

生物模倣型水中アクチュエータ

— 遊泳方法による魚種の分類と導電性高分子アクチュエータの開発 —

学生員 杉山 公一* 大和 健太郎*
正員 石井 和男* 金藤 敬一*

A Biomimetic Underwater Actuator

- Categorization of fish using swimming behavior, and development of fin actuator using electro conductive polymer -

by Kimikazu Sugiyama, *Student Member* Kentaro Yamato
Kazuo Ishii, *Member* Keiichi Kaneto,

Summary

Precise motion control without mechanical noises is a technical issue on the operations of research vessels and underwater vehicles in order to observe creatures in actual. As a solution for the problem, we pay attentions to bio-mechanisms of underwater creatures, especially undulately fins being used for attitude control. Bio-mechanisms of creatures are adapted to environment as a result of evolution. If the motor control mechanisms of the creatures can be introduced into underwater robots, there is a possibility to realize a high performance actuator. In this research, we have been trying to develop a bio-inspired underwater actuator instead of screw propellers. As the material of the actuator, electroconductive polymer is used as an artificial muscle. We describe the concept of the developing actuator, behavior of water creatures and development of electroconductive polymer and the results of performance evaluation test of the developing electro conductive polymer.

1. 結 言

近年、世界人口の急激な増加と共に、食糧消費やエネルギー消費が急増している。それに伴って水産資源や海底鉱物資源、海底油田など、海洋開発の必要性はますます大きくなっている。ところが海中は極限環境と言われ、人類が容易く調査や作業できる環境では無い。そこで人間の代わりに調査するロボットが必要となる。これまでも多くの水中ロボットが開発されてきているが、今後更に多様化された水中ロボット開発が必要である¹⁾。

これまでに開発されている水中ロボットには、高知能化や高効率化、ロボット間通信システムの確立、水中での自己位置同定やナビゲーションシステムの構築など数々の課題がある。海中作業や生態調査に使用するためにはさらにアクチュエータの発するメカニカルノイズ対策や外乱中でも適応可能な精密な姿勢制御方法が必要であるなどの問題が挙

げられる。実際に沿岸域で作業する場合、潮流や波浪など外乱の影響が多く、正負の切り替えを迅速に行うことが難しいスクリーブローバを装備した水中ロボットでは、精密な姿勢制御やホバリングが困難であるなどの問題がある。また、船舶による音響探査や生物調査ではプロペラを停止し船体をドリフトしながら行うなどの対策が採られている。

海中に目を向けてみるとそこには魚類をはじめとした多くの生物が息息しており、潮流や波浪などあっても遊泳し生活を営んでいる。さらに種類によってはそうした外乱の中でも任意の水域に留まったり、ヘリコプターのようにホバリングしたりすることが可能である。そこで筆者らは、水中生物の遊泳能力に着目し、その機能を模倣したアクチュエータを製作することでそれらの問題の解決を図ることを目指している。

模倣するアクチュエータの対象として、魚類の鰭（ヒレ）に着目する。既に多くの研究者によって水中生物の鰭を模倣したモデルが製作されている。例えば尾鰭を模倣した研究として、Triantafyllou のマグロを模倣したロボット”RoboTuna”²⁾の開発や、同様にマグロの尾鰭の骨格構造を模倣した推進用振動翼を製作した森川ら³⁾の研究がある。また中島らのイルカの形状を模倣したイルカ型ロボット⁴⁾の開発、平田らの魚の尾鰭を模倣したロボット⁵⁾等の研究が挙げられる。

次に胸鰭を模倣した中央ヒレ型の研究について見てみる

* 九州工業大学

と、加藤らの3軸胸鰭運動装置付き水中ロボット"PLATYPUS"の開発⁶⁾や、戸田らの屈曲型側ヒレを持つ水中移動体の研究⁷⁾、Willyらのイカ型ロボット⁸⁾が挙げられる。また体全体を動かすことで推進するウナギ型としては小林ら⁹⁾の研究報告がある。より魚に近い模倣型ロボットとして三菱重工が製作した鯛やシーラカンスを模倣したロボット¹⁰⁾がある。このように魚の鰭に関する研究や鰭を模倣したアクチュエータを搭載する水中ロボットの開発が行われるようになってきている。

魚種により移動に使われる鰭は様々であるため、本論文では最初に魚の鰭の形状や生息域等を数値パラメータとして評価し、魚の遊泳手法をクラスタリングした。その結果をもとに開発する鰭型アクチュエータに必要な機能の検討を行い、導電性高分子を用いて鰭アクチュエータの試作を行った。以下では開発したアクチュエータについて述べる。

2. 生物の遊泳方法

長い年月を経て淘汰を繰り返してきた生物の機能は、その生物が棲んでいる環境に最適化されたものの一つであると言える。水中生物について遊泳方法を見てみると種類によって様々な泳ぎ方がある。四肢を用いるものや鰭を使うもの、ジェット推進を備えた種類などが挙げられる。水中に生息する生物の代表として魚類があるが、魚類の遊泳運動について分類を見てみると、C.M.Brederによってアジ型、ウナギ型、フグ型の三種類に分類され¹¹⁾、その後Lindseyによってさらに細かく分類されている¹²⁾。分類は2つのモードに分けられ、尾鰭と体を使用した動き(BCF: Body and/or Caudal Fin locomotion)をさらに細分化したものの、背鰭・尻鰭と胸鰭を使用した動き(MPF: Median and/or Pectoral Fin locomotion)をさらに細分化したものがあ

番号付を行った。

生物の持つ機能を模倣したアクチュエータを製作するには、そのアクチュエータを搭載したロボットを使用する水域の環境に適した生物の機能や形状を用いることが重要であると考えられる。そこで筆者らは前述の各遊泳モードに属する魚種を選定し、各魚種についていくつかの特徴を挙げクラスタリングを行った。クラスタリングの手法には自己組織化マップ(Self Organizing Map: 以下SOM)¹³⁾(Appendix参照)を用い、色々な環境下においてどの遊泳モードが適しているか検証した。クラスタリングに使用した魚種とパラメータを表1に示す。魚種はBCFとMPFの中のそれぞれの遊泳モードに該当する魚種を選定し、アオザメ、アカエイ、アナゴ、Amiacalva、ウナギ、カワハギ、キュウセン、クロマグロ、サケ、デンキウナギ、フグ、ニジマス、ハコフグ、ハリセンボン、Blackgohst、マアジ、マサバの計17魚種を用いた。また使用するパラメータは大別すると、A)全長及びアスペクト比、B)行動時間帯、C)生息層、D)生息域、E)生息地、F)姿勢制御、G)回遊性、H)使用する鰭、I)体・鰭の動き、J)食性である。以下各パラメータについて詳述する。

