。
- ・ 操作・整備・運用の各種ノウハウ継承が難しい。

トライボッツ式ペンギンロボット、科学館の長期イベントで子供が操作したロボット

科学館での長期利用に向けて開発、実績をあげている、Trybots（トライボッツ）のペンギン型水中ロボット「モルペン」は、実使用での信頼性や性能要求に合わせ、海洋楽研究所式とは全く違う構造となっています。数日動かすのと、数ヶ月業務用として動かすのとは全く違い、しっかりとした樹脂フレーム、強度と信頼性を重視した独自の(工作精度、高信頼性、整備性)羽ばたきメカニズム、第8世代では光造形3Dプリンターによる外皮を持っています。またお子様に操作しやすいように、ペンギン人形型コントローラーやアーケードゲーム用ジョイスティック、羽ばたく着ぐるみ、VRグラスとも組み合わせられる構成で開発されています。

写真

Trybots（トライボッツ） ペンギン型水中ロボットモルペンと人形型コントローラー



水中生物ロボットを作るときには、その用途をイメージし、構造を考える事の重要性がわかります。

7.国際ロボット展、でのフィールド調査



写真 ラジコンモードで操作体験中

2017年12月『つくる☆さわれる国際ロボット展』組み立て式プールにて、“ロボ化石ウミサソリ 初公開”と題しデモと説明の後、希望されたお子さん達約50名に実際に操作体験をしていただきました。当日はトライボッツのモルペンが圧倒的な安定性を示す中、ウミサソリ ロボ化石もなんとか大きなトラブルなく一日中動き続けました。その結果から良かった点、問題点などを洗い出し、後日防水区画内の部品の取り付け方や、尾のワイヤーの素材変更など一部修正を加えました。

また、ロボ化石用の尾のメカを応用した、地上用のチンアナゴロボも人気を集めました。当初想定していた、電子工作やロボット好きな親子連れに加え、古生物好きな方々からの支持や協力も得られ、当日ご紹介した、ロボ化石のTwitter上の動画再生回数もその後の一月で数万回となり、多くの方に見て頂くことができました。

