

高い運動性能を有する魚類型ロボット用泳動機構の開発に関する研究

藤原, 慎平

<https://doi.org/10.15017/1807010>

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

高い運動性能を有する魚類型ロボット用泳動機構の
開発に関する研究

平成 29 年 1 月

藤 原 慎 平

目次

第1章	序論.....	1
	1.1 海洋開発の現状と水中ロボットによる調査.....	1
	1.2 水生生物模倣型ロボット.....	4
	1.3 生物模倣型運動機構に関する研究の現状.....	5
	1.4 研究の目的と内容.....	10
第2章	魚類型ロボット用泳動機構の開発.....	12
	2.1 緒言.....	12
	2.2 魚類の泳動方法.....	13
	2.2.1 魚類の体型の分類.....	13
	2.2.2 前進時における魚類の泳動方式の分類.....	14
	2.2.3 魚体各部の鰭の役割と泳動方式.....	18
	2.3 機体の泳動機構.....	20
	2.3.1 胴体部分の泳動機構.....	20
	2.3.2 人工筋肉により駆動するフィン機構.....	23
	2.4 泳動能力を向上させるためのフィン機構の検討.....	25
	2.4.1 フィン機構を構成する部品の検討.....	25
	2.4.2 人工筋肉の配置方法の検討.....	26
	2.4.3 フィン形状の検討.....	33
	2.5 人工筋肉とサーボモータを併用する機体製作.....	35
	2.6 魚類型ロボットの運動性能の評価.....	40
	2.6.1 実験設備の概要.....	40
	2.6.2 直進泳動実験結果.....	42
	2.6.3 急旋回泳動実験結果.....	43
	2.6.4 急停止動作の実験結果.....	46
	2.7 泳動機構の改良による運動性能の向上.....	48
	2.7.1 胴体駆動用サーボモータの変更と追加.....	48
	2.7.2 人工筋肉により駆動する開閉型フィン機構の追加.....	50
	2.7.3 泳動機構を改良した機体の製作.....	52
	2.8 魚類型ロボットの推進性能の推定.....	53
	2.8.1 細長体理論.....	53
	2.8.2 前進泳動時の胴体駆動パターン.....	58
	2.8.3 各胴体駆動パターンの推進力の推定.....	60
	2.8.4 異なる胴体駆動パターンによる推進力の推定結果.....	63

	2.9 泳動機構を改良した機体の運動性能評価.....	65
	2.9.1 直進泳動実験結果.....	65
	2.9.2 急旋回泳動実験結果.....	67
	2.10 結言.....	70
第3章	実水域における魚類型ロボットの運用.....	72
	3.1 緒言.....	72
	3.2 魚類の習性を模倣した運動制御の検討.....	73
	3.3 実水域における機体の運動制御方法.....	74
	3.4 運動制御用センサとビデオカメラの搭載.....	78
	3.5 機体の運動制御と生物観測実験.....	80
	3.5.1 水槽実験結果.....	80
	3.5.2 実水域における運動制御実験.....	83
	3.6 泳動機構周りに発生する吸い込み流の検討.....	86
	3.7 結言.....	90
第4章	高速振動型魚類型泳動機構の開発.....	91
	4.1 緒言.....	91
	4.2 高速振動型泳動機構のための泳動方式.....	92
	4.3 魚類の泳動振動数に関する考察.....	93
	4.4 高速振動型泳動機構の開発.....	95
	4.4.1 Carangiform 型泳動機構の開発.....	95
	4.4.2 Subcarangiform 型泳動機構の開発.....	99
	4.5 高速振動型泳動機構の性能評価.....	102
	4.5.1 Carangiform 型泳動機構の推進力推定と泳動実験.....	102
	4.5.2 Subcarangiform 型泳動機構の推進力推定と泳動実験.....	105
	4.6 結言.....	109
第5章	結論.....	111
	謝辞.....	114
	参考文献.....	115
	主要記号一覧.....	119

図目次

- Fig. 1.1.1 “Jason Jr.” with experience that investigated “Titanic” (WHOI) [1]
- Fig. 1.1.2 “Kaiko 7000- II” which was developed to work in deep sea (JAMSTEC)
- Fig. 1.1.3 Urashima (JAMSTEC) [3]
- Fig. 1.1.4 ABE (WHOI) [4]
- Fig. 1.1.5 BA-1 (Tokyo University of Marine Science and Technology)
- Fig. 1.3.1 LS3 AlphaDog (DARPA) [6]
- Fig. 1.3.2 Naro-tartaruga (ETH) [7]
- Fig. 1.3.3 BIREM (Osaka City Univ.) [8]
- Fig. 1.3.4 “ROBOTUNA” in imitation of tuna (MIT) [10]
- Fig. 1.3.5 “TDUNA-2013c” in imitation of tuna (Tokyo Denki Univ.) [11]
- Fig. 1.3.6 Bending “Soft-bodied fish robot” (MIT) [12]
- Fig. 1.3.7 Swimming “PF-300” (NMRI) [13]
- Fig. 1.3.8 Swimming “PLATYPUS” (Osaka Univ.) [14]
- Fig. 1.3.9 Fish-Type Robot (Kyushu Univ.) [15-17]

- Fig. 2.2.1 Image of anguilliform mode
- Fig. 2.2.2 Image of carangiform mode
- Fig. 2.2.3 Image of ostraciiform mode
- Fig. 2.2.4 Image of subcarangiform, carangiform and thunniform mode
- Fig. 2.2.5 Names of a fish body
- Fig. 2.2.6 Motions of pectoral fin
- Fig. 2.3.1 Arrangement of the fish-type robot
- Fig. 2.3.2 Motion of central body part of the fish-type robot
- Fig. 2.3.3 Servo motor “S3470SV”
- Fig. 2.3.4 Drive of equipped actuators during quick turn and sudden stop motion
- Fig. 2.3.5 Bio Metal Fiber 150
- Fig. 2.4.1 Structure of pectoral and tail fin
- Fig. 2.4.2 Arrangements of artificial muscle on the fin
- Fig. 2.4.3 (a) Arrangement of artificial muscle to fins and (b) conceptual diagram of deformation in the *dl*-cross section of fins
- Fig. 2.4.4 Experiment for measuring the contraction of the artificial muscle
- Fig. 2.4.5 Estimation of the deformation of fin

- Fig. 2.4.6 Estimated trailing edge shapes of fins deformed in air
- Fig. 2.4.7 Experiment of the deformation of fin in air
- Fig. 2.4.8 Estimated and measured trailing edge of fin in air
- Fig. 2.4.9 Estimated trailing edge of fin in air and measured that in water
- Fig. 2.4.10 Measurement method of hydrodynamic force to act on fin
- Fig. 2.4.11 Drag acting on fins
- Fig. 2.4.12 Original and improved fin shapes
- Fig. 2.4.13 Drag acting on original and improved finst
- Fig. 2.5.1 Photos of (a) mbed NXP LPC1768, (b) XBee S1 and (C) CX G³ LiPo Power Pack
- Fig. 2.5.2 Pin arrangement of mbed NXP LPC1768
- Fig. 2.5.3 Circuit diagram of fish-type robot
- Fig. 2.5.4 Flowchart of control program
- Fig. 2.5.5 Fish-type robot using artificial muscles and servo motor
- Fig. 2.6.1 Arrangement of the experiment
- Fig. 2.6.2 Measurement of the position of swimming robot
- Fig. 2.6.3 Measurement of heading angle of swimming robot
- Fig. 2.6.4 Drive signal of servo motor during straight swimming
- Fig. 2.6.5 Control signal of the servo motor during left quick turn motion
- Fig. 2.6.6 Control signal of the fins during left quick turn motion
- Fig. 2.6.7 Turning angle during left quick turn
- Fig. 2.6.8 Turning angle during right quick turn
- Fig. 2.6.9 Control signal of the servo motor during sudden stop motion
- Fig. 2.6.10 Control signal of fins during sudden stop motion
- Fig. 2.6.11 Advance speed of robot during sudden stop motion
- Fig. 2.7.1 Servo motor “S9570SV”
- Fig. 2.7.2 Structure of the opening and shutting type fin
- Fig. 2.7.3 Quick turn using the opening and shutting type fin
- Fig. 2.7.4 Sequence of photos of opening and shutting type fin
- Fig. 2.7.5 Arrangement of improved fish-type robot
- Fig. 2.7.6 Improved fish-type robot using artificial muscles and servo motors
- Fig. 2.8.1 Coordinate system for fish type slender body
- Fig. 2.8.2 Sequence of photos of vortex around trailing edge during straight swimming motion
- Fig. 2.8.3 Drive signal of the central body part during straight swimming
- Fig. 2.8.4 Difference of the input signal and its approximation

- Fig. 2.8.5 Original drive signal of the central body part and its approximation
- Fig. 2.8.6 Calculated average thrust
- Fig. 2.8.7 Process of drive cycle for the central body part
- Fig. 2.9.1 Calculated average thrust and measured maximum forward speed
- Fig. 2.9.2 Control signal of the central body part during left quick turn motion
- Fig. 2.9.3 Control signal of each fins during left quick turn motion
- Fig. 2.9.4 Turning angle of improved robot during left quick turn
- Fig. 2.9.5 Turning angle of improved robot during right quick turn
- Fig. 2.9.6 Continuous action of quick turn
-
- Fig. 3.3.1 (a) Image of correction with angular velocity sensor and (b) estimate of attack angle at real sea area during straight swimming motion
- Fig. 3.3.2 Control of angle of direction
- Fig. 3.3.3 Flowchart of control program using PID control and quick turn motion
- Fig. 3.4.1 Acceleration sensor “KXR94-2050” and angular velocity sensor “ENC-03R” on the substrate
- Fig. 3.4.2 Small video camera “FS-MD700”
- Fig. 3.5.1 (a) Acceleration of robot in still water (b) speed
- Fig. 3.5.2 Sequence of photos of robot which was given external force
- Fig. 3.5.3 (a) Acceleration of robot which was given external force and (b) speed
- Fig. 3.5.4 Sequence of photos of the fish type robot with carp
- Fig. 3.5.5 Carp which were photographed from fish-type robot
- Fig. 3.6.1 (a) Flow and pressure around thruster and (b) a fish-type swimming mechanism
- Fig. 3.7.1 (a) Imitation seaweed and (b) water tank containing imitation seaweed
- Fig. 3.7.2 (a) Arrangement of the thruster-type robot and (b) the photograph
- Fig. 3.7.3 Conceptual diagram of experiment with imitation seaweed
- Fig. 3.7.4 Entangled imitation seaweed in thruster
-
- Fig. 4.4.1 Geared direct current motor “TG-85R-SU-13.2-KA” [60]
- Fig. 4.4.2 Structure of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion
- Fig. 4.4.3 Operation principle of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion

- Fig. 4.4.4 Sequence of photos of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion
- Fig. 4.4.5 Structure of swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion
- Fig. 4.4.6 (a) Swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion and (b) swimming test in a tank
- Fig. 4.4.7 Sequence of photos of swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion
- Fig. 4.5.1 Carangiform type robot
- Fig. 4.5.2 Energy consumption, maximum forward speed and calculated average thrust of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion
- Fig. 4.5.3 Measured amplitude of head and rear end of the robot imitating carangiform swimming motion
- Fig. 4.5.4 Energy consumption, maximum forward speed and calculated average thrust of subcarangiform swimming mechanism driven fore and aft
- Fig. 4.5.5 Energy consumption, maximum forward speed and calculated average thrust of subcarangiform swimming mechanism driven only aft
- Fig. 4.5.6 Measured amplitude of head and rear end of swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion
- Fig. 4.5.7 (a) Time histories of measured forward speed of subcarangiform swimming mechanism and (b) that of modified mechanism

表目次

Table 2.3.1	Specification of S3470SV
Table 2.3.2	Specification of BMF150
Table 2.6.1	Maximum forward speeds of swimming robot
Table 2.7.1	Specification of S9570SV
Table 3.3.1	Setting of gains by ultimate gain method
Table 3.4.1	Specification of acceleration and gyro sensors
Table 3.4.2	Specification of “FS-MD700”
Table 4.3.1	Swimming number of fishes
Table 4.4.1	Specification of TG-85R-SU-13.2-KA

第1章 序論

1.1 海洋開発の現状と水中ロボットによる調査

海洋は地球表面の約7割を占めており、海洋及び海底に存在する水産資源、海洋エネルギー及び鉱物資源は人類の生活の維持と発展に不可欠なものである。これらの資源を持続的かつ効率的に利用するためには海洋及び海底の詳細な調査が不可欠であり、海洋調査に必要なさまざまな機材の研究開発が活発に行われている。海洋調査に用いる機材としては調査船や潜水艇、水中ロボットなどが挙げられる。

水中ロボットは、生身の人間がそのままでは足を踏み入れることのできない水域へ接近するための一つ的手段であり、人間の動作の代行をしている産業用ロボットとは根本的に異なる[1]。この違いは、水中で駆動することに起因する。水中での駆動を想定すると、水圧への対策、状況を判断するためのセンサ類の搭載、水生生物のように自由に水中を動き回る能力等が必要になる [1]。水圧への対策としては、外殻を厚くしたり、機体形状を楕円型もしくは円筒型に近づけるなどの工夫が必要となる。搭載するセンサ類としては、対象までの距離を計測するための音響センサや光センサが必要となり、運動能力の向上には贅肉部分の少ないスリムな形状が求められる。

水中ロボットは、遠隔操縦型ロボット ROV (Remotely Operated Vehicle) と自律行動型ロボット AUV (Autonomous Underwater Vehicle) に大別され、それぞれの機体には利点と欠点があるため、調査目的、海域や海況によって機材を適切に選定する必要がある。ROV は外部から電力を供給しながら操縦できるため、ロボット本体にはアクチュエータとカメラ及びセンサ類を搭載すれば作業が可能となるが、母船とロボットを繋ぐテザー (アンビリカル) ケーブルは障害物に絡まりやすく、ケーブルに働く重力と浮力を含むその他の流体力及びケーブルの長さによって機体の動きが制限されてしまう。一方、AUV はテザーケーブルが無いため機体の運動が制限されることがない反面、内部バッテリーによる電力供給によって稼働するため動作時間に制限があり、ロボットの自律化と外乱の影響が大きい海域での運動制御が問題となる。

ROV としては Fig. 1.1.1 に示す ウッズホール海洋研究所 (WHOI) の「Jason Jr.」[2] や Fig. 1.1.2 に示す海洋研究開発機構 (JAMSTEC) の 7000m 級無人探査機「かいこう 7000-II」[3] が開発されており、AUV の例としては Fig. 1.1.3 に示す同機構の深海巡航探査機「うらしま」[3] や Fig. 1.1.4 に示す WHOI とマサチューセッツ工科大学 (MIT) により開発された巡航型 AUV「ABE (Autonomous Benthic Explorer)」[4] が挙げられる。

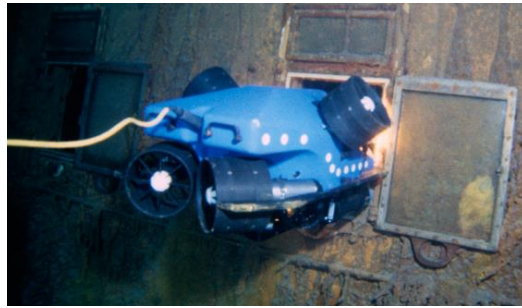


Fig. 1.1.1 “Jason Jr.” with experience that investigated “Titanic” (WHOI)



Fig. 1.1.2 “Kaiko 7000- II” which was developed to work in deep sea (JAMSTEC)



Fig. 1.1.3 Urashima (JAMSTEC)



Fig. 1.1.4 ABE (WHOI)

水中ロボットを用いた海洋調査では大洋や深海だけでなく、沿岸域や浅水域の海流が速く波の影響を強く受ける海域も運用の対象となる。しかし従来開発されてきた水中ロボットは大型の機体が多く、沿岸域や浅水域での作業においては大量の機材と多くの人員が必要となるため、あまり効率的ではないと考えられる。

水中ロボットの推進機構としては一般的にスラストなどの回転運動する機構が用いられているが、スラスト周りには吸い込み流が発生してしまう。このため、海中に浮遊する海藻やゴミなどの異物が吸い込まれて回転機構に絡んだり、遊泳能力の低い海洋生物を巻き込んで殺傷してしまう可能性が高い。一例として、東京海洋大学が開発した自動給餌システム搭載の海洋生物協調型 AUV「BA-1」の実海域実験において、海藻が多い海域で機体を駆動させた際にスラストのシャフトに海藻が絡まり推進不可能になった事例があった [5]。「BA-1」の写真を Fig. 1.1.5 に示す。



Fig. 1.1.5 BA-1 (Tokyo University of Marine Science and Technology)

また、スラストでは推力の方向の正負を瞬時に切り替えることが容易でなく、細やかな運動制御や急発進、急旋回といった動作を実現することが困難であり、実海域において流れが複雑な場合には、機体の運動を十分に制御できなくなる可能性が高い。これらの問題を解決するための泳動機構として、近年、生物模倣型の泳動機構を用いた水中ロボットが注目されており、さまざまな研究機関で開発研究が実施されている。

1.2 水生生物模倣型ロボット

推進器による巻き込み事故や生態系への悪影響を防ぐため、近年、生物模倣型の泳動機構とこれを搭載した水中ロボットがさまざまな研究機関で開発されている。

水生生物の推進方法は種や生息域によってさまざまである。例えば魚類や海獣類、一部の遊泳可能な甲殻類などは胴体や鰭の往復運動により泳動する。また、イカ類は通常はエンペラ（胴体側部から生えている側鰭）を波状に動かして泳動するが、逃避行動時には漏斗と呼ばれる器官から体に取り入れた海水を噴射することによって推進する。クラゲや一部の二枚貝は体または殻の開閉運動によって推進力を生み出し、微生物の中には繊毛・鞭毛を螺旋状に波打たせることで体を回転させながら泳動する種も存在する[6]。これらの推進方法に共通している点は、推進器となる部位が体と独立した回転運動をしていないことである。等速回転運動は定常運動であるため、推進器の周りに発生する流れも定常状態に近いものとなり、正負逆転することなく発生し続ける。するとストラスタのように強い吸い込み流が発生し、異物や生物を巻き込む原因となる。前述のような生物の挙動を模倣した動作ならば周期的に機構周りの圧力分布の大小が切り替わるため強い吸い込み流が発生しにくい。特に胴体または鰭による往復運動はその生物の周りに発生する圧力差の切り替わりの周期が非常に短いため吸い込み流がほとんど発生せず、同時に推力の方向の正負の逆転が容易であるため、細やかな動作や急発進、急旋回といった動作に向いていると考えられる。そこで本研究では前述の胴体または鰭の往復運動による泳動方法を採用した魚類型推進機構を採用しこれを搭載する機体の開発を試みる。

1.3 生物模倣型運動機構に関する研究の現状

生物の動作及び機能を応用して新しいものを生み出す考えを **Biomimetics**（バイオミメティクス）と呼ぶ。近年では流体力学やロボット工学においてこの考えが広く活用されている。本研究で扱う魚類型ロボットはバイオミメティクスに基づいて考案されたロボットの一種であるが、魚類以外のバイオミメティックロボットとして、様々な例が挙げられる。Fig. 1.3.1 に示すアメリカ海兵隊と国防高等研究計画局（DARPA）が開発中の四足歩行型輸送用ロボット「LS3AlphaDog」[7] は、自動車や戦車が走行できないような悪路でも救援物資を届ける目的で製作されている。Fig. 1.3.2 に示すスイス連邦工科大学（ETH）が開発したウミガメ模倣ロボット「Naro-tartaruga」[8]は、周りの海洋生物にできるだけ干渉しないように海洋観測を行うために考案された。Fig. 1.3.3 に示す大阪市立大学が開発したヤドカリの挙動を模した橋梁検査ロボット「BIREM」[9]は、生身の人間では難しい鉄橋の裏側の腐食検査を行うために開発された。



Fig. 1.3.1 LS3 AlphaDog (DARPA)



Fig. 1.3.2 Naro-tartaruga (ETH)

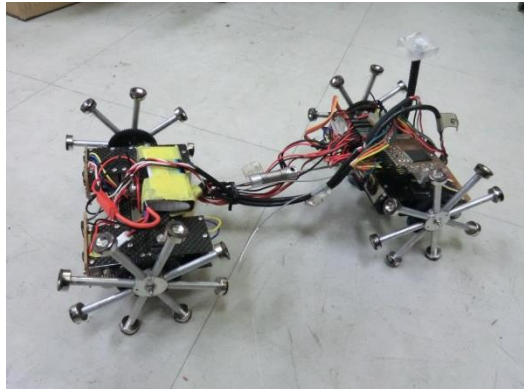


Fig. 1.3.3 BIREM (Osaka City Univ.)

魚類型の生物模倣型ロボットにおいて、胴体や鰭の往復運動によって発生する推進力はプロペラを用いた一般的な船舶及び水中ロボットの推進方法に比べて推進効率が良いと言われている。例えば、ケンブリッジ大学の生物学者グレイ (J. Gray) は体長約2メートルのイルカが 20 knot の船に並走して遊泳したと伝えている。グレイがこのイルカの体長から筋肉重量を推定し、イルカを 20 knot で曳航した場合に予想される流体抵抗からイルカに働く推進力と抗力の釣り合いを考えてイルカの単位重量当たりのパワーを計算したところ、0.074 馬力にもなる結果となった。これはよく鍛えられたヒト、またはイヌについて報告されている約 0.01 馬力と比較してきわめて大きく、生物学的に矛盾していると言われている(Gray のパラドックス[10])。このように、魚類や海獣の泳動を模倣した胴体や鰭の往復運動による推進機構は船や水中ロボットの推進装置として有用であると考えられ、これに関する研究がさまざまな研究機関で行われてきた。

これまでに実施されてきた鰭を用いた魚類型推進機構の研究開発は大まかに次の3つの目的によって分類できる。1つは、大洋を泳ぎ回る目的で開発されてきた推進機構である。大洋を泳ぎ回るためには加速及び旋回的能力はあまり重要ではなく、最大前進速度と推進効率が重要視される。よって、これらを考慮した魚類型推進機構は大洋を高速で泳ぐイルカなどの海獣やマグロ、カツオなどの高度回遊性魚類の形状及び動作を模倣した機構となる。これらの例として、Fig. 1.3.4 に示す MIT で開発されたマグロの泳動を模した水中推進装置「ROBOTUNA」[11]や Fig. 1.3.5 に示す東京電機大学で開発中のマグロ型振動翼推進魚「TDUNA5-2013c」[12]などが挙げられる。

2つ目は、沿岸域や浅水域、その他の狭い水路や流れが複雑な水域での使用を目的として開発されてきた推進機構である。沿岸域や浅水域で航行させるためには機体が小型である必要があり、狭い水路や流れが複雑な水域での使用を考えると、機体には高い加速能力と旋回性能、機体の姿勢を保つためのホバリング能力が必要になる。これらの要素を考慮した推進機構としては、沿岸域を遊泳する魚種や岩場に潜むカサゴ、メバルな

どの根魚の形状及び動作を模倣した泳動機構が有効となる。これらの要素を考慮した泳動機構の例としては、Fig. 1.3.6 に示す MIT で開発された機構内に充填された気体を膨張、収縮させることで泳動機構を駆動する弾性体魚型ロボット[13]や、Fig. 1.3.7 に示す海上技術安全研究所で開発された旋回性能特化型魚ロボット「PF-300」[14]、Fig. 1.3.8 に示す大阪大学が開発した鰭で動きを制御しホバリング動作も可能な「PLATYPUS」[15]などが挙げられる。



Fig. 1.3.4 “ROBOTUNA” in imitation of tuna (MIT)



Fig. 1.3.5 “TDUNA-2013c” in imitation of tuna (Tokyo Denki Univ.)



Fig. 1.3.6 Bending “Soft-bodied fish robot” (MIT)



Fig. 1.3.7 Swimming “PF-300” (NMRI)



Fig. 1.3.8 Swimming “PLATYPUS” (Osaka Univ.)

3つ目の分類として、前進性能、加速性能、旋回性能すべてにおいてバランス良く、ある程度高い性能を保つためにアジ、サバなどの小型回遊魚やサケ、マスなどの遡河回遊魚を模倣した泳動機構が考えられる。九州大学では Fig. 1.3.9 に示すアジの形状及び動作を模倣した人工筋肉により駆動する魚類型ロボットを開発してきた[16-18]。この機体は形状記憶合金製の人工筋肉を搭載し、通電により機体後部の形状を変化させることにより泳動することが可能である。



Fig. 1.3.9 Fish-Type Robot (Kyushu Univ.)

上記の魚類型ロボットには代表的な生物模倣型泳動機構が採用されており、世界的に見ても性能の高い機体であるが、実際の魚類に匹敵する前進、加速、旋回、ホバリング性能は未だ実現されていない。この原因として、2つの要因が考えられる。1つ目は、アクチュエータが配置される部位が機体全体に対して狭いことである。実際の魚類は胴体のみならず頭部や体中の鰭の関節までの広い範囲に筋肉が発達しており、体の各部を動かすことが可能である。しかしこれまでに開発されてきた機体はアクチュエータの個数が少なく機体の可動箇所が少ないため、実際の魚類と同等の泳動が実現できていない。これは、従来使用されて来た直流モータやサーボモータのサイズが大きすぎて、鰭先のようにアクチュエータの搭載スペースがほとんどない部位への配置が困難であることが原因となっている。2つ目の要因は、運動機構の駆動振動数が低いことである。特に、魚類が急加速する瞬間もしくは回遊魚の遊泳の際には胴体後半部および尾鰭を高い振動数で動かしていると言われていたが、これまで開発された泳動機構の振動数を見ると、振動数が高いマグロ型推進機構において **ROBOTUNA** が 1 Hz、**TDUNA-2013c** が 5 Hz であった[11, 12]。一方で、回遊魚が高速で泳ぐ際の振動数は 5 Hz 以上であると言われており、従来の高速泳動型魚類型ロボットの駆動振動数が不足していることが分かる。

これらの問題への対策として、機体の中でアクチュエータの搭載スペースが十分に確保できる場所に高出力のアクチュエータを、搭載スペースが狭い部位には出力は低いサイズが小さいアクチュエータを搭載することが考えられる。これにより、機体の広範囲を動かすことが可能となり、泳動性能の向上が期待できる。また、泳動機構の駆動振動数を高めるために、搭載するアクチュエータの種類や性能を詳細に検討し、これを用いた新しい機構のメカニズムを採用することで、推進性能の向上が期待できる。

1.4 研究の目的と内容

本研究では、一般的なスラストを用いた水中ロボットでは困難とされる急発進または急旋回動作を実現させるための推進機構の開発を目指す。これらの動作の再現によって、将来的に流れが複雑な実海域での制御が実現できると考えられる。

本研究で開発する泳動機構は以下の2種類である。1つは胴体と共に胸鰭、尾鰭、背鰭、尻鰭を駆動することにより操縦性能の向上を図る機体であり、他方は泳動機構の駆動振動数を高めて加速性能及び前進速度の向上を目指した機体である。前者では前進と急旋回、急停止の性能について調査し、後者では前進速度及び前進時の加速性能を調査する。さらに、これらの機体の運動制御方法と推進機構への異物巻き込みについて考察する。本文は以下の5つの章により構成されている。

第1章では緒論として、魚類型ロボット及び生物模倣型泳動機構の研究の背景と現状について述べるとともに、本研究の目的と各章の内容を示した。

第2章では、胴体と共に各部の鰭を駆動するためにサーボモータと人工筋肉を併用した魚類型ロボットの開発について述べる。アクチュエータの搭載スペースが大きい胴体部には出力の高いサーボモータを搭載し、アクチュエータの搭載スペースが小さい各部の鰭は人工筋肉で駆動することで、魚類型ロボットの運動性能の向上を目指した。機体の開発に先立ち、鰭を持つ魚類の形状及び泳動方式について調査し、求められる運動性能の実現に適した機体形状と泳動方式を検討した。続いて、鰭の材質、形状、人工筋肉の配置について検討し、機体の設計及び製作を行った。ロボットの泳動性能を細長体理論に基づく推進力の推定と、泳動実験による前進速度と旋回角速度の計測結果により評価した結果、採用された泳動方式による高い前進速度と、人工筋肉を搭載した各鰭の併用による旋回性能の向上が確認された。

第3章では、第2章で開発した魚類型ロボットを実水域で運用した結果について述べる。ここでは魚類の走流性に着目し、ロボットを周りの流れに沿って泳動させるための運動制御方法を検討した。加速度センサとジャイロセンサを搭載した機体を用いて実水域での小型ビデオカメラによる水生生物の観測を行い、開発した運動制御系の有用性を確認した。その結果、水路における実験においてロボットが水路内の流れに沿って泳動することが確認できた。また、機体に搭載した小型ビデオカメラによる水生生物の撮影に成功した。

次に、魚類型ロボットから発生する吸い込み流について水槽実験により調査した。魚類型ロボットとスラスト駆動型ロボットを、海藻を模擬した浮遊物が投入された水槽中で推進させた結果、魚類型ロボットでは推進器への浮遊物の巻き込みは認められなかった。一方で、スラスト駆動型ロボットでは約半数の試行において巻き込みが発生し、浮遊物が多く存在する水域での生物模倣型泳動機構の有効性が確認された。

第4章では、推進性能に優れた泳動機構を開発するため、Carangiform方式と

Subcarangiform 方式を採用した機体の推進性能を調査した結果について述べる。Carangiform 方式は広義のアジ型推進のうち、頭部の横方向運動と尾鰭のアスペクト比が平均的な魚類の泳動方式であり、Subcarangiform 方式は広義のアジ型推進のうち、頭部の横方向運動が他と比べて大きく尾鰭のアスペクト比が他と比べて小さい魚類の泳動方式を示す。高い推進性能が期待される胴体と尾鰭の泳動振動数を実際の魚類の泳動数をもとに推定し、この泳動を実現するための推進機構を製作した。細長体理論に基づく推進力の推定と実験による前進速度及び泳動時の消費電力の計測を行った結果、Carangiform 方式の優位性が確認された。

第5章は結言である。本研究で得られた結果を総括し、生物模倣型水中ロボットの実水域での有用性と今後の課題について述べる。

第2章 魚類型ロボット用泳動機構の開発

2.1 緒言

本章では胴体と各部の鰭を駆動させ高い運動性能を目指した機体として、人工筋肉とサーボモータを併用した魚類型ロボットの開発を行う。形状記憶合金製の人工筋肉は直径 150 nm で人間の髪の毛程度のサイズであり、生物模倣型泳動機構に使用する際にアクチュエータの搭載スペースが小さくて済むという利点があった。しかしこの人工筋肉は、一般的に使用されるモータ等の他のアクチュエータに比べて出力が小さいという欠点があり、魚類型ロボットの胴体部分に使用し泳動推進器を駆動するには不十分である。そこで、魚類型ロボットの機体内部で、アクチュエータの搭載スペースが大きい胴体には出力の高いサーボモータを搭載し、アクチュエータの搭載スペースが小さい尾鰭や胸鰭等に人工筋肉を搭載することで、機体の複数の部位を駆動し泳動能力の向上を目指した。

機体の開発では、まず鰭を持つ魚類の形状及び泳動方式の分類について調査し、必要とする泳動能力の再現に適した機体形状及び泳動方式を検討する。次に、実際の魚類でいうところの胸鰭及び尾鰭として機能するフィン機構を考案し、製作する。フィン機構は人工筋肉に通電することによって駆動し、使用する人工筋肉の収縮量をもとにフィンの材質、形状、人工筋肉の配置について検討する。製作した人工筋肉で駆動するフィンとサーボモータで駆動する導体を有する試作機的设计及び製作を行い、その泳動性能を評価する。その後、さらなる泳動性能の向上を目指すため、胴体部分にサーボモータを追加し、魚類の背鰭及び尻鰭として機能する人工筋肉駆動の開閉型フィンを搭載した機体について、その泳動性能を考察する。開発した機体の泳動性能は、計算による推進力の推定、泳動実験による最大前進速度と急旋回時の平均角速度により評価する。

2.2 魚類の泳動方法

ここでは、魚類型ロボット泳動機構とその駆動方法について検討するために、実際の魚類の形状や魚体各部の泳動方式について概要を述べ、開発する魚類型ロボットに適した機体形状及び泳動方式を検討する。

2.2.1 魚類の体型の分類

実際の魚類は、生息場所の状況に適応するために体や鰭の形状や泳動時の運動が種によってさまざまである。ここでは、魚体の形状と生息環境について述べる。魚体形状は主に5つに分類される[19]。以下に、その分類とそれぞれの特徴を示す

- 1) 紡錘型 (Fusiform) : 流線型の体型で、大洋に生息し長距離を移動するために長時間もしくは常時、泳動を継続する魚類に多く見られる。サメ類、カツオ・マグロ類、ブリ及びカンパチなどはその典型的な例である。このような体型は水中を高速で長時間泳動する習性に適応して発達したものと考えられている。
- 2) 側扁型 (Compressiform) : 紡錘型が背と腹の方向に高くなり左右の幅が薄くなった体型である。紡錘型に比べて長時間高速で泳ぎ続ける能力は低い、旋回能力は高い。コノシロ、ヒラアジ、マダイ、カワハギなどが挙げられる。
- 3) 縦扁型 (Depressiform) : 紡錘型が背腹方向に薄くなり左右の幅が広がった体型で、運動性に乏しい。エイやアンコウなどのような底生魚類が多い。
- 4) ウナギ型 (Anguilliform) : 紡錘型を前後の方向へ延長した細長い体型。無顎類やウナギ目魚類などがこの体型に属する。水底の砂底や泥底及び狭い場所全般に潜入する習性に適応して発達したものと考えられている。
- 5) フグ型 (Tetraodontiform) : 紡錘型を前後に縮小した体型で、卵型または球型に近い体型である。フグ類がこの形状をしている。一般的に運動は緩慢であるが、ホバリング動作に適している。

これらの分類及び生息環境より、大洋を航行するための機体形状には紡錘型が、沿岸域や浅水域での使用を目的とするならば側扁型やフグ型が適していると考えられる。

2.2.2 前進時における魚類の泳動方式の分類

ここでは魚類が前進運動する場合における泳動方式の分類について述べる。Brederは、さまざまな魚類の泳動を、魚体の尾鰭の形状や運動を考慮して3つに大別した[20]。この分類方法は、多くの魚類の泳動の研究で採用されている。Brederによる魚類の泳動方式の分類を以下に示す。ただし、ここでは永井が著書[21]で用いた、日本語による呼び名を併用した。

- 1) **Anguilliform mode** (ウナギ型推進) : 魚体が細長く、太さが一様で、体を進行波状に変形させることで生じる変形波による波の伝搬を利用して推進する方式。推進力を得るためには、変形波の速度が前進速度よりも大きく、振幅を尾に向かって増加する必要がある。このような変形波による推進は、魚体に送る進行波の方向や波長、振動数を切り替えることが容易であるため、細かい位置決めや前進後進の切り替えが簡単に行える。実際の魚類の中ではウナギ、ウツボなどがこの泳動方式に属する。この泳動方式の概念図を Fig. 2.2.1 に示す。図において、 x 、 y 、 z 軸をそれぞれ体長方向、体幅方向、体高方向とし、 x 軸の正の方向は推進方向とする。図中の黄色い矢印は魚体を変形波状に動かすことによって押し出す水の方向を表している。