A)は魚体の縦横比について、B)は主に行動する時間帯に

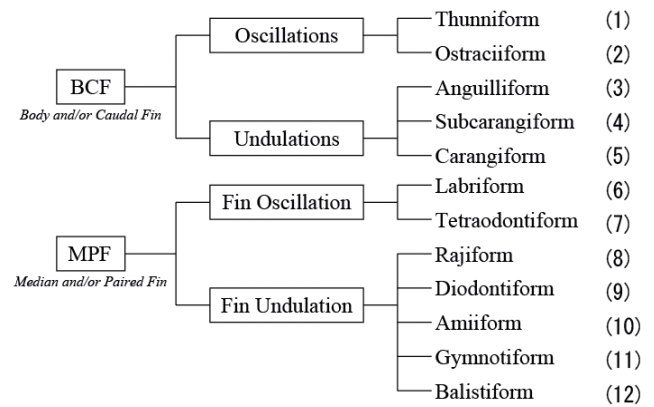


Fig. 1 Classification of fish locomotion¹¹⁾¹²⁾

Table 1 Feature parameters of fish

Swimming Modes No	Fish Name	A)		B)		C)			D)				E)			F)		G)		H)				I)	J)
		Length	Aspect Ratio	Active Diurnally	Surface	Middle	Bottom	Rock	Sand	Mud	Migration	Sea	River	Lake	Hovering	Backward	Sea going	Go back	Caudal fin	Median	Pectoral fin	Body	Undulation	Fish-eating	
(1)	Blueshark	1.000	0.40	1.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.25	0.25	1.00	
	Tuna	0.750	0.24	1.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.25	1.00	
(2)	Boxfish	0.075	0.18	1.00	0.00	0.50	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	
	Sea eel	0.325	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.50	0.50	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
(3)	Eel	0.250	0.60	0.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.25	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
	Salmon	0.250	0.26	1.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	1.00	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.25	0.00	0.00	0.75	0.75	1.00	
(4)	Rainbow trout	0.200	0.24	1.00	0.25	0.25	0.50	0.75	0.00	0.00	0.25	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.75	0.75	1.00	
	Mackerel	0.100	0.26	1.00	0.00	0.25	0.75	0.50	0.00	0.00	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	1.00	
(5)	H.mackerel	0.125	0.30	1.00	0.25	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00	0.75	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.50	1.00	
	Wrasse	0.075	0.28	1.00	0.00	0.25	0.75	0.50	0.50	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.75	0.00	0.50	0.00		
(6)	Puffer fish	0.250	0.22	1.00	0.00	0.25	0.75	0.75	0.25	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.75	0.50	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	
(7)	Ray	0.125	0.24	0.25	0.00	0.25	0.75	0.25	0.50	0.25	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.25	0.25	0.50	1.00	0.00	
(8)	Porcupine fish	0.075	0.21	1.00	0.00	0.25	0.75	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.50	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00	
(9)	Amiacalva	0.125	0.32	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	1.00	0.75	0.00	0.00	0.25	0.50	0.00	0.00	1.00	1.00	
(10)	Electric eel	0.625	0.62	0.25	0.00	0.00	1.00	0.25	0.25	0.50	0.00	0.00	0.75	0.25	1.00	0.75	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.25	1.00	1.00	
	BlackGohst	0.125	0.25	0.25	0.00	0.50	0.50	0.75	0.25	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	1.00	0.75	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	
(11)	Thread-sail filefish	0.100	0.11	1.00	0.00	0.25	0.75	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.75	0.00	0.00	0.25	0.25	0.25	0.00	1.00	0.00	

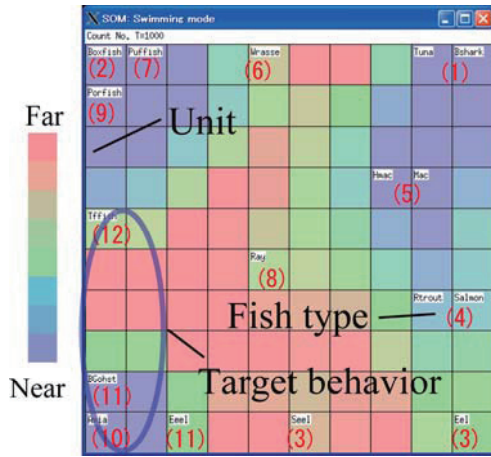
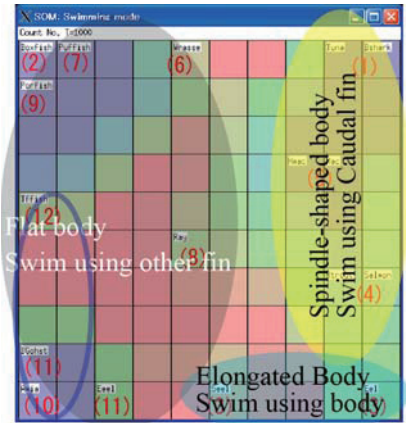


Fig.2 Result of categorized map using SOM

よって、昼行性と夜行性に分類した. 次に C)は主に息息する深度層を底層, 中層, 表層とし, D)は水域を海域, 河川域, 湖沼域に, E)は場所の環境として岩礁帯, 砂地, 泥地, 回遊として分類を行った. そして F)ではホバリングや後進が可能かどうかについて分類し, G)は溯上, 降海するかについて分類した. H)は遊泳時に主に使用する鰭・体(尾鰭, 胸鰭, 背鰭・尻鰭, 体全体)で分類し, I)は体や鰭を動かすときに, 振動させるか, それとも波動させるかで分類, J)は他魚を襲って食べる魚は総じて瞬発力があるので, 魚食性があるかどうかを分類した. それぞれのパラメータの値は[0, 1]に正規化して使用した. 今回のクラスタリングでは全 17 魚種, 23 のパラメータを比較しクラスタリングを行った.

クラスタリングした結果を図 2 に示す. このとき学習回数約 300 回で学習結果に変化が無くなったため, 収束したものと判定した. 図の一つ一つの升目はユニットを表し, 色の濃淡は隣接するユニットのユークリッド距離を表しており, 濃い色ほど近いことを意味している. また, 図中の番号は図 1 の (1) から (12) の遊泳モードを表す. 丸い形の実線で囲った箇所は本研究で目標とする遊泳モードを示している. また図 3 に図 2 の分布から読み取れる特徴を示す. 以下図 3 のそれぞれの評価について詳説する.

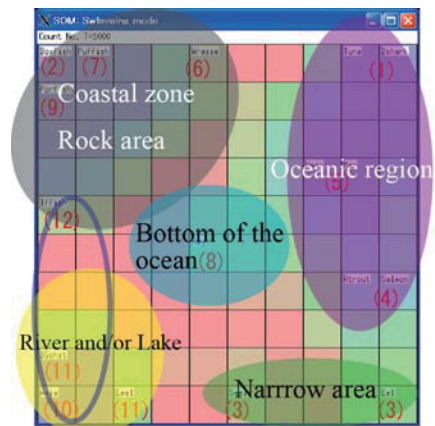
図 3 の (i) は体形と推進時に主に使用する鰭で評価した. 大別すると, 形状が高速遊泳に適した紡錘形かつ主推進器に尾鰭を使用するグループとそれ以外の形状で推進時に尾鰭以外の鰭を使用するグループ, 細長い体形で体全体を使って推進するグループの 3 グループに分類されている. この分類では主にパラメータの A) や H) に係わっている. (ii) では推進時に使用する鰭や体の動作が振動的かまたは波動的かどうかで評価した. (iii) はパラメータの C) D) E) を総合した息息環境で評価した. (iv) ではクラスタリングに使用した魚種の尾鰭形状で評価した. 尾鰭の形状は様々な



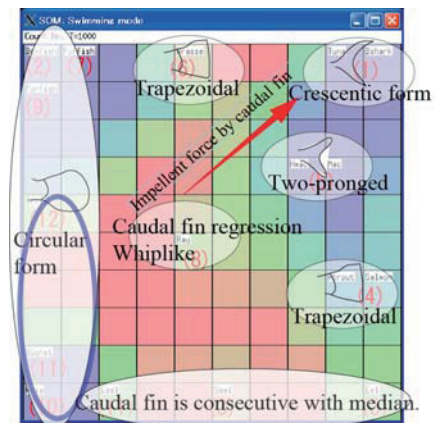
(i) Body type and fin motion



(ii) Stroke motion



(iii) Living area



(iv) Caudal Fin type

Figs.3 Classified by each parameter

種類が存在するが、今回用いた魚種では計5種類の尾鰭形状で評価した。

以上の SOM の結果から、様々な水域毎で運用する生物模倣型水中ロボットを開発するときに、導入する最も有効と思われる遊泳モード及び機体形状、機能について考察する。