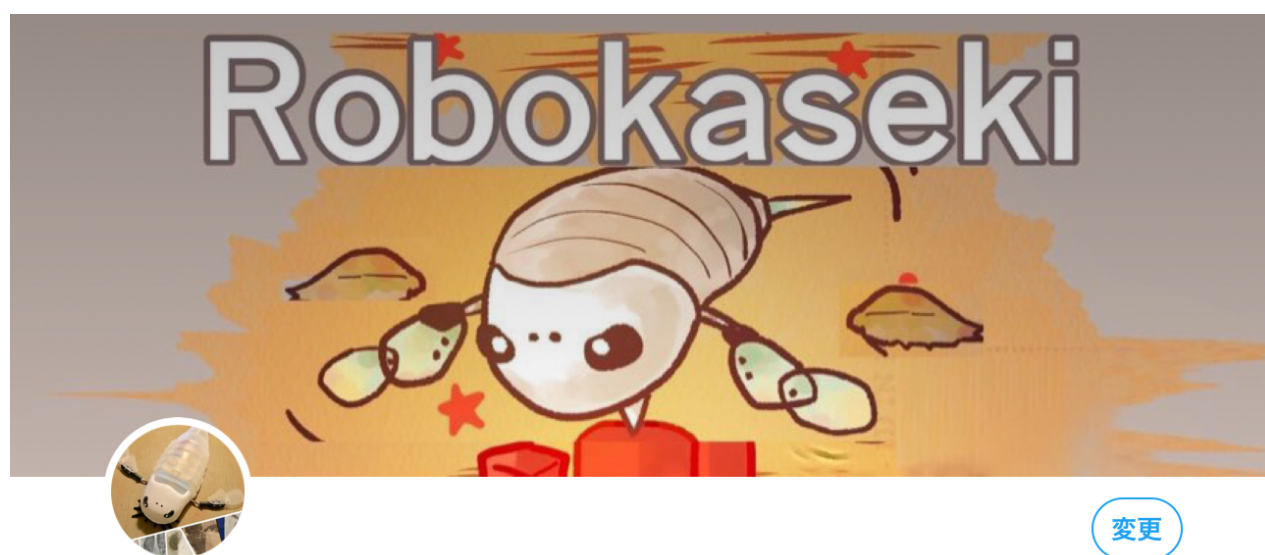
8.最後にひとこと

実際に作ってみようと思われた方の為に、簡単な工具で作れるもう少し詳しいマニュアルを別途ご紹介予定です。型紙をダウンロードして印刷、樹脂板に張り、鉄ノコギリなどで切り出す。PP板をハサミで切り、湯で曲げる、メカを組み込み、防水ケースに入れる。比較的怪我もなく、安全につくりやすい手順を心がけました。

ただし、これだけでは外観や動作は地上ではするものの、水の中に入れるとなかなか泳がないのも確かです。お作りになろうと思われたら、ご興味を持たれたら、ぜひ、Twitterでロボ化石をご覧ください。調整のノウハウなどお伝えしたいと思います。

最新情報はこちらに掲載しています

ロボ化石 Twitter



Robokaseki

@2cvkoleo

水に住んでいる古代生物をロボ化石にしてどう泳いでいたのかなど考えて、簡易再現を試みています。社会貢献活動として本業の合間に実施中。クラゲや水中二足歩行ロボ教材も開発中。つくってさわれる国際ロボット展ロボット体験企画コーナー、水中ロボットゾーンにてロボ化石のウミサソリ 君を泳がせました。イラスト提供、よ志

9.おすすめの情報

水中 ウミサソリ の化石も見られる、オススメの博物館
群馬県立自然史博物館 (群馬県富岡市)
多摩六都科学館 (東京都西東京市)

魚の立体化石が見られる博物館
学校法人城西大学水田記念博物館大石化石
ギャラリー. (東京都千代田区)

化石購入先 FFストア



節足動物の色

今回は、あえて体をポリプロピレン板素材の半透明色を生かし、遊泳パドル部と尾先を構造色にして動作のわかりやすさを重視しました。途中リアルな塗装も一部試しましたが、節足動物をリアルにすると、巨大なゴキ、ムカデに見え、女性より大不評でしたので平和な開発継続には色使いにも注意が必要です。

謝辞

群馬県立自然史博物館 主幹(学芸員) 高桑祐司博士 (理学)にウミサソリ の資料提供、専門的な見地からのご意見、ご協力いただきました。

城西大学 化石ギャラリー学芸員 宮田真也博士 (理学) に、各種ご協力いただきました。
(城西大学化石ギャラリーでお会いした国立科学博物館の古生物系ボランティアガイドの方々にも貴重な意見をいただきました。)

海洋楽研究所(かいようがく) 林正道さん に、林式魚ロボットの成功失敗など各種ノウハウのご提供などご協力いただきました。

NPO日本水中ロボネット様の水中ビークルフリーミーティングに参加させていただき、実験をさせていただきました。

アクアモデラーズ メンバーの方々から、水中ラジコンについて技術的なノウハウのご提供などご協力いただきました。

松山工業株式会社、鵜久森社長に、リサイクルラバーのご提供、つくる・さわれる国際ロボット展での展示などご協力いただきました。

彦坂明孝氏 山縣広和氏に、記事製作に関して専門的なご意見ご協力をいただきました。

浅野家の方々に、水中撮影、お子さんによる操作実験などにご協力いただきました。

木内吏香氏に記事校正にご協力いただきました。

参考資料

古生代の生き物については、海外の方が情報が多く、まずはこちらで調べてから、博物館へ行き、ご相談しました。

Palaeos

<http://palaeos.com/metazoa/arthropoda/eurypterida/eurypterida.html>

Eurypterida Burmeister 1943

Synonyms Gigantostraca Haeckel 1866

Ordovician to Permian, Cosmopolitan

Phylogeny: Chelicerata : Xiphosura + (Arachnida + * : Stylonuracea + (Eurypteracea + (Mixopteracea + -Pterygotina)