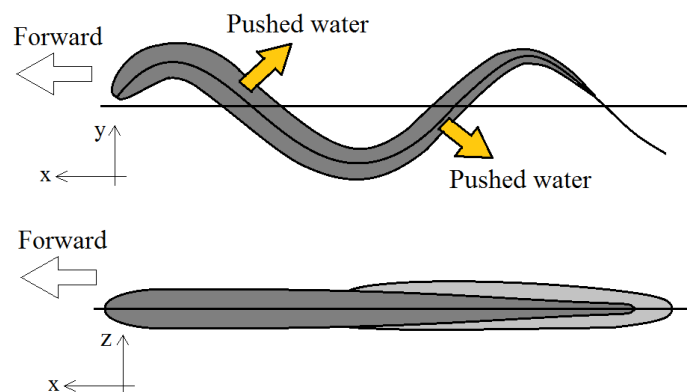


Fig. 2.2.1 Image of anguilliform mode

- 2) **Carangiform mode** (アジ型推進) : 尾鰭の運動と体全体の運動の両方を利用し、水を後方に押し出して推進する。この泳動方式における魚体表面の圧力分布を模式的に表したものを Fig. 2.2.2 に示す[22]。魚体の表面には正圧域及び負圧域が存在し、これらの合力が前進方向の推進力となる。この泳動方式では高い前進速度での遊泳と同時に素早い加速と旋回が可能となる。実際の魚類ではアジやマグロ、カツオ、サケなどの高速で泳ぐものがこの泳動方式に属する。

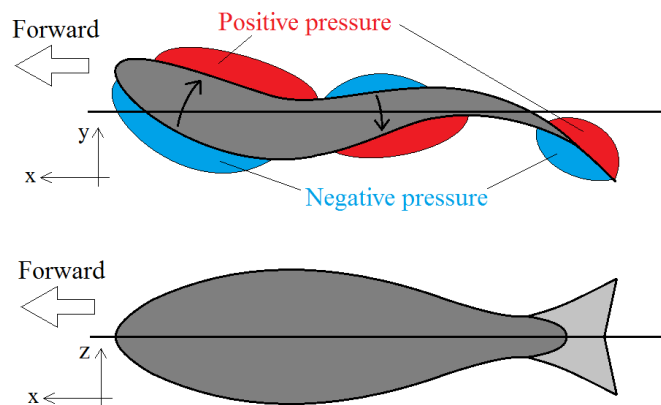


Fig. 2.2.2 Image of carangiform mode

3) Ostraciiform mode (ハコフグ型推進) : 体をほとんど使わずに扇状の尾鰭だけを動かして推進する方式。鰭をボートのオールのように漕いだり羽ばたくように動かすことで、前進だけでなくホバリングや旋回径の非常に小さい旋回も可能である。この泳動方式は尾鰭の運動により生成される推力の向きが左右に分散されやすいため、上記の泳動方式と比べて速度及び推進効率の点では劣っていると考えられている。しかしこの泳動方式を採用する機構は関節が少ないため、魚類型ロボットに採用する場合には駆動部での機械損失を低減できるため、機械効率の点で有利であると考えられている[23]。また、この泳動方式において扇状の尾鰭を剛体でなく弾性体にするすることで、推力の向きを安定させることが可能であり、推進性能の向上が期待できる。実際の魚類では、ハコフグやハリセンボンなどがこの泳動方式に属する。この泳動方式の概念図を Fig. 2.2.3 に示す。

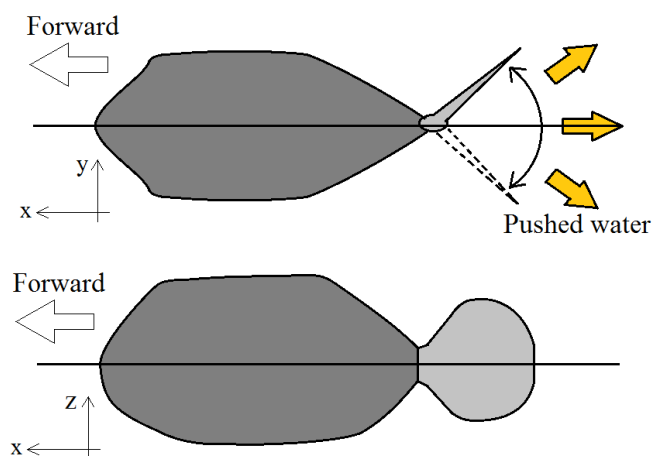


Fig. 2.2.3 Image of ostraciiform mode

上記の泳動方式のうち、加速、前進、そして旋回において高い能力が期待できる泳動方式は Carangiform mode であり、実水域での運用を目指す魚類型ロボットのための泳動方式に適していると考えられる。魚類の泳動方式において、Lindsey はこの Carangiform mode をさらに細かく分類している[24]。前述の Carangiform mode は Lindsey の分類によって、魚体各部の横運動の大きさや尾鰭のアスペクト比を基にさらに3通りに分けられている。以下に、その分類を示す。

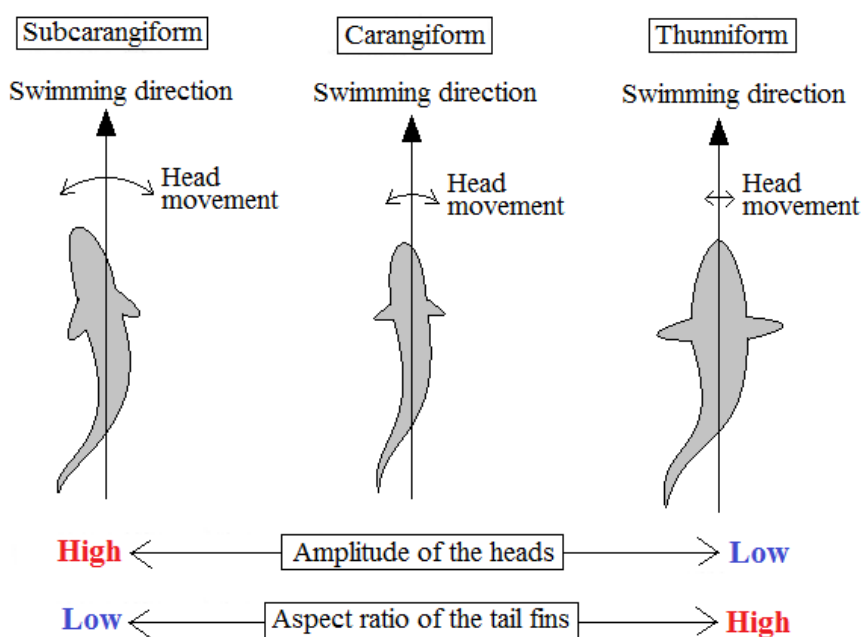


Fig. 2.2.4 Image of subcarangiform, carangiform and thunniform mode

- 1) **Subcarangiform mode (Oscillating Foil)** : この泳動方式では、頭部を含む胴体前半分の横方向の運動の振幅が他の2種類よりも大きく、尾鰭の形状は低アスペクト比で魚体形状は側扁型を成すものが多い。横方向に体を変形させる蛇行というよりは、水を後方に押し出して進む泳動方式である。体の大きさの割に尾鰭の面積が広く、また体全体も翼として作用するため、大きい推力の発生が可能であり、静止時からの急加速に優れた魚類が多い。しかしながら、側扁型の魚体形状や低アスペクト比で面積の広い尾鰭は、単位面積当たりの抵抗が大きく、他の2種類に比べると高速泳動や高効率泳動には適していないと考えられる。このため、この泳動方式を模倣した魚類型推進機構は急発進や急旋回などの非定常動作において優れたものとなると考えられる。また、動力の出力を体の広い範囲に分散することにより作動時に泳動機構に過度な負荷が生じにくいいため、泳動機構に高い強度を必要としないという利点がある。英語表記では、この泳動方式を

“Oscillating Foil” と呼ぶ場合がある[25]。実際の魚類ではサケ、マス、スズキなどがこの泳動方式に属している。

- 2) **Carangiform mode (Oscillating Foil and Wing)** : この泳動方式は、頭部を含む胴体前半分の横運動の振幅が上記の **Subcarangiform mode** よりも小さい。体の形状は側扁型や弓矢型（サンマ等のように細長く尾鰭のアスペクト比が大きい形状）で、体高に比べて体長が十分に長いものが多い。体の形状は魚体中央から尾柄（尾鰭の付け根）に進むにつれて細長くなり尾柄部分で最も細くなる。これは魚体後半部の質量を小さくにとって、横方向の発生力が集中する魚体後半部の角運動量を小さくするためであり、これによって魚体の横滑りや後半部の動きの反動による頭部の横運動が軽減されている。頭部の振れが小さいと、前進方向から見た機体前半分の投影面積を泳動機構の駆動 1 周期内において平均化した値が小さくなるため、魚体の抵抗が小さくなる。このため、上記の **Subcarangiform mode** に比べて推進効率が改善し最大前進速度も大きくなると考えられる。イワシ、アジ、サバなどがこの泳動方式に属する。
- 3) **Thunniform mode (Oscillating Wing)** : この泳動方式は振動翼を利用した推進方法であり、英語表記では別名 “Oscillating Wing” と呼ばれる[26]。頭部を含む胴体前半分の横運動はほとんどなく、尾鰭を単独の翼と仮定した場合の、その横運動によって生じる揚力が推進力のほとんどであると考えられている[27]。この泳動方式をとる魚類の多くが紡錘型の魚体と三日月型の尾鰭を持ち、尾鰭はほとんど剛体に近い。尾鰭のアスペクト比は他の 2 種類の泳動方式に比べて非常に高く、それゆえ面積あたりの抵抗が少なく、揚抗比が大きいという特徴がある。尾鰭を含む魚体全体の抵抗も少なく、さらに、魚体全体に占める尾鰭の面積が小さいために尾鰭を駆動するエネルギーを小さくできることから、高い推進効率と前進速度を兼ね備えた泳動方式であるとされている。しかし、尾鰭の面積が小さいため魚体全体により発生する推進力に対する尾鰭のみの推進力は小さく、急加速や急旋回動作の性能は他の泳動方式と比べて低いと考えられている[27]。実際の魚類ではマグロやカツオがこの泳動方式に属する。

以上が、広義での **Carangiform mode** を詳細に分類した場合の泳動方式である。以上の考察により、大洋を航行するための泳動方式には **Thunniform mode** が、沿岸域や浅水域での使用には **Subcarangiform mode** もしくは **Carangiform mode** が適していると考えられる。

2.2.3 魚体各部の鰭の役割と泳動方式

魚類には様々な種類の鰭が備わっており、それらは泳動時に活用されるものが多い。Fig. 2.2.5 に代表的な魚類の各鰭の配置を示す[28]。

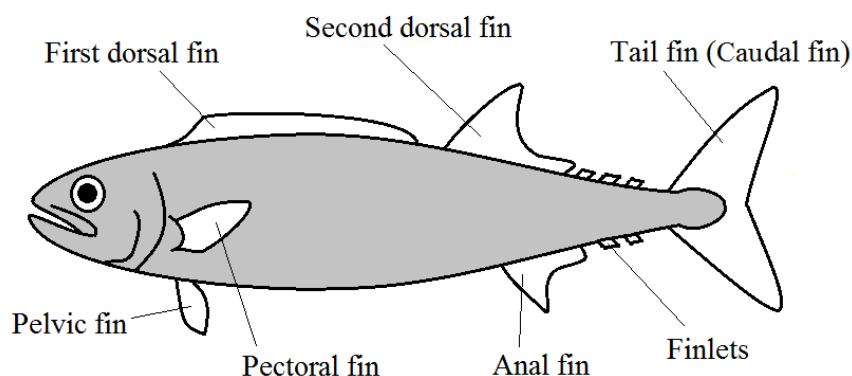


Fig. 2.2.5 Names of a fish body

胸鰭 (Pectoral fin) と腹鰭 (Pelvic fin) は左右一対ずつ存在し、その他の第1、第2背鰭 (First and second dorsal fins)、尻鰭 (Anal fin)、尾鰭 (Tail fin) もしくは Caudal fin) はそれぞれ1つずつである。ただし、背鰭を魚体の前後に2つ持つのは一部の魚類である。また、特定の魚類には小離鰭 (しょうりき) (Finlets) がある。

魚類はこれらの鰭のうち、尾鰭や背鰭は前進運動時に、胸鰭は旋回運動時や急停止運動時に活用している。前進運動時において、尾鰭は主に推進力を発生させ、背鰭を広げることで針路安定性を高めることができる[29]。これらの鰭はある程度まで変形させることが可能であり、様々な形状 (アスペクト比) を状況に応じて使い分ける。また、胸鰭は他の鰭と比べて運動の自由度が高く、基本的な運動としてはローイング運動 (鰭を前後に振動させる運動)、フラッピング運動 (鰭を上下に振動させる運動)、フェザリング運動 (鰭を捻る運動)、ベンディング運動 (鰭を屈曲させる運動)、スパニング運動 (鰭の幅を伸縮させる運動) の5種類が挙げられる[30]。胸鰭におけるこれらの運動のイメージ図を Fig. 2.2.6 に示す。実際の魚類はこれらの胸鰭の運動を組み合わせることで、前進時には抗力及び進行逆方向の推力を発生させることで急停止し、旋回時には抗力及び揚力を発生させることで魚体周りのモーメントを発生させて急旋回する[31]。よって魚類型ロボットにおいて、胸鰭は機体の操縦や位置保持に重要な役割を果たすと考えられる。

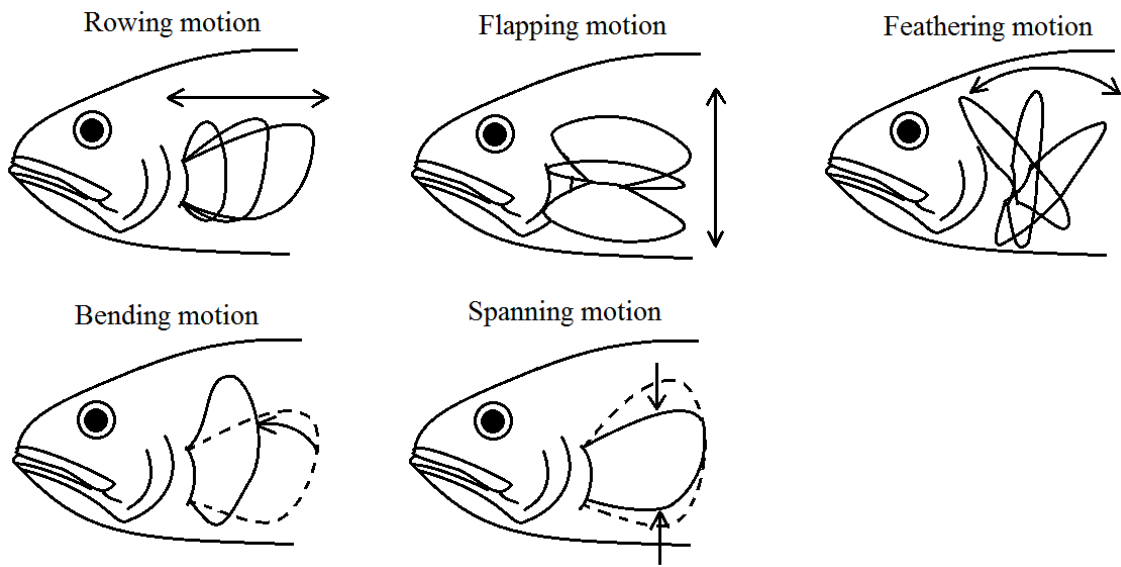


Fig. 2.2.6 Motions of pectoral fin

2.3 機体の泳動機構

高い旋回性能を有する魚類型ロボットの泳動機構として、アクチュエータの搭載スペースが大きい胴体に出力の高いサーボモータを搭載し、アクチュエータの搭載スペースが小さい尾鰭や胸鰭等は人工筋肉によって駆動する、複合的な泳動機構を開発する。ここでは、本泳動機構に使用するアクチュエータと、その運動の詳細について述べる。まず最初に、製作する魚類型ロボットの内部配置を Fig. 2.3.1 に示す。

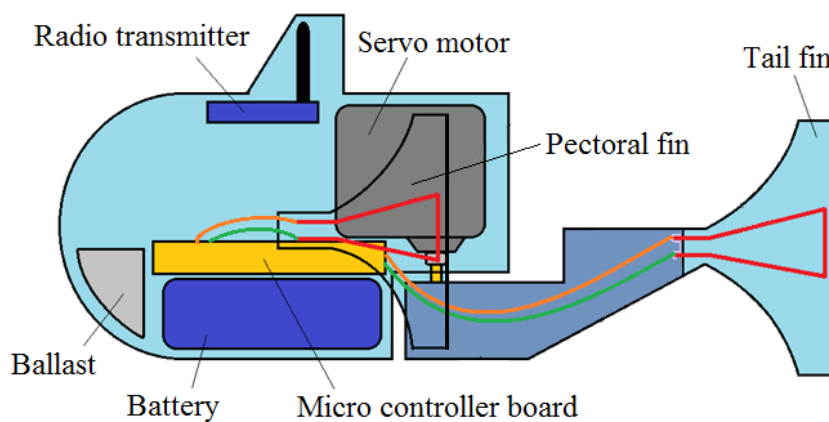


Fig. 2.3.1 Arrangement of the fish-type robot

機体の運動を制御するためのマイコンを含む駆動回路と、機体を遠隔操作するための無線通信機を搭載する。

2.3.1 胴体部分の泳動機構

魚類型ロボットの胴体部分に搭載するアクチュエータとしては、前進運動時における横方向往復運動や、急旋回動作時における非定常運動を実現できるものを選択する必要がある。前進時と急旋回時における機体胴体中央部分の運動のイメージ図を Fig. 2.3.2 に示す。図において、 x 、 y 方向はそれぞれ機体前方と機体横方向である。

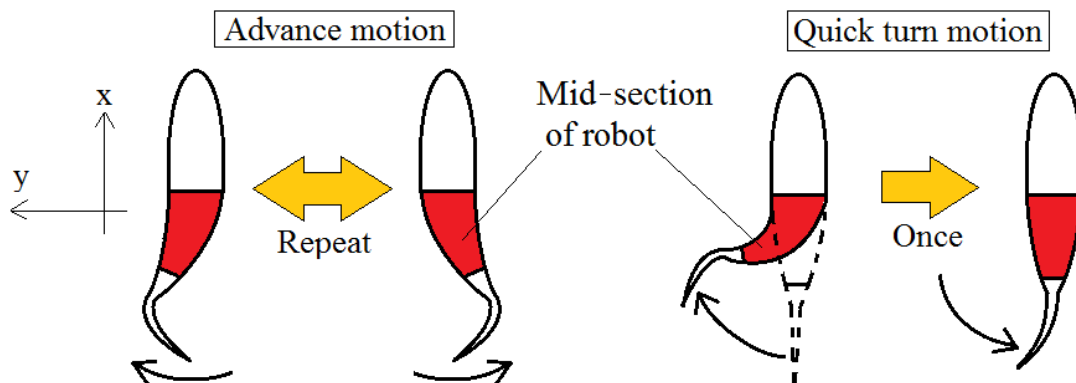


Fig. 2.3.2 Motion of central body part of the fish-type robot

機体の前進運動は胴体中央部分を左右に屈曲させるものであり、この時の可動角の振幅は小さめである。急旋回運動は機体が静止している状態からこの胴体部を左右どちらかに大きく曲げ直後に元の位置に戻す動作であり、このときに発生する機体周りのモーメントによって瞬時に機体の針路を変更することができる。このような急旋回動作は側扁型魚類特有のものであり、水中ロボットを用いた調査や作業において有用であると考えられているため、過去に研究例がいくつか存在する。平田ら[32]や古川ら[33]は、自身らが開発した魚類型ロボットによる急旋回性能の評価を行っている。

胴体部に搭載するアクチュエータは、魚の前進運動を再現するための回転運動や、急旋回動作時における瞬間的な非定常運動を実現できるものが望ましいが、前述の人工筋肉は素早く細やかな収縮が可能である反面、その発生力は弱い。また、人工筋肉は通電時の発熱によって変形するため、原形に戻すために冷却する必要があり、短い周期の運動には不向きであると考えられる。一方で直流モータは発生力と短周期の運動の実現の面では問題ないが、機体の向きや姿勢を微調整できるような細やかな動作には向いていない。このため、人工筋肉と直流モータは機体の胴体駆動用アクチュエータとしては適さない。

上記の条件を満たすアクチュエータとしてはサーボ機構の採用が適切であると考えられる。サーボモータは、位置や速度を制御量として目標値に追従するように自動で動作するモータである。本論文において直流モータは制御機構がなく固定子(永久磁石)、回転子(コイル)、シャフト、外殻から成るアクチュエータと定義し、サーボモータはラジコン用DCサーボモータとする。ホビー用で市販されているサーボモータは用途ごとに分けられており、大きく分けてカー用サーボモータと空用サーボモータに分かれる。本研究では水中での高い推進力の発生を実現させる必要があるため、比較的输出トルクの大きいカー用サーボモータを使用した。今回使用した双葉電子工業製のカー用サーボモータ S3470SV の外観を Fig. 2.3.3 に、仕様[34]を Table 2.3.1 に示す。



Fig. 2.3.3 Servo motor “S3470SV”

Table 2.3.1 Specification of S3470SV

Speed	0.12sec/60° (7.4V)
	0.14sec/60° (6.0V)
Torque	9.6kgf·cm (7.4V)
	8.0kgf·cm (6.0V)
Size	40.0×20.0×38.1mm
Weight	43g
Supply voltage	4.8V~7.4V

このサーボモータのシャフト部分を水密加工したものを機体の胴体中央部分に配置し、機体に前進及び急発進等の動作をさせるためには、マイクロコントローラ（以下、マイコン）を用いた PWM (Pulse Width Modulation) 制御によってサーボモータの動きを制御する。

2.3.2 人工筋肉により駆動するフィン機構

魚類型ロボットの胸部両側及び尾柄にある鰭部分に搭載するアクチュエータは、小さいスペースに設置可能で応答時間が短く微調整の利く動作が必要とされる。急旋回と急停止動作において、機体各鰭（胸鰭と尾鰭の役割をするフィン機構）の使用時と未使用時の運動を Fig. 2.3.4 に示す。この図において、x、y 方向はそれぞれ機体前方と機体横方向である。

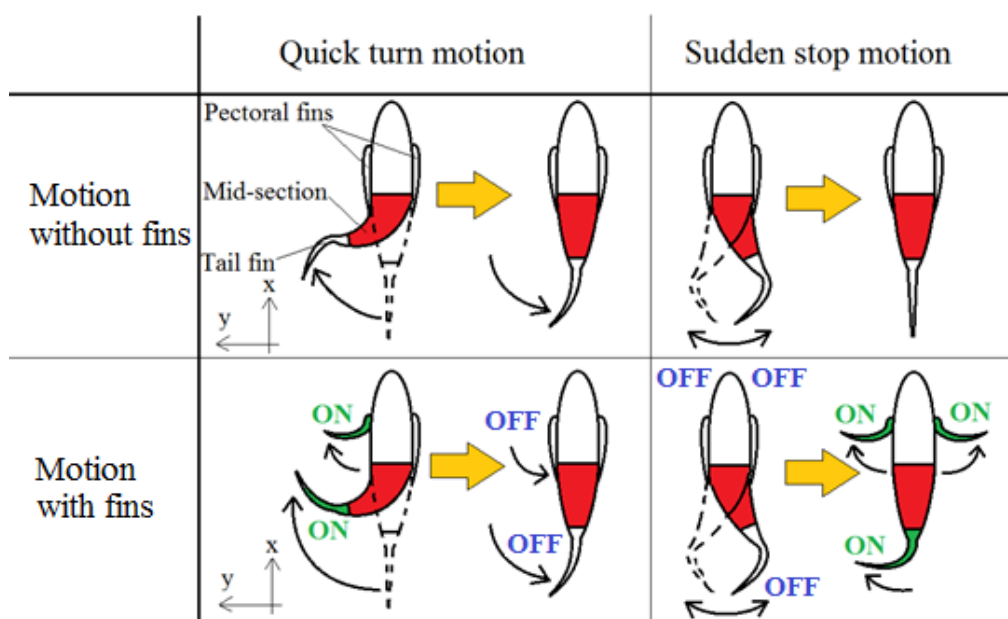


Fig. 2.3.4 Drive of equipped actuators during quick turn and sudden stop motion

Fig. 2.3.4 において、ON と表記されている状態ではフィン機構が屈曲されている状態であり、OFF の場合は元の形状を維持している状態である。図中の色付けされている箇所において、赤色の表示は胴体中央部に搭載したサーボモータにより駆動される部分、緑色の表示は人工筋肉により駆動される胸鰭と尾鰭を示す。ここで、サーボモータは位置の制御を行っているため常に通電されており、胸鰭と尾鰭は人工筋肉への通電の ON/OFF の操作のみで駆動するため、図では人工筋肉に通電していない状態のフィン機構は色付けされていない。

胸鰭と尾鰭に搭載するトキ・コーポレーション製の人工筋肉 Bio Metal Fiber 150 (以下、BMF150) の写真と仕様[35]をそれぞれ Fig. 2.3.5 と Table 2.3.2 に示す。



Fig. 2.3.5 Bio Metal Fiber 150

Table 2.3.2 Specification of BMF150

Standard diameter (mm)	0.15	Standard drive voltage (V/m)	20.7
Practical force produced (gf)	150	Standard power (W/m)	7.05
Practical kinetic strain (%)	4	Standard resistance (Ω /m)	61
Service life (times)	1000000	Tensile strength (Kgf)	1.8
Standard drive current (mA)	340	Weight (mg/m)	112

この BMF は Ti-Ni 系形状記憶合金を原料にした繊維状のアクチュエータであり、通電するとニクロム線のような電気抵抗の大きさを利用した自己発熱により収縮し、電流を遮断することで熱が冷め、短時間で元の形状に戻る。BMF150 は直径が $150\mu\text{m}$ と細く、薄い色の髪の毛のような外観である。

フィンの動作はマイコンとトランジスタを用いたスイッチング回路で制御し、トランジスタとしては比較的小型な電界効果トランジスタ (FET) を使用する。

2.4 泳動能力を向上させるためのフィン機構の検討

2.4.1 フィン機構を構成する部品の検討

製作するフィン機構は、鰭型に切ったシートの表面に BMF150 を接着した構造とする。魚類型ロボットは急旋回、急停止動作において Fig. 2.3.3 に示すように鰭を大きく変形させるため、鰭型のシートには縦弾性係数が小さめの柔らかい材質を使用し、接着部分が柔軟な弾性接着剤により人工筋肉を接着する必要がある。また、フィンの曲げ剛性を小さくするためにフィンの断面 2 次モーメントをできるだけ小さくする必要がある。曲げ剛性値は鰭型シートの形状と使用する弾性接着剤の体積や貼り付け方にも依存するため、弾性接着剤はできるだけ薄く塗る必要がある。同時に十分な強度を確保するため、フィン表面の人工筋肉の上には極薄のシートを張り付ける。

機構の基盤となる鰭型のシートとして厚さ 0.2mm のポリ塩化ビニルシートを、フィンの表面に貼り付ける極薄シートとして厚さ 0.05mm の極薄シリコンシートを採用した。また弾性接着剤としては、アクリル変成シリコン樹脂を用いた。本接着剤は、塗布してから固まるまでの体積収縮がほとんどなく耐候性にも優れているため、変色や劣化などの変質が起こりにくいといった特徴を有する。フィン機構の構造を Fig. 2.4.1 に示す。この図において、x、y、z 方向はそれぞれ機体前方、横方向、高さ方向を表す。胸鰭と尾鰭においてフィン基盤の形状は同じであるが、胸鰭は片側のみに、尾鰭は両側に BMF150 とシリコンシートをそれぞれ 1 つずつ配置する。

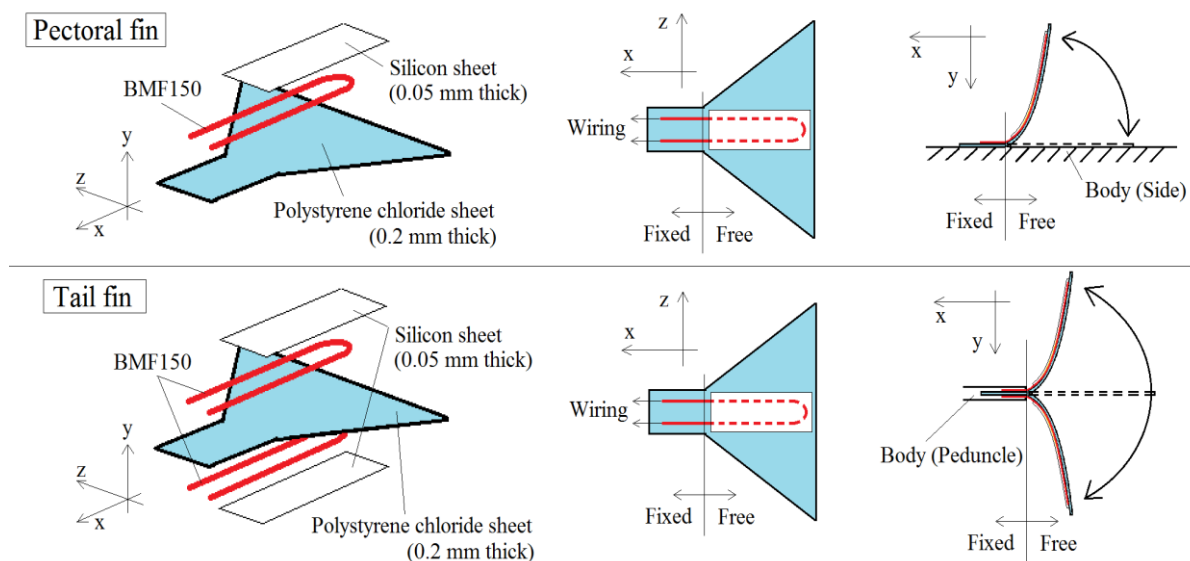


Fig. 2.4.1 Structure of pectoral and tail fin

2.4.2 人工筋肉の配置方法の検討

フィン機構を駆動させたときのフィンの屈曲 (Fig. 2.2.6 におけるベンディング) 及び鰭先の形状は、人工筋肉の配置を変えることによって変化する。ここでは、急旋回と急停止の動作時にフィンの鰭先の形状が各動作に適した形状となる人工筋肉の配置を求めため、3通りの人工筋肉の配置パターンを比較する。それぞれのパターンでの人工筋肉配置を Fig. 2.4.2 に示す。

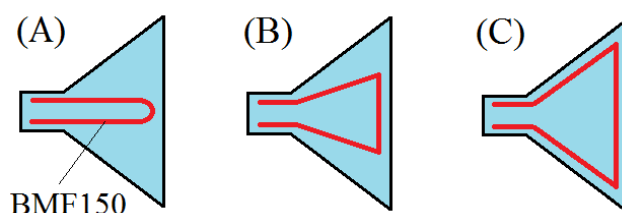


Fig. 2.4.2 Arrangements of artificial muscle on the fin

ここでは、フィンの鰭先の形状の影響を確認するために、各配置パターンにおいて、ベンディング量は等しくフィンの鰭先の形状のみが異なる配置を採用している。配置方法の詳細については後で述べる。

面状の抵抗体において、高い抗力を発生させるために面の向きを相対流れの向きに直交させた場合、面の断面形状は凹または凸の形状と比較して平面形状の方が抗力係数が大きくなり、高い抗力が発生する[36]。従って、フィン機構の鰭先の形状を平面に近づけることにより、より高い抗力を発生させることが可能となる。

ここで、通電した BMF150 の微小要素に注目すると、それぞれの微小要素での発生力と収縮率は場所に関わらず全ての微小要素で同じである。従って、フィン機構内の BMF150 に通電した場合、固定されてない鰭端部においてフィンに発生する曲げモーメントは一樣であると仮定することができ、通電時のフィンは単純曲げ (simple bending) に近い状態であると考えられる[37]。このため、通電時のフィン機構の微小要素における曲げ平面は Fig. 2.4.3 のようになる。Fig. 2.4.3(b)において、 dl は人工筋肉の微小長さ、 a はフィンにおけるポリ塩化ビニルシートの厚さの半分 (0.1mm)、 $d\theta$ は微小角度、 ρ は曲率半径とする。

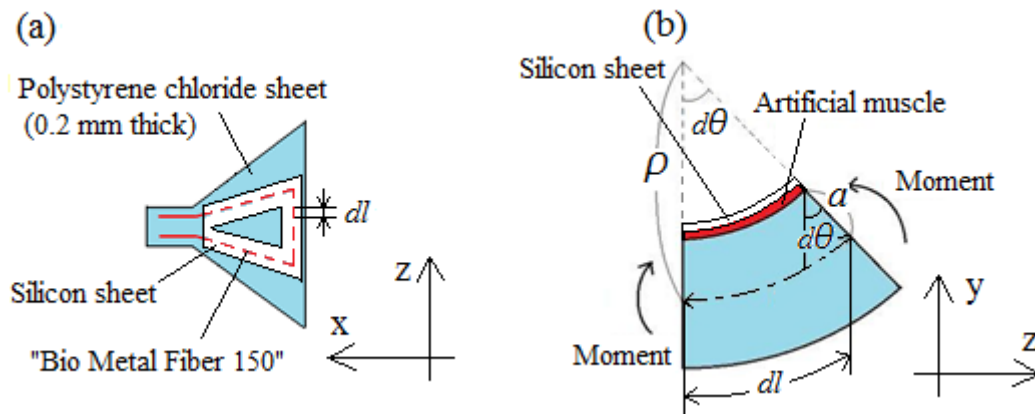


Fig. 2.4.3 (a) Arrangement of artificial muscle on fins and (b) conceptual diagram of deformation in the dl -cross section of fins

Fig. 2.4.3(b)において、変形前に互いに平行であった微小要素 dl における左右端の断面は変形後には図のように傾斜し、ポリ塩化ビニルシートの凹側の面は縮み、同材の凸側の面は伸びる。それらの中に伸縮しない線素があり、この伸縮しない線素を含む x - z 面に平行な面を中立面という。単純曲げにおける中立面の曲率半径が上記の ρ となり、この状態において、

$$\varepsilon = a \frac{d\theta}{dl} = \frac{a d\theta}{\rho d\theta} = \frac{a}{\rho} \quad (2.4.1)$$

$$\rho = \frac{a}{\varepsilon} = \frac{aL}{\Delta L} \quad (2.4.2)$$

となる。ここで、 L は収縮前の人工筋肉の長さ、 ΔL は人工筋肉の長さの変化量、 ε は人工筋肉の歪みを表す。 ΔL 及び ε はフィンの曲げ剛性によっても変化するが、BMF150 は単位体積当たりの発生力が非常に高く、今回製作するフィンの厚さは約 0.2mm と薄いため、フィンの曲げ剛性は BMF150 の収縮量にほとんど影響を与えないと仮定する。