・沿岸域における運動

沿岸域調査を行う水中ロボットは、潮流の影響や浅ければ波浪の影響を受けやすいという特徴がある。こうした外乱に対し正確な姿勢制御を行うためには図3(i), (iii)から、(2)Ostraciiform, (6)Labriform, (7)Tetraodontiform, (9)Diodontiform, (12)Balistiformに属する魚種の鰭形状や生体機能を模倣することが望ましいと推測できる。これらの遊泳モードは尾鰭以外の鰭をうまく使うことで外乱中でも魚体を制御している。また(ii)から鰭の動作は波動的でも振動的でも対応可能であることがわかる。今回クラスタリングに用いた魚種の魚体を見る限り、機体形状については平べったい形状や寸胴、細長いものなどで運用可能であると推測できる。

・広範囲における運動

外洋を調査する水中ロボットの場合、広範囲にわたり長時間調査することが望まれる。図3(i), (iii)より(1)Thunniform, (4)Subcarangiform, (5)Carangiformに属する魚種の鰭形状や生体機能を模倣することが望ましいと推測できる。主な推進器として尾鰭が用いられ、それ以外の鰭は魚体が傾斜することを防ぐ姿勢安定と、方向転換に使われる¹⁴⁾。機体形状は紡錘形や涙適型が適していると推測できる。また(ii)から推進時の動作は振動的な動きが望ましいと推測できる。

・河川域における運動

河川は一様に流れが存在し、水中ロボットは其中で姿勢の制御や、ミッションを行う必要がある。図3(iii)より(10)Amiiform, (11)Gymnotiformなどの魚種の鰭形状や生体機能を模倣することが望ましいと推測できる。魚体は細長い形状であることが多く、帯状の鰭を持つ種類も多い。また(ii)から推進時の動作は波動的な動きが望ましいと推測できる。

・狭域における運動

沈船内部や海底洞窟探査など狭域におけるミッションの多くは危険を伴うため、水中ロボットで行うことが望ましい。図3(i), (iii)から海、河川に係わらず狭域では細長い形状が適していると言え、(3)Anguilliformに属する魚種の鰭形状や生体機能を模倣することが望ましいと推測できる。

(ii)から推進時の動作は波動的な動きが適しており、また(iv)から尾鰭は必要とせず機体形状は十分に柔軟性を持った細長体が適していると推測できる。

・海底面における運動

図3(iii), (iv)から海底に張り付いて行う海底面調査



Fig.4 Fishes of MPF swimming modes (in case of Amiiform, Gymnotiform and Balistiform)

などでは、尾鰭以外の鰭が必要だが、尾鰭は不要であると推測できる。クラスタリングに用いた魚種の形状は、海底に接する側は平らで、その反対側は流線形状になっている。

(8)Rajiformに属する魚種の鰭形状や生体機能を模倣することが望ましいと推測できる。また(ii)から鰭の動作は波動的なものが適していると考えられる。

・尾鰭形状アクチュエータ

推進器としての尾鰭について図3(iii), (iv)を見ると、高速航行では三日月形の尾鰭、中速域では截形(せつけい)、外乱の多い水域では円形となっており、狭域或いは海底面では尾鰭をあまり必要としていないと言える。三日月形の尾鰭は、大洋を長時間持続的に遊泳する魚種に多く見られ巡航時のエネルギー効率が良い形状といわれている¹⁴⁾。また、截形や円形は長時間の持続的遊泳には向かないが中距離や短距離、瞬発力の必要な遊泳時に適していると推測できる。図3(ii)より、ホバリングや後進など魚体を細かく姿勢制御する遊泳モードの多くは、鰭を波動的に動かしている。それに対し、鰭を振動的に動かすモードは比較的速度の速い魚種に多く見られる¹⁵⁾。このことから細かな姿勢制御を行うアクチュエータには波動型の鰭が適していると推測される。

水中ロボットに水中生物を当てはめると、ミッションに依存して効率良いアクチュエータ及び形状を選択する必要がある。本研究では、低速域から静止時の水中ロボットの姿勢制御を主体に司るアクチュエータ開発を考える。こうした機能は正確な制御が必要とされ、外乱域で静止できるような魚種が望ましい。この点を見てみると図2の(2)Ostraciiform, (7)Tetraodontiform, (9)Diodontiform, (10)Amiiform, (11)Gymnotiform, (12)Balistiformが該当する。さらにこれらの魚種の中で前後進やホバリングが可能な種類に絞ると(9)Diodontiform, (10)Amiiform, (11)Gymnotiform, (12)Balistiformになる。さらにこれらの魚種を詳しく見ると(10)Amiiform, (11)Gymnotiform, (12)Balistiformの魚種では帯状鰭を有するという共通点があることがわかった。そこで本研究では(10)Amiiform, (11)Gymnotiform, (12)Balistiformについて注

目することとした。図4にこれらの運動モードの魚種を、以下に運動モードの特徴を示す。

Amiiform は体に沿って帯状の背鰭を持っている。遊泳は多くの場合体軸を真直ぐにしたまま鰭に変形波を送ることで推力を発生させている。この遊泳モードを持つ魚種として Amiacalva などがある。

Gymnotiform は Amiiform が体の上側に背鰭を持っていたのに対し、体の下側に帯状の尻鰭を持っている。このモードは South American Electric Fish やブラックゴーストなどの魚種に見られる。

Balistiform は帯状の背鰭及び尻鰭を持った形状である。このモードは帯状の鰭が体の上下に付いているので、これらを組み合わせて動作させることで体を傾けた状態で保持するなどより細かな制御が可能である。カワハギの仲間などに見られるモードであり、カワハギは実際にある程度の潮流中であっても姿勢制御することが可能である。

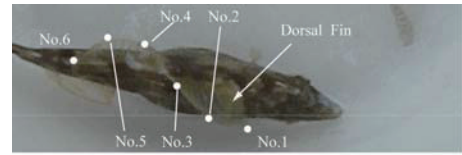
これらの生物の泳ぎに注目すると、帯状鰭を波動的に動かすことで体を前・後進させている。いずれも推進力の方向を急激に切り替えることが出来、前後の動作や位置決めを容易に行うことが可能であるという特徴がある。このような泳ぎは、魚以外にコウイカの仲間などにも見られる。コウイカはジェット推進器官も備えているが、体の両側面にある帯状鰭に波を送ることで細かな姿勢制御を行っている¹⁴⁾。

Balistiform に属すカワハギの背鰭動作について注目し、その動きを運動解析ソフトウェア (DITECT, Dipp-Motion XD Ver3.13) を用いて数値化した。鰭動作の測定結果を図5に示す。図5の(a)はカワハギの背鰭のマーカ位置を、(b)は上面から見た時間毎の背鰭の軌跡をそれぞれホバリング時、前進時でプロットしている。なお原点が口先を示している。また(c)は、背鰭に付けたマーカの頭よりから3点の時系列データをそれぞれホバリング時、前進時でプロットしている。(b)(c)ともに体の厚みを1とし、無次元化した値を使用した。

さて、魚類の一般的な遊泳時の軌跡は Lighthill¹⁶⁾ によって以下の式(1)で近似できることが示されている。

$$\phi = ae^{bx} \sin(\omega t + \psi x) \quad (1)$$

このとき、 ϕ は鰭の変位、 a は振幅、 b は増幅の増大率、 x は鰭の位置、 ω は角振動数、 t は時間、 ψ は位相を示している。図5の(b)からカワハギの背鰭動作も解析するとその軌跡は(1)式の近似式で表すことができた。また図5(c)から、背鰭の動作周波数はホバリング時及び前進時は凡そ 3.9[Hz]~4.3[Hz]で動作していることが分かった。結果として、(1)式に対して表2のパラメータを得ることが出来、その値をグラ