Links: Eurypterida - UCMP; The possible lifestyle of a Late Ordovician eurypterid - by Jeffrey Minicucci - very interesting essay on the mode of life of *Onychopterella augusti*; Faktablad om sjøskorpioner - material on Eurypterids - in Norwegian - includes a photo of a lovely *Mixopterus* specimen; Eurypterida - Dendrogram and genus list, by Mikko K. Haaramo; Dr Simon J. Braddy - research on Eurypterids, and on Paleozoic arthropod trackways as documenting the diversity and palaeoenvironmental distribution of the early terrestrial arthropods.; bulletin board Re: Eurypterid Chat; Where? - some notes on the late Silurian Williamsville formation of Buffalo, New York, and the Eurypterid fauna

出土した多数の化石から、ある程度の泳ぐ動作が想像されており、参考にしました。

Youtubeの化石の写真から泳ぐ姿を作った動画のURL

<https://www.youtube.com/watch?v=uTxmXYL89zA&feature=youtu.be&app=desktop>

クモとサソリは、遺伝子から共通の先祖から進化しているのは間違いない。その共通先祖はウミサソリ系と近い関係、いや遠いとか。ウミサソリの一部が陸に上がって、、、と諸説あり？ 結局のところ現世のサソリには泳ぐタイプはいない、むしろサソリは水に溺れると疑問は続きますが、色々とわかってきて面白くなったきっかけの記事です

古世界の住人 オフィシャルブログ

<https://ameblo.jp/oldworld/entry-10674385360.html>

Peabody Museum Yale University

<http://peabody.yale.edu/exhibits/tree-of-life/evolution-along-branches-tree-life>

ウミサソリのCGは、とっても本物らしいのですが、これでは泳がないな,,,とつい思ってしまいました。 潰れた化石のまま?の再現とおもわれるものもあり、やはり作って泳がせないとわからないと作ってみようと思うきっかけにもなりました

BIOZONE International

<https://www.thebiozone.com/weblink/ngss-bio-2-3dmodels/>

Seascorpion 3D.

https://sketchfab.com/models/b8b356eb20d64512b1baef0c1f1f82a1/embed?camera=0&ui_infos=0&ui_related=0

Paleo Profile - Sea Scorpions. まとめ動画的なもの

<https://youtu.be/4dTiUHvIm0s>

parasaurolophus56 Euryptérides

<https://youtu.be/ofv0OzP75cc>

ヘビとチンアナゴの動きを解析し、ロボットに生かす研究です。 サーボモーターを連ねて、詳細に制御するアプローチを拝見しつつ、別の方法で簡単に教材として成立しないものかと開発を行いました。クネクネと、ピクピクの動きの組み合わせがポイントかなあと想像。生き物は計算せずに自然にやっている、化石を見ると、古生代から獲得していた動きとわかり、生き物すごいと感じました。

チンアナゴを参考とした土中推進を行う索状移動体 ―第1報:土中推進の基本原則―

Burrowing Cord Robot Inspired by Spotted Garden Eel -1st Report: Basic Principle of Burrowing Locomotion-

渡辺 祥広(東工大) ○学 楯 貴志(東工大)

正 塚越 秀行(東工大)

<https://www.jsme.or.jp/rmd/Japanese/Awards/2015/1P1-S02.pdf>

イラスト、本文、写真の権利は著作者が保持します。

許可なく非営利かつ教育学術目的以外での、複製・配布・配信は行えません。

記事制作

AFK研究所合同会社 代表社員 近藤敏康

イラスト提供 よ志