フィンは人工筋肉の片側のみには接しており比較的容易に曲げることができるため、人工筋肉の収縮量に影響しないが、人工筋肉をフィンに固定する弾性接着剤は人工筋肉の全面をコーティングするため、少なからず人工筋肉の収縮量に影響を与えると予測できる。Table 2.3.2 に BMF150 の収縮時の歪みを示しているが、この値には弾性接着剤の影響が含まれていない。そこで、弾性接着剤によるコーティングの影響を実験によって確認する。Fig. 2.4.4 に実験の概念図を示す。

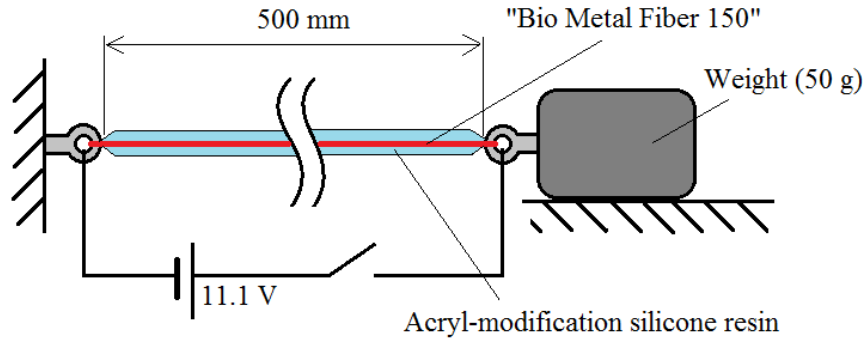


Fig. 2.4.4 Experiment for measuring the contraction of the artificial muscle

実験において、コーティングに使用した弾性接着剤の体積（人工筋肉の単位長さ当たりの接着剤の体積）はできるだけフィン機構に使用する量と同じ値にした。人工筋肉の片端につないであるオモリは人工筋肉を弛ませないためのものであり、重すぎると人工筋肉の収縮量が小さくなるため、測定する収縮量に影響を与えないように配慮し、50gのオモリを使用している。また、魚類型ロボットに搭載する予定のバッテリーを使用して11.1Vの電圧を人工筋肉に印加する。実験結果より、 ΔL は人工筋肉の全長の0.24%となり、 ε の値が0.0024と求められた。

式(2.4.1)と式(2.4.2)にファインの厚さと得られた ε の値を代入することで、フィン機構の微小要素における曲率半径 ρ の値を導出することができる。このことより、Fig. 2.4.5に示すフィン機構の鰭先の形状を、式(2.4.3)、式(2.4.4)用いて推定する。

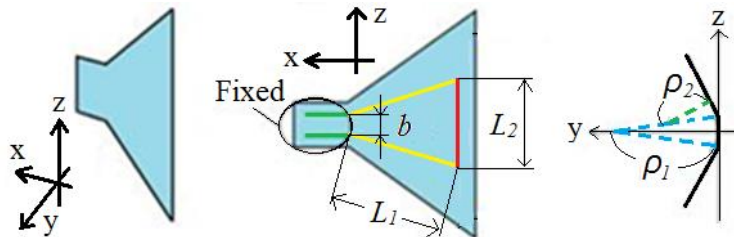


Fig. 2.4.5 Estimation of the deformation of fin

$$\rho_1 = \frac{aL_2}{\Delta L_2} \quad (2.4.3)$$

$$\rho_2 = \frac{2aL_{1z}}{2\Delta L_{1z} + \Delta L_2 - \Delta b} \quad (2.4.4)$$

L_1 と L_2 は Fig. 2.4.5 に示すそれぞれの箇所的人工筋肉の長さ、 b は機体に固定されている箇所において平行に配置されている人工筋肉の間隔、 L_{1z} は L_1 の z 方向への投影長さ、 ΔL_{1z} 、 ΔL_2 、 Δb はそれぞれの長さに対する人工筋肉の収縮量、 ρ_1 と ρ_2 はそれぞれ、 L_2 のみもしくは L_1 と L_2 の両方の収縮によって発生する鰭先部分の曲率半径を表す。鰭先の変形だけでなく Fig. 2.2.6 に示すような胸鰭の様々な運動についても同様に推定することができる。また、フィン機構の xy 平面の曲率の計算方法もこの計算方法と同じ原理で行うことができるが、本研究では全て的人工筋肉の配置パターンにおいて xy 平面の曲率は同じになるため、計算及び検討は省略している。

この方法を用いて、Fig. 2.4.2 で示した3種類的人工筋肉の配置を持つそれぞれのフィンの通電時の鰭先の zy 平面の形状推定結果を Fig. 2.4.6 に示す。

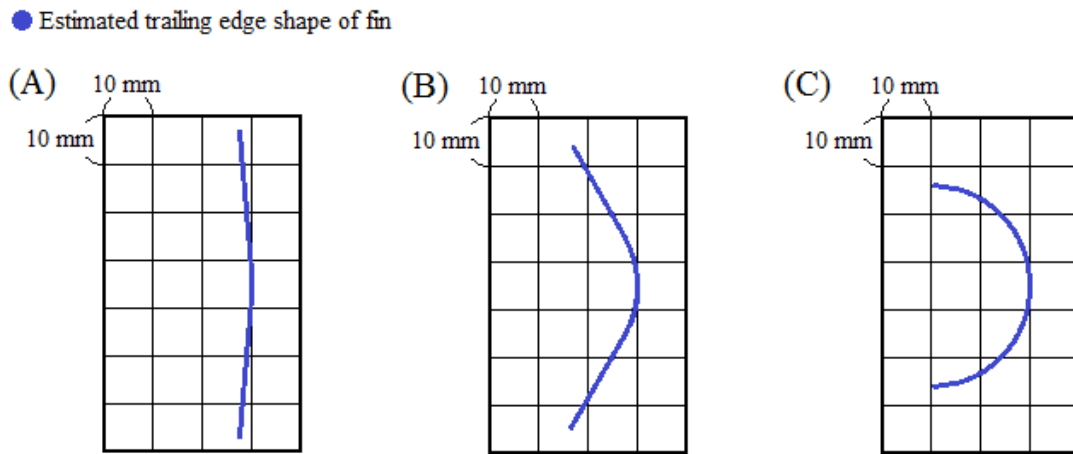


Fig. 2.4.6 Estimated trailing edge shapes of fins deformed in air

次に、本推定方法の有効性を検討するため、通電時のフィン機構の鰭先の形状をカメラで撮影する実験を実施した。実験の模式図を Fig. 2.4.7 に示す。

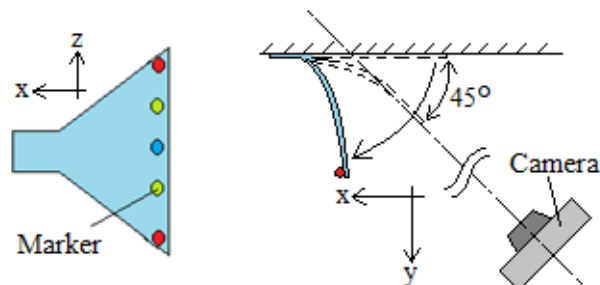


Fig. 2.4.7 Experiment of the deformation of fin in air

実験では、フィン機構が駆動している様子を約 45° 後方よりカメラで撮影し、鰭先の形状を観測した。また、フィン機構内の人工筋肉への通電時間は 0.1sec とし、カメラの動画撮影設定をハイスピードモードにして、フィン機構の瞬間的な動作をスローモーションで撮影した。ここで、フィン機構の鰭先には直径 3mm の球体形状のマーカを 5 カ所に設置している。観測されたフィン機構の鰭先の形状を推定結果と合わせて Fig. 2.4.8 に示す。

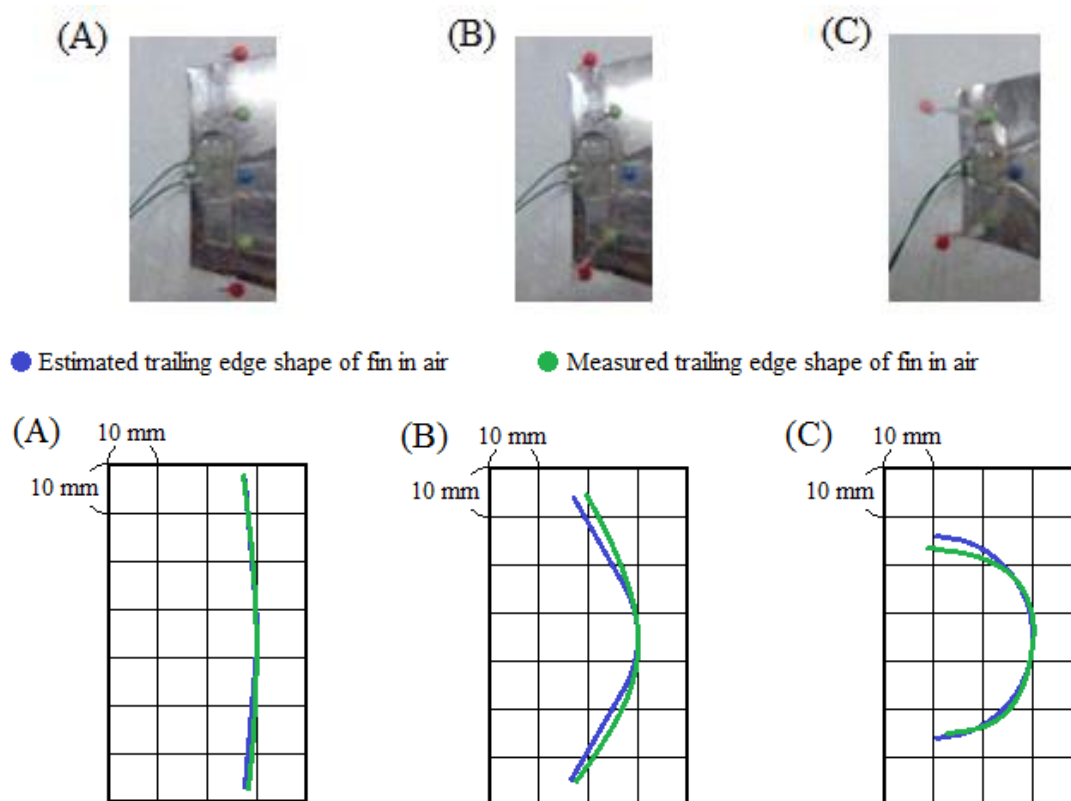


Fig. 2.4.8 Estimated and measured trailing edge of fin in air

それぞれの人工筋肉の配置において、観測値と推定値は概ね一致しており、本推定法の有効性が確認された。

フィン機構は弾性体であり、水中では流体力を受けて変形するため、次に、同様の実験を水中で実施し、鰭先の形状を確認した。観測結果と推定結果を比較して Fig. 2.4.9 に示す。

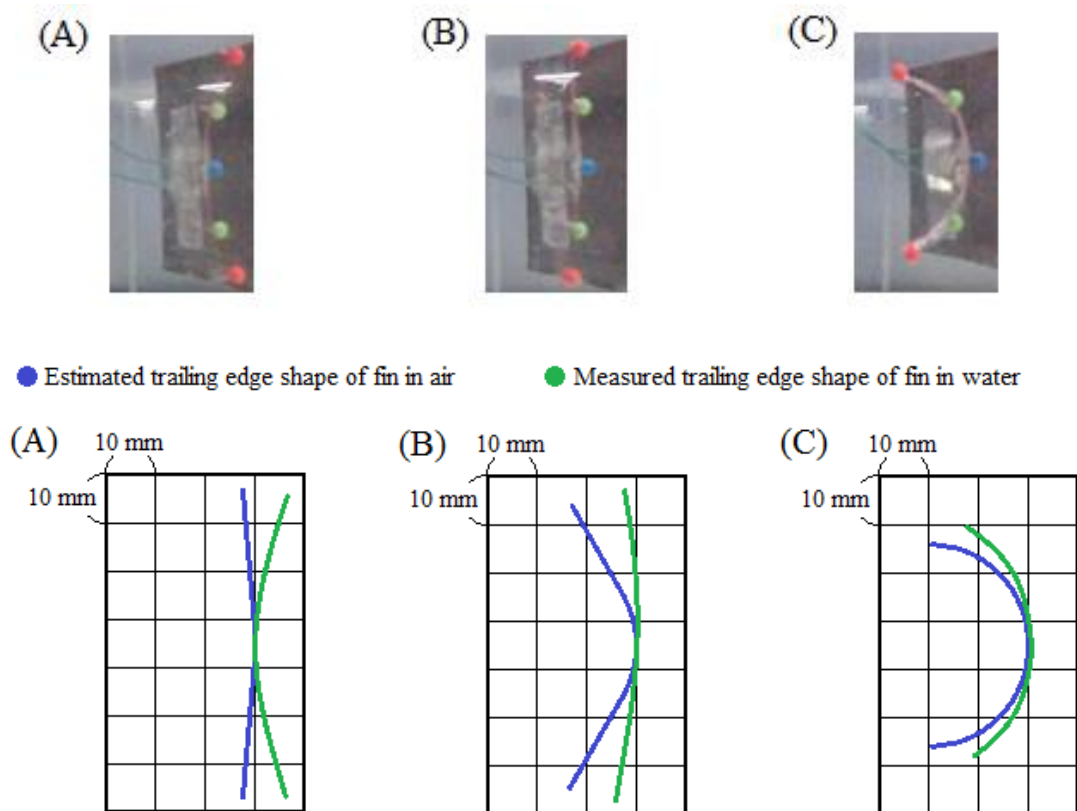


Fig. 2.4.9 Estimated trailing edge of fin in air and measured that in water

実験では、流体力の影響によって鰭先の形状が相対流れの下流方向にたわんでいることが確認できた。人工筋肉の配置の異なる(A)、(B)、(C)の各フィンにおいて、水中での形状が最も平面に近いのは(B)のフィンであるため、製作する機体には(B)のフィンを採用する。

次に、(A)、(B)、(C)の各フィンを静水中で駆動させたときにフィンに発生する流体力を、実験において計測した。本実験の概念図を Fig. 2.4.10 に示す。

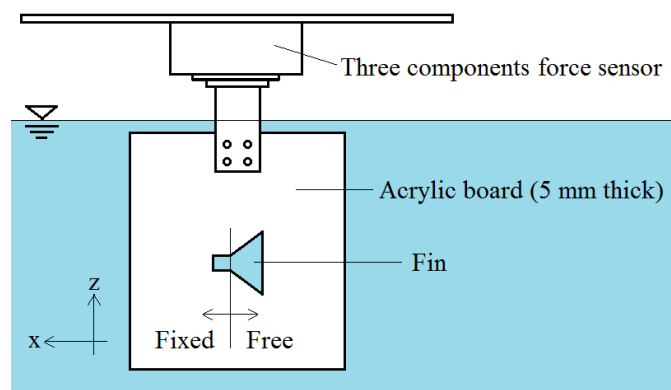


Fig. 2.4.10 Measurement method of hydrodynamic force acting on a fin

図中、 x 、 y 、 z 方向の正の向きはそれぞれフィンの前方、奥行き方向の奥側、鉛直上向を表す。フィン機構を張り付ける基盤として厚さ 5mm のアクリル板を使用し、人工筋肉への通電時間は 0.1sec とする。印加電圧は 11.1V とし、(A)、(B)、(C) に設置された人工筋肉の長さはそれぞれ 11cm、12cm、14cm である。このため、通電時の電流の値はそれぞれ 1.65A、1.51A、1.30A となり、フィン機構駆動時の消費電力はそれぞれ 18.3W、16.8W、14.4W であった。(A)(B)(C) それぞれのフィン機構について計測された力の x 、 y 方向成分の時刻歴を Fig. 2.4.11 に示す。

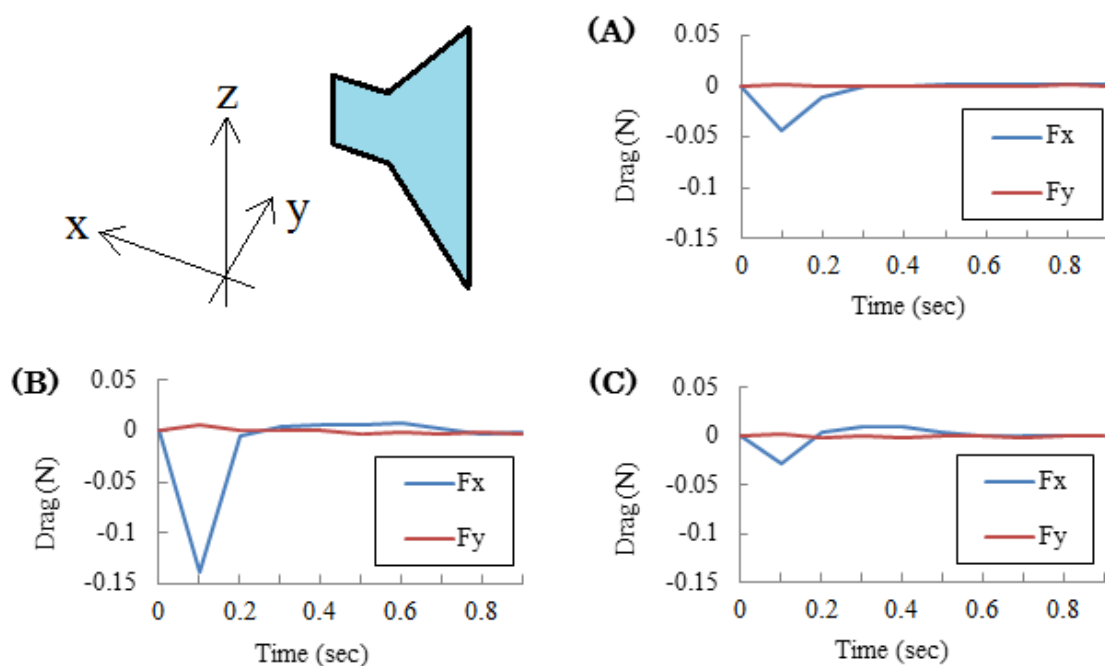


Fig. 2.4.11 Drag acting on fins

実験結果より、最も高い抗力を発生させているフィンは(B)であることが確認できる。従って、機体の製作において胸鰭及び尾鰭として使用するフィン機構には(B)の人工筋肉の配置を採用する。

いずれのフィンの場合でも、 F_y に比べて F_x の方が大きくなる傾向にあった。Fig. 2.3.3 で示したフィン機構を併用した急旋回動作において、機体の重心位置とフィン機構により発生する抗力の作用点および向きを考えると、胸鰭では F_x 成分が、尾鰭では F_y 成分が大きいほうが機体重心周りに大きいモーメントを発生させるのに都合がよい。従って、ここで示したフィン機構は尾鰭よりも胸鰭としての使用に適していると考えられる。

2.4.3 フィン形状の検討

前節ではフィン機構内の人工筋肉の配置形状について検討したが、ここではフィン機構そのものの形状について考察する。

製作するフィンは抗力を発生させることを目的としており、流体中の物体に働く抗力 D は、

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho_w S V^2 \quad (2.4.5)$$

C_D : 物体の抗力係数

ρ_w : 真水の密度

S : 物体の投影面積

V : 流体の相対速度

で表すことができる。抗力係数 C_D については前節の鰭先の形状についての検討で、平面形状に近いものが適することを示した。ここでは、フィン機構における投影面積 S と流体の相対速度 V について考察する。

フィン機構はフィンの固定部分を基準にして、固定されていない部分が回転するように変形する。このため、フィン機構の周りの流体との相対速度は、フィンの付け根側に近づくほど遅く、フィンの鰭先に近づくほど速い。よって、フィンの鰭先付近の投影面積を増やし、付け根付近の面積を減らすことで、面積の総和を変えないままで発生する抗力を増加させることができると考えられる。この時に面積の総和を変えない理由は、総和を大きくするとフィン機構の屈曲が小さくなるためである。また、これによりフィン機構駆動時におけるフィンの抗力中心と機体の重心の間の距離が増大するため、機体に働くモーメントをさらに増加させることが可能となる。

このような方針に基づき、新たに考案した改良型のフィン機構の形状を Fig. 2.4.12 に示す。

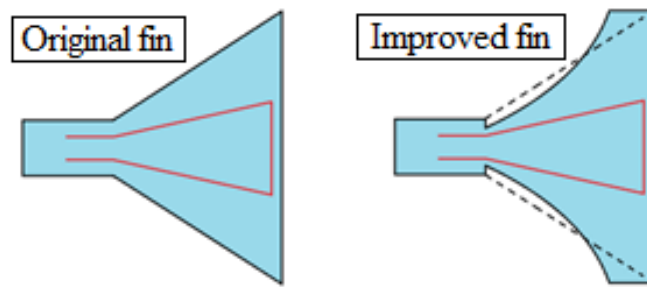


Fig. 2.4.12 Original and improved fin shapes

新しいフィン形状では、原形のフィンにおける付け根部分の面積が鰭先部分に移行されていることがわかる。この改良型のフィン機構を用いて原形と同様な水中での作動状態における抗力計測実験を実施した。抗力の計測結果を Fig. 2.4.13 に示す。

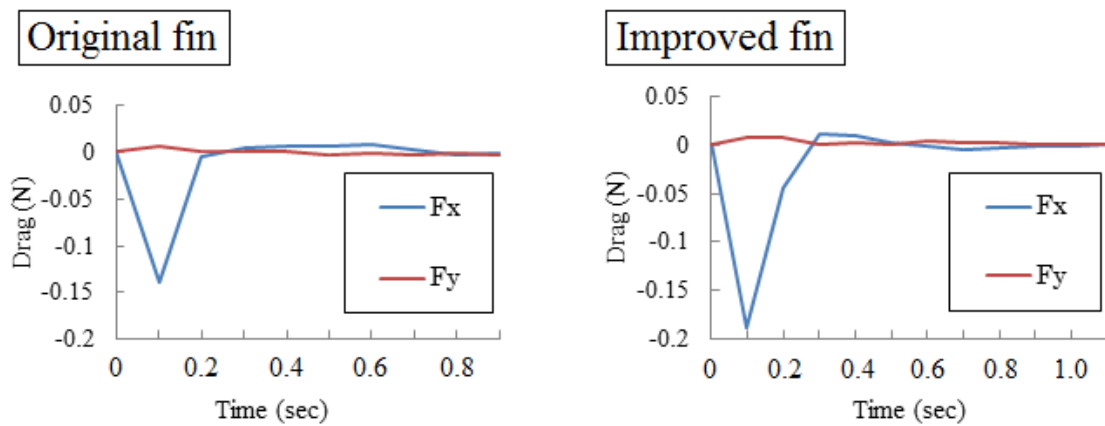


Fig. 2.4.13 Drag acting on original and improved fins

実験結果より、改良型のフィン機構では原形のフィン機構よりも高い抗力を得られることが確認できた。従って、製作する魚類型ロボットに搭載するフィン機構には改良型の形状を採用する。

2.5 人工筋肉とサーボモータを併用する機体製作

本節では、前述のサーボモータを用いた機体胴体部の泳動機構と人工筋肉を用いたフィン機構を併用した魚類型ロボットの製作の詳細について述べる。

機体は全長 230mm、重量 300g であり、機体の運動制御用マイコンには ARM 社製のプロトタイピング用ワンボードマイコンである mbed NXP LPC1768 を、無線通信機には Digi 社製のワイヤレスモジュールである XBee S1 を使用した。また、電源のバッテリーには、質量当たりの出力が比較的高いリチウムポリマ二次電池である HYPERION 社製の CX G³ LiPo Power Pack を採用した。このバッテリーは 3セルタイプであり、出力電圧は 11.1V である。機体の外殻には厚さ 2mm の塩化ビニル板を加工したものを使用しているが、本機体は大深度での使用を想定していないため強度に関しては問題ない。使用したマイコン、無線通信機、バッテリーの外観を Fig. 2.5.1 に、マイコン「mbed NXP LPC1768」のピン配置[38]を Fig. 2.5.2 に示す。

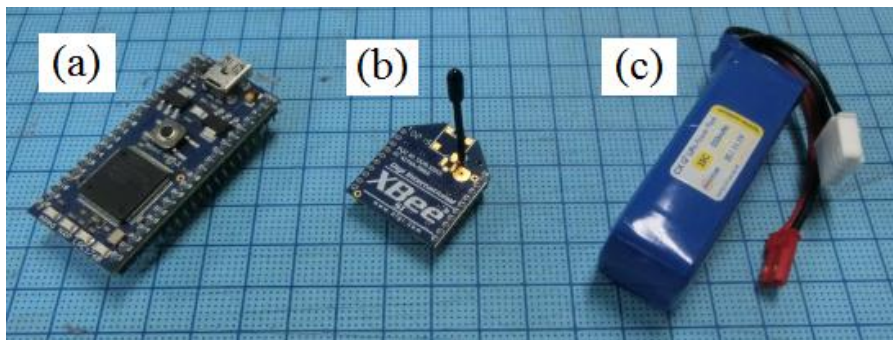


Fig. 2.5.1 Photos of (a) mbed NXP LPC1768, (b) XBee S1 and (c) CX G³ LiPo Power Pack

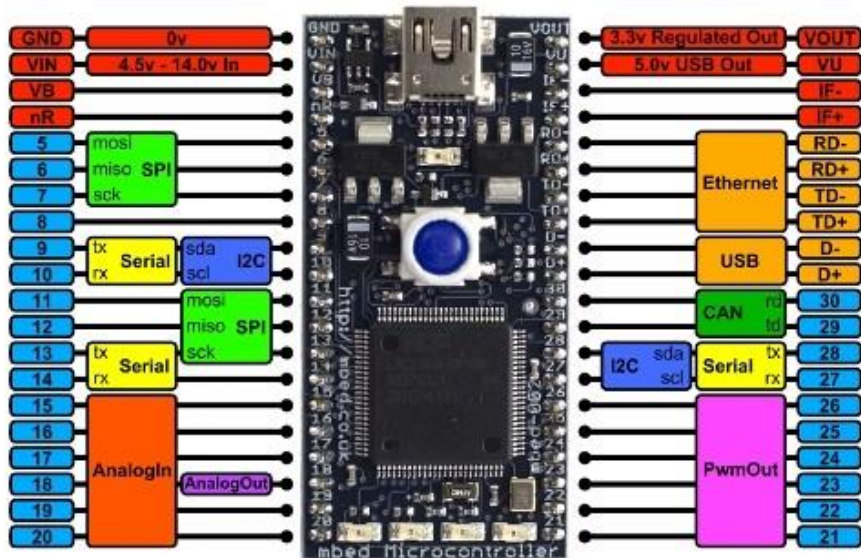


Fig. 2.5.2 Pin arrangement of mbed NXP LPC1768

使用するバッテリーの出力電圧はマイコンの駆動電圧範囲内に収まっており直接接続することが出来る。また使用するマイコンにはシリアル通信、アナログ電圧データの読み取り、PWM 操作の機能があり、無線機を用いた遠隔操作やセンサー類からのデータ読み取り、サーボモータの操作が単体で可能である。Fig. 2.5.2 には表示されていないが、5~30 までのピンはデジタル出力も可能であるため、このデジタル出力と電界効果トランジスタを用いて、フィン機構内の人工筋肉への通電及び遮断の切り替えを操作する。また、このマイコンには 3.3V 出力のピンがあるため、無線通信機への電源供給の配線にはレギュレータなどの電圧調整用の電子部品介さずに駆動電圧が 3.3V の無線通信機を接続することができる。製作した機体用の駆動回路を Fig. 2.5.3 に示す。

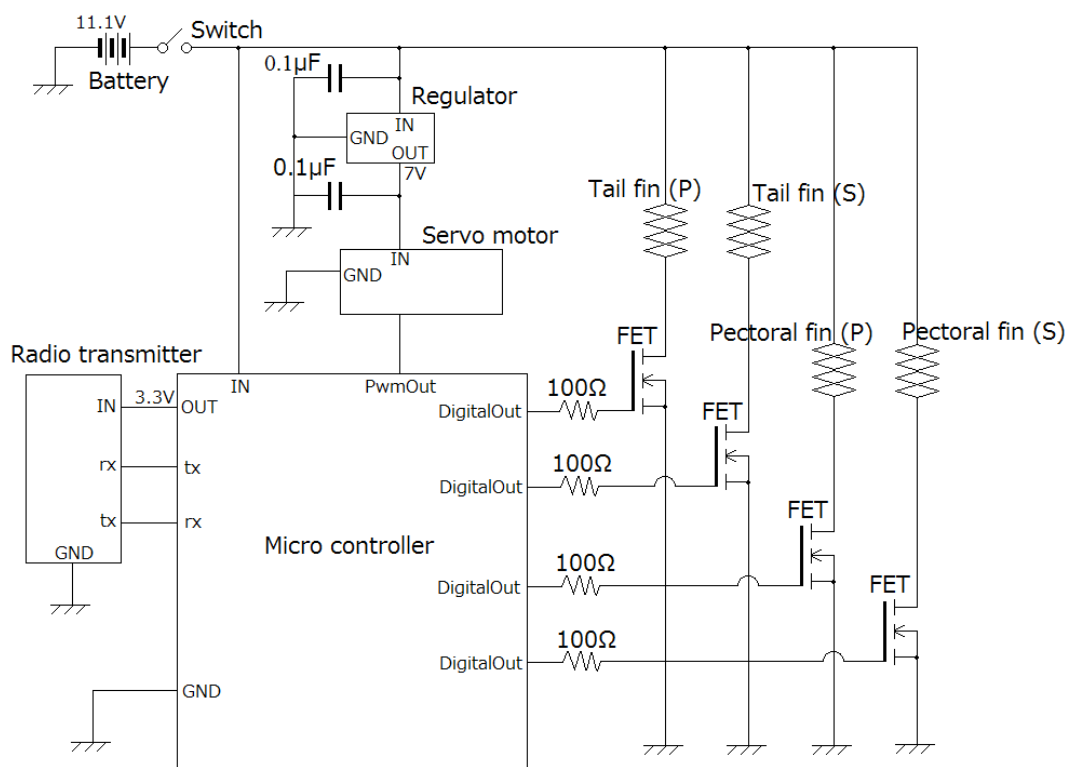


Fig. 2.5.3 Circuit diagram of the fish-type robot

ここで、胴体駆動用のサーボモータへの供給電圧は 6.0~7.4V であるため、電圧調整用のレギュレータには 7V 出力のものを使用している。また、図中のフィン機構における(P)と(S)はそれぞれ Port side と Starboard side を意味している。プログラムの書き込みには mbed 付属の USB ケーブルを使用し、ブラウザ上で作動する mbed 専用のオンライン開発環境で制作したプログラムをマイコンへ送信する。また、開発のプログラム言語には C++を用いている。運動制御プログラムのフローチャートを Fig. 2.5.4 に示す。

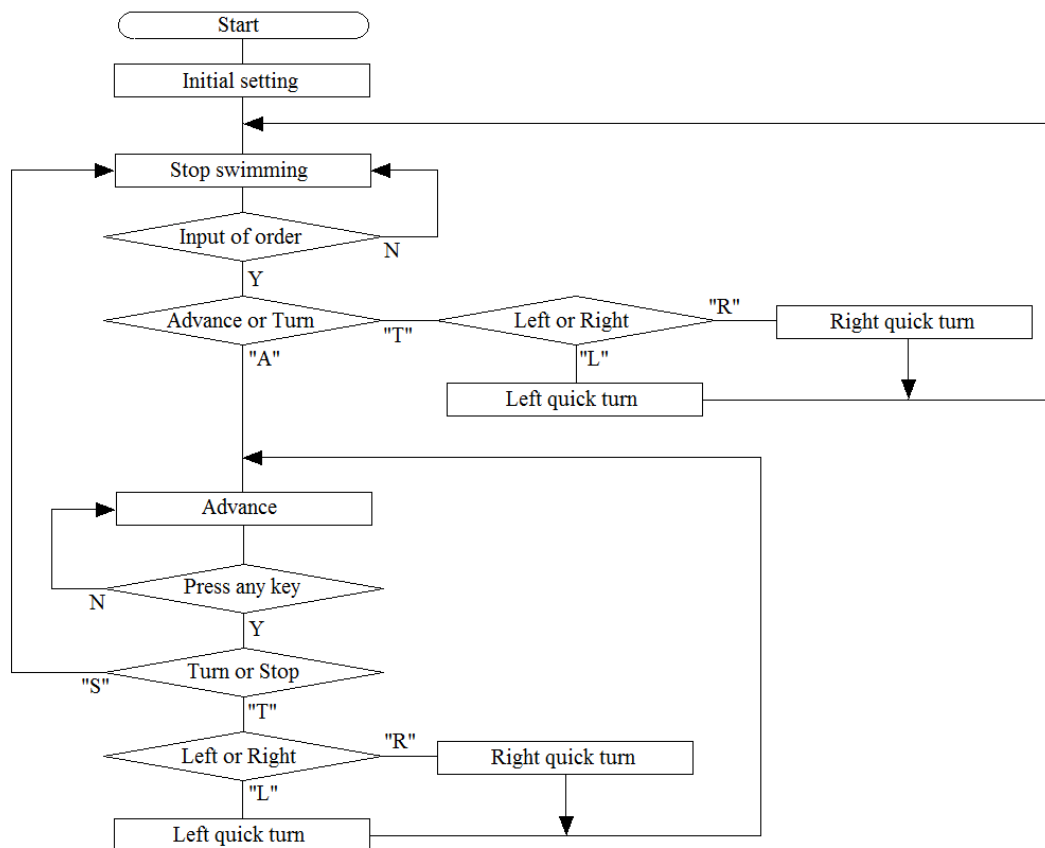


Fig. 2.5.4 Flowchart of control program

機体の運動制御用プログラムは大きく分けて初期設定、前進動作、急旋回動作、急停止動作の4つに分かれており、急旋回動作には左急旋回と右急旋回がある。機体への指令は陸上のパソコンから入力可能であり、パソコンに接続された無線通信機の親機を通して、機体に搭載してある子機に送信される。初期設定では、サーボモータの往復運動の振幅原点の設定とフィン機構の併用の有無の設定を行う。上記のフローチャートにおいて、“Y”、“N”、“A”、“T”、“S”、“L”、“R”のコマンドはそれぞれ、陸上のパソコンに接続されたキーボードから対応するアルファベットを入力することで送信される。製作された魚類型ロボットの外観を Fig. 2.5.5 に示す。



Fig. 2.5.5 Fish-type robot using artificial muscles and servo motor

2.6 魚類型ロボットの運動性能の評価

ここでは、製作した魚類型ロボットの前進、急旋回、急停止の性能を確認するための水槽実験を実施し、サーボモータと併用されるフィン機構の有用性を評価する。

2.6.1 実験設備の概要

製作した魚類型ロボットを用いた泳動実験を、九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部内の海洋環境シミュレーション実験室に設置されている、幅 2m、長さ 3m、水深 0.6m の水槽で実施した。