Thread sail filefish - Top view -

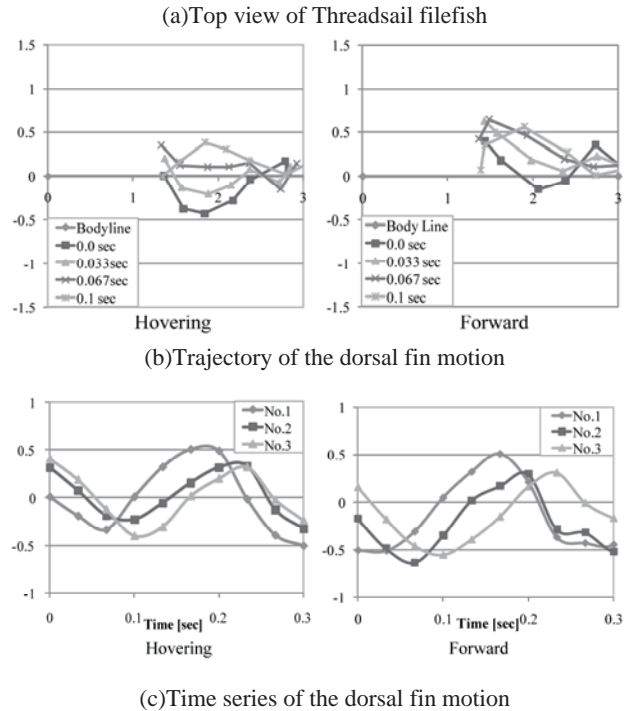


Fig.5 Analysis of Thread sail filefish in hovering and forward motion.

Table 2 Parameter of the dorsal fin motion

Swimming mode	a	b	ω [rad/s]	ψ [rad/m]	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
Forward	0.58	-0.96	25.8	22.0	0.00	0.18	0.62	0.94	1.29	1.75
Hovering	0.49	-0.74	27.0	23.4	0.00	0.23	0.48	1.01	1.42	1.46

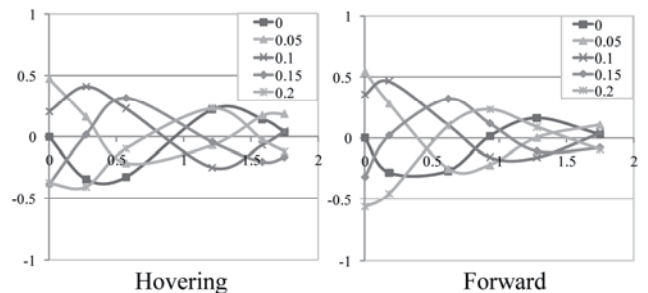


Fig.6 Trajectory of calculated fin motion by obtained parameter

フにプロットすると図6を得た。パラメータの a と x はそれぞれ体の厚みを1とし、無次元化した値とした。図6の横軸は x を、縦軸は ϕ を表している。

本研究では、模倣する鰭は帯状鰭を想定し、帯状鰭型のアクチュエータ製作を目指す。このアクチュエータは姿勢制御やホバリング等、搭載した水中ロボットが正確な位置保持や姿勢保持が可能となることを目標とする。

3. 生物模倣型アクチュエータ

開発するアクチュエータに使用する動力に従来のモータを使用した場合、機械雑音の低減化は困難である。そこで生体の筋肉のような直動型のアクチュエータを用いることとする。この生体の筋肉のように滑らかに伸縮するアクチュエータは総称して人工筋肉と呼ばれている¹⁷⁾。人工筋肉としての素材は多様であり、高分子材料のもの、形状記憶合金などの無機材料のもの、FMA(Flexible Micro Actuator)などの空気圧駆動のものなどがある。近年こうした素材をアクチュエータに取り入れる動きは積極的に見られ、水中に関してみるとイオン伝導性高分子を用いた高木らのエイ型ロボット¹⁸⁾や、中坊らのへび型水中ロボット¹⁹⁾、形状記憶合金を用いた山口らの魚類型ロボット²⁰⁾などがある。

本研究ではこれまでの考察を基に生物模倣型アクチュエータの開発を目指し、素材には複数ある人工筋肉材料の内、導電性高分子を用いることとした。高分子は、模倣する生物の鰭動作速度が最大で4.3[Hz]であったので5.0[Hz]までの動作検証を行う。開発する生物模倣型アクチュエータのイメージを図7に示す。带状鰭は屈曲動作する鰭ユニットを複数並べた構成とし、はじめに鰭ユニットとして屈曲動作アクチュエータの製作を行う。

3.1 導電性高分子

3.1.1 特徴

導電性高分子は、2000年にShirakawaら²¹⁾がノーベル賞を受賞してから特に有名になった素材である。導電性高分子は π 共役系のポリマーで、単結合と二重結合が交互に繋がって構成され、二重結合のうち一本の結合に使われる電子が余ることで電子の移動が可能となる。ただし、この状態では電子が詰まって動きにくくなってしまいうため、電子がスムーズに移動することが出来ない。そこで、電子をいくらか除いて電子の動けるスペースを作るためにイオンを添加する。このことをドーピングと言う。導電性高分子は、イオンをドーピングされて初めて電気を通しやすくなる。そしてこの高分子内を電子が通るときに、イオンの出入りで高分子鎖の構造が変化して高分子自体が変形、伸縮する¹⁷⁾。図8に高分子が伸縮するときの原理を示す。この原理から、生体の筋肉のような伸縮するアクチュエータとして用いることが可能となる。導電性高分子に出入りするイオンが陽イオンであるか陰イオンであるかによって、電圧をかけたときの伸縮動作が異なる。プラス電圧をかけたときに陰イオンがドーピングされるものがアニオン駆動であり、逆に陽イオンが脱ドーピングするものがカチオン駆動である。アニオン駆動膜にプラス電圧を印加すると膜は伸び、マイナスを印加すると収縮する²²⁾。

導電性高分子をアクチュエータの素材として用いた場合、

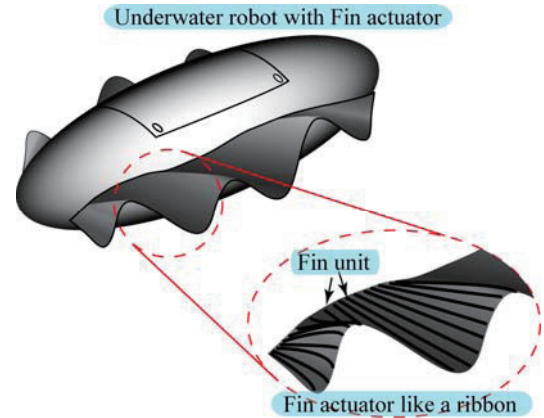


Fig.7 An image of an underwater robot with ribbon like fin actuators

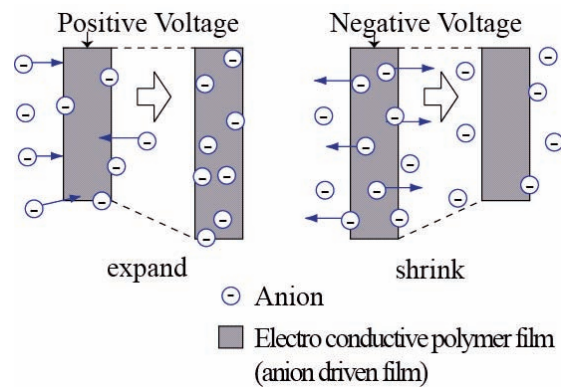


Fig.8 Principle of expansion and shrinkage motion in Electroconductive polymer

以下の

- 1.低電圧駆動
- 2.伸縮時無音で動作
- 3.海水中でも駆動が可能

といった利点が挙げられる。先ず1については、他の人工筋肉アクチュエータが動作時に数十～数百ボルトの印加電圧が必要であるのに対し、導電性高分子は1.5[V]程度で駆動することが可能である。次に2については、先述のように伸縮動作は高分子鎖の構造変化のため機械雑音が全く発生せずに動作が可能である。3は海水中のイオンをドーパントとすることが可能であるため、高分子自体が海水中で動作可能である。