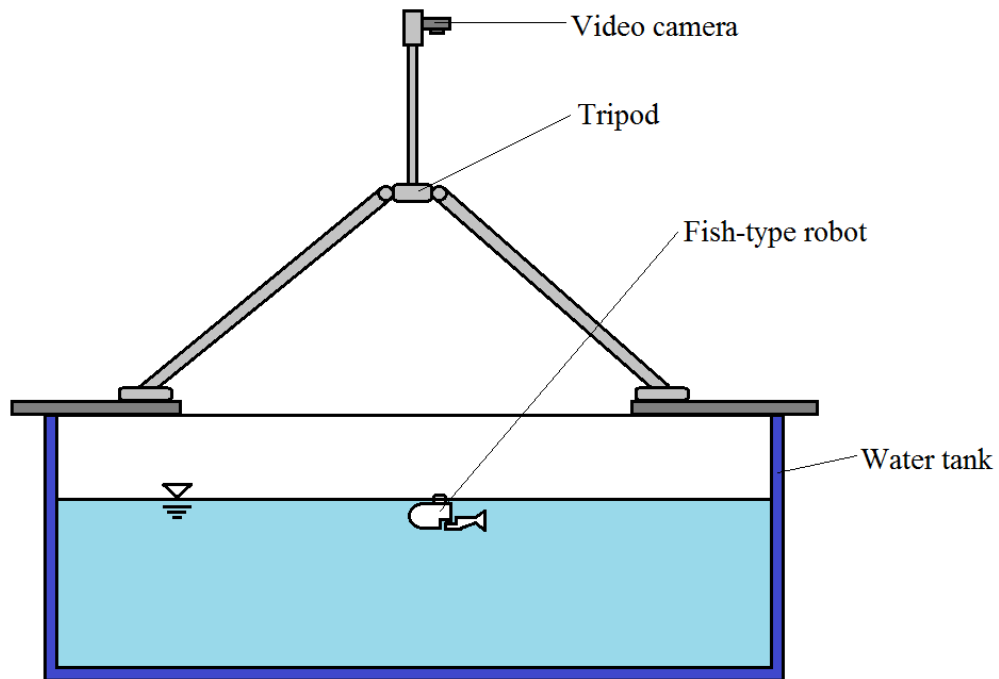


Fig. 2.6.1 Arrangement of the experiment

泳動時の機体位置、前進速度、旋回角速度は、Fig. 2.6.1 に示すように水面から約 2.2m の高さからデジタルビデオカメラにより機体運動を撮影し、その動画解析により求めた。フリーソフトウェアを用いた動画解析の様子を Fig. 2.6.2 及び Fig. 2.6.3 に示す。



Fig. 2.6.2 Measurement of the position of swimming robot

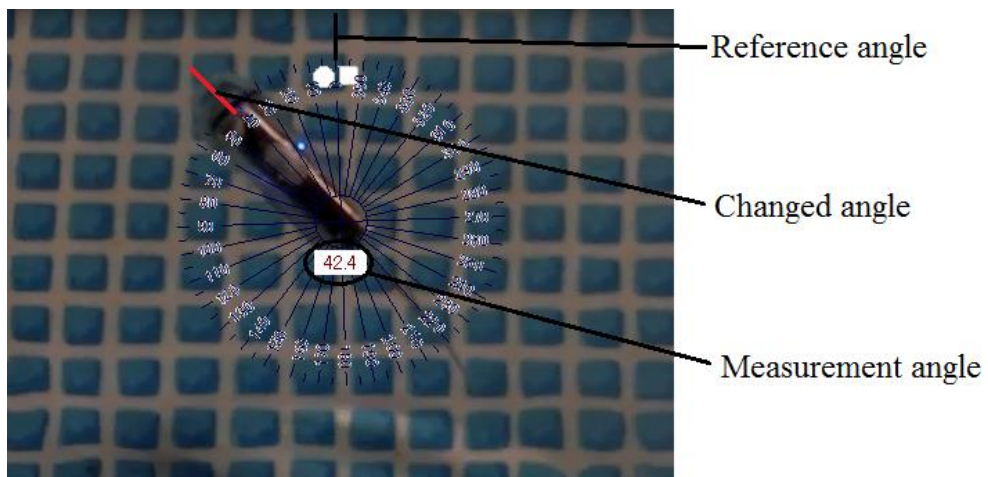


Fig. 2.6.3 Measurement of heading angle of swimming robot

2.6.2 直進泳動実験結果

直進泳動の性能を確認するため、泳動周期を 0.4sec、0.5sec、0.6sec の 3 通りに変化させて泳動実験を実施した。泳動周期の最小値は、胴体駆動用サーボモータの仕様より決定された。泳動実験に用いた胴体駆動用サーボモータの角度指令値を Fig. 2.6.4 に示す。

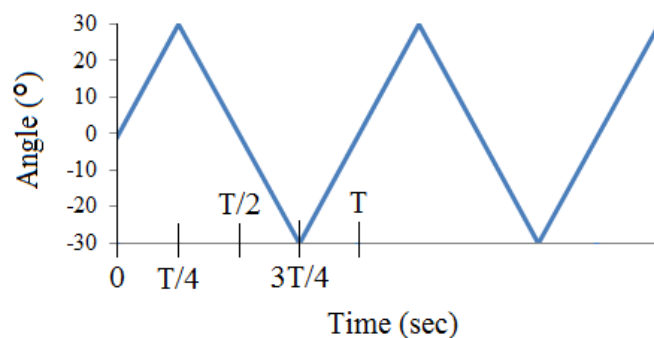


Fig. 2.6.4 Drive signal of the servo motor during straight swimming

図中の T は機体の泳動周期を表す。上記の 3 通りの泳動周期で機体の最高前進速度を比較したところ、最も速い前進速度を記録したのは泳動周期が 0.4sec のときであり、約 0.2m/sec であった。この際の発進から最高前進速度（終端速度）に達するまでの時間は約 2sec であった。

Table 2.6.1 Maximum forward speeds of swimming robot

Drive period (sec)	Maximum forward speed (m/sec)
0.40	0.20
0.50	0.18
0.60	0.15

2.6.3 急旋回泳動実験結果

Fig. 2.5.3 の回路図に示したように、急旋回動作と急停止動作において、2 か所以上のフィン機構を同時に駆動させると電流が分流してしまい、十分なフィンの変形量が得られない。このため、複数のフィン機構を同時に動作させる際にはそれぞれの駆動タイミングをずらして、複数の人工筋肉に同時に電流が流れないようにする。各鰭の駆動タイミングを考慮した左急旋回動作における胴体駆動用サーボモータとフィン機構駆動用人工筋肉に対する指令値の時刻歴をそれぞれ Fig. 2.6.5 と Fig. 2.6.6 に示す。

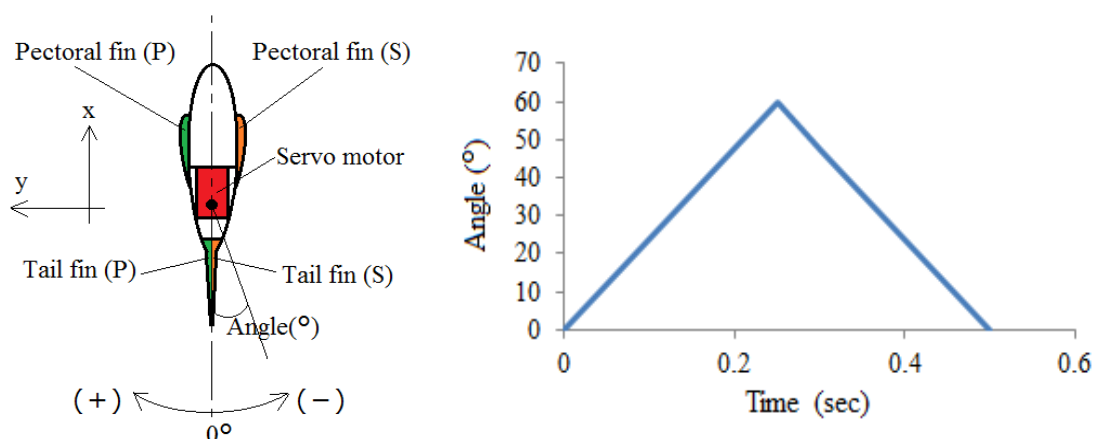


Fig. 2.6.5 Control signal of the servo motor during left quick turn motion

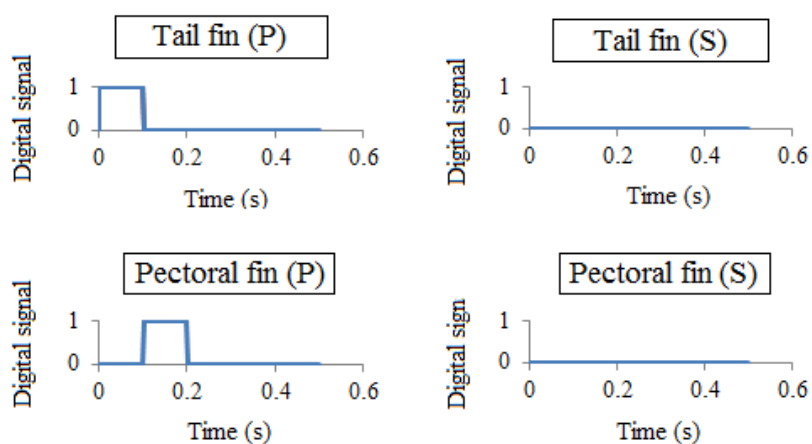


Fig. 2.6.6 Control signal of the fins during left quick turn motion

左急旋回動作において、サーボモータの腕は旋回開始直後に左側に約 60° 動かし、

続いて元の状態に戻す。また、複数の人工筋肉に同時に電流が流れないように、尾鰭と胸鰭のフィン機構の駆動タイミングをずらしている。Fig. 2.6.5 に示すように、急旋回動作時にサーボモータが腕の角度を元の中立状態に戻し始める時間は動作開始から 0.25sec 後である。このため、フィン機構周りの相対流速が高くなるタイミングでフィンを駆動させるためには、サーボモータの腕の角度が元の状態に戻り始めるまでに全てのフィン機構の動作を完了させている必要があるため、フィン機構の駆動は動作開始から 0.25sec 以内に収めている。このときの各フィン機構の駆動順序は、フィンが発生する機体周りのモーメントの大きさに影響を与えると考えられるが、この影響は小さいと予想できるので、ここではフィン機構の駆動順序は特に理由なく決定している。

実験では、動作開始から動作終了までにおける機体の回頭角と平均回頭角速度を調査した。フィン機構を使用した場合と使用しない場合での左右の急旋回実験の結果を、それぞれ Fig. 2.6.7、Fig. 2.6.8 に示す。ただし、それぞれの図における角度は絶対値を示している。

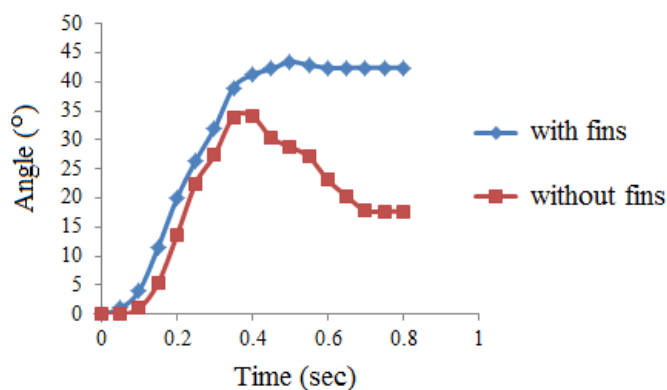


Fig. 2.6.7 Turning angle during left quick turn

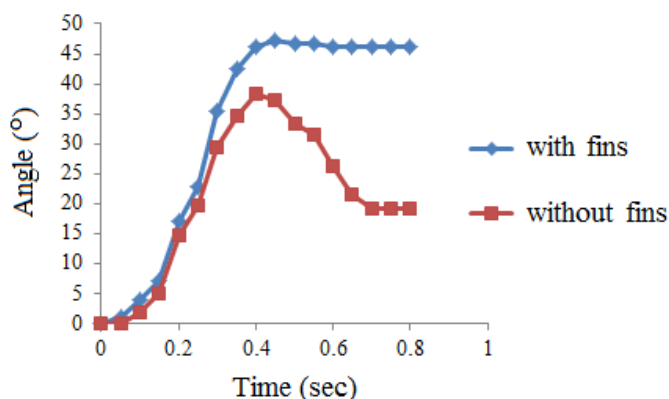


Fig. 2.6.8 Turning angle during right quick turn

Fig. 2.6.7 及び Fig. 2.6.8 において、急旋回動作の完了のタイミングを胴体及びフィン機構が旋回開始時の中立状態に戻った瞬間とすると、左右の急旋回共に、動作開始から急旋回動作完了までの時間は約 0.6sec であった。左急旋回において、動作完了時における機体の回頭角度の変化はフィン機構を併用する場合に 42.4° であり、フィン機構を使用しない場合は 17.7° であった。右急旋回における機体の回頭角度の変化は、フィン機構を併用する場合に 46.3° 、フィン機構を使用しない場合に 19.3° であった。急旋回動作における機体の平均回頭角速度は、フィン機構を使用しない場合は左が 29.5deg/sec 、右が 32.2deg/sec であり、フィン機構を併用する場合は左が 70.7deg/sec 、右が 77.2deg/sec であった。このように、急旋回動作においてフィン機構を併用すると使用しない場合に比べて、平均回頭角速度が約2.4倍増加することが確認できた。また、サーボモータの往復動作の前半ではフィンの使用の有無で回頭角度の変化は少ないが、動作の後半では回頭角速度がフィンの使用の有無に大きく影響されることがわかった。これは、フィン機構の動作はサーボモータの往復動作の前半に完了するため、フィン機構により機体周りに発生した渦が動作の後半において、機体の旋回性能に影響を与えているためであると考えられる。

2.6.4 急停止動作の実験結果

急停止動作における、胴体駆動用サーボモータとフィン機構駆動用の人工筋肉に対する指令値の時刻歴をそれぞれ Fig. 2.6.9 と Fig. 2.6.10 に示す。

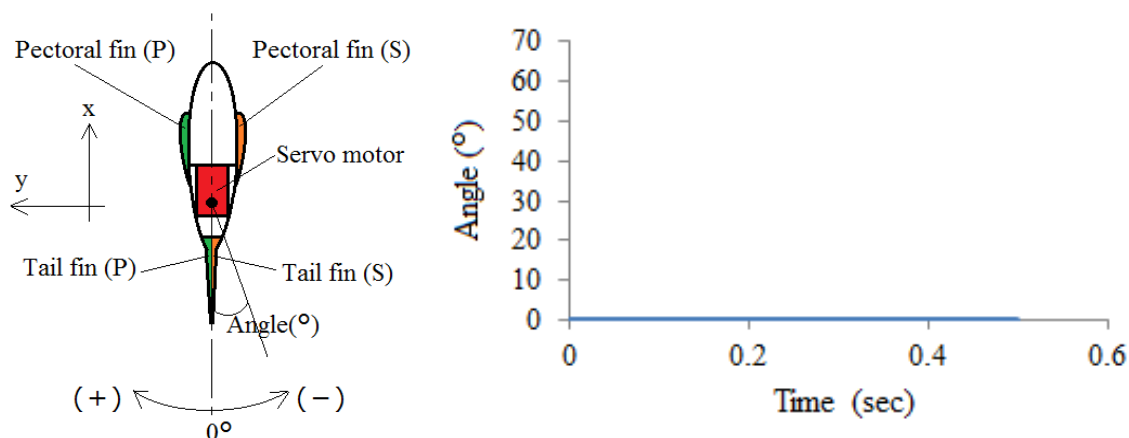


Fig. 2.6.9 Control signal of the servo motor during sudden stop motion

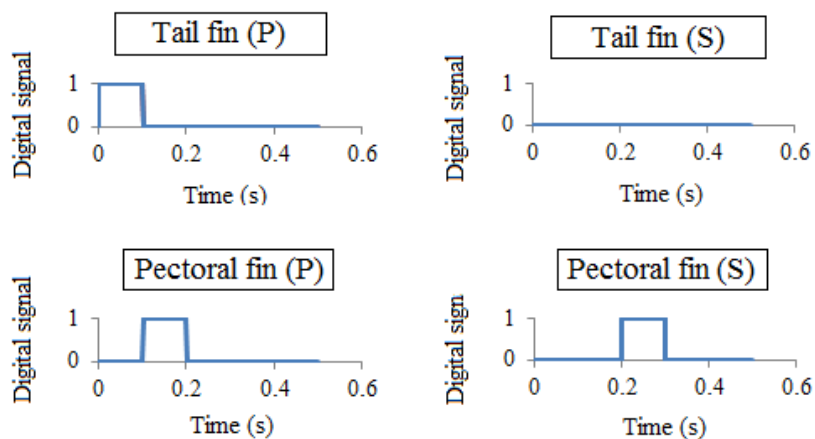


Fig. 2.6.10 Control signal of the fins during sudden stop motion

急停止動作において、サーボモータの腕は常に 0° を維持する。また、急旋回動作時と同様に、複数の人工筋肉に同時に電流が流れないようにそれぞれのフィン機構の駆動タイミングをずらしている。1回の急停止動作では機体が完全に停止するまで時間がかかると判断したため、実験ではこの急静止の動作を連続で3回行うプログラムにした。

フィン機構を使用した場合と使用しない場合での急停止実験の結果を Fig. 2.6.11 に

示す。実験では、動作開始から数秒間における機体の前進速度の時間変化と動作中の最小加速度（負の加速度）を調査した。

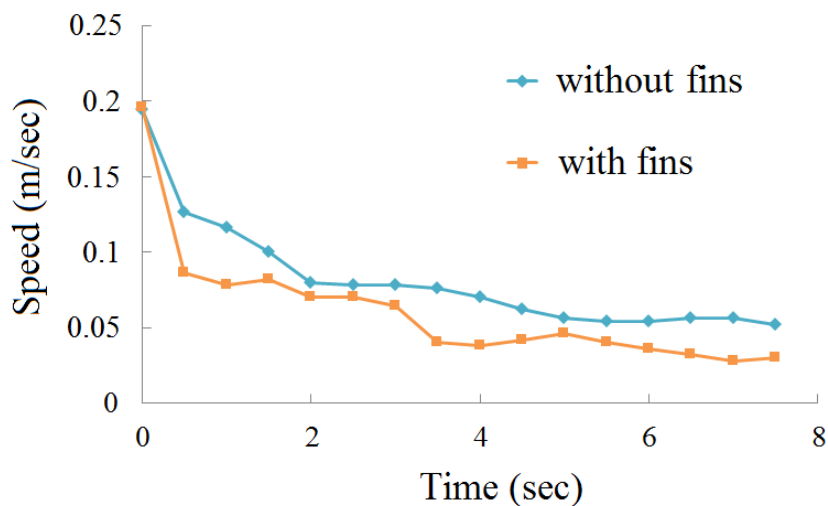


Fig. 2.6.11 Advance speed of the robot during sudden stop motion

実験結果では、フィン機構を使用しなかった場合の機体の最小加速度は -0.136m/sec^2 であり、フィン機構を使用した場合では -0.220 m/sec^2 であった。このように、フィン機構を併用した場合、使用しなかった場合に比べて約 1.6 倍の減速度を実現しており、フィン機構を用いることで急停止性能が向上することが確認できた。

2.7 泳動機構の改良による運動性能の向上

ここでは、前節で製作した魚類型ロボットの運動性能の更なる向上を目指し、機体に搭載する泳動機構の改良について検討する。

2.7.1 胴体駆動用サーボモータの変更と追加

機体の胴体部分に搭載するサーボモータを追加することで、サーボモータが1つの場合に比べて胴体部分の屈曲の最大角速度と駆動角の範囲が増加し、泳動性能の向上に繋がると考えられる。

サーボモータが1台の場合には、サーボモータのジョイントの片端がそのまま胴体後半部に繋がっている状態になるが、2台のサーボモータを使用する場合はジョイントの両端に1台ずつサーボモータが繋がっている状態になる。機体の体高を変えないためには、使用するサーボモータの高さを低くする必要があるため、駆動電圧、出力トルク、回転数が前節で使用した S3470SV にできるだけ近い、双葉電子工業製のカー用サーボモータ S9570SV を採用する。サーボモータの外観を Fig. 2.7.1 に、仕様[39]を Table 2.7.1 に示す。



Fig. 2.7.1 Servo motor “S9570SV”

Table 2.7.1 Specification of S9570SV

Speed	0.08sec/60° (7.4V)
	0.10sec/60° (6.0V)
Torque	8.0kgf·cm (7.4V)
	6.6kgf·cm (6.0V)
Size	40.0×20.0×25.4mm
Weight	43g
Supply voltage	4.8V~7.4V

このように、胴体駆動用のサーボモータを追加することにより、胴体部分の駆動角範囲が増加することで急旋回性能の向上が、胴体部分の最大角速度が増加することで前進及び急旋回性能の向上が期待できる。

2.7.2 人工筋肉により駆動する開閉型フィン機構の追加

Fig. 2.3.3 に示した急旋回動作において、胴体駆動用サーボモータの往復動作の前半に、機体後半部の横方向の抗力係数と投影面積を大きくすることができれば、機体の回頭モーメントをさらに増加することが出来る。これを実現するため、機体後半部の上下端に搭載する開閉型フィン機構を採用する。本フィン機構の構造を Fig. 2.7.2 に示す。

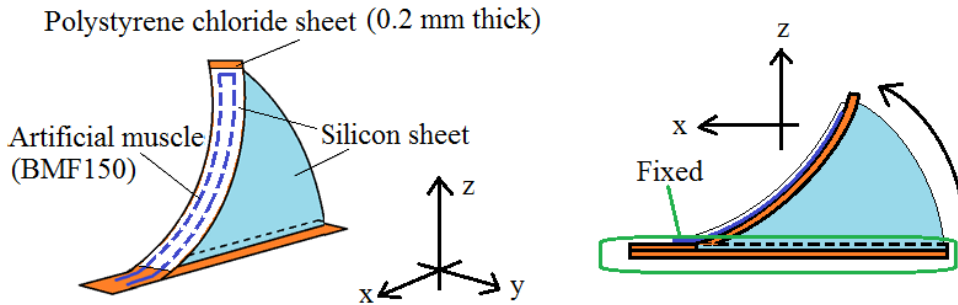


Fig. 2.7.2 Structure of the opening and shutting type fin

ここで提案する開閉型フィン機構では、細長く切った2枚のポリ塩化ビニルシートを重ね、上面には人工筋肉（BMF150）を弾性接着剤（アクリル変成シリコン樹脂）で張り付け、2枚の間にはシリコンシートをある程度撓ませた状態で図のように接着している。下面のポリ塩化ビニルシートは機体に接着剤で固定されており、人工筋肉に通電すると上面のポリ塩化ビニルシートのみが変形し、2枚の間のシリコンシートが展開した状態になる。開閉型フィン機構を搭載した機体の急旋回動作を Fig. 2.7.3 に示す。図中において、ON と表記されている状態ではフィン機構が屈曲または開かれている状態であり、OFF の場合は閉じている状態である。

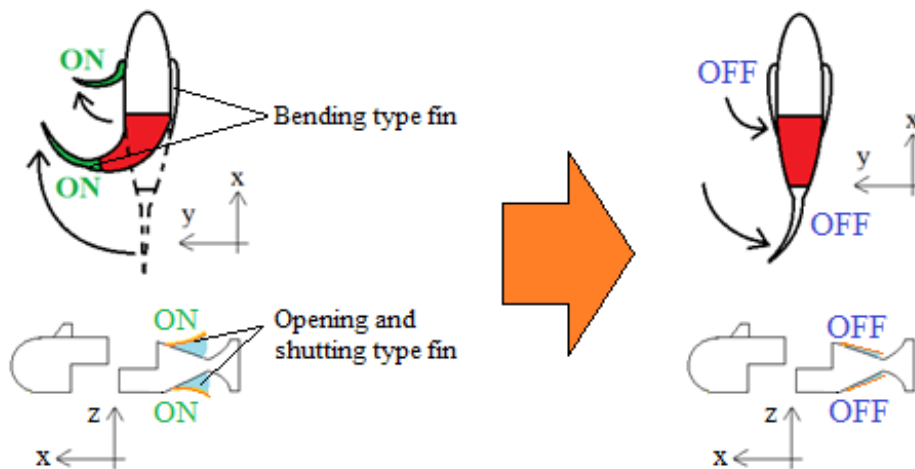


Fig. 2.7.3 Quick turn using the opening and shutting type fin

開閉型フィン機構はサーボモータ往復動作の前半で、機体後半部の横方向流れにおける抗力係数と投影面積が増大するように作動させる。これによって、機体の回頭モーメントが増加するため、急旋回動作完了時の機体の回頭角度が増大する。開閉型フィン機構の開閉の様子を Fig. 2.7.4 に示す。

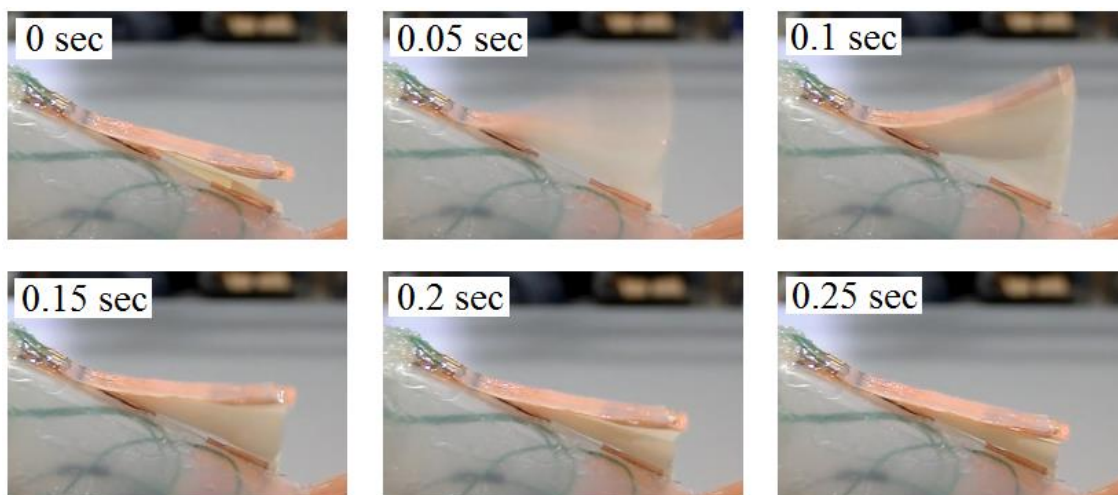


Fig. 2.7.4 Sequence of photos of opening and shutting type fin

開閉型フィン機構で使用している人工筋肉の長さは、機構の構造上の都合により、前節で製作した屈曲型フィン機構の人工筋肉よりも短い。このため、通電時間を屈曲型フィン機構と同じにすると過度な発熱により機構が損傷する可能性が高い。ここでは、人工筋肉への通電時間は 0.05sec とした。

2.7.3 泳動機構を改良した機体の製作

以上の検討に基づき、Fig. 2.5.1 に示した魚類型ロボットに、胴体駆動用のサーボモータを1台と開閉型フィン機構を2箇所を追加した機体を製作する。改良型機体の内部配置を Fig. 2.7.5 に示す。

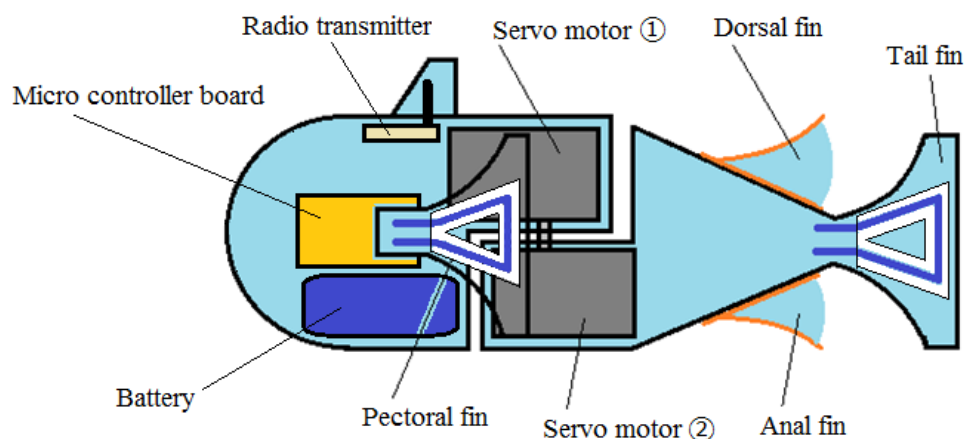


Fig. 2.7.5 Arrangement of the improved fish-type robot

機体に搭載する運動制御用マイコン、無線通信機、バッテリーは、改良前と同じものを使用する。機体の2箇所を搭載する開閉型フィン機構のうち、胴体後半部の上部に搭載するものを背鰭 (Dorsal fin)、下部に搭載するものを尻鰭 (Anal fin) と呼ぶこととする。駆動回路図と運動制御プログラムのフローチャートは、改良前の機体のものに尾鰭と尻鰭を追加しただけなので、ここでは省略する。製作した機体の写真を Fig. 2.7.6 に示す。機体の全長は 258mm、空中重量は 394g である。

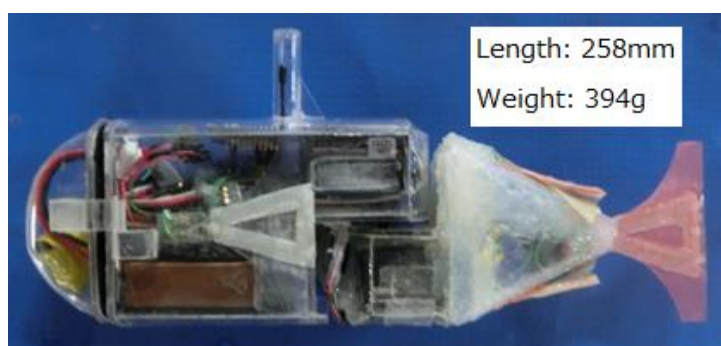


Fig. 2.7.6 Improved fish-type robot using artificial muscles and servo motors

2.8 魚類型ロボットの推進性能の推定

魚類の推進力に関する理論としては、振動翼理論や細長体理論等が挙げられる。振動翼理論では魚類の尾鰭を1枚の振動翼と考えて、その振動翼に発生する揚力を求める[40]。一方、細長体理論では魚体の各断面を微小要素と考え、その各要素において発生する要素当たりの揚力と付加質量の変化に伴う要素当たりの慣性力を魚体全体にわたって積分することにより推進力を求める[41]。本章で製作した魚類型ロボットの泳動方式は Fig. 2.2.4 における Subcarangiform mode を模倣しているため、魚体全体を動かして推進力を得る泳動方式であるため細長体理論に基づいた推進力の推定を試みる。以下に、細長体理論の詳細について述べる。

2.8.1 細長体理論

ここで述べる細長体理論は、細長体生物の推進力を求めるための理論であるが、対象を細長体として扱うための条件は、

$$\varepsilon_{LB} = \frac{B}{L_{OA}} \ll 1 \quad (2.8.1)$$

となる。ここで、

ε_{LB}	: 細長比
B	: 体幅 (最大値)
L_{OA}	: 魚体全長

である。前節で製作した機体の全長は 258mm、体幅の極大値は 34mm であるので細長比は約 0.13 となり、この値は式(2.8.1)の条件を満たしていると考えられる。

細長体理論を考えるにあたって使用する座標系を Fig. 2.8.1 に示す。この図において、x、y、z 方向はそれぞれ魚体の長さ方向、高さ方向、幅方向を示す。

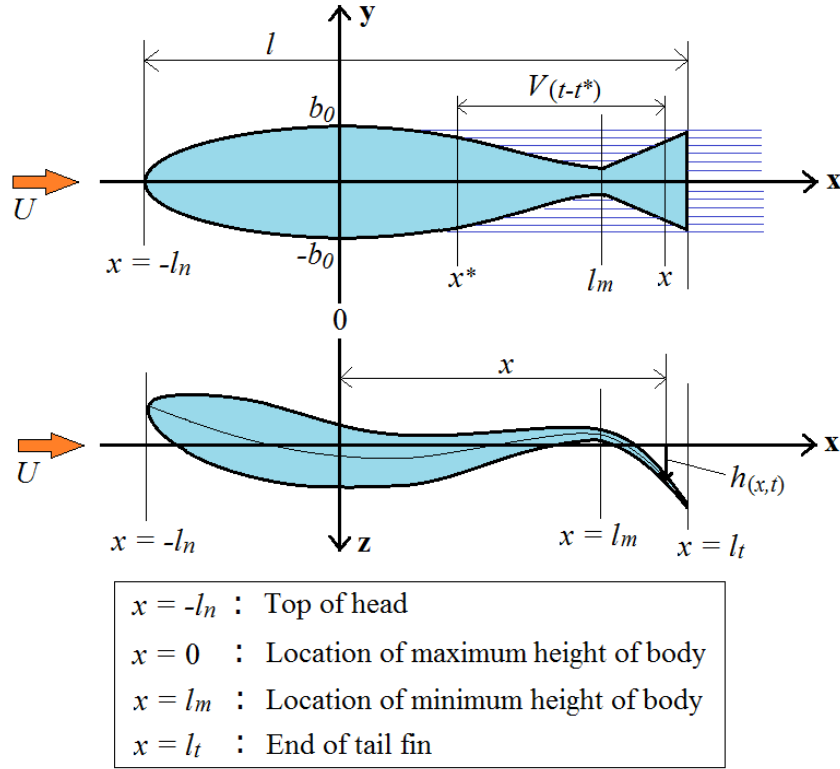


Fig. 2.8.1 Coordinate system for fish type slender body

本座標系において、魚体が体高方向に上下対称であると仮定して体高が最大となる位置を原点としている。また、頭部先端位置を $x = -l_n$ とし、体高が最小となる位置を $x = l_m$ 、尾鰭後端部を $x = l_t$ とする。

魚体が z 方向変位 $h(x,t)$ で泳動する場合を考える。 U は魚体周りの相対流速を表しており、静止流体中を $-x$ 方向に前進速度 U で泳動しているとする。このときの細長体生物に働く横力の長さ方向分布 $li(x,t)$ は、魚体の微小要素における左右の圧力差を Δp としたとき、極大高さ以前 ($-l_n < x < 0$) では式(2.8.2)で、極小高さ以後 ($l_m < x < l_t$) では式(2.8.3)で表される[40]。

$$li(x,t) = \int_{-b}^b (-\Delta p) dy = -\frac{d}{dt} \{ \rho_w \pi b^2(x) w(x,t) \} \quad (2.8.2)$$

$$li(x,t) = -\frac{d}{dt} \{ \rho_w \pi b^2(x) w(x,t) \} + w^* \frac{d}{dt} \{ \rho_w \pi b^2(x) \} \quad (2.8.3)$$

ここに、

$$h(x, t) = f(x)g(t - x/c) \quad (2.8.4)$$

$$w(x, t) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} \right) h(x, t) \quad (2.8.5)$$

$$w^* = w(x^*, t^*) \quad (2.8.6)$$

$$x^* = x - U(t - t^*) \quad (2.8.7)$$

であり、

ρ_w	: 流体の密度
$b(x)$: 体高の体長方向分布
t^*	: 尾鰭の後端から渦が放出された時間
$f(x)$: 幅方向変位振幅の体長方向分布
$g(t - x/c)$: 波を表す周期関数
c	: 位相速度