3.1.2 屈曲動作原理

カチオン駆動膜の動作は、アニオン駆動とは反対の動作となる。この相反する動作形態の膜を貼り合わせて同極の電圧を印加すれば、バイモルフ型のアクチュエータを作ることが可能である²³⁾。単膜で使用した場合は伸縮動作となるが、バイモルフ型として使用すれば屈曲動作とすることが出来る。動作原理を図9に示す。この屈曲動作を用いることで生物の有する鰭機能の模倣が可能となる。

3.2 製作方法

導電性高分子の製作方法は、電解重合法¹⁷⁾を用いた。電解重合法は高分子膜の材料となる溶液中に電極を入れ、その電極に任意の時間一定の電流値を印加することで作用電極上に高分子の薄膜が生成される。電極は対向電極に白金を、作用電極はチタンとした。高分子の材料は、アニオン駆動の高分子として、ピロール (Pyrrole) と TBACF₃SO₃、安息香酸メチルを用い、一方カチオン駆動の高分子には Pyrrole、ドデシルベンゼンスルホン酸 (DBS) を用いた。どちらの場合も、それぞれの材料を混ぜ合わせて溶液を作り、そこへ各電極を入れて電流を印加した。電流の印加には、ポテンシヨ・ガルバノスタット (Hokuto. Denko HAB-151) を使用し、アニオン駆動の高分子では電流密度 0.2[mA/cm²]で、カチオン駆動の高分子では 1.0[mA/cm²]で印加を行った。生成する高分子の膜厚を 10~15[um]になるように電流を印加する時間を設定したが、重合する時間を変えることで生成される膜の厚みを変えることが可能である。生成された CF₃SO₃ 膜の写真を図 10 に示す。以下、今回生成したアニオン駆動膜は PPy/CF₃SO₃ と、カチオン駆動膜は PPy/DBS と呼ぶ。

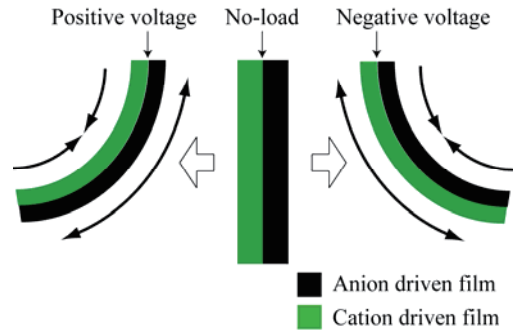


Fig.9 Principle of bending motion

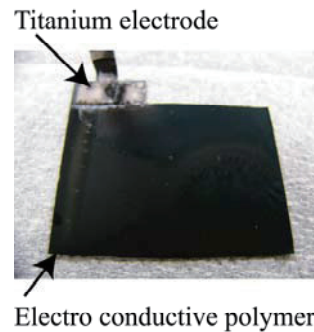


Fig.10 Photograph of produced PPy/CF₃SO₃ film on titanium electrode.

3.3 性能評価

3.3.1 伸縮動作実験

製作した高分子の性能評価として、伸縮率の計測を行う。使用した伸縮動作実験システムの構成を図 11 に示す。高分子膜の縦横長さを 5[mm]×2[mm]の大きさの試験片(図 12)とし、溶液 (NaCl 等) の入ったガラス製の容器 (Cell) 内にセットする。試験片を作用電極とし、対向電極には白金を用いた。試験片へ入力する電圧の波形は任意波形発生器 (Yokogawa FG110) で発生し、そのときの試験片の伸縮による変位量をレーザー変位計 (Keyence LB-040)で測定した。

伸縮実験は、印加する電圧値や周波数、使用溶液(NaCl, 海水)、負荷錘などの条件を変え、PPy/CF₃SO₃ 及び PPy/DBS について行った。動作周波数はカワハギの鰭の解析結果から、5.0[Hz]まで検証した。

3.3.2 実験結果

伸縮動作実験で得られた結果の一例を図 13~16 のグラフに示す。いずれのグラフも破線が印加した電圧の波形を、実線が試験片の伸縮率を表している。図 13 のグラフは、試験片が PPy/CF₃SO₃、印加した電圧は正弦波、周波数 0.01[Hz]、振幅-800~600[mV]、負荷錘 0.6[g]、NaCl 溶液 0.1[mol/l]の条件で行ったときの伸縮率を時系列で表したデータである。高分子は、電圧を印加しはじめは伸縮動作が安定しないが、ある程度の時間動かし続けると安定した伸縮率となる。図 14 は図 13 を一部拡大したグラフである。図 15 は印加する電圧の周波数を 0.1[Hz]に変えて行った結果を、一部拡大したグラフである。また、図 16 のグラフは試験片を PPy/DBS に変

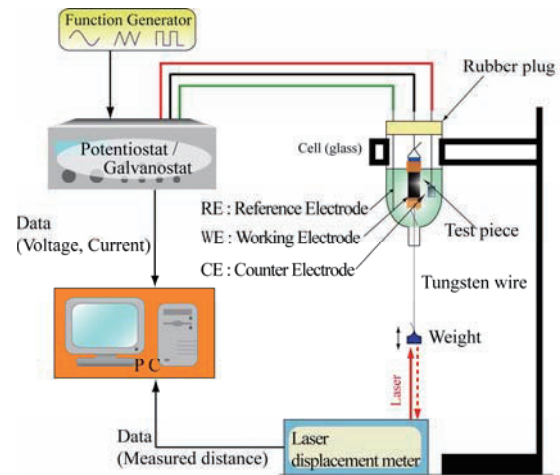


Fig. 11 Measurement system of the experiment

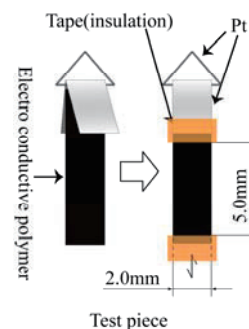


Fig.12 Test piece for the experiment

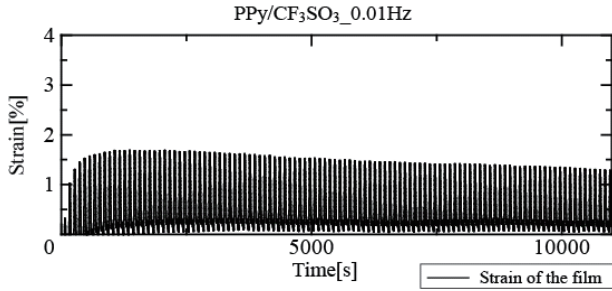


Fig.13 An experimental result of PPy/CF₃SO₃ film (Input signal is sinusoidal wave 0.01[Hz] at -800 to +600[mV], weight load is 0.6[g], driven in NaCl solution at 0.1[mol/l].)