である。機体の泳動実験は真水で満たされた水槽で行うため、上式における流体の密度には真水の密度を採用している。なお w^* は、極大高さ以後の後流中の任意の位置 $x = x^*$ 点 ($0 < x^* < l_m$) において、後端から渦が放出された時刻 (遅延時刻) t^* における横方向変位速度を表す。細長体理論は、後流中の渦は前方へ遡って魚体の圧力分布に影響しないという仮定のもとに成り立っている[41]。この仮定が成り立っているものとする、極大高さと極小高さとの間 ($0 < x^* < l_m$) における横力分布は、

$$li(x, t) = \rho_w \pi b^2(x) \frac{d}{dt} w(x, t) \quad (2.8.8)$$

となる。楕円柱をその長径に垂直方向に加速する場合における付加質量は、長径を直径とする円柱の体積と等しい流体の質量となる[42]。よって、式(2.8.2)、式(2.8.3)、式(2.8.8)における $\rho_w \pi b^2(x)$ は、全長方向座標 x の位置における付加質量を表す。

細長体生物に働く推進力 Th は、式(2.8.2)、式(2.8.3)、式(2.8.8)で示す横力より求

めた揚力と、魚体の前縁（特異点）に働く吸引力に基づく発生力との和となり、次式のように与えられる[41]。

$$Th = \int_{-l_n}^{l_t} li(x, t) \frac{\partial h(x, t)}{\partial x} dx + \rho_w \pi \int_{-l_n}^0 \left\{ \frac{1}{2} w^2 \frac{\partial b^2(x)}{\partial x} \right\} dx + \rho_w \pi \int_{l_m}^{l_t} \left\{ \frac{1}{2} (w - w^*)^2 \frac{\partial b^2(x)}{\partial x} \right\} dx \quad (2.8.9)$$

上式を魚類型ロボットに適用する場合、体高の体長方向分布 $b(x)$ として、機体の体高を計測した結果を回帰分析して近似式を使用する。幅方向変位振幅の体長方向分布 $f(x)$ と泳動の位相速度 c は、機体の泳動周期と後述する胴体駆動パターンごとに実験方法により計測し、 $f(x)$ については複数回の計測結果を回帰分析して近似式を作成する。

また、 w^* を求めるために必要となる、尾鰭の後端から渦が放出された時間 t^* を確認するために、渦の可視化実験を行った。流れを可視化する方法はいくつか存在するが、そのなかでもトレーサ色素として安価なコンデンスミルクを用いたコンデンスミルク法[43]を採用した。この方法では、機体表面にコンデンスミルクを薄く塗りつけて水流の中に入れ、コンデンスミルクが少しずつ水流の中に溶け出して描く筋から境界層の剥離や後流の様子を確認することができる。このとき、機体を、泳動による回頭以外の回転及び並進を固定した状態で前進泳動させ、機体の真上からビデオカメラで可視化された渦を撮影する。この渦も、駆動パターンごとに撮影する。ある駆動パターンにおいて、渦が尾鰭後端から放出される時間を計測した実験例を Fig. 2.8.2 に示す。

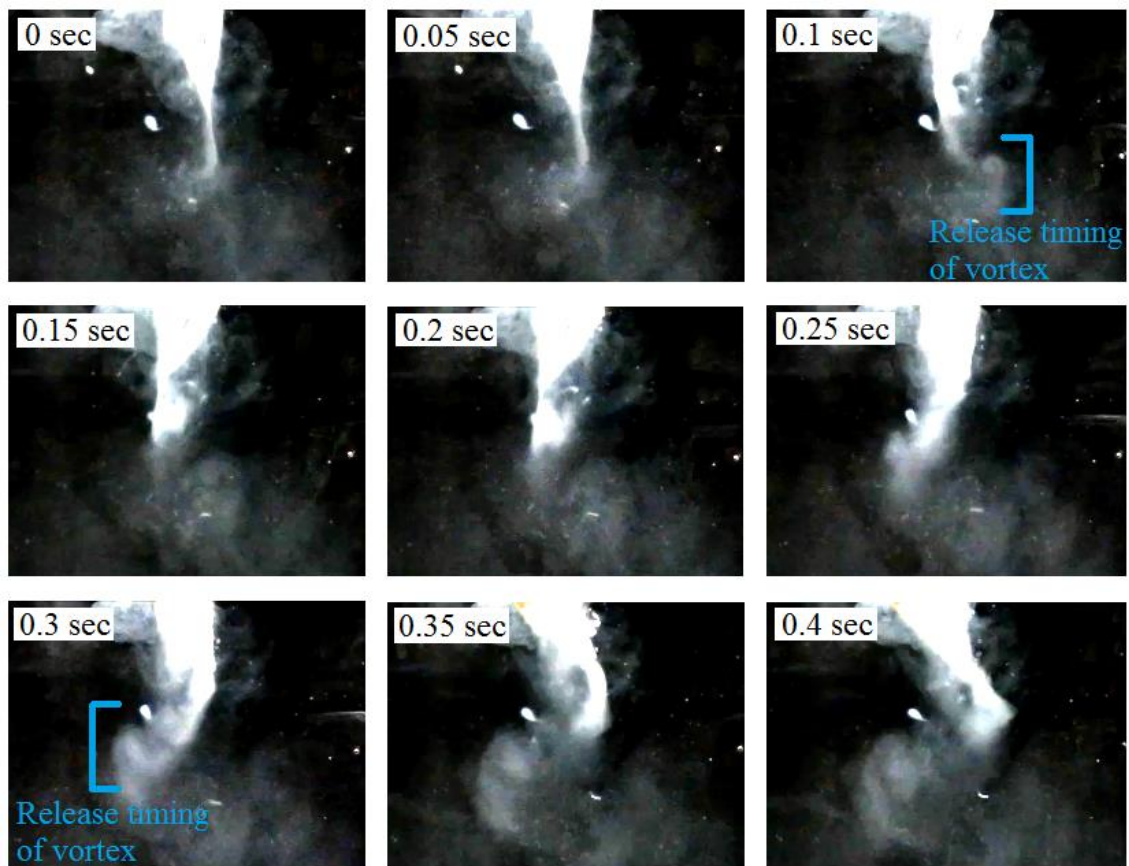


Fig. 2.8.2 Sequence of photos of vortex around trailing edge during straight swimming motion

図では、胴体の往復運動における折り返しのタイミングで尾鰭後端から渦が放出されていることが確認できる。

2.8.2 前進泳動時の胴体駆動パターン

サーボモータを 2 台搭載した機体の胴体部分の水中における最大回転角速度は約 $473.6^\circ/\text{sec}$ となった。しかし、泳動中において常時最大角速度を維持することで高い前進速度が得られるわけではないため、搭載する 2 台のサーボモータの駆動パターンは計算及び実験結果に基づき最適化する必要がある。ここでは、胴体部分の挙動パターンとして Fig. 2.8.3 に示す (D)、(E)、(F) の 3 とおりについて調査する。ただし、図に示すサーボモータの指令値は Fig. 2.7.5 に示したサーボモータ①及びサーボモータ②の駆動信号の和を示すものとする。

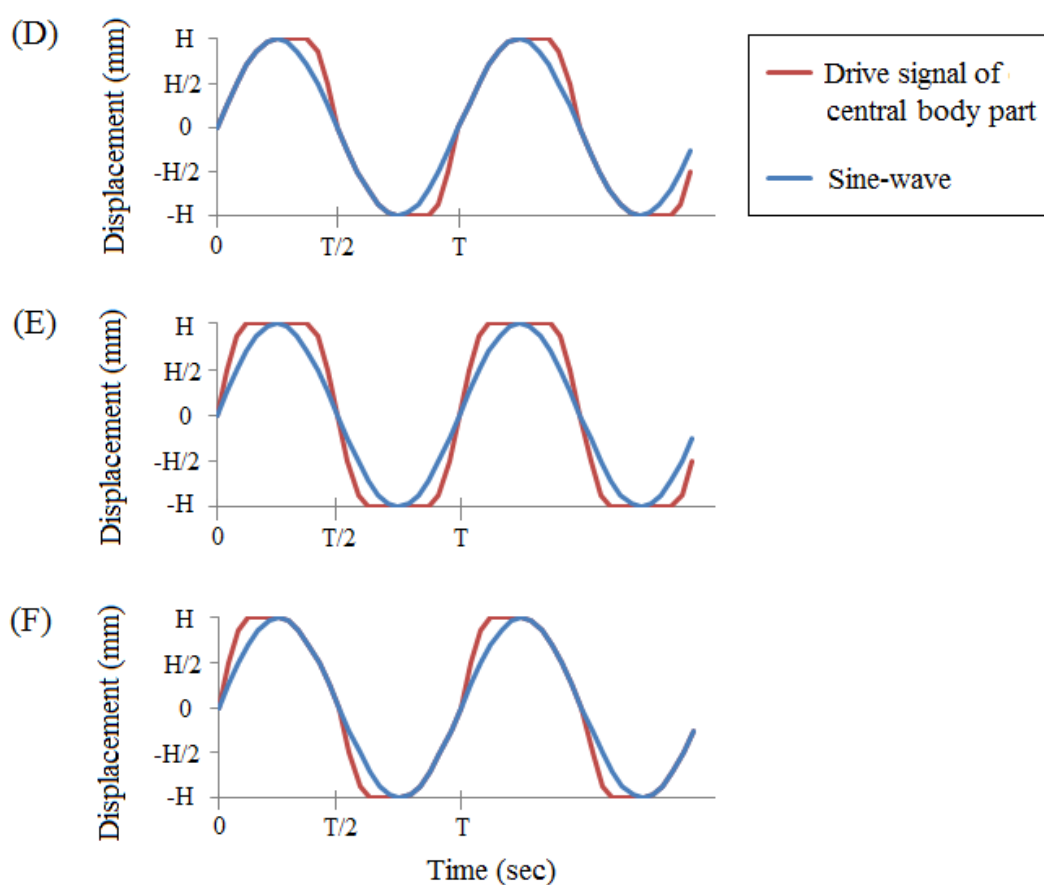


Fig. 2.8.3 Drive signal of the central body during straight swimming

図中の H は駆動信号の振幅を、 T は駆動周期を表す。前進動作時には胴体駆動部分は横方向の往復運動をするが、この往復運動において正弦波状の基本動作と比較して、折り返しの直後のみ加速する動作を(D)動作、折り返しの直前のみ加速する動作を(F)動作、折り返しの前後両方において加速する動作を(E)動作とする。図中には比較用として正

弦波状に胴体を動かした場合の信号が青線で記載されている。この 3 種類の動作に加え、正弦波状に駆動させた場合の動作を合わせた 4 種類の挙動パターンを用いて計算と実験を行う。

2.8.3 各胴体駆動パターンの推進力の推定

式(2.8.4)で説明した $g(t - x/c)$ は周期関数であるため、ここで使用する 3 種類の胴体駆動パターンの挙動を表す周期関数を作成しなければならない。以下に、各駆動パターンを表す周期関数を作成する手順の詳細を述べる。

まず、Fig. 2.8.3 に示す(D)(E)(F)それぞれの駆動信号と正弦波の信号の差をとり、信号の差を近似して簡易的に表したグラフを作成する。このグラフは直線のつなぎ合わせで近似できるため、Fig. 2.8.3 のグラフ形状を直接級数展開するよりも容易に展開できる。信号の差及びそれを近似したグラフを Fig. 2.8.4 に示す。

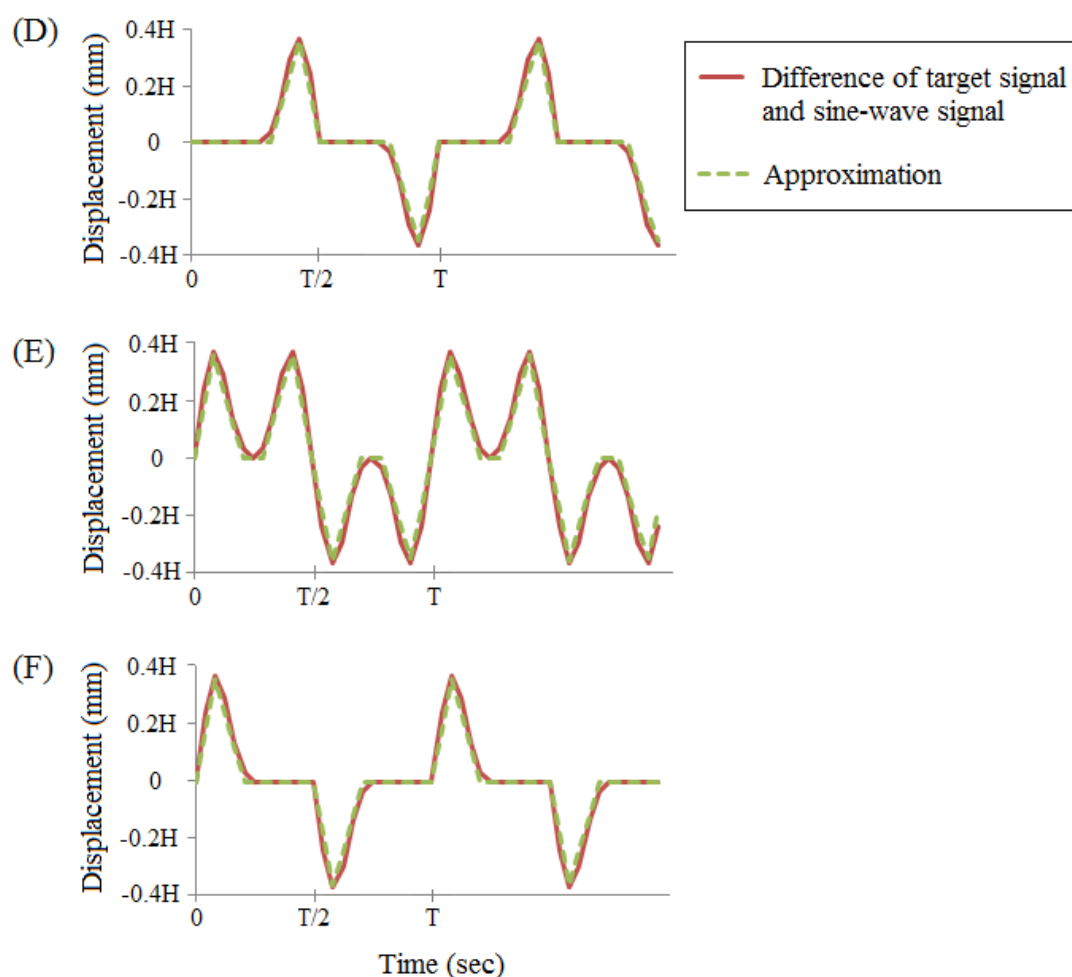


Fig. 2.8.4 Difference of the input signal and its approximation

Fig. 2.8.4 に示すグラフにおいて、極大値と極小値はそれぞれ 0.36H と -0.36H である。

次に、Fig. 2.8.4 に示す近似グラフをフーリエ級数展開し、それぞれのグラフを周期

関数に変換する。Fig. 2.8.4 に示すそれぞれの近似グラフを、時間 t の周期関数 $i(t)$ と仮定すると、

$$i(t) \cong \sum_{n=1}^N (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.8.10)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.8.11)$$

となる。ここで、

a_n : フーリエ余弦級数の係数
 b_n : フーリエ正弦級数の係数
 ω : 角速度

である[44]。Fig. 2.8.4 に示す(E)の近似グラフは奇関数の形状であるため、(E)の駆動パターンにおいて、

$$\left. \begin{aligned} a_n &= 0 & (n = 1, 2, \dots) \\ b_n &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{T}{2}} i(t) \sin n\omega t \, dt & (n = 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (2.8.12)$$

であり、(D)と(F)の近似グラフは偶関数でも奇関数でもないため、これらの駆動パターンにおいて、

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) \cos n\omega t \, dt & (n = 1, 2, \dots) \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i(t) \sin n\omega t \, dt & (n = 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (2.8.13)$$

である[44]。これらの式を用いて、それぞれの駆動パターンでの a_n と b_n を求め、式(2.8.10)に代入することによって $i(t)$ が求められる。ここで、式(2.8.10)における N の値

が小さすぎると精度が下がり、大きすぎると計算が膨大になるため、今回の計算における N の値は 50 とした。

最後に、振幅が H の正弦波信号と $i(t)$ の和を求め、この和をそれぞれの駆動パターンにおける近似信号とする。この行程により求めた近似信号と元の駆動信号を Fig. 2.8.5 に比較して示す。元の駆動信号と計算により求めた近似信号は良く一致しており、本近似法の有効性が確認できた。

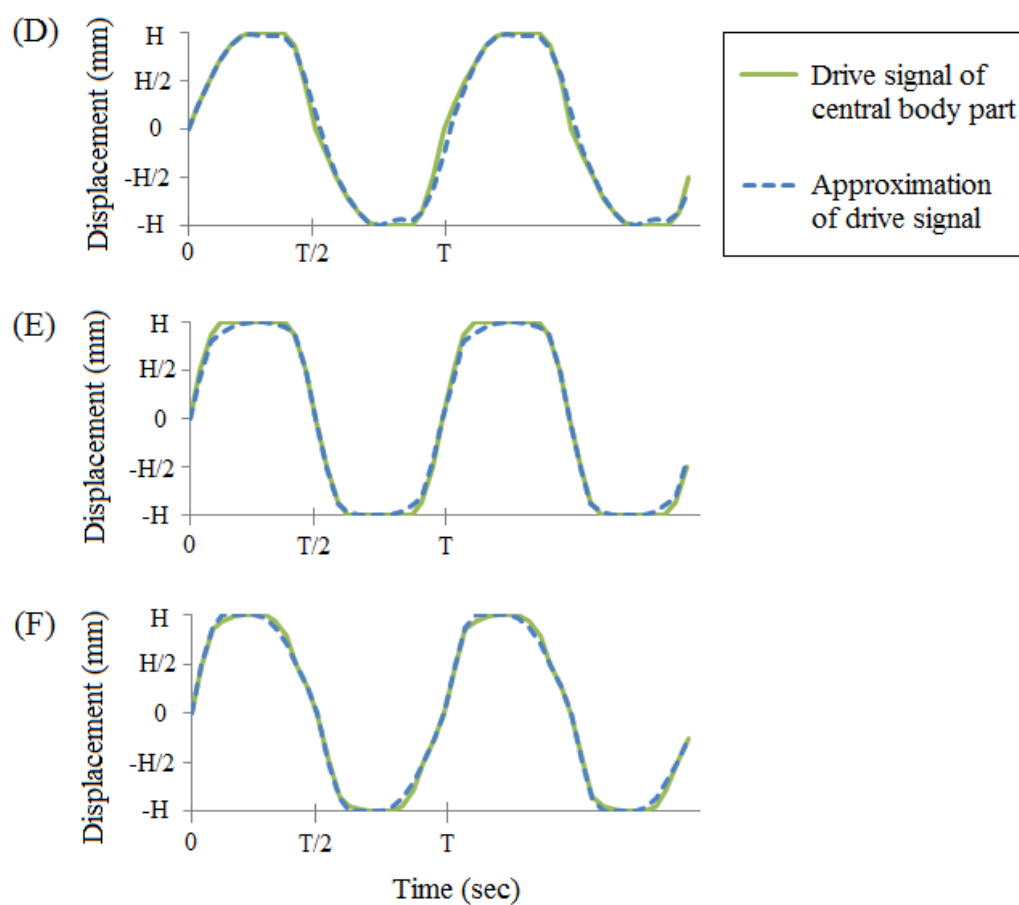


Fig. 2.8.5 Original drive signal of the central body part and its approximation

2.8.4 異なる胴体駆動パターンによる推進力の推定結果

Fig. 2.8.5 に示す近似信号の周期関数を式(2.8.9)に適用することで、機体の推進力を求める。ただし、式(2.8.9)によって求めることができるのはある瞬間 t における推進力であり、駆動周期 T で推進力の値は変化していく。ここでは、駆動周期 T の範囲内で 0.001sec ごとの推進力を求め、それらの平均値を比較した。機体周りの相対流速 U (正の向きは機体後方) が 0m/sec のときと 0.5m/sec のときにおける推進力の平均値を Fig. 2.8.6 に示す。

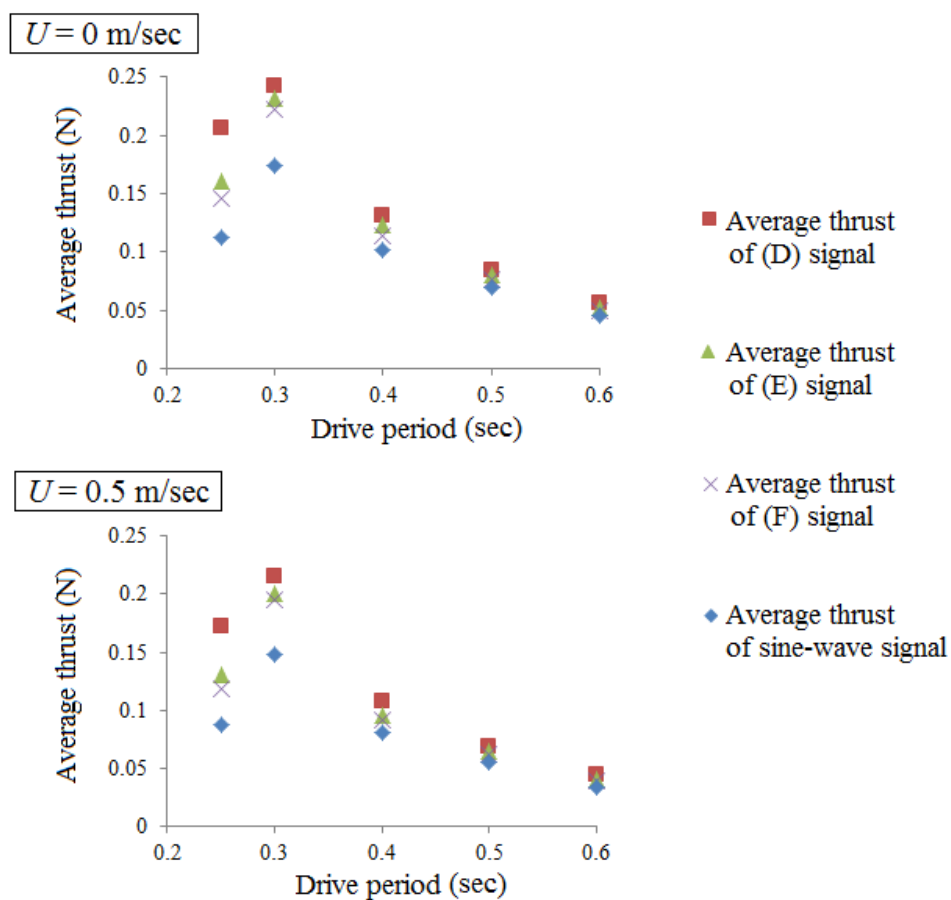


Fig. 2.8.6 Calculated average thrust

Fig. 2.8.6 より、どの駆動パターンの結果においても駆動周期が 0.3sec のときに最も高い平均推力が得られることが確認できた。また、同じ駆動周期で比較すると、平均推力が高い順に $(D) > (E) > (F) >$ 正弦波信号となり、同じ駆動周期と駆動パターンで相対流速 U が 0m/sec のときと 0.5m/sec とで比較してみると、相対流速がある場合では平均推力が低くなることが確認できた。

この計算の結果に見られるように、ある特定の駆動周期で機体の推進力が極大値となることは、Lighthill [45]による魚類の推進力推定において指摘されている。この周期は魚体全長や胴体の微小要素ごとの体積及び形状に影響され、魚種や個体ごとに異なる。

また、相対流速が高くなると推進力が下がる現象は、一般的な推進機構であるプロペラでも確認されている[46]。これは移動体の運動量理論[47]において、推進機構前方の流体（機構に向かって流れてくる流体）の運動量が大きくなることにより機構後方と機構前方にある流体の運動量の差が小さくなることが原因である。

同じ駆動周期において平均推進力が高い順に(D) > (E) > (F) > 正弦波信号となった理由としては、動作を加速する瞬間の尾鰭の角度が影響していると考えられる。この理由について、下の Fig. 2.8.7 を用いて説明する。

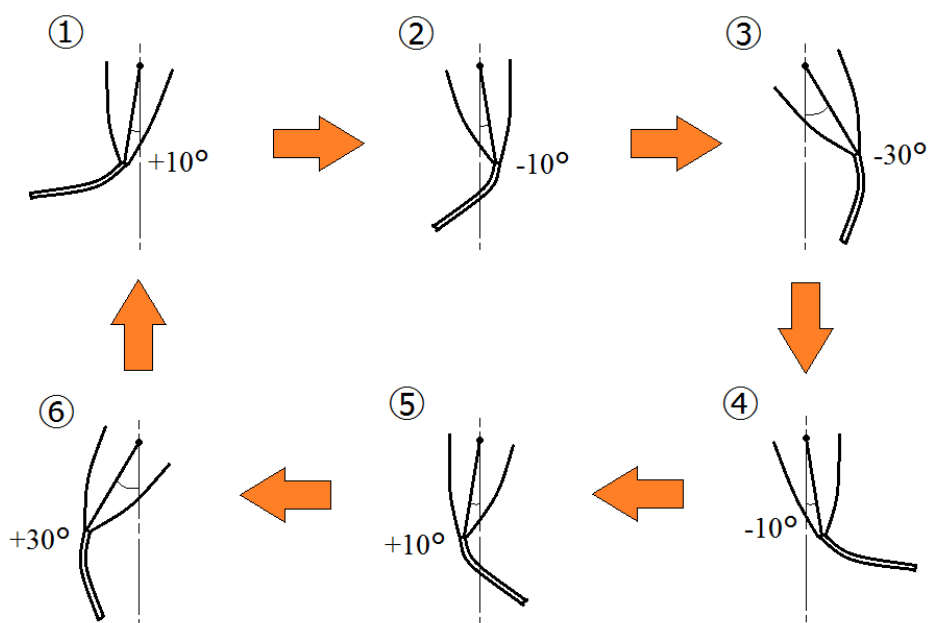


Fig. 2.8.7 Process of drive cycle for the central body part

Fig. 2.8.7 は駆動 1 周期における魚体形状のイメージ図である。①から⑥の過程では、それぞれ尾鰭の角度が異なり、①と④の過程では尾鰭の面がほぼ機体後方に向いており、③と⑥の過程では尾鰭の面がほぼ機体横方向を向いていることがわかる。(D)の駆動パターンでは①と④の瞬間に加速するため、この間に機体後方へ強く水を押し出し、機体前方への高い推進力が得られる。(F)の駆動パターンでは③と⑥の瞬間に加速するため、この間に機体横方向へ水を押し出すことで、前進運動には寄与しない横方向への推力が多く発生し、前進方向の推力が増加しないと考えられる。ただし、この場合でも増加した推力のいくらかは前方への推進力となっているため、正弦波状に動作させた場合よりは平均推進力は高くなっている。

2.9 泳動機構を改良した機体の運動性能評価

2.9.1 直進泳動実験結果

Fig. 2.8.3 に示す(D)(E)(F)の駆動信号と正弦波状の駆動信号を合わせた4種類の駆動パターンにおいて、駆動周期を0.25sec、0.3sec、0.4sec、0.5sec、0.6secと変化させて直進泳動した時の最高前進速度を計測した結果を、その最大前進速度を機体周りの相対流速 U とした場合における機体の平均推進力の推定値と合わせて Fig. 2.9.1 に示す。

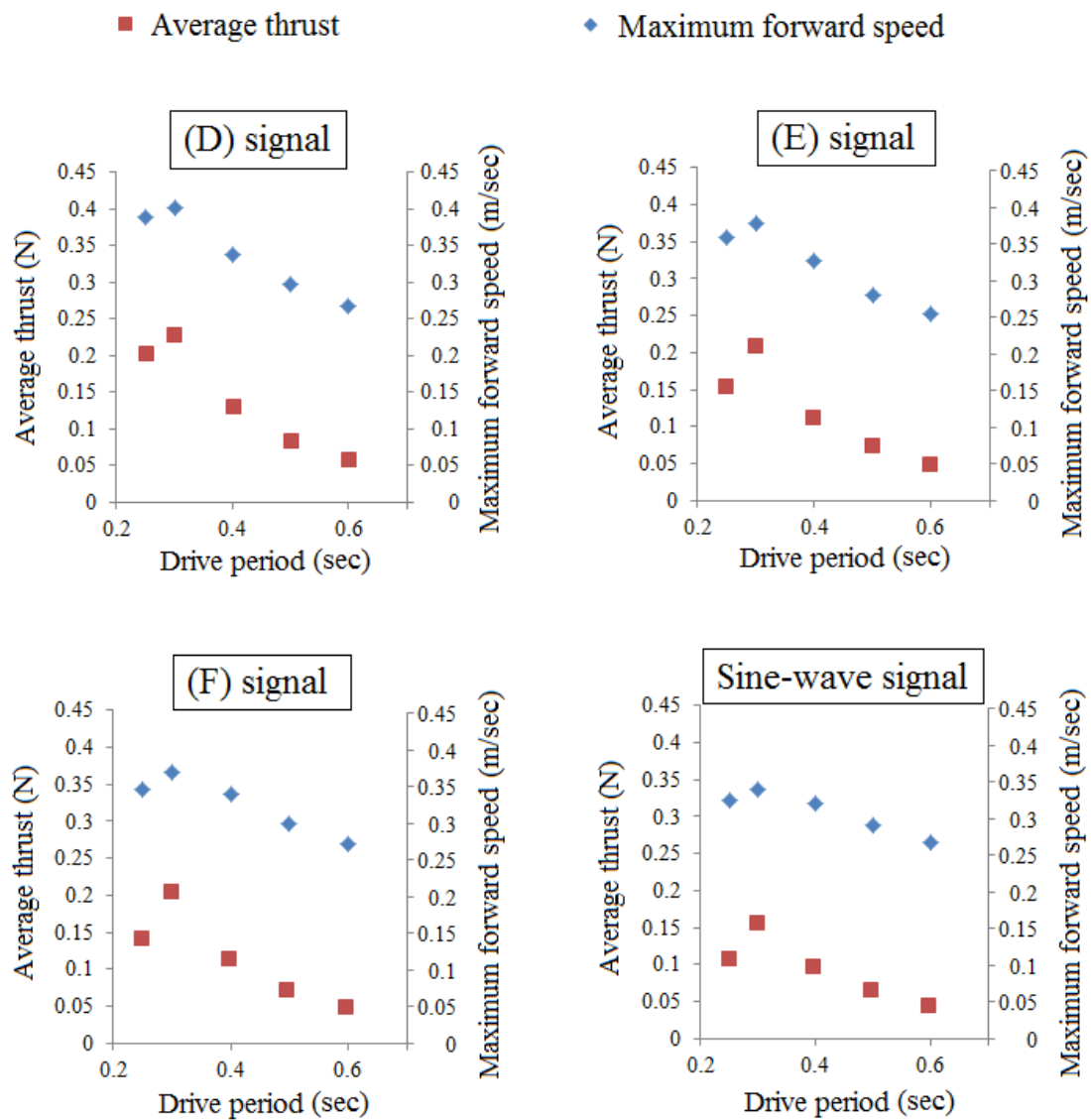


Fig. 2.9.1 Calculated average thrust and measured maximum forward speed

図において、最も高い最高前進速度を記録したのは、駆動パターン(D)のときで駆動周期が 0.3sec の場合であった。駆動パターンごとに最高前進速度を比べると、(D) > (E) > (F) > 正弦波信号の順に高い前進速度を記録した。そのときの最高前進速度は約 0.4m/sec であり、発進から最高前進速度（終端速度）に達するまでにかかる時間は約 2sec であった。

2.9.2 急旋回泳動実験結果

左急旋回動作における胴体駆動用サーボモータと各フィン機構駆動用の人工筋肉への指令値の時刻歴をそれぞれ Fig. 2.9.2 と Fig. 2.9.3 に示す。ここでも、急旋回動作において 2 箇所以上のフィン機構を同時に駆動させないように配慮している。Fig. 2.9.2 における赤線はサーボモータを 2 台同時に使用した場合の制御信号であり、青線は 1 台のみ使用した場合の制御信号である。

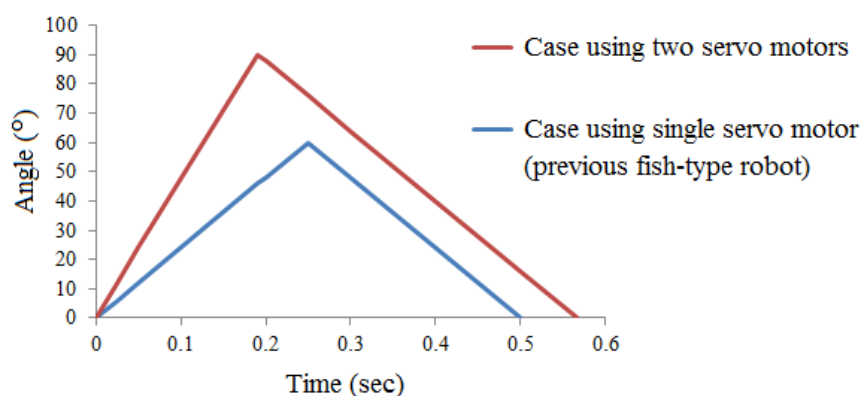


Fig. 2.9.2 Control signal of the central body part during left quick turn motion

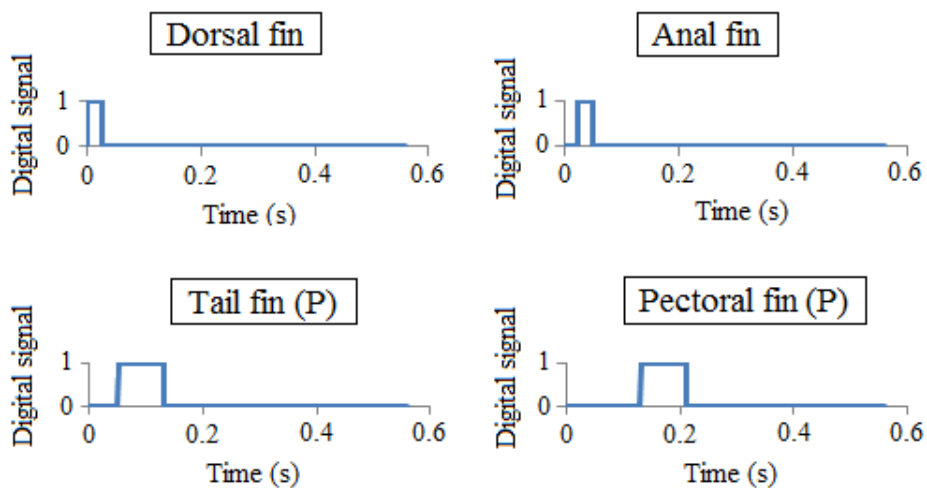


Fig. 2.9.3 Control signal of each fins during left quick turn motion

改良前の機体に比べて、サーボモータの追加により胴体駆動部の駆動範囲が広がったため、胴体駆動部は急旋回動作時には片側に 90° 動かし、その後、元の状態に戻すといった動作プログラムに変更している。Fig. 2.9.2 に示すように、急旋回動作時にサー