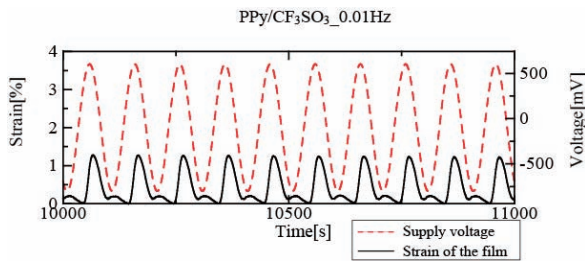


Fig.14 A part of close-up in Fig.13 for from 10000 to 11000[sec] (Solid line: Strain, Dash line: Supply voltage)

えて、実験条件は図 15 と同様のままにした時の結果を一部拡大したグラフである。

伸縮動作実験の結果から得られた高分子の周波数応答特性を図 17 のグラフに示す。実験では周波数が最大 5.0[Hz]まで計測を行ったが、5.0[Hz]時は伸縮動作が計測されなかったためグラフにプロットしていない。図 17 より製作した高分子は、アニオン駆動、カチオン駆動ともに以下の式 (2) の関係があることがわかる。

$$y = \alpha x^{-\beta} \tag{2}$$

ここで、 x は周波数、 y は伸縮率、 α 及び β は定数である。今回製作したアニオン駆動の PPy/CF₃SO₃ の場合 $\alpha=0.002$ 、 $\beta=1.14$ 、一方、カチオン駆動である PPy/DBS の場合、 $\alpha=0.015$ 、 $\beta=1.04$ であった。また同様に位相応答について図 18 に示す。位相応答の変化の関係は今のところ明確に分かっていないため、図中には計測値のみをプロットしている。

今回製作した PPy/CF₃SO₃、PPy/DBS 共に印加する電圧の周波数が高くなると、伸縮がその早さに伴わず伸縮率が低下する傾向が見られた。

将来、実海域で運用する水中ロボットでの使用を想定し、海水中での動作実験も行った。海水の成分は NaCl の場合 0.6[mol/l]に相当する。PPy/CF₃SO₃ を海水中で伸縮実験した結果を図 19 に示す。同条件下で溶液のみ NaCl 溶液 0.1[mol/l]

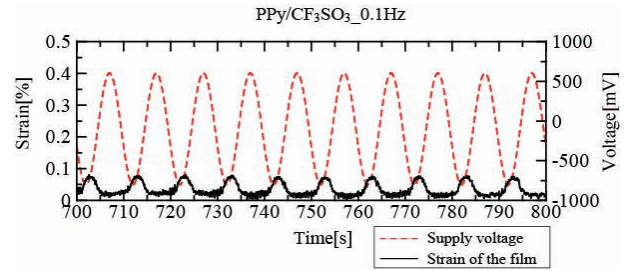


Fig.15 A strain data of PPy/CF₃SO₃ film (Input signal is sinusoidal wave 0.1[Hz] at -800 to +600[mV], weight load is 0.6[g], driven in NaCl solution at 0.1[mol/l].)

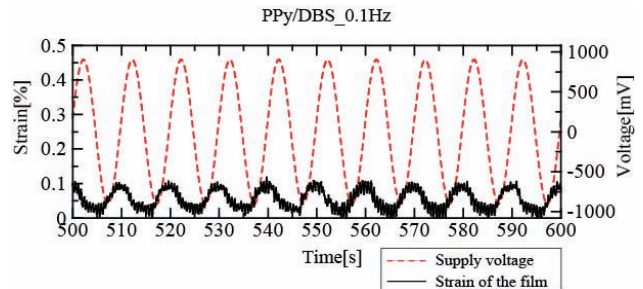


Fig.16 A strain data of PPy/DBS film (Input signal is sinusoidal wave 0.1[Hz] at -800 to +600[mV], weight load is 0.6[g], driven in NaCl solution at 0.1[mol/l].)

を使用した場合平均 2.5%程度の伸縮を得られていたのに対し、海水中では 1.58%程度に留まることがわかった。海水中での伸縮率を増加させるためには二種類の対策が考えられる。海水中の成分には NaCl 以外に MgCl₂ や MgSO₄、CaSO₄、KCl などが含まれており、一つはこうした成分をドーパントとして動作する高分子を製作することである。もう一つは高分子が動作する理想的な状態で高分子を溶液ごと密封し、動作させる手法が考えられる。いずれにせよ海水中で大きな伸縮率を得るためには、何らかの対策が今後必要であると考えている。

3.3.3 屈曲動作

屈曲動作する高分子膜を、初期状態が曲がっている梁のモデルとして考える(図 20)。高分子膜へドープが進み、荷重ゼロで曲率半径 R_0 の屈曲状態になったとする。これは、屈曲した状態でフィルムの変形はゼロであり、膜厚方向 z に関してドープ状態が異なるため、ヤング率は z の関数 $E(z)$ となる。 z における円弧の歪み ϵ は以下の式(3)で表せる。

$$\epsilon = \frac{2\pi(R+z) - 2\pi(R_0+z)}{2\pi(R_0+z)} = \frac{R-R_0}{R_0+z} \tag{3}$$

ここで R は荷重をかけた時の曲率半径、 z は中立線からの膜厚方向の距離とする。

次に歪み ϵ によるモーメント M は式(4)となる。

$$M = \int_{-a}^b E(z) \cdot \varepsilon \cdot z \cdot S(z) dz \quad (4)$$

ここで M は、荷重をかけたときにフィルムの断面にかかるモーメント、 $S(z)$ は z に関する微小面積である。これに式(3)を代入すると以下の式(5)が得られる。

$$M = (R - R_0) \int_{-a}^b E(z) \frac{zS(z)}{R_0 + z} dz \quad (5)$$

式(5)において \int の中は、高分子膜のドープ状態に左右される定数となるので、モーメント M は

$$M = kR + C \quad (6)$$

と表せる。ここで k , C はドープ状態や膜質等による定数とする。以上より曲率半径 R とモーメント M は線形関係であることがわかる。このことからゆっくりとした周期の信号を入力するか、又は印加電圧を大きくするほどより大きなモーメントを得られるということが分かる。

製作した高分子を用いた伸縮実験において、図 17 から周波数を低くすれば伸縮率が大きくなっていることがわかる。図 21 は試験片に付加する錘を増やしていったときの伸縮率をプロットし応力と伸縮率の関係を示したもののだが、この図の結果より、伸縮率と応力の中に線形関係があることがわかる。屈曲動作における曲率半径 R は単膜での伸縮率に、モーメント M は応力にそれぞれ依存しているので、動作周波数を低くするほどモーメントが得られることが確認できた。

製作した PPy/CF₃SO₃ 膜の片面に PPy/DBS の代わりにテープを貼り伸縮動作に制限を与えることで、屈曲動作を発生させた。このときの試験片は 50.0[mm]×5.0[mm]×13[um]とし、対向電極に白金を用いた。また電圧は 1400[mV]を印加し、試験片と対向電極に極性を反転しながら矩形波として入力した。入力する速度は 0.001[Hz]から 5.0[Hz]まで行った。

屈曲動作試験の結果について、入力信号が矩形波 0.001[Hz]時に最大屈曲した様子を図 22 に、1.0[Hz]時の動作の様子を連続写真で図 23 に示す。電圧を印加すると高分子膜が屈曲動作することが確認できた。しかし、入力信号が 1.0[Hz]よりも大きい場合、屈曲動作は追従できなくなった。これは高分子膜へのドープ (又は脱ドープ) が間に合わないことから生じると考えられる。このことは図 17 のグラフで、1.0[Hz]以上では伸縮率がほとんど発生していないことから変位量は周波数が低いほど大きいことが確認された。また図 24 に 0.3[Hz]時の屈曲動作の軌跡を示す。この時の曲率は 0.03 である。

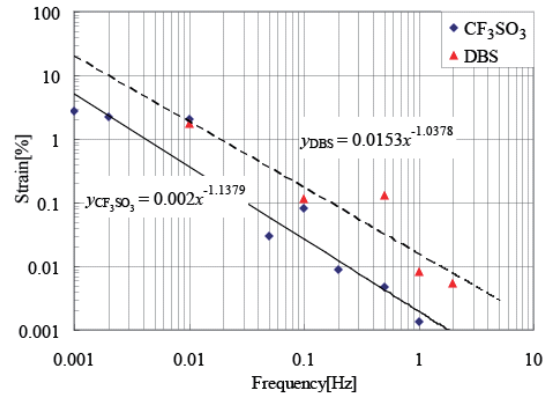


Fig.17 Amplitude spectrum data of a frequency response taken from PPy/CF₃SO₃ film and PPy/DBS film (Solid line indicates an approximate curve of PPy/CF₃SO₃ and dash line indicates an approximate curve of PPy/DBS.)

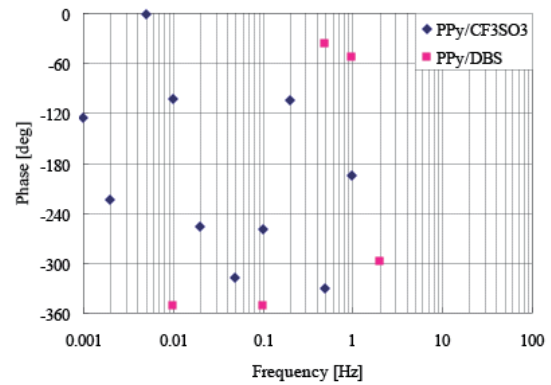


Fig.18 Phase spectrum data of a frequency response taken from PPy/CF₃SO₃ film (rhombus) and PPy/DBS film (square)

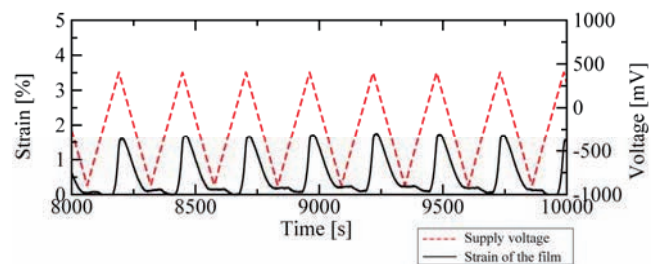


Fig.19 A strain data of PPy/CF₃SO₃ film driven in seawater at 0.004[Hz] (Seawater corresponds to approximately 0.6[mol/l] in NaCl.)

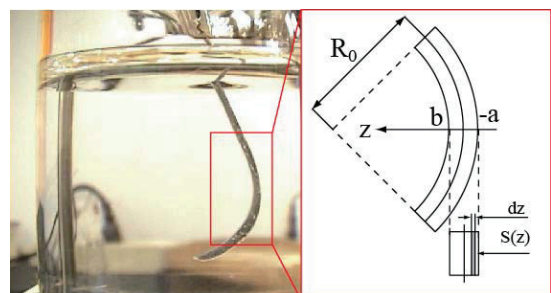


Fig.20 Beam model

4. 結言

本論文では、既存のスクリープロペラに替わる新しいアクチュエータ形状に水中生物の持つ鰭型を提案した。水中ロボットに魚類の機能を導入するにあたり、12種類の遊泳モードに属す17魚種をSOMによってクラスタリングし様々な環境下で最適な遊泳モードについて評価、考察した。この評価は、生息環境や機能、形状等様々なパラメータを入力し数値的に解明した新しい試みであり、今回の結果を水中ロボット開発に反映させることで、各ミッションに対してより効果的かつ高性能な生物模倣型水中ロボットを開発することが可能になると考えられる。また、带状鰭を持つ魚種としてカワハギの背鰭動作に注目し、その動作解析を行った。带状鰭型アクチュエータを実現するためにその素材となる導電性高分子の製作と性能評価を行い、伸縮動作及び屈曲動作を確認することができた。またPPy/CF₃SO₃に関しては海で採水した海水中での伸縮動作も確認した。

今回遊泳モードに関し17種類の魚種をSOMによってクラスタリングしたが、世界には魚類が約三万種類ほど生息していると言われており、今回用いたデータ数だけでSOMの有効性を結論付けることは時期尚早である。また、魚種によっては使用する鰭によって遊泳速度を変化させているなどの場合もあり、特徴パラメータの設定次第でこうした魚種は異なったクラスタリング結果となる。今後、こうした問題を解決するために多くの魚種や様々な特徴パラメータを取り入れて評価することが必要であると考えている。

また高分子に関しては、参考としたカワハギの動作速度が得られなかったため、使用する素材を変更することでより高出力で高速な高分子を製作し、海水中でも十分な動作性能を得られる素材の開発を目指す。そして屈曲型の鰭ユニットを複数製作し、さらにそれを組み合わせることで带状鰭型アクチュエータとする。ここで各鰭ユニット間の繋がりを出すために、膜などで覆って一枚の带状鰭とするなどの対策が必要であるが、高分子を膜で覆った場合、屈曲率などが低減するなどの恐れがある。しかし全体を密封するような方策とした場合、海水やNaCl溶液よりも大きな伸縮率、屈曲率を得られる理想液体ごと封入することが可能となることからこの問題に対処できると考えている。带状鰭型アクチュエータの開発が出来次第、その性能評価を行っていく予定である。

謝辞

この研究の一部は、21世紀COEプログラム「生物とロボットが織りなす脳情報工学の世界」(拠点番号J19)の推進事業として実施しました。関係各位ならびに関係部署に深く感謝致します。

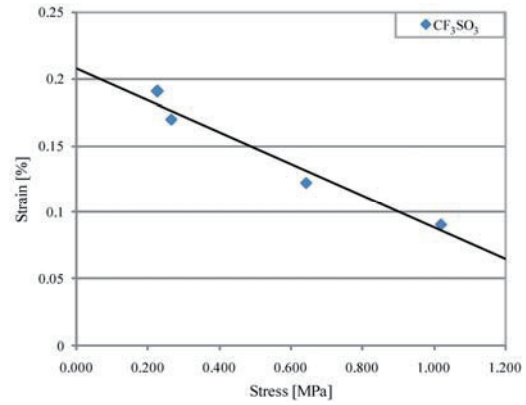


Fig.21 Strain-Stress graph (CF₃SO₃, NaCl 0.1[mol/l], 0.1[Hz])

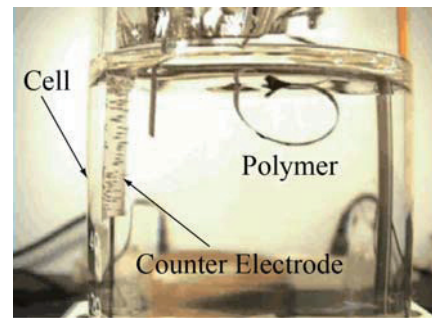


Fig.22 Bending motion of PPy/CF₃SO₃ film attaching a fixed length film with no expansion at 0.001[Hz]

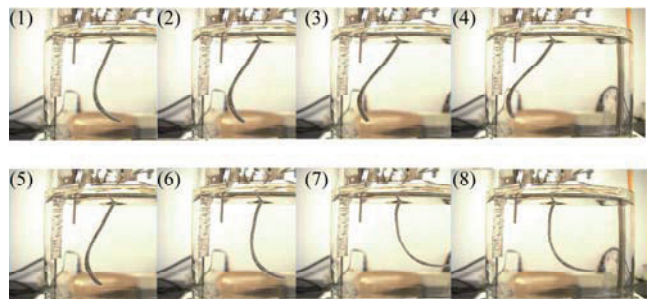


Fig.23 Sequential photographs of bending motion at 1.0[Hz] in NaCl solution (frame/ sec)