ボモータが戻り始める時間は動作開始から 0.2sec である。前述したように、動作開始から 0.2sec 以内に全てのフィン機構の駆動を終了することを目指す。Fig. 2.9.3 に示すフィン機構の駆動にかかる時間の合計は 0.21sec となる。ここでは、開閉型フィン機構の回頭モーメントに対する悪影響に配慮して、背鰭と尻鰭を優先して駆動させるような順序で各フィン機構を動作させる。

動作開始から動作終了までにおける機体の回頭角の時間変化と平均回頭角速度を、全てのフィン機構を使用した場合とフィン機構を全く使用しない場合、さらに開閉型フィン機構（背鰭と胸鰭）のみを使用した場合について Fig. 2.9.4、Fig. 2.9.5 に示す。

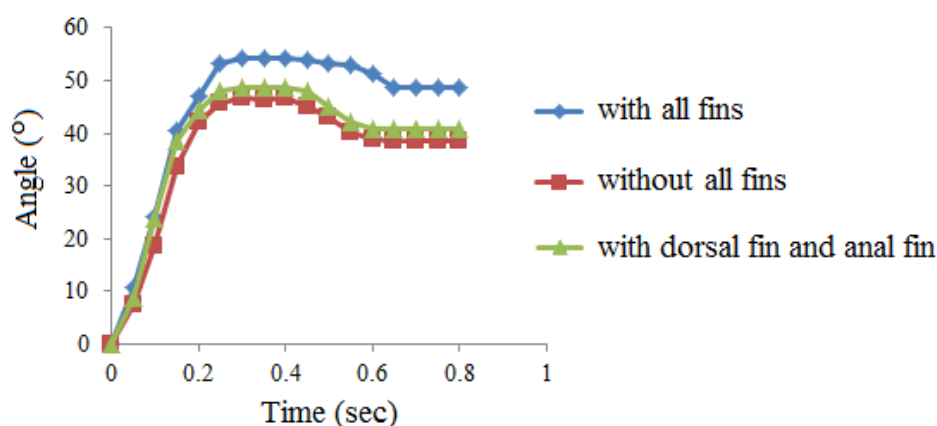


Fig. 2.9.4 Turning angle of the improved robot during left quick turn

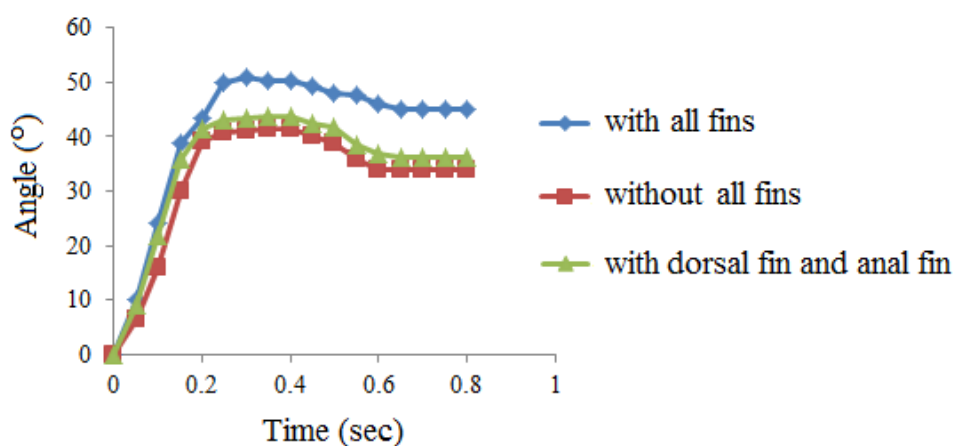


Fig. 2.9.5 Turning angle of the improved robot during right quick turn

Fig. 2.9.4 及び Fig. 2.9.5 において、急旋回動作の完了までの時間は、左右両方の急旋回において動作開始から約 0.62sec となった。動作完了時における左急旋回の機体の回頭角度は、フィン機構を使う場合で 48.8° となり、フィン機構を使用しない場合で 38.7° であった。右急旋回の機体の回頭角度は、フィン機構を使う場合で 45.2°、フィ

ン機構を使用しない場合で 33.8° であった。また、急旋回動作における機体の平均回頭角速度は、フィン機構を使用しない場合は左が 62.4deg/sec 、右が 54.5deg/sec であり、フィン機構を使用する場合は左が 78.7deg/sec 、右が 72.9deg/sec であった。また、全てのフィン機構を使用しなかった場合と開閉型フィン機構のみ（背鰭と尻鰭にあたるフィン機構）を使用した場合では性能にほとんど差が出なかった。水中での開閉型フィン機構の様子を確認したところ、機構に通電しない時間にもシリコンシートの膜が周りの流れにより開いていることが確認された。このため全てのフィン機構を使用しなかった場合と開閉型フィン機構のみを使用した場合の結果には大きな差が出なかったと考えられる。

この結果より、フィン機構を使用することにより急旋回性能が向上することが確認できたが、フィン機構の効果は、改良前の機体よりも小さくなった。この原因としては、胴体駆動部分の性能の向上により、フィン機構を使用しない時でも機体周りに旋回に有利に働く渦が発生していたことが考えられるが、詳しい原因を解明するためには CFD(Computational fluid dynamics)による数値解析等により詳細な調査を行う必要がある。

次に、狭い水路で機体を 180° 方向転換させる状況を想定して、急旋回動作を 4 回連続で実行した場合における動作前と動作後の機体の様子を Fig. 2.9.6 に示す。

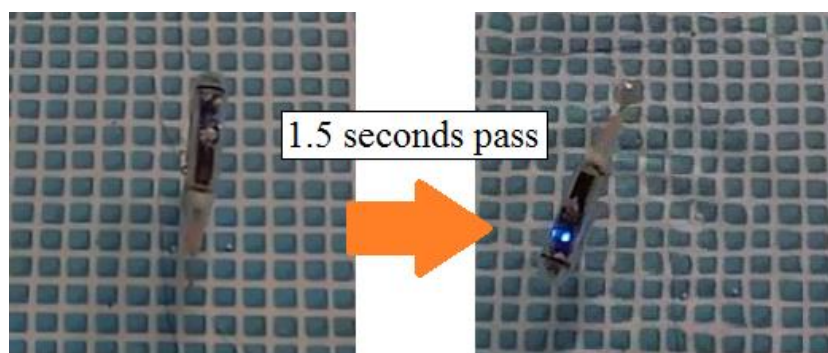


Fig. 2.9.6 Continuous action of quick turn

この時の動作にかかった時間は 1.46sec で、回頭角の変化は 167.1° であったため、平均回頭角速度は 114.5deg/sec となり、急旋回動作を 1 回だけ実行する場合よりも平均回頭角速度が増加した。また、このときの旋回半径は約 75mm となり、この方法により、狭い場所で短時間の旋回が可能であることが確認された。

2.10 結言

本章では、機体の駆動範囲の拡大に重きを置いた機体として、人工筋肉とサーボモータを併用した魚類型ロボットの開発を行った。魚類型ロボットの各部において、アクチュエータの搭載スペースが大きい胴体には出力の高いサーボモータを搭載し、アクチュエータの搭載スペースが小さい尾鰭や胸鰭等に人工筋肉を搭載することで、機体の広い範囲を駆動させ泳動能力の向上を目指した。

まずフィンを持つ魚類の形状及び泳動方式の分類について調査し、必要とする泳動能力の再現に適した機体の形状及び泳動方式を検討した。魚類の形状の分類をもとに、大洋を航行するための機体形状には紡錘型が、沿岸域や浅水域での使用を目的とするならば側扁型やフグ型が適していることを明らかにした。また泳動方式の分類に関しては、大洋を航行するための泳動方式には **Thunniform mode** が、沿岸域や浅水域での使用を目的とするならば **Subcarangiform mode** もしくは **Carangiform mode** が適していることを示した。

次に、胸鰭と尾鰭として機能する屈曲型フィン機構を考案し、使用する人工筋肉の仕様をもとにフィンの材質、形状、人工筋肉の配置形状について検討した。開発したフィン機構と胴体駆動用のサーボモータを搭載する機体の設計及び製作を行いその泳動性能を評価した。その結果、最高前進速度は約 0.2m/sec 、急旋回動作における機体の平均回頭角速度は、フィン機構を使用しない場合は左が 29.5deg/sec 、右が 32.2deg/sec であり、フィン機構を併用する場合は左が 70.7deg/sec 、右が 77.2deg/sec であった。急旋回動作において、フィン機構を併用した場合、使用しない場合に比べて平均角速度は約 2.4 倍に増加することが確認できた。急停止動作において、フィン機構を使用しなかった場合の機体の最小加速度は -0.136m/sec^2 であり、フィン機構を使用した場合では -0.220m/sec^2 であった。このように、フィン機構を併用した場合、使用しなかった場合に比べて約 1.6 倍の減速度を実現しており、フィン機構を用いることで急停止性能が向上することが確認できた。

その後、さらなる泳動性能の向上を目指すため、胴体部分にサーボモータを追加し、魚類の背鰭及び尻鰭として機能する人工筋肉駆動の開閉型フィン機構を搭載した機体について泳動性能を調査した。泳動性能の評価においては、細長体理論に基づく推進力の推定と泳動実験による最高前進速度と急旋回時の平均回頭角速度の測定を行った。推進力の推定では、数種類の動作パターンについて機体の推進力を計算した。その結果、いずれの駆動パターンの場合においても駆動周期が 0.3sec のときに最も高い平均推力が得られることが確認できた。また、同じ駆動周期で比較すると、動作パターンと相対流速の影響が認められた。この計算の結果において、ある特定の駆動周期で機体の推進力が極大値となる現象は、**Lighthill** による魚類の推進力推定論において、相対流速が

高くなると推進力が下がる現象は、移動体の運動量理論においてそれぞれ説明することができる。

急旋回動作における改良型機体の平均回頭角速度は、フィン機構を使用しない場合は左が 62.4deg/sec、右が 54.5deg/sec となり、フィン機構を併用する場合は左が 78.7deg/sec、右が 72.9deg/sec となった。また、全てのフィン機構を使用しなかった場合と開閉型フィン機構のみを使用した場合では性能にほとんど差が出なかった。この結果より、フィン機構を使用することにより急旋回性能が向上することが確認できたが、その効果は改良前の機体で行った急旋回泳動実験の結果よりも小さくなった。また、狭い水路で機体を 180° 方向転換させる状況を想定し、急旋回動作を 4 回連続で実行したところ、平均回頭角速度は 114.5deg/sec となり、1.46sec で 167° 方向転換が可能であった。このときの旋回半径は約 75mm であり、本機体は狭い水域での観測に対し高い適性が認められた。

これらの結果より、製作した機体の運動性能は、狭い水域での使用に特化できていると判断でき、今後の研究ではこの機体の制御系を発展させることで沿岸域での安全な航行が期待できる。

第3章 実水域における魚類型ロボットの運用

3.1 緒言

本章では、前章で開発した機体を用いて実水域での自律制御による生物観測を行うため、機体の運動制御方法を検討し、必要なセンサ類及び小型ビデオカメラを既存の機体に追加で搭載する。

機体の運動制御方法として、実際の魚類の習性を模倣した制御方法を採用する。これにより、実水域において水生生物を観測する際に機体の周りには水生生物に影響を与えず、効率よく撮影等による観測が実施可能であると考えられる。魚類の習性を模倣した運動制御方法としてここでは、周囲の流れに対し、同方向または逆方向に泳動する習性である走流性に注目した運動制御を試みる。運動制御に使用するセンサとして、3軸加速度センサと2軸ジャイロセンサを機体に搭載する。実水域での実験に先立ち、水槽において事前の制御実験を行い、制御に使用するセンサ類および設計した運動制御系の有用性を確認した。実水域においては、機体に小型カメラを搭載し、生息する水生生物の撮影を試みる。

さらに、吸い込み流が発生しにくいという生物模倣型ロボットの利点に焦点を当てて、海藻やゴミなどの浮遊物が多く存在する水域を想定した実験を実施する。ここでは、前章で製作した魚類型ロボットと比較するためにスラスト駆動型ロボットを製作し、それぞれの機体を模擬海藻が投入された水槽で駆動させて推進機構に模擬海藻が絡む確率について調査する。

3.2 魚類の習性を模倣した運動制御の検討

魚類の行動習性には、光の強度が高いもしくは低い場所に向かって泳ぐ走光性[48]や、サケ・マスなどが川から海へ下って成長したのちに産卵のために生まれた川へ帰っていく母川回帰[49]などがある。これらの行動習性のうち、ニジマスやマダイ、マアジなどにみられる周囲の流れの向きに沿って泳ぐ走性を走流性(Rheotaxis)と呼び、このうち流れに向かって泳ぐ走流性を正の走流性と呼ぶ[50, 51]。この正の走流性は、魚類の位置制御や上流への遡上に役立っており、流れがある水域では正の走流行動をとっている魚類が多く存在する。

本章では、魚類型ロボットを用いて水生生物にできるだけ接近してその行動を観測することを目標とする。正の走流性を模倣した制御系は、実水域で流れに沿って泳動している生物観測において有用であると考えられる。魚類が周囲の流れを感知するメカニズムは以下のとおりである。魚類は、魚体側面に備わっている側線と呼ばれる器官により圧力を感知して、並んでいる多数の側線間に生じる圧力差の変化により水流を感知する。魚類型ロボットでこれと同様のメカニズムを再現するためには、多数の圧力センサが必要となるが、前章の機体には十分な数の圧力センサを搭載するスペースが無いため、加速度センサとジャイロセンサを用いて正の走流性を模倣する機体の運動制御方法を開発し、疑似的な走流行動を実行させる。

3.3 実水域における機体の運動制御方法

ここでは、加速度センサとジャイロセンサ（角速度センサ）を用いた機体の運動制御方法の詳細について述べる。

魚類の走流性を再現するためには流れの方向を推定する必要がある。流れがある水域で機体が泳動している状態を考え、加速度センサにより計測した水平面内の加速度を時間積分して機体の速度ベクトルを導出する。この速度ベクトルと静止流体中における機体の前進速度ベクトルの差を算出し、機体の横すべり角を推定する。機体の加速度計測における機体傾斜による重力加速度の影響は、ジャイロセンサの計測値を用いて修正する。機体加速度の修正と、横すべり角の推定の概念図を Fig. 3.3.1 に示す。

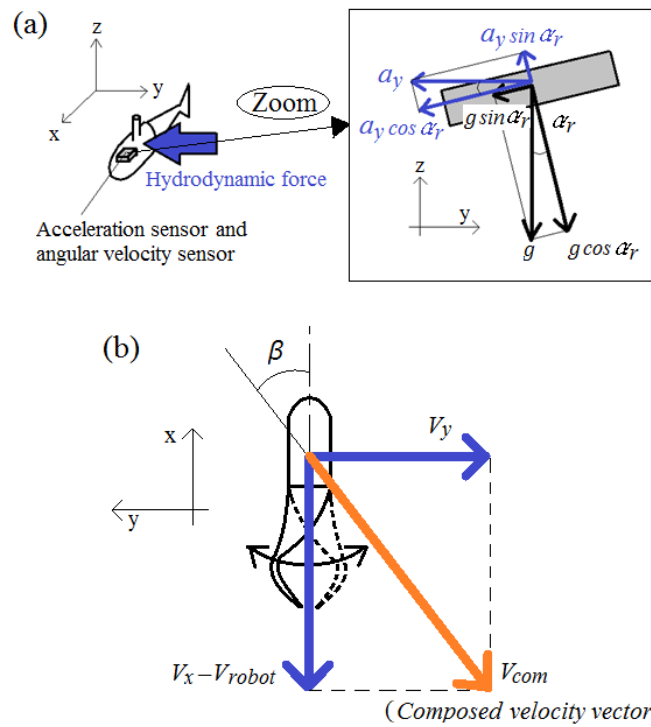


Fig. 3.3.1 (a) Image of correction with angular velocity sensor and (b) estimate of attack angle at real sea area during straight swimming motion

a_x と a_y は一様流により機体に働く x、y 方向加速度、 g は重力加速度、 α_r と α_p はそれぞれ機体のロール角とピッチ角である。 α_r と α_p はジャイロセンサで計測した角速度を時間積分することで求められる。加速度センサは機体に固定されており、図のように傾いた場合、加速度センサが計測する y 方向加速度の値は $a_y \cos \alpha_r + g \sin \alpha_r$ となる。ジャイロセンサにより α_r を計測し、 a_y の値を求める。Fig. 3.3.1(b)において、 V_x 及び V_y は加速度センサによって計測した x、y 方向の加速度を時間積分して導出した速度成分、

V_{robot} は静止流体中における機体の前進速度（駆動パターンは前章の(D)パターンで駆動周期は0.3secとする）、 V_{com} は V_y と $V_x - V_{robot}$ の合成速度ベクトル、 β は機体中心線と合成速度ベクトル V_{com} の延長線がなす角度である。これにより予測される速度は、一様流による流体力が作用する機体の速度であり、周りの流れの流速ベクトルではないため、 β は横すべり角とは異なる。水中ロボットが周りの流れの流速ベクトルを正確に感知するためには流速計の搭載が必要となり、十分なスペースを持たない小型の機体には搭載することが出来ない。ここでは、 β が機体の横すべり角に近い値であると仮定し、走流動作を再現するために使用している。また、前進運動時の機体のヨー方向角度は泳動により常に変化しているため、機体の横すべり角は、計測値の泳動1周期中での平均値を用いて求める。

走流性を再現するため、流れの方向に機首を向けて泳動するための運動制御系設計として、PID制御(Proportional-Integral-Differential Controller)に基づく運動制御プログラムを作成する。PID動作の制御則[52]は次式で表される。

$$\theta_{servo} = k_p \beta + k_i \int \beta dt + k_d \frac{d\beta}{dt} \quad (3.3.1)$$

ここで、

- θ_{servo} : 胴体駆動部の往復動作の中央角度
- k_p : 比例ゲイン
- k_i : 積分ゲイン
- k_d : 微分ゲイン

である。それぞれのゲインは、比例制御のみの予備実験に基づき、応答が発散も収束もしない定常状態となる時の比例ゲイン k_{pc} をもとに他のゲインを決定する限界感度法[52]により求めた。限界感度法によるゲイン設定表を Table 3.3.1 に示す。

Table 3.3.1 Setting of gains by ultimate gain method

	Proportional gain	Integral gain	Derivative gain
P control	$0.5k_{pc}$		
PI control	$0.45k_{pc}$	$0.83k_{pc}$	
PID control	$0.6k_{pc}$	$0.5k_{pc}$	$0.125k_{pc}$

開発する機体では急旋回動作として胸鰭と尾鰭のフィン機構を用いることにより、旋回性能の向上が期待出来る。そこで、横すべり角の絶対値が 45 度以内の状態では通常の PID 制御より横すべり角を制御し、横すべり角の絶対値が 45 度を超過する場合には急旋回動作を実行することとして制御性能の向上を図る。この制御方法の概念図を Fig. 3.3.2 に示す。

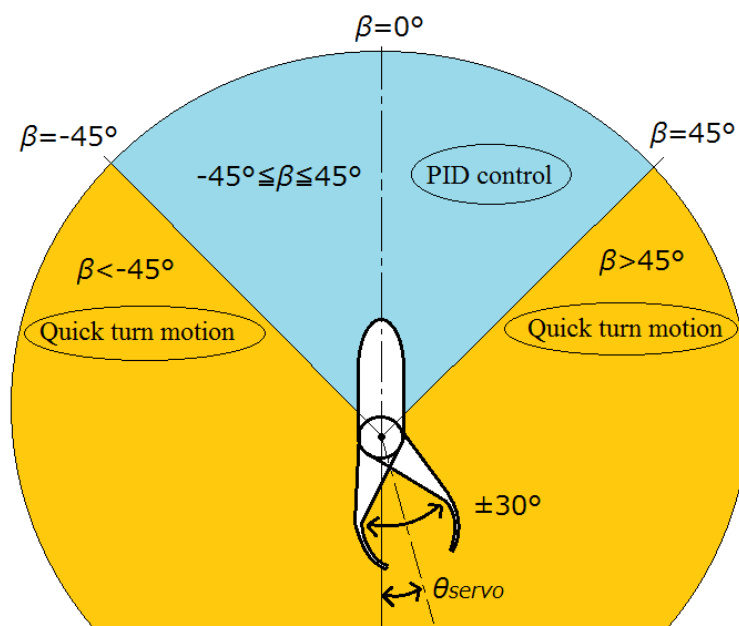


Fig. 3.3.2 Control of angle of direction

このときの胴体駆動部は往復動作の中央角度から $\pm 30^\circ$ で往復運動させ、胴体駆動パターンには Fig. 2.8.3 の(D)パターンに示す動作を採用し、駆動周期は Fig. 2.8.6 の前進泳動実験により最速を記録した 0.3sec とする。設計された運動制御プログラムのフローチャートを Fig. 3.3.3 に示す。

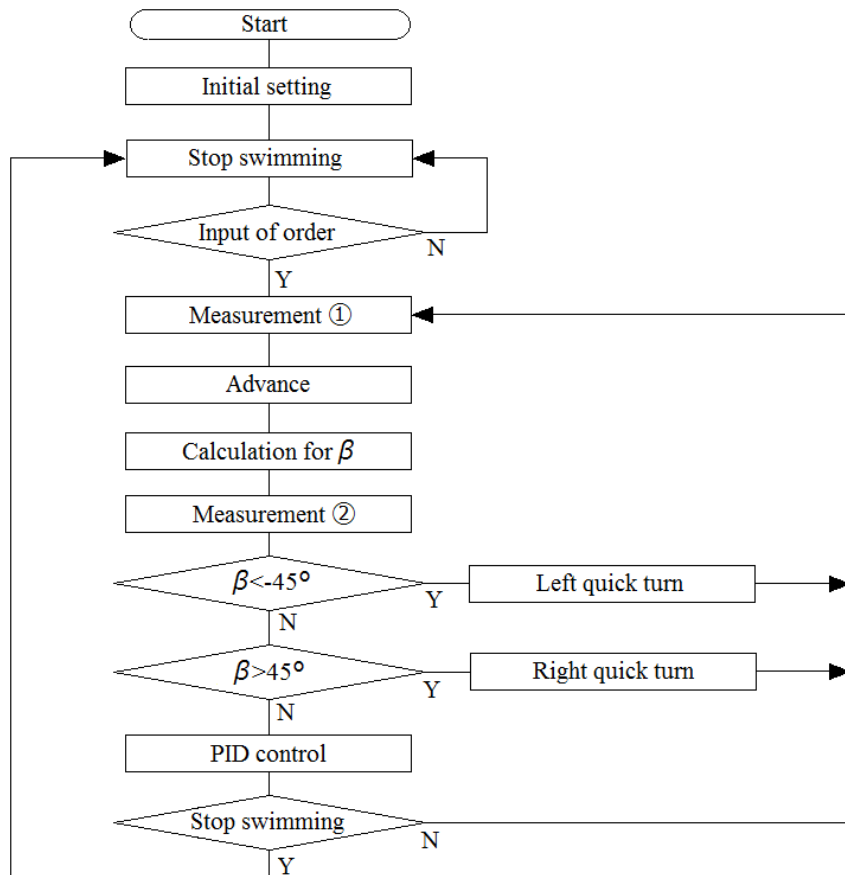


Fig. 3.3.3 Flowchart of control program using PID control and quick turn motion

Fig. 3.3.3における計測①と計測②はセンサ類による機体の加速度と角速度の計測を表している。計測①と計測②の間には 0.1sec の間隔があり、この間隔の時間が十分に短いと仮定して、プログラム内で時間積分を行う。このためには、計測時刻の異なる 2 つの計測値が必要であるので、プログラムの 1 ループ内において方位角の推定計算の前後に 2 回のデータ計測を行っている。

3.4 運動制御用センサとビデオカメラの搭載

前節で述べたように、機体の運動制御のために加速度センサとジャイロセンサを機体内部に搭載する。加速度センサには Kionix 社製の KXR94-2050 を、ジャイロセンサには村田製作所製の ENC-03R を使用した。これらのセンサは必要とする供給電圧が 2.5～5.25V であり、使用するマイクロコントローラからの出力で直接駆動できる。各センサを搭載した基盤の写真を図 3.4.1 に、各センサのスペックを Table 3.4.1 に示す[53, 54]。加速度センサではサージとスウェイ方向の加速度を、ジャイロセンサではピッチとロール方向の角速度を計測する。

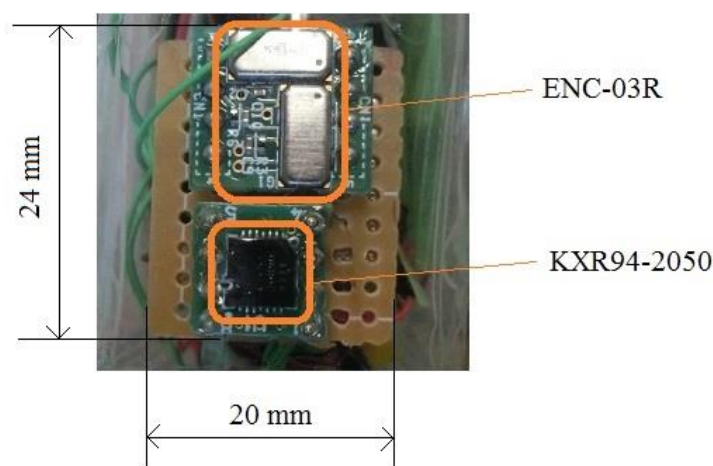


Fig. 3.4.1 Acceleration sensor “KXR94-2050” and angular velocity sensor “ENC-03R” on the substrate

Table 3.4.1 Specification of acceleration and gyro sensors

	KXR94-2050	ENC-03R
Range of measurement	± 2 g	± 300 deg/sec
Sensitivity	660 mV/g	0.67 mV/(deg/sec)
Zero-g offset	1.65 V	1.35 V
Supply Voltage	2.5～5.25 V	2.7～5.25 V

上記の各センサを搭載したユニバーサル基盤は幅約 20mm、奥行き約 24mm、高さ約 11mm と小型であり、機体内の僅かなスペースにも搭載可能である。これらのセンサの駆動方法の詳細については、各センサのデータシート[53, 54]に記載されているので、ここでは省略する。

次に、水生生物を撮影するためのビデオカメラを選定する。ビデオカメラのための機体内の搭載スペースは僅かであるため、今回は画質や録画時間よりも本体サイズの小ささを優先して選定し、ファイアスター社製の FS-MD700 を採用した。ここでは、外形をさらに小さくするためにレンズ周り以外の外殻を取り除いて絶縁テープで固定した。FS-MD700 の外観を Fig. 3.4.2 に、スペック [55] を Table 3.4.2 に示す。

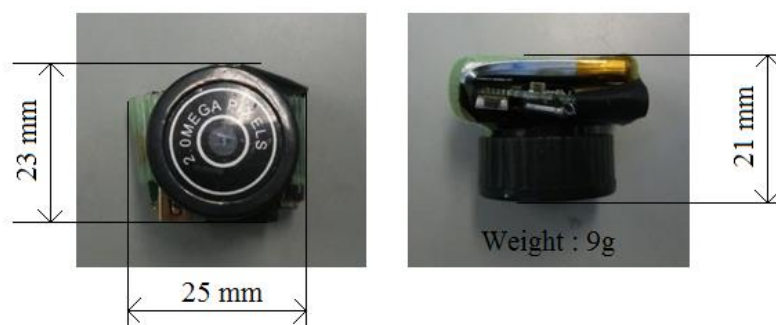


Fig. 3.4.2 Small video camera “FS-MD700”

Table 3.4.2 Specification of “FS-MD700”

Sensor	1.3 million pixels
Frame rate	30 fps
Support micro SD	16 GB max
Recording type	AVI
Resolution	640×480
Battery	Lithium battery (120mAh)
Continuation recording time	25 minutes

このビデオカメラを機体頭部に搭載し、機体前方の水中の様子を撮影する。動画データは、実験後にカメラ本体とパソコンを USB ケーブルで接続することで取り出すことができる。

3.5 機体の運動制御と生物観測実験

ここでは、実験水槽及び実水域における機体の運動制御結果と機体に搭載したセンサによる水平面内速度の計測結果について述べる。すなわち、実験水槽では加速度およびジャイロセンサを用いて静止流体中における機体の前進速度の計測を行い、実水域では小型ビデオカメラによる水生生物の観測を実施する。

3.5.1 水槽実験結果

機体の運動制御に関する水槽実験を Fig. 2.6.1 で示したものと同様の設定で実施する。水槽中で機体を前進泳動させ、機体水平面内の速度を測定し、搭載したセンサの有用性を確認すると共に、機体の静水中定常速度の計測を行った。機体の水平面内方向の加速度と、それを時間積分して導出した速度をそれぞれ Fig. 3.5.1 に示す。

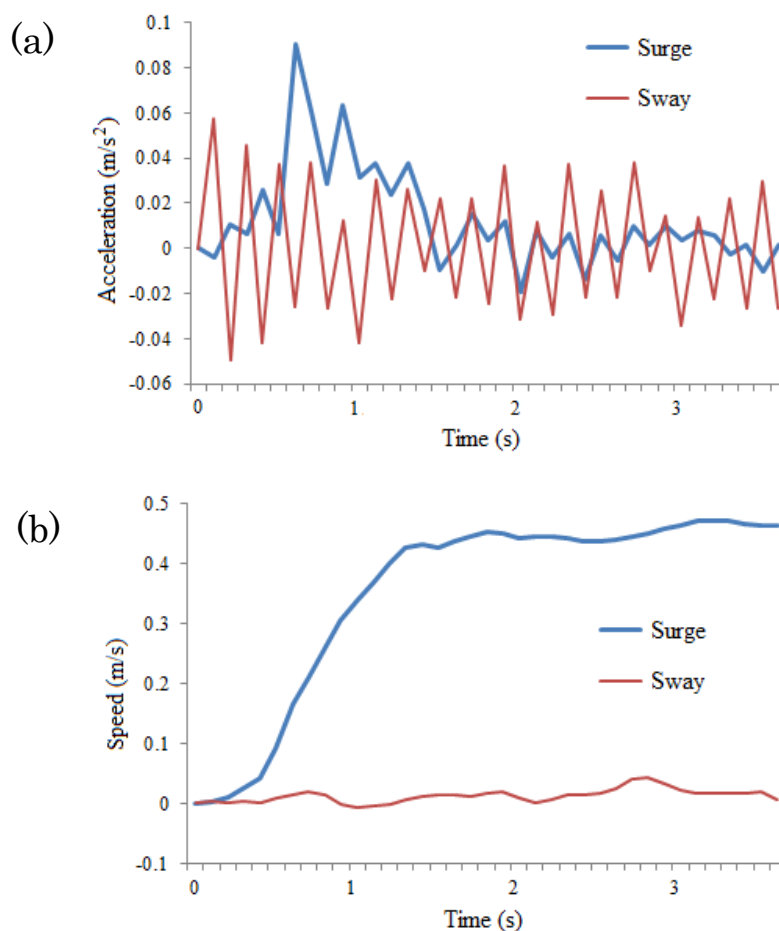


Fig. 3.5.1 (a) Acceleration of the robot in still water and (b) speed

Fig. 3.5.1(a)には、スウェイの加速度が0を基準に振動しており、機体の胴体が横方向に往復運動していることが確認できる。また、Fig. 3.5.1(b)において、機体前進速度は約0.45m/secで一定となり、動画解析による計測結果とほぼ一致していることから、用いた計測方法が有効であることが確認された。

次に、静止流体中において、機体に与えられた外乱に対する応答を確認した。すなわち、外乱として、機体の一部に適当な外力を加えこれに対する運動制御系の応答を観察する。実験における機体の運動の様子を Fig. 3.5.2 に示す。

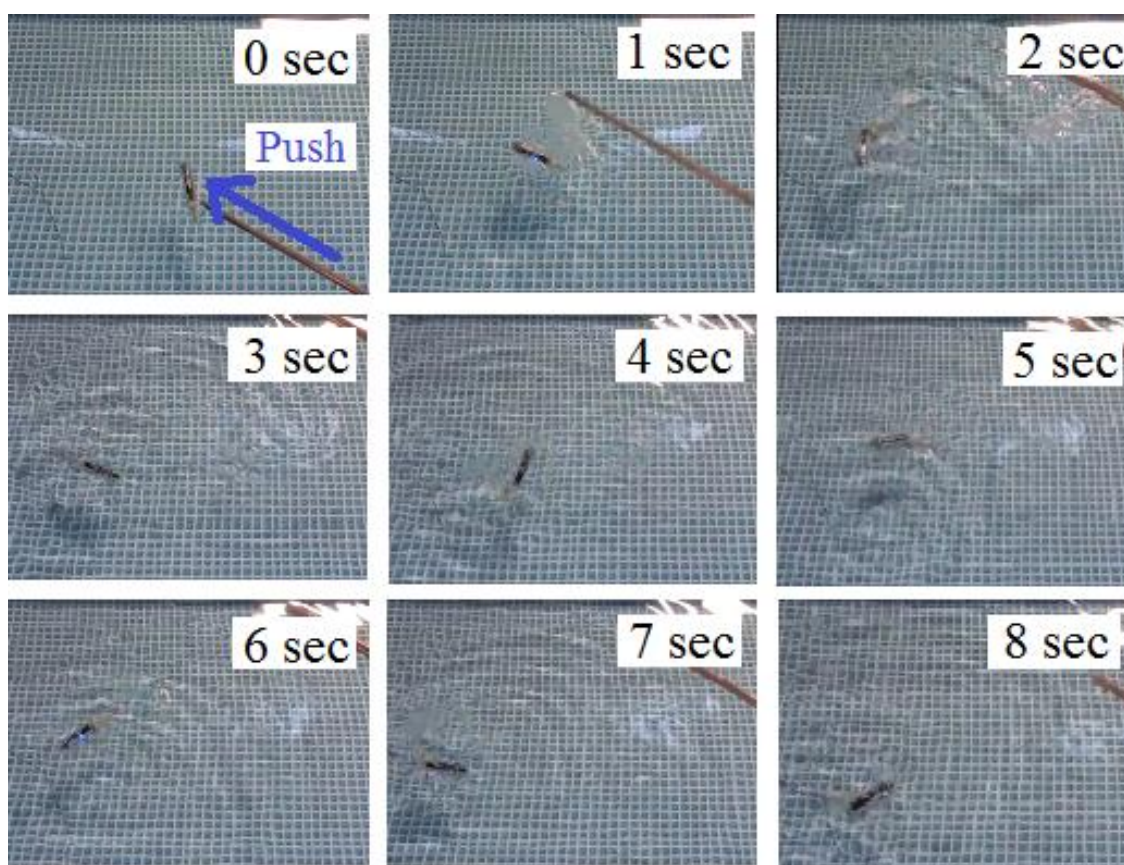


Fig. 3.5.2 Sequence of photos of robot which was given external force

Fig. 3.5.2 より、外力を与えてから2秒ほどで急旋回動作を実行していることが確認できた。その後、機体は慣性力により少しずつ前方に移動し、走流性に基づく運動制御プログラムに従い、その場での方向転換を繰り返し同じ場所を数回まわり続けた。加速度センサで計測されたサージとスウェイの加速度と、これを時間積分して導出した速度の時刻歴をそれぞれ Fig. 3.5.3 に示す。

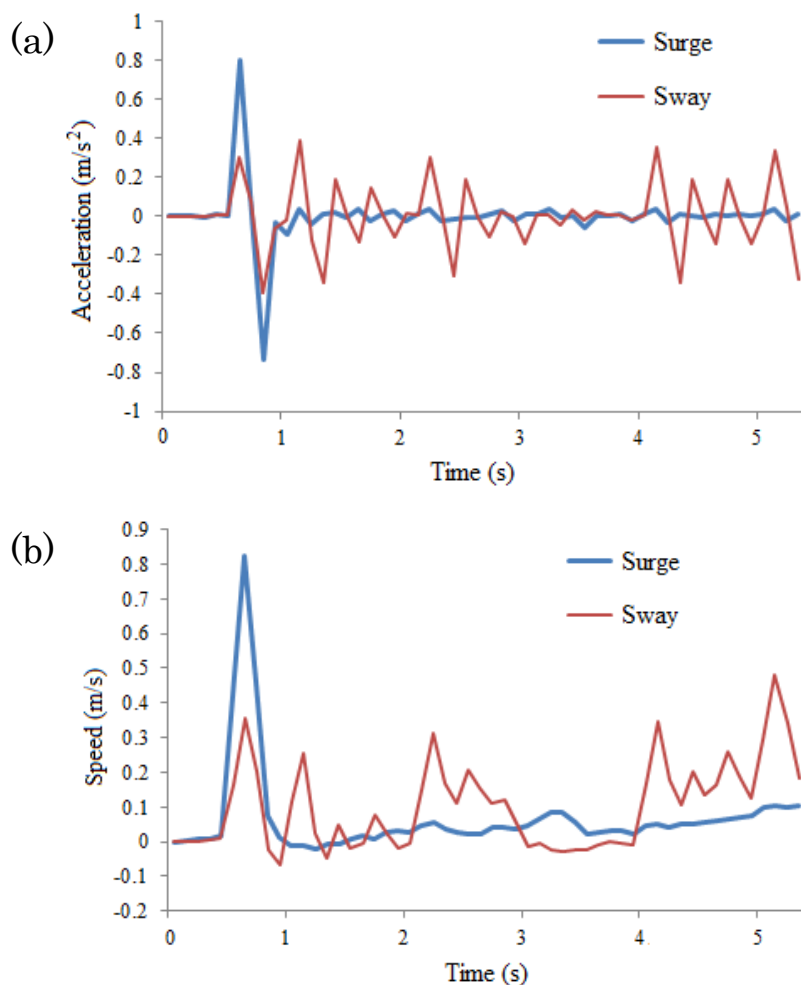


Fig. 3.5.3 (a) Acceleration of the robot which was given external force and (b) speed

Fig. 3.5.3(a)より、与えられた外乱による加減速度が確認できる。また、Fig. 3.5.3(b)では、横方向速度が正の方向に数回高くなっており、同じ方向の急旋回動作を数回実行していることが確認できる。また、動画を確認した限りでは機体の前進速度が特に増加していなかったのにもかかわらず、計測した加速度を積分して導出した機体の前進速度が徐々に増加していた。このことから、センサにより計測したデータを積分していくうえで誤差が増加していると予想できる。よって、この誤差の影響を低減するために、制御プログラムを何秒かに一度リセットする必要があると思われたため、Fig. 3.3.3のフローチャートにおいてプログラムが10回ループしたときに加速度と角速度のデータをリセットするようにした。

3.5.2 実水域における運動制御実験

運動制御用センサとビデオカメラを搭載した機体を、流れのある実水域に投入し、その水域で水生生物が泳動する様子を撮影する。同時に、機体の泳動運動の様子を別のビデオカメラで撮影し、周りの水生生物の機体に対する反応を確認する。

実験対象水域として、福岡県糟屋郡久山町大字猪野の大照皇大神宮内の水路を選んだ。ここでは多数のニシキゴイが飼育されており、ニシキゴイの明確な色彩は実験後の映像解析の際に好都合である。水路の際にビデオカメラを設置し、機体を水路に投入して周りのニシキゴイとともに泳動させた。機体には走流性に基づく泳動制御プログラムを搭載している。このときの機体の泳動の様子を Fig. 3.5.4 に示す。

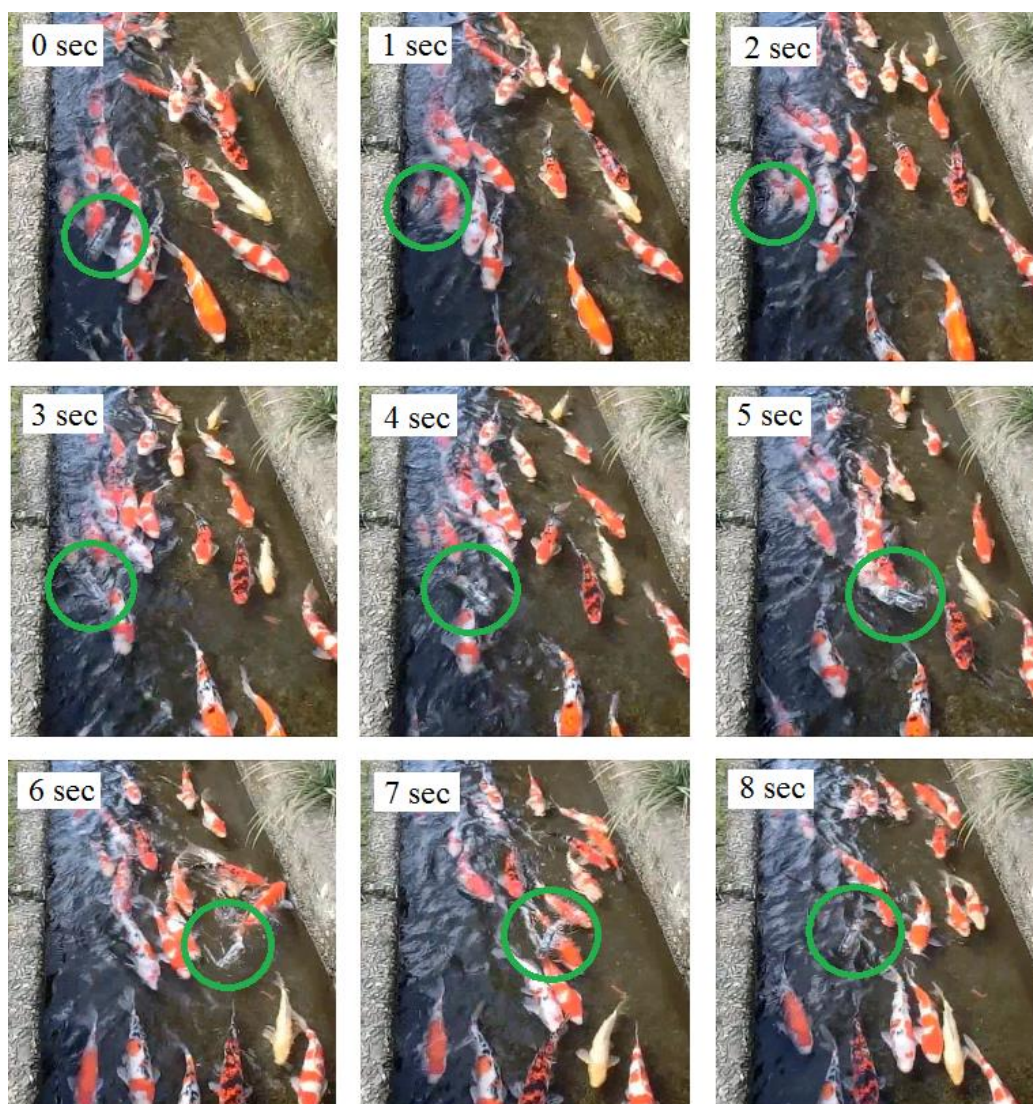


Fig. 3.5.4 Sequence of photos of the fish type robot with carp

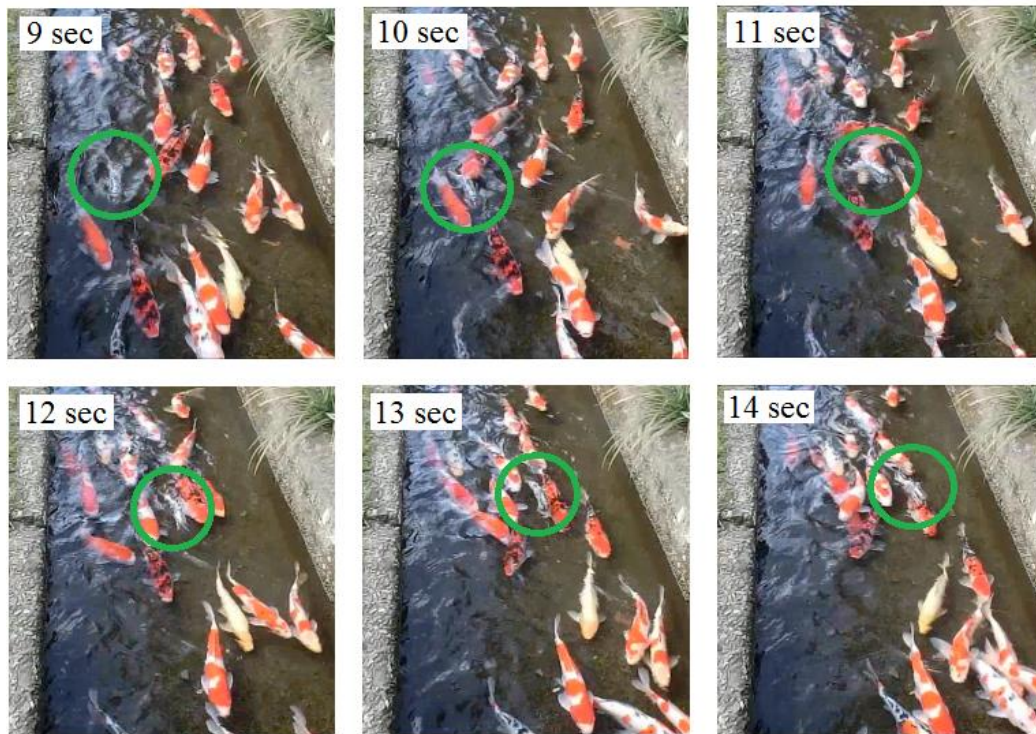


Fig. 3.5.4 Sequence of photos of the fish-type robot with carp (continued)

Fig. 3.5.4において、動作開始から5~6secの間に機体の横すべり角が急激に変化している。これは、機体の方位角が目標値から大きく離れた際に、機体が急旋回動作を実行したものであると考えられる。また、6secの画像では機体の近くにいたニシキゴイが逃避行動をとっていることが確認できるが、他の画像では機体の周りのニシキゴイが機体を避けている様子は特に確認できなかった。このことから、急旋回動作のような激しい動きをした場合はニシキゴイが驚いて逃避行動をとるが、通常の前進泳動時にはニシキゴイを驚かせることが少なく、本ロボットを用いることで観測対象に影響を与えずに、その行動を記録することが可能であると考えられる。機体に搭載したビデオカメラから撮影したニシキゴイの動画のスナップを Fig. 3.5.5 に示す。



Fig. 3.5.5 Carp which were photographed from the fish-type robot

機体に搭載したビデオカメラは頭部内に完全に固定されていたため、泳動に伴ってカメラが激しく動き、ビデオ映像の画質低下が発生した。今後は、搭載するビデオカメラの動きをサーボモータ等により制御し、映像のブレを補正する必要がある。

3.6 泳動機構周りに発生する吸い込み流の検討

魚類型ロボットは通常のスラスト駆動型ロボットとは異なり、推進器となる部位が体と独立した回転運動を行わない。等速回転運動により発生する、推進器の周りの流れは定常状態に近いものとなり、その方向は正負逆転することなく発生し続ける。すると、強い吸い込み流が形成され、これにより周りの異物や生物が巻き込まれることとなる。一方、魚類型ロボットの泳動における胴体の運動では機体周りに発生する圧力差の切り替わりの周期が非常に短いため、定常的な吸い込み流がほとんど発生しないと考えられる。魚類型泳動機構及びスラストにおける機構周りの圧力分布と流れの様子を表す概念図[22]を Fig. 3.6.1 に示す。

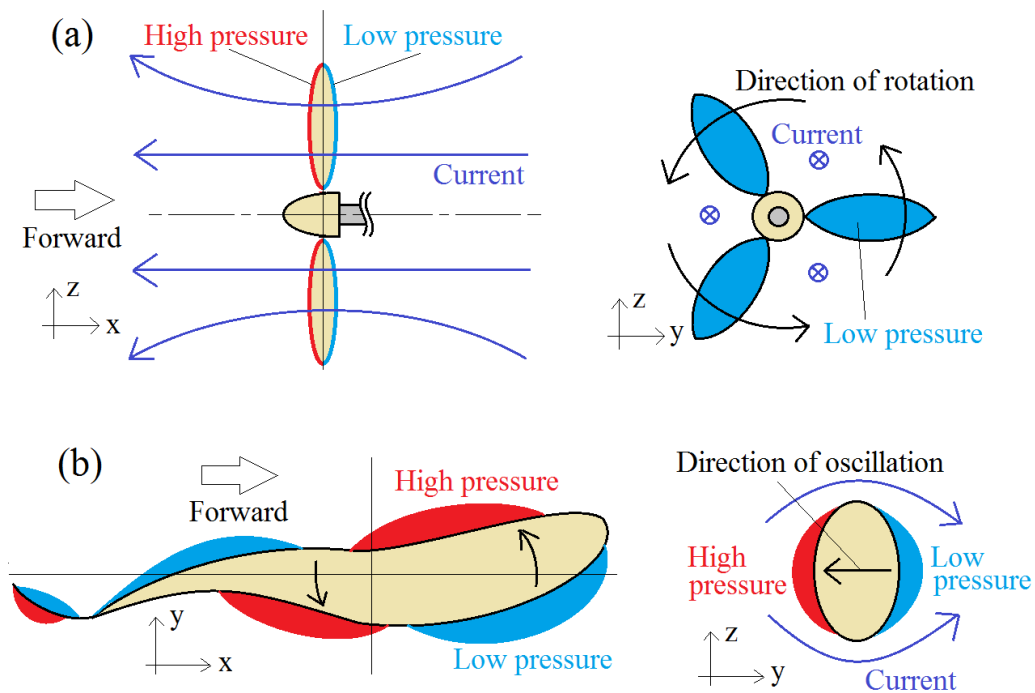


Fig. 3.6.1 (a) Flow and pressure around a thruster and (b) a fish-type swimming mechanism

スラストでは翼の前面が低圧、後面が高圧となり、翼の間を抜けるような強い流れが発生する。実水域に生息する遊泳能力の低い水生生物はこの流れに抗うことができず吸い込まれ、回転する翼にぶつかって死傷する場合もある。一方で魚類型ロボットの泳動機構周りの圧力分布は、短い周期でその正負が切り替わるため、機構に向かうような吸い込み流がほとんど発生しないと考えられる。また、スラストの翼端は薄く尖っており、水生生物に接触すると致命傷を与える可能性が高いが、魚類型泳動機構の側面は滑らか

な形状をしているため、水生生物に接触しても致命傷を与える可能性は低いと予想される。

次に、魚類型ロボットとスラスト駆動型ロボットを浮遊障害物が多数投入された水槽で駆動させ、それぞれの泳動機構の吸い込み流による異物巻き込みの状況を調査する。ここでは、縦 3m、横 2m、深さ 0.75m の水槽の長辺（約 3m）に沿って、それぞれの機体を 50 回ずつ航行させ、推進機構に浮遊物が絡んだ回数を記録し、推進機構に異物が絡まる確率を導出する。実験で使用する浮遊障害物として、ポリエチレン製の模造海藻を製作し、約 4.8kg を水槽に投入した。製作した模造海藻と、模造海藻が投入された水槽の様子を Fig. 3.7.1 に示す。

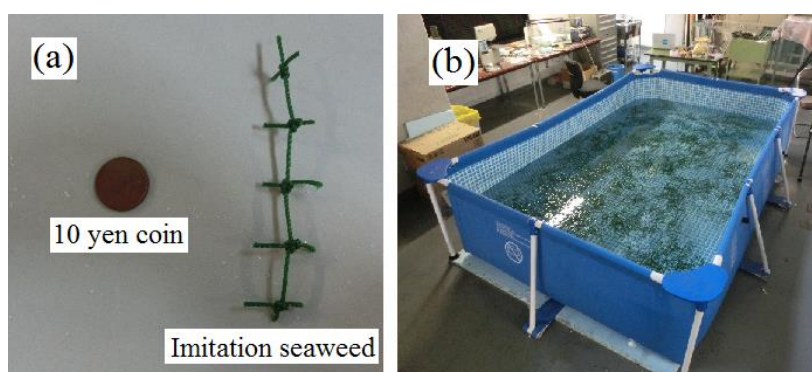


Fig. 3.7.1 (a) Imitation seaweed and (b) water tank containing the imitation seaweed

ポリエチレンの比重は水より小さいため、模造海藻はすべて水面に浮いた状態であり、使用する 2 機のロボットは、常に水面直下を推進する

実験に使用するスラスト駆動型ロボットの内部配置と外観を Fig. 3.7.2 に示す。機体の全長は 365mm、空中重量は 792g であり、最大前進速度は 0.46m/sec である。

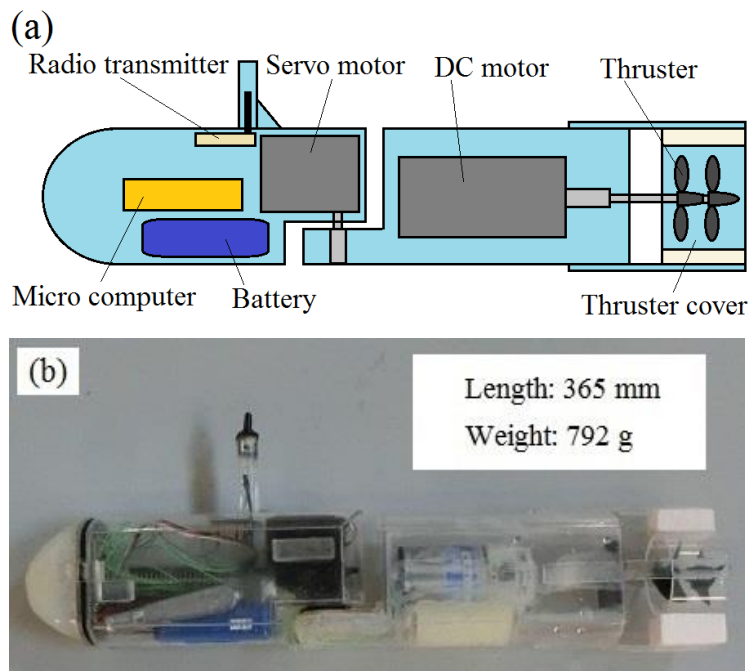


Fig. 3.7.2 (a) Arrangement of the thruster-type robot and (b) the photograph

魚類型ロボットとスラスタ駆動型ロボットを水槽に投入して、水槽長辺方向への合計 50 回の試行を実施した。実験では一回ごとに機体を水面から引き揚げて推進機構の状態を確認し、機構に模造海藻が絡まっていた場合はそれを取り除いてから機体と取り除いた模造海藻を水槽に再投入する。推進機構に模造海藻が絡まった回数を記録しその発生確率を導出した。実験の概念図を Fig. 3.7.3 に、スラスタ型推進機構に模造海藻が絡まった状態の写真を Fig. 3.7.4 に示す。

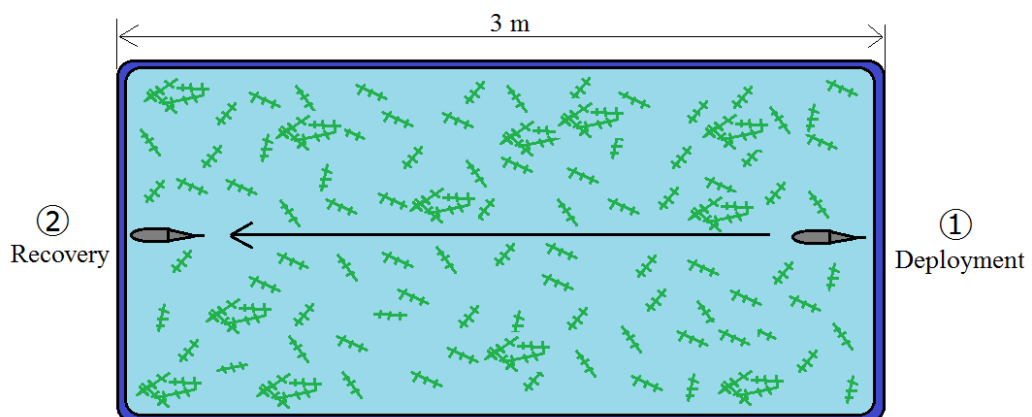


Fig. 3.7.3 Conceptual diagram of experiment with imitation seaweed



Fig. 3.7.4 Entangled imitation seaweed in thruster

模造海藻の重みの影響等で機体が航行途中で進まなくなってしまった場合は、機体が停止した段階で機体を水面から引き揚げ、1回駆動とカウントした。それぞれの機体で模造海藻が機構に絡まる回数は魚類型ロボットで0回、スラスト駆動型ロボットで27回であった。すなわち、模造海藻が絡まる確率は魚類型ロボットで0%、スラスト駆動型ロボットで54%となった。以上の結果より、障害物が多く浮遊している水域における魚類型ロボットの有用性が確認できた。

3.7 結言

本章では魚類型ロボットによる実水域での機体の自律制御とこれによる生物観測を目的とし、機体の運動制御方法を検討し、これに必要なセンサ類及び小型ビデオカメラを既存の機体に搭載して実水域で泳動させ、また海藻やゴミなどが多く存在する水域を想定した吸い込み流に関する実験を実施した。

機体の運動制御方法として、実際の魚類の習性を参考に、走流性に基づく制御系を導入し、観測対象の水生生物への影響を低減し、効率良く観測を実施するための方策を検討した。加速度センサとジャイロセンサを機体に搭載し、水槽において外乱下の機体の応答を確認した。水槽実験では、外乱を加えた後、約2秒で急旋回動作が行われることが確認された。

次に、機体に小型カメラを搭載して実水域での運動制御とそこに生息する水生生物の撮影を試みた。実験の結果、徐々に流れに負けて機体が下流に流されていったため、走流行動を再現できたのは最初の数秒のみであった。通常の前進泳動時には観測対象のニシキゴイを驚かせることがないため、ニシキゴイに急接近して撮影することが出来た。

さらに、吸い込み流が発生しないという生物模倣型ロボットの利点に着目し、海藻やゴミなどの浮遊物が多く存在する水域を想定した水槽実験を実施した。魚類型ロボットと新たに製作したスラスト駆動型ロボットを使用した結果より、模造海藻が推進機構に絡まる確率は魚類型ロボットで0%、スラスト駆動型ロボットで54%となり、浮遊物が多く存在する水域において魚類型ロボットが有用であると判断できる。

第4章 高速振動型魚類型泳動機構の開発

4.1 緒言

第2章において、複雑な流れが存在する水域において水生生物の観測を実施するために、急旋回性能に優れる魚類型ロボットの開発を実施した。本章では、速い流れの存在する水域で航行できるよう、十分な推進性能を有する機体を実現するために、新たな泳動機構を採用し、その性能について調査する。すなわち、高速で胴体及び尾鰭を振動させる魚類型泳動機構の開発を行う。

はじめに、第2章で調査した魚類の泳動方式の中から、**Carangiform** と **Subcarangiform** の泳動に注目し、それぞれの泳動方式を用いる魚類の泳動振動数について、魚種ごとの泳動振動数の過去データと泳動数の推定式を用いて検討する。それぞれの泳動方式の動作と理想的な泳動振動数を実現するための泳動機構として、直流モータをアクチュエータとして用いた新たな泳動機構を考案・製作し、その泳動性能を水槽実験により調査する。

次に、**Carangiform** と **Subcarangiform** の泳動を模したそれぞれの泳動機構の推進力を細長体理論に基づき推定し、水槽実験において、機体の最高前進速度と消費電力を計測する。また、機体頭部と尾鰭後端の幅方向振幅を計測し、振幅の大きさが前進性能に与える影響について調査する。

4.2 高速振動型泳動機構のための泳動方式

第2章で述べた魚類の体型と泳動方式の分類によれば、前進及び加速性能に優れる泳動機構に対し、機体形状は流線型の体型である紡錘型が、泳動方式は広義の意味での Carangiform mode (アジ型推進) が適していると考えられる。広義の Carangiform mode は更に Subcarangiform mode、Carangiform mode (以下、狭義の意味で使用)、Thunniform mode の3とおりに分類できる。

この中で、Thunniform mode はアスペクト比と剛性が高い尾鰭を高速で振動させることで発生する揚力により推進する泳動方式である。調査した全ての泳動方式において最も高い最高前進速度を得ることができると考えられ[27]、過去に様々な研究機関においてこの泳動方式を模倣した泳動機構及びロボットの研究開発が行われてきた[11, 12]。この Thunniform mode は高い前進性能が期待できる反面、加速が遅いといった欠点があるため、本研究の目的とする前進及び加速性能に優れる泳動機構への導入には不向きである。一方で Carangiform mode と Subcarangiform mode は Thunniform mode に比べて前進速度性能は劣るものの、加速や旋回においてもある程度高い性能が期待できるため、ここでは Carangiform mode と Subcarangiform mode に焦点を当てて泳動機構の開発に取り組む。

4.3 魚類の泳動振動数に関する考察

ここでは、開発する泳動機構のおおよその駆動振動数を設定するために、Carangiform mode 及び Subcarangiform mode で泳動する実際の魚類の泳動振動数について調査する。

魚類の遊泳速度の段階は詳細には 6 段階に分類される [56]。以下に、その分類と魚体の筋肉の機能分業を示す。

- 1) 最小持続速度 (Minimum speed) : 魚体の沈下を防ぐことができる最小の揚力を得るための前進速度
- 2) 持続速度 (Sustainable speed) : 血合筋 (魚類特有の暗赤褐色の筋肉) のみを用いた疲労しない前進速度。通常的生活ではこの速度段階が使われる。
- 3) 最大持続速度 (Maximum sustainable speed) : 血合筋のみを用いた遊泳の境界前進速度
- 4) 中間速度 (Prolonged speed) : 普通筋が関与し、速度に応じて持続時間が減少する前進速度
- 5) 突進速度 (Burst speed) : 普通筋が主体の瞬間的な高速遊泳前進速度。摂餌行動や危険回避の際に用いられる。
- 6) 最大遊泳速度 (Maximum speed) : 魚体の筋肉の能力として理論的な最高前進速度

この分類において、最も高い前進速度は最大遊泳速度 (Maximum speed) であるが、これはあくまで理論的に可能とされている前進速度であり、実際の魚類を観察することで確認できる可能性は低いとされ、魚類の瞬発的な動作について研究している論文では主に、突進速度 (Burst speed) を扱っている。よって、本研究においても実際の魚類の突進速度のデータをもとに、突進速度について魚類の泳動振動数を導出する。

魚類全般に適用されている泳動数 [57] の値をもとに、Carangiform mode 及び Subcarangiform mode で泳動する魚類の泳動振動数を求めよることを考える。泳動数を S_w とすると、

$$S_w = \frac{U_{fish}}{f_{fish} l_{fish}} \quad (4.3.1)$$

となり、

U_{fish} : 対象魚種の前進速度
 f_{fish} : 対象魚種の泳動振動数
 l_{fish} : 対象魚種の全長

である。すなわち、対象魚種の泳動数及び前進速度と全長が分かれば、泳動振動数を推定することができる。ここでは、 U_{fish} に対象魚種の突進速度を用いることで、突進泳動時の泳動振動数を導出する。

ここでは、Carangiform mode で泳動する魚種としてマアジを、Subcarangiform mode で泳動する魚種としてウグイとフナを採用し、それぞれの魚種における突進速度、全長、泳動数の平均値のデータを過去の研究[58-60]を基に設定した。Table 4.3.1 に、それらの値と、式(4.3.1)により導出した泳動振動数を示す。

Table 4.3.1 Swimming number of fishes

Species	S_w	U_{fish}/l_{fish} (BL/sec)	f_{fish} (Hz)
Japanese horse mackerel	0.76	4.5	5.92
Chub	0.63	19.5	30.95
Crucian carp	0.61	6	9.84

Table 4.3.1 において、突進速度は魚体長倍速度(Body length / sec)で表している。またこの表において、泳動振動数 f_{fish} の最小値はマアジの 5.92Hz であることから、開発する泳動機構は少なくとも 5~6Hz で駆動する必要がある。

4.4 高速振動型泳動機構の開発

ここでは、前節で選択した Carangiform mode 及び Subcarangiform mode の泳動動作を模倣した魚類型泳動機構の計画と製作を行い、その泳動性能について調査する。

4.4.3 Carangiform 型泳動機構の開発

前節で示したように、生物模倣型推進機構において高い推進性能を実現するためには 5Hz 以上の泳動振動数が必要である。第 2 章で使用した人工筋肉やサーボモータでこのような高周波数の泳動を実現することは難しく、また、現在入手可能なその他の人工筋肉やサーボモータにおいては、アクチュエータ自身を 5Hz で駆動することは可能であるが発生力が小さく、魚類型ロボットの泳動機構には不向きである。そこで、高速振動型泳動機構用のアクチュエータとして直流モータを採用し、これと新たに提案する泳動機構を組み合わせることにより高い推進性能を有する泳動機構の開発を試みる。製作に使用するツカサ電工製のギヤドモータ（ギヤによって回転数及び出力トルクを調整してある直流モータ）TG-85R-SU-13.2-KA の外観[60]を Fig. 4.4.1 に、仕様[61]を Table 4.4.1 に示す。



Fig. 4.4.1 Geared direct current motor “TG-85R-SU-13.2-KA”

Table 4.4.1 Specification of TG-85R-SU-13.2-KA

Speed	998 rpm (12V)
Torque	1.7 kg·cm (12V)
Size	φ37×75mm
Weight	302 g
Reduction ratio	1/13.2

Carangiform mode による泳動は Subcarangiform mode に比べて胴体前半分の横運動の振幅が小さいため、直流モータを搭載した Carangiform 型泳動機構は機体後半部のみを駆動させる機構とした。製作する機構の構造を Fig. 4.4.2 に示す。

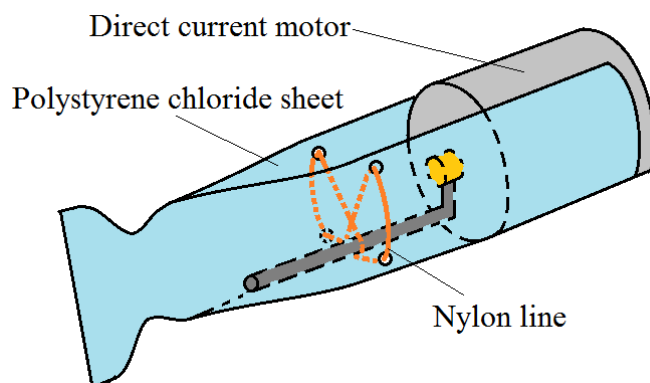


Fig. 4.4.2 Structure of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion

本泳動機構は直流モータのシャフト部分に接続された L 字型の金属棒と機構側面の塩化ビニルシート、および 2 本の環状のナイロンラインによって構成される。本機構は構造が簡単であり、機体に搭載した場合に泳動機構のメンテナンスや修理が容易である。本機構の駆動原理の概念図を Fig. 4.4.3 に示す。

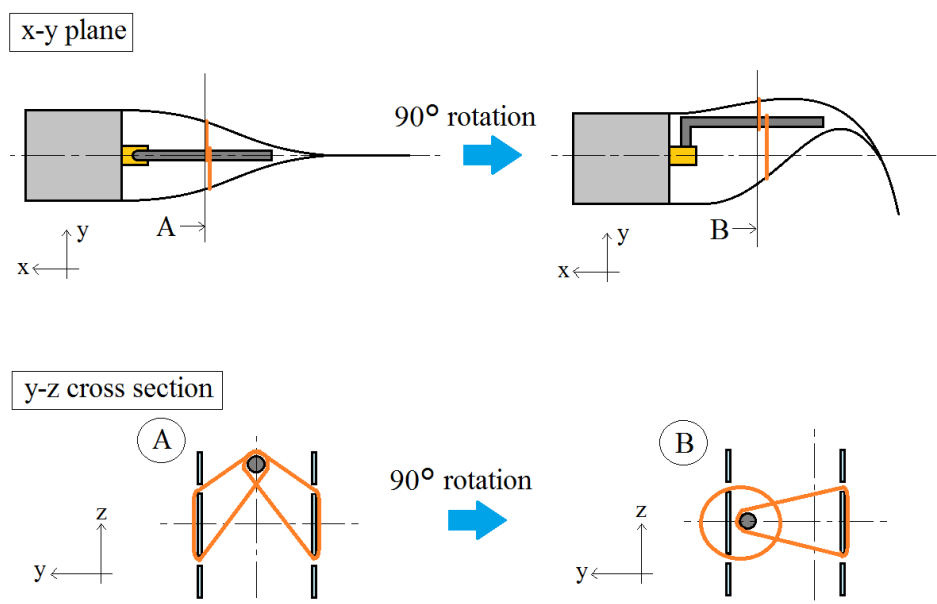


Fig. 4.4.3 Operation principle of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion

Fig. 4.4.3 左の A 断面図には、L 字型金属棒が機体中心線上に位置する基準状態を示している。この状態では左右の塩化ビニルシートは機構の中心線からみて線対称の位置にあるが、直流モータのシャフトが 90° 回転した B 断面図の状態では、2 枚の塩化ビニルシートのうち片側一枚は L 字型の金属棒によって押され、もう片方は環状のナイロンラインによって引っ張られるため、2 枚の塩化ビニルシートが片側へ移動する。直流モータのシャフトが回転し続けることによってこれらの動作が左右交互に発生し、魚類の泳動に近い挙動を示す。製作した泳動機構の最大駆動振動数は約 16Hz となり、目標とした駆動振動数 5.92Hz 以上を達成した。ビデオカメラのハイスピードモードにより撮影した、本泳動機構を水中において 16Hz で駆動させた場合の様子を、Fig. 4.4.4 に示す。Fig. 4.4.4 を見ると、泳動機構の形状が魚類が泳動するときの胴体後半部の形状に似ていることがわかる。