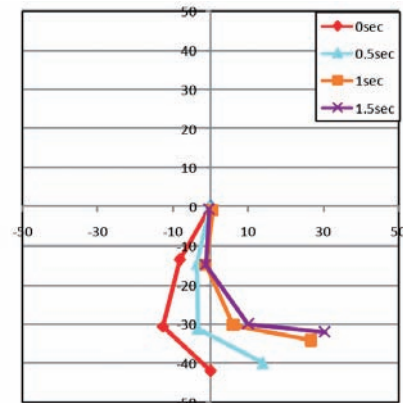


Fig.24 Trajectory of a bending motion at 0.3[Hz] in CF₃SO₃Film

参考文献

- 1) 浦環: 海中に求められるロボット, 日本ロボット学会誌, Vol22, No.6, pp2-6, 2004.
- 2) Triantafyllou, M., Yue, D.K.P. and Grosenbaugh, M.: Fluid Mechanics and Robotics of Fish-Like Locomotion, Proc. of the Special Session on Bio-Engineering Research Related to Autonomous Underwater Vehicles, pp.11-26, 1997.
- 3) 森川, 中尾, 小林: 高速魚の尾ひれ型振動機構における翼挙動制御, 第1回ロボットシンポジウム, pp.327-330, 1996.
- 4) M. Nakashima, K. Kaminaga and K. Ono: Experimental Study of Two-Joint Dolphin Robot (Propulsive Characteristics of 2nd Large Model), Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.311-314, 2000.
- 5) K. Hirata, T. Takimoto and K. Tamura: Study on Turning Performance of a Fish Robot, Proc. of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.287-292, 2000.
- 6) 加藤, 方山, 鈴木他: 3軸胸鰭運動装置付き水中ロボット"PLATYPUS"の誘導制御, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第1号, pp33-36, 2005.
- 7) 戸田, 有藤, 田中: 屈曲型側ヒレ推進機構を持つ水中移動体の基本運動特性に関する実験, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第1号, pp47-50, 2005.
- 8) Willy, A., Low, K.H.: Undulating fins of a cuttlefish robot, <http://releeps.tripod.com/cgi-bin/>, 2005.
- 9) 小林, 関塚, 森川: 屈曲型水中推進機構の分散制御, 第10回バイオエンジニアリング講演会論文集, pp.631-632, 1998.
- 10) 三菱重工神戸造船所鉄構部: 魚ロボット市販初号機を製作開始 体長70cmの古代魚 シーラカンス, 三菱重工ニュース, 3893号, 2000.
- 11) C.M.Breder: The locomotion of fishes, Zoologica, vol.4, pp. 159-297, 1926.
- 12) Lindsey, C.C.: Form, Function and Locomotory Habits in Fish, In Fish Physiology VII Locomotion, edited by W.S.Hoar and D.J.Randall, Academic Press, pp.239-313, 1978.
- 13) H. Ritter and T. Kohonen: Self-Organizing Semantic Maps, Bio. Cybern. 61, pp.241-254, 1989.
- 14) 東 昭: 生物の動きの事典, 朝倉書店, 1997.
- 15) 田中一郎, 永井實: 抵抗と推進の流体力学 - 水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ -, シップ・アンド・オーシャン財団, 1996.
- 16) M.J. Lighthill: Note on the swimming of slender fish, Fluid Mech., 9, pp. 305-317, 1960.
- 17) 長田義仁編著: ソフトアクチュエータ開発の最前線 人工筋肉の実現を目指して, NTS inc, 2004.
- 18) K.Takagi, M.Yamamura, Z.W.Luo, M.Onishi, S.Hirano, K.Asaka and Y.Hayakawa: Development of a Rajiform Swimming Robot using Ionic Polymer Artificial Muscles, Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1861-1866, Oct. 2006.
- 19) 中坊, 小川, 向井, 安積, 大西: 人工筋肉を用いた生物模倣ヘビ型水中推進ロボット, 第22回ロボット学会学術講演会予稿集, 2C16, 2004.
- 20) 山口, 寺田: 人工筋肉を利用した魚類型ロボットの運動制御方法の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第2W号, pp29-32, 2006.
- 21) H.Shirakawa, et al.: for the discovery and development of electrically conductive polymers, Nobel Prize in chemistry, 2000.
- 22) W.Takashima, Shyam S.Pandey, K.Kaneto: Investigation of bi-ionic contribution for the enhancement of bending actuation in polypyrrole film, Sensors and Actuators B 89, pp48-52, 2003.
- 23) W.Takashima, et al.: Cyclic Step-voltammetric Analysis of Cation-driven and Anion-driven Actuation in polypyrrole Films, The Japan Society of Applied Physics, Vol.41, pp7532-7536, 2002.

Appendix

自己組織化マップ(Self-Organizing Maps, 以下SOM)¹³⁾とは、Kohonenによって開発された大脳皮質の神経機能をモデル化したニューラルネットワークである。多次元のデータを2次元に写像することが可能であり、高次元空間の可視化に用いることが可能である。またこれらの多次元のデータをクラスタリングすることが出来る。

図24にSOMのアーキテクチャを示す。図25(A)ではデータ空間を3次元で示しているが、実際は高次元空間を表している。ベクトルデータはこの高次元空間上においてある一点で表すことができ、それらの集合が多様体(マニフォールド)を形成している。図25(B)はこの多様体をSOMにマッピングした様子を示している。このようにSOMはベクトルデータの集合であるマニフォールドを低次元空間に写像することができる。

SOMはデータ数とユニット数の大小関係によって以下の二つの機能を持つ。まず、SOMはデータとデータの補間を自己組織的に行うことが可能である。次に、主成分分析

(Principle Component Analysis, PCA)ではデータの分布が非線形である場合うまく機能しないが, SOM は非線形 PCA として機能することができる。

SOM の学習は教師なし競合学習である。学習アルゴリズムは以下の4つのプロセスで構成されている。

(A)評価プロセス

MAP 層内のユニットの持つ参照ベクトル w と入力空間上のそれぞれのデータとの距離 E を計算する。ここで MAP 層の k 番目のユニットの持つ参照ベクトル w^k と i 番目のデータとの距離を式(7)に示す。

$$E_i^k = \|w^k - x_i\|^2 \quad (7)$$

ここで x は入力ベクトル(学習データ)である。

(B)競合プロセス

評価プロセスで求めた距離 E_i^k から, それぞれのデータに対する BMU (Best Matching Unit)を決定する。ここで i 番目のデータに対する BMU k_i^* を式(8)と表す。

$$k_i^* = \arg_k \min E_i^k \quad (8)$$

(C)協調プロセス

それぞれの参照ベクトルが, それぞれのデータをどのくらい学習するのか(学習率)を決定する。ここで i 番目のデータに対する k 番目のユニットの学習率 ψ_i^k は

$$\psi_i^k = \frac{\phi_i^k}{\sum_i \phi_i^k} \quad (9)$$

となる。ここで近傍関数 ϕ_i^k は

$$\phi_i^k = \exp\left(-\frac{d(k, k_i^*)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

また近傍半径 σ は式(11)となる。

$$\sigma = \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (11)$$

ここで τ は時定数を示す。

(D)適合プロセス

協調プロセスで得た学習率 ψ_i^k を用いて参照ベクトル w の更新を行う。

$$w^k = \sum_{i=1}^I \psi_i^k x_i \quad (12)$$

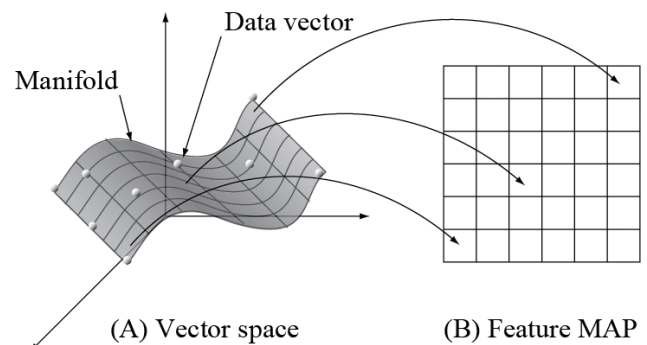


Fig.25 Schematic view of architecture of SOM