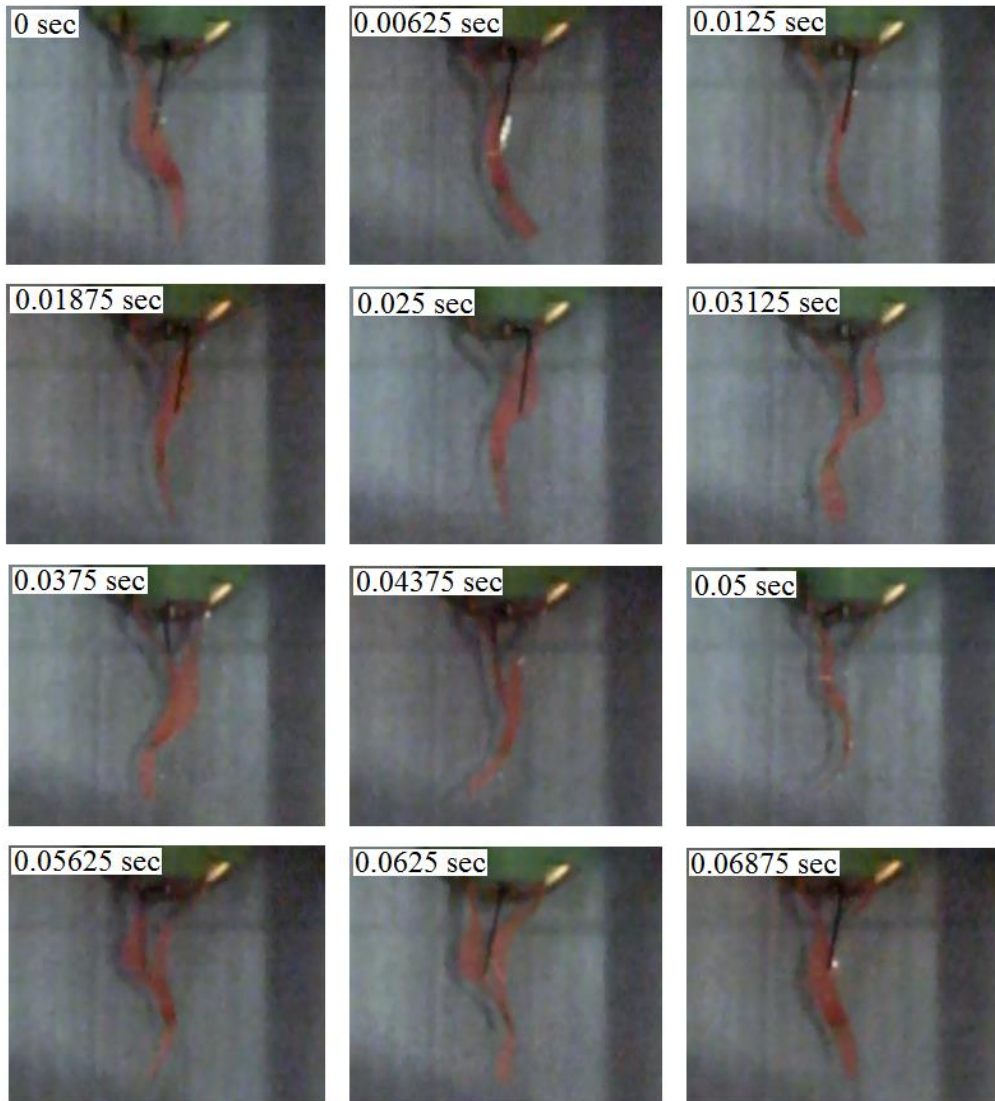


Fig. 4.4.4 Sequence of photos of swimming mechanism imitating carangiform swimming motion

4.4.2 Subcarangiform 型泳動機構の開発

Subcarangiform 型泳動機構においても Carangiform 型泳動機構と同様に高周波数の泳動を実現するために、アクチュエータに同様の直流モータを使用する。Subcarangiform mode は Carangiform mode に比べて胴体前半分の横運動の振幅が大きいため、機体前半部と後半部の両方を駆動させる機構とした。製作する泳動機構の構造を Fig. 4.4.5 に示す。

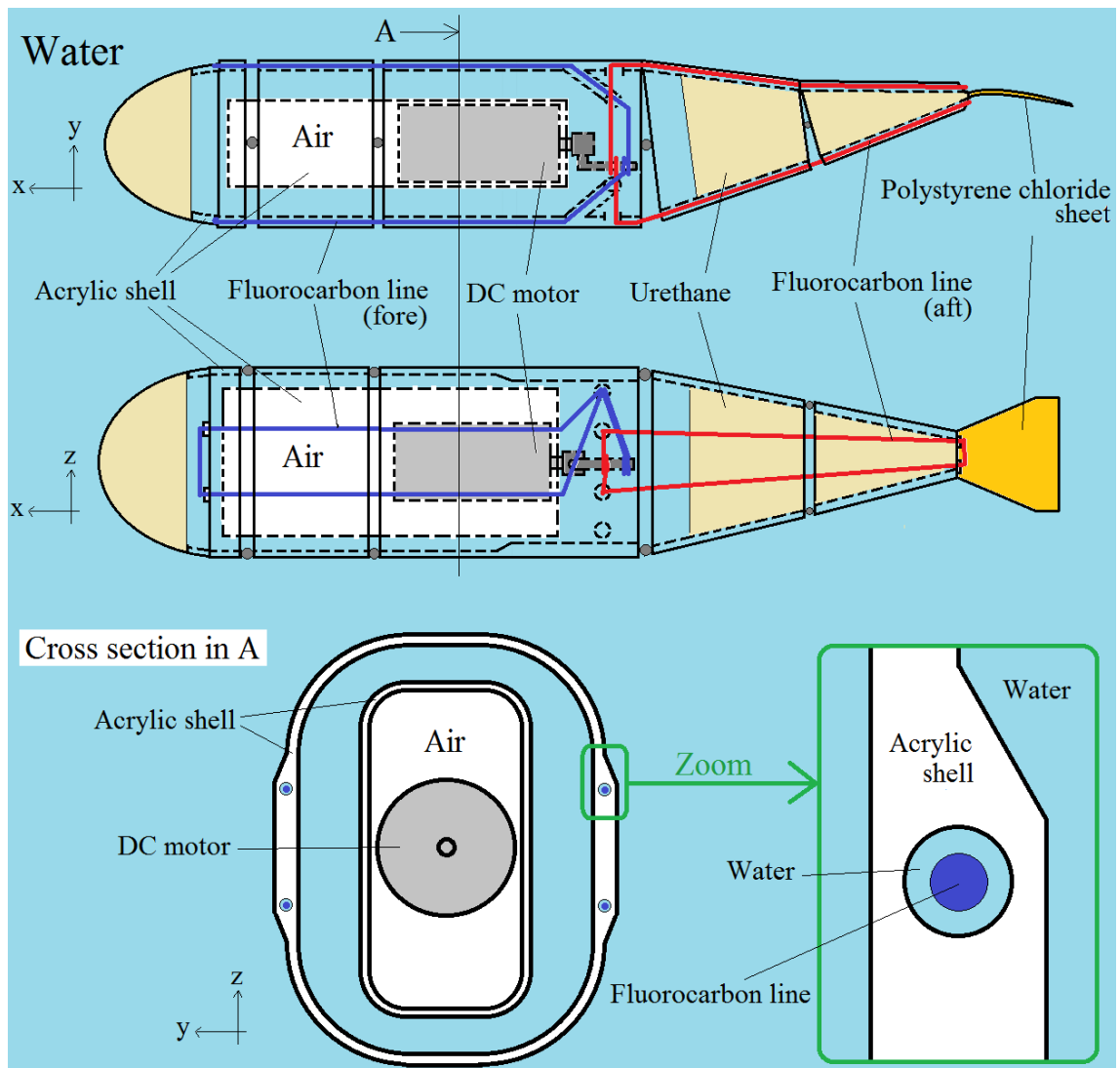


Fig. 4.4.5 Structure of swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion

機体前半部と後半部は同一の直流モータによって駆動する。魚体形状を模したアクリル製の外殻の両横に穴をあけ、その穴に環状のラインを通す。このラインにより外殻と直流モータのシャフトが連動しており、直流モータ駆動させることで両横のラインを交互に引っ張り、外殻を動かすことができる。また、実際の魚類の泳動においては頭部から尾鰭に向かって魚体横運動の位相がずれていくが、この泳動機構ではその位相のずれを再現するためにモータのシャフトでラインを引っ張る向きをずらしている。Subcarangiform 型の駆動原理は Carangiform 型泳動機構とほとんど同じであるが、図中青色の環状ラインにより 2 箇所関節を用いて機体前半部を振動させる点で異なる。本機構では赤色で示された機体後半部の環状のラインに、Carangiform 型泳動機構に比べて大きな摩擦が働くため、機構駆動時に発生する摩擦を考慮して、摩擦と引っ張りの両方に強いフロロカーボンラインを使用する。製作した泳動機構を Fig. 4.4.6 に示す。

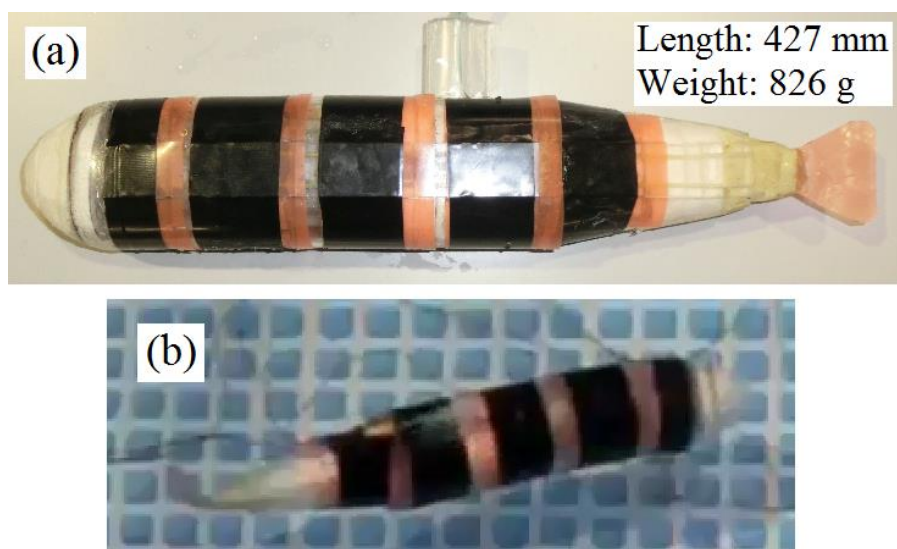


Fig. 4.4.6 (a) Swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion and (b) Swimming test in a tank

機体は全長 427mm、空中重量 826g であり、機体前半部と後半部の両方を同時に駆動した場合の振動数の最大値は約 6.7Hz である。これは、目標とした駆動振動数 5.92Hz を上回る。製作した泳動機構を水中において 6.7Hz で泳動させた様子を、ビデオカメラのハイスピードモードにより撮影した。このときの泳動機構の挙動を Fig. 4.4.7 に示す。Fig. 4.4.7 を見ると、機体前半部と後半部が駆動していることが確認でき、また実際の魚類の泳動における前半部と後半部の位相差が再現できていることがわかる。

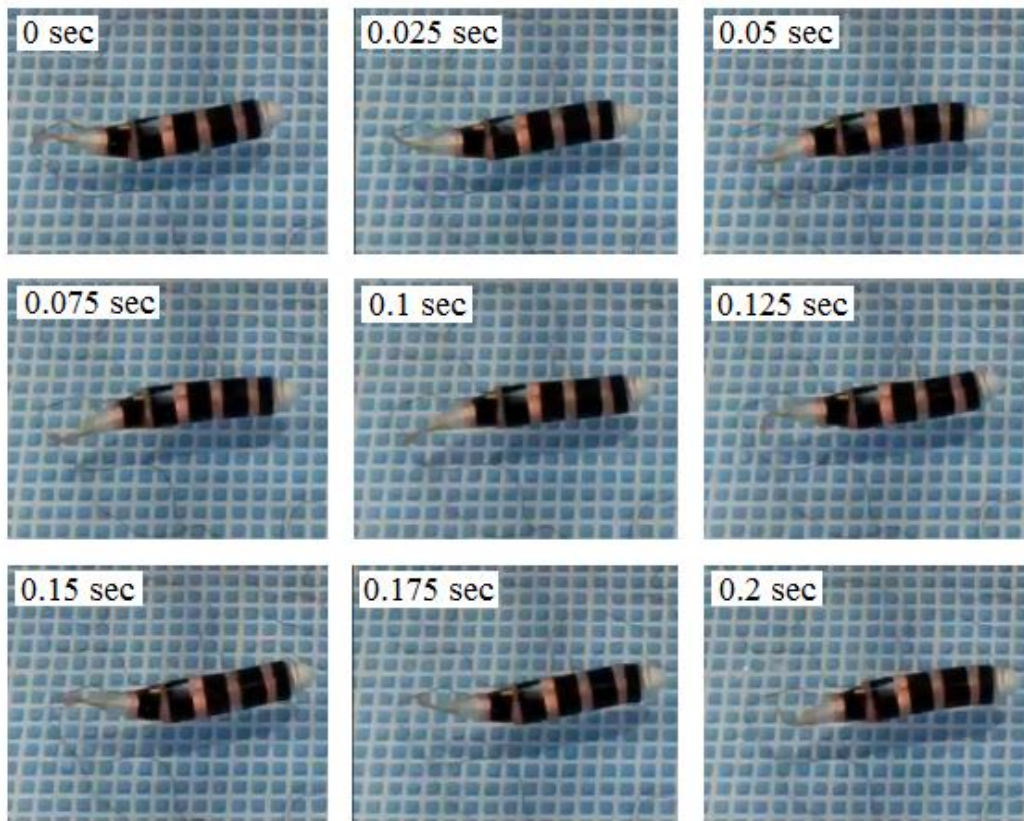


Fig. 4.4.7 Sequence of photos of swimming mechanism imitating subcarangiform swimming motion

4.5 高速振動型泳動機構の性能評価

ここでは、製作した Carangiform 型及び Subcarangiform 型泳動機構の推進力の推定と最高前進速度の計測を行う。第 2 章と同様に、推進力は細長体理論に基づき推定し、最高前進速度は泳動の動画を解析して計測した。また、両機構が水中で泳動の消費電力を計測した。

4.5.1 Carangiform 型泳動機構の推進力推定と泳動実験

実験で使用する Carangiform 型泳動機構を搭載した魚類型ロボットを Fig. 4.5.1 に示す。機体の全長 345mm、空中重量は 597g である。

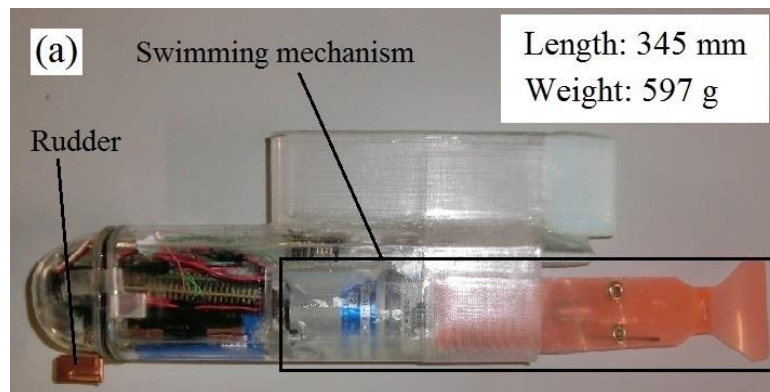


Fig. 4.5.1 Carangiform type robot

推進機構の 1 周期中の平均推進力は、第 2 章で述べた細長体理論により計算する。また、最高前進速度は泳動動画の解析により計測する。また、水中で泳動中の消費電力を計測するために、機体内の配線を外部に延長し、電源装置により推進機構を駆動する。このようにして測定された電流と電圧の積を消費電力とした。Fig. 4.5.2 に計算により推定した平均推力と実験により計測した最高前進速度及び消費電力を駆動振動数に対し示す。

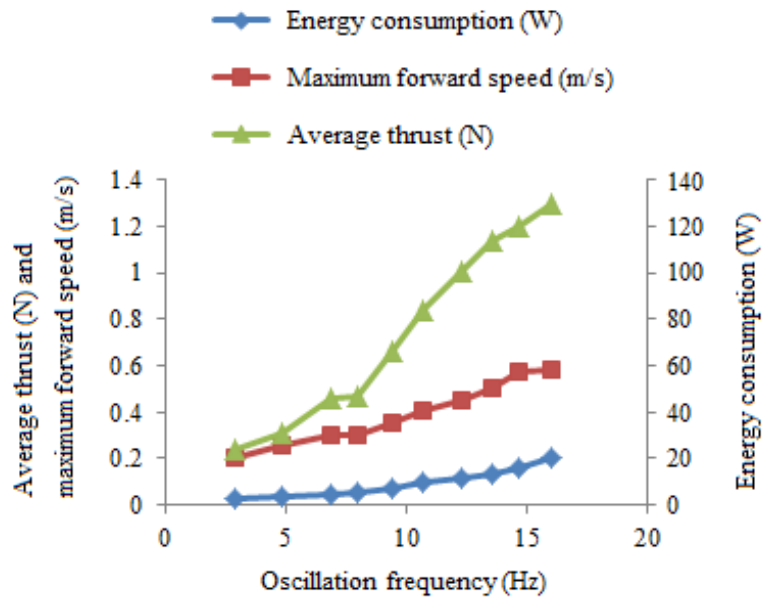


Fig. 4.5.2 Energy consumption, maximum forward speed and calculated average thrust of the swimming mechanism imitating carangiform swimming motion

水槽実験において最も速い前進速度を記録したのは駆動振動数が 16Hz の場合で、そのときの最高前進速度は 0.58m/sec となり、魚体長倍速度に直すと 1.68BL/sec になった。また、このときに動作開始から最高前進速度に達するまでの時間は約 1.5sec であり、消費電力は約 20W となった。最高前進速度を消費電力で割った値を単位エネルギー当たりの前進距離とすると、この値は駆動振動数 2.9~16Hz において駆動振動数が小さいほど高くなることが確認できた。図を見ると、駆動振動数の増加とともに消費電力、最高前進速度、平均推進力の全てが増加しているが、駆動振動数が 8Hz のところで平均推進力と最高前進速度の増加量が小さくなっていることが確認できる。このように、魚類型泳動機構の駆動振動数を増やしていったときに、ある特定の駆動振動数になると推進力の増加量が下がる現象は Vladislav ら[62]により実験的に確認されている。

Lighthill[63]は、理想的な魚類の定常泳動に関して、魚体中心線の体幅方向振幅は魚体後半部で大きく前半部で小さいことを条件としている。そこで、開発した Carangiform 型泳動機構が、この条件に当てはまっているかを水槽実験結果より確認する。泳動中の機体の前端と尾鰭後端の体幅方向振幅の計測結果を Fig. 4.5.3 に示す。

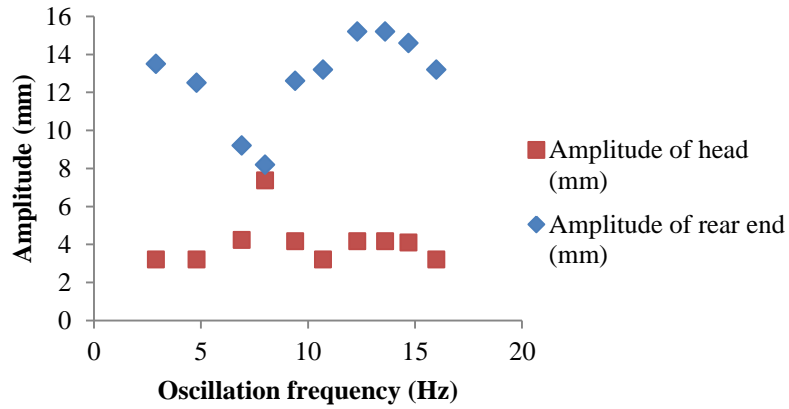


Fig. 4.5.3 Measured amplitude of head and rear end of the robot imitating carangiform swimming motion

Fig. 4.5.3 を見ると、全ての駆動振動数において機体頭部よりも尾鰭後端の方が振幅が大きいことが確認できるが、駆動振動数が 8Hz の場合には機体頭部の振幅が極端に大きくなると同時に尾鰭後端の振幅が極端に小さくなっていることがわかる。このため、8Hz 付近では前述の Lighthill が唱える理想的な魚類の定常泳動の条件が満足されておらず、この駆動振動数付近で平均推進力及び最高前進速度の増加量が減少していると考えられる。

4.5.2 Subcarangiform 型泳動機構の推進力推定と泳動実験

Carangiform 型泳動機構の推進力推定と泳動実験と同様な方法により、Subcarangiform 型泳動機構の推進性能を調査する。Fig. 4.5.4 に推定した平均推進力と計測した最高前進速度及び消費電力を駆動振動数に対し示す。

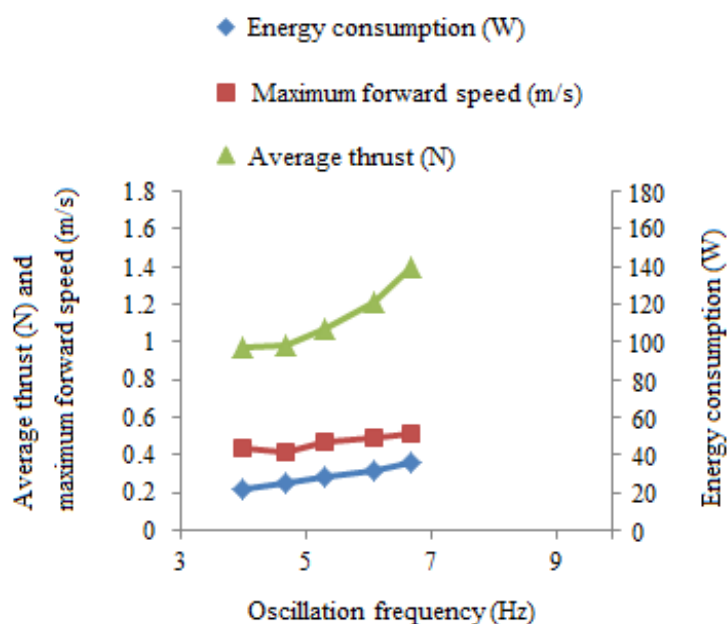


Fig. 4.5.4 Energy consumption, maximum forward speed and calculated average thrust of subcarangiform swimming mechanism

実験において最も速い前進速度を記録したのは駆動振動数が 6.7Hz の場合で、そのときの最高前進速度は 0.5m/sec であった。これを魚体長倍速度に直すと 1.17BL/sec となる。また、このときに泳動開始から最高前進速度に達するまでの時間は約 4sec であり、消費電力は約 34W であった。一方、単位エネルギー当たりの前進距離は駆動振動数が小さいほど大きくなることが確認できた。駆動振動数の増加とともに消費電力と平均推力は増加しているが、最高前進速度は 4.7Hz の場合に減少しており、平均推進力も同じく 4.7Hz で増加量が小さくなっており、Carangiform 型泳動機構のときと同様に、ある特定の駆動振動数になると推進力の増加量が下がる現象が確認された。

次に、Subcarangiform 型泳動機構において機構前半部を駆動するためのラインを取り外すことで、機構後半部のみを駆動して同様の計算及び実験を行った。機構後半部のみを駆動させる場合、機構頭部の振幅が小さくなるため、泳動方式は Carangiform mode に近い動作になる。機構後半部のみを駆動させた場合における、平均推力の推定値と最高前進速度及び消費電力の計測値を駆動振動数に対し Fig. 4.5.5 に示す。

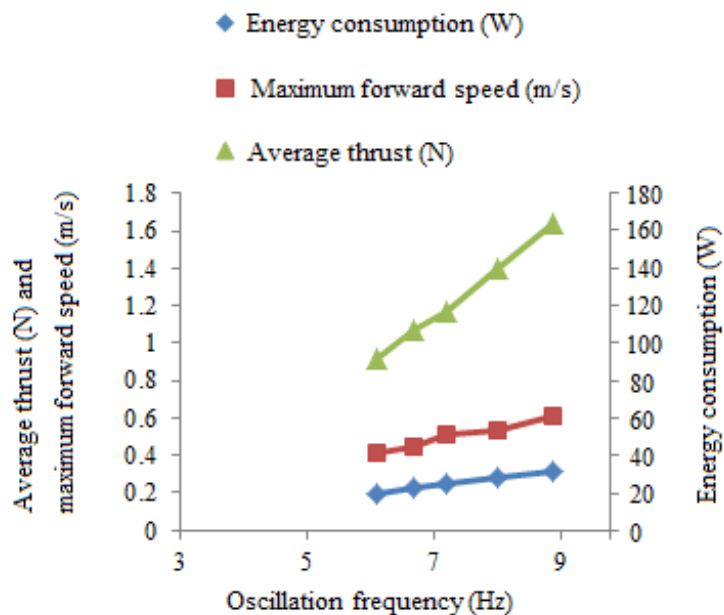


Fig. 4.5.5 Energy consumption, maximum forward speed and calculated average thrust of modified subcarangiform swimming mechanism

機構後半部のみを駆動することで、前後半部両方を駆動する場合に比べ直流モータにかかる負荷が小さくなり、泳動振動数を増加することが可能となる。最速の前進速度を記録したのは駆動振動数が 8.9Hz の場合で、そのときの最高前進速度は 0.6m/sec となり、魚体長倍速度に直すと 1.41BL/sec である。また、泳動開始から最高前進速度に達するまでの時間は約 4sec であり、消費電力は約 31W であった。単位エネルギー当たりの前進距離は、どの駆動振動数においてもさほど変化がなかった。この場合、駆動振動数の増加とともに消費電力、最高前進速度、平均推力はほぼ線形に増加する。最高前進速度においては、同じ駆動振動数で比較した場合には機構全体を駆動させたほうが高いが、同じ消費電力で比較した場合には機構後半部のみを駆動させたほうが高い前進速度が得られた。

Subcarangiform 型泳動機構を用いた機体の、頭部前端と尾鰭後端の体幅方向振幅の計測を行った結果を Fig. 4.5.6 に示す。

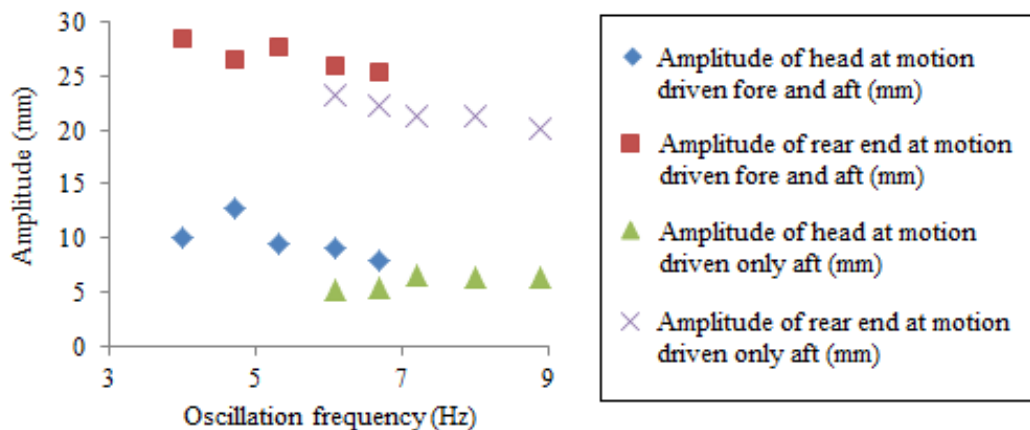


Fig. 4.5.6 Measured amplitude of head and rear end of swimming mechanism imitating subcarangiform swimming

Fig. 4.5.6を見ると、全ての駆動振動数において機体頭部よりも尾鰭後端のほうが振幅が大きいことが確認できる。ただし、機構の前後半部両方を駆動させた場合において、駆動振動数が 4.7Hz の場合に機体頭部の振幅が大きくなって尾鰭後端の振幅が小さくなっている。これは、Carangiform 型泳動機構の場合と同様に、Lighthill が唱える理想的な魚類の定常泳動の条件が満たされていないことを示しており、これにより最高前進速度が低下したと考えられる。

機構の前後半部両方を駆動させる場合と、機構の後半部のみを駆動させる場合とでは泳動方式が異なるので、それぞれの泳動方式における、前進及び加速の性能を比較する。それぞれの泳動方式の前進速度の時間歴を Fig. 4.5.7 に示す。

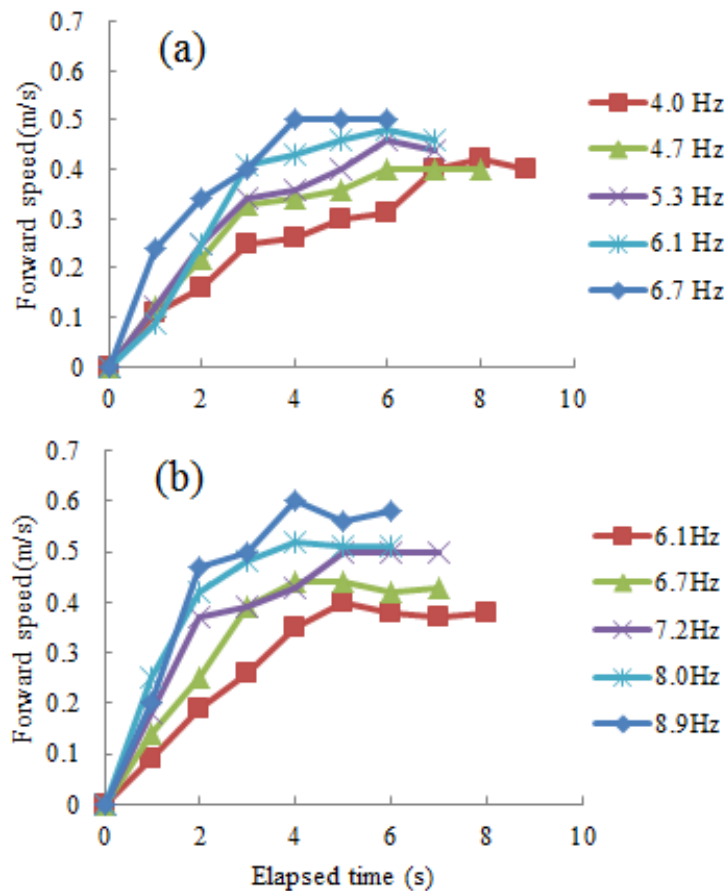


Fig. 4.5.7 (a) Time histories of measured forward speed of subcarangiform swimming mechanism and (b) that of modified mechanism

両者の駆動振動数が一致する 6.1Hz では、前後半部両方を駆動する場合の最高前進速度は 0.48m/sec、後半部のみを駆動させる場合で 0.4m/sec であった。同じく、駆動振動数 6.7Hz のときはそれぞれ 0.5m/sec と 0.44m/sec であった。また、機体が発進してから最高前進速度に達するまでの時間は、駆動振動数 6.1Hz のとき、機構の前後半部両方を駆動させる場合は 6sec、後半部のみを駆動させる場合は 5sec であった。また、駆動振動数が 6.7Hz のときは両者ともに 4sec であった。このことより、機構の前後半部両方を駆動させる場合と機構の後半部のみを駆動させる場合において、加速性能にさほど差はないが、最高前進速度は前後半部両方を駆動させる場合のほうが高い性能を発揮することが確認できた。

4.6 結言

本章では、最高前進速度と静止状態からの加速性能に優れた泳動機構を実現するため以下の調査を実施した。

はじめに、泳動機構に採用する魚類の泳動方式について検討した。多くの研究機関で研究開発されてきた **Thunniform mode** を模した泳動機構は本研究における泳動機構への導入には不向きであると判断したため、この加速と前進の動作に優れた機体として、本章では **Carangiform mode** と **Subcarangiform mode** の泳動方式を模した魚類型泳動機構を提案した。

まず、**Carangiform mode** と **Subcarangiform mode** の泳動方式を持つマアジ、ウグイ、フナの泳動振動数を、魚種ごとの泳動数データと泳動数の式を用いて推定した。その結果、導出した泳動振動数はマアジの **5.92Hz** が最小であり、製作する泳動機構は水中での駆動時に少なくともこの駆動振動数以上での駆動が可能である必要があると考えた。

Carangiform mode は **Subcarangiform mode** に比べて胴体前半分の横運動の振幅が小さいため、**Carangiform** 型泳動機構は機体後半部のみを駆動させる機構とした。製作した **Carangiform** 型泳動機構の最大駆動振動数は約 **16Hz** となり、**Subcarangiform** 型泳動機構の最大駆動振動数は、機構前後の駆動で **6.7Hz**、機構後半部のみの駆動で **8.9Hz** となり、それぞれの機構において条件の駆動振動数 **5.92Hz** 以上は満たすことができた。

次に、それぞれの泳動機構の推進力推定を細長体理論の式を用いて行い、水槽でそれぞれの泳動機構を泳動させ、最高前進速度及び消費電力を計測した。駆動振動数の増加とともに消費電力、最高前進速度、平均推進力の全てが増加しているが、平均推進力と最高前進速度においては駆動振動数が **8Hz** のところで増加量が小さくなっていることが確認できた。**Subcarangiform** 型泳動機構でも同様に、駆動振動数の増加とともに消費電力と平均推進力は増加しているが最高前進速度はある特定の駆動振動数のところで減少しており、平均推進力においては同じ駆動振動数のところで増加量が小さくなっていることが確認できた。また、**Subcarangiform** 型泳動機構において、機構前半部を駆動するためのフロロカーボンラインを切断することで、機構後半部のみの駆動で同様の計算及び実験を行った。機構の前後両方を駆動させる場合と機構の後半部のみを駆動させる場合において同じ駆動振動数で性能を比較したところ、加速性能にさほど差はないが、前進性能においては機構の前後両方を駆動させる場合のほうが高い性能を発揮することが確認できた。これらの結果より、機構の簡易さ、前進性能、加速性能、推進効率などの面から考えると、**Subcarangiform** 型泳動機構よりも **Carangiform** 型泳動機構のほうが優れており、**Subcarangiform** 型泳動機構において機構前後を駆動させる場合

と機構後半部のみを駆動させる場合で比べても、機構後半部のみを駆動させる場合つまり **Carangiform mode** の泳動に近い動作をさせる場合の方が前進性能及び推進効率が良いことが確認できたため、**Subcarangiform mode** よりも **Carangiform mode** の方が本章で目指す泳動機構に適していると判断した。また、**Lighthill** が唱える理想的な魚類の定常泳動では、魚体中心線の体幅方向振幅は魚体後半部で大きく前半部で小さいことを条件としており、この理想的な魚類の定常泳動の条件を満たしていないときの駆動振動数と、平均推進力及び最高前進速度の増加量が小さくなっているときの駆動振動数が一致していることが確認できたため、本章で使用した推進力の計算式は魚類型泳動機構において適切な駆動振動数を推定する際に有用であると考えられる。

第5章 結論

水中ロボットに用いられる様々な推進機構の中で、推進器による巻き込み事故や生態系への干渉に配慮して開発が実施されている生物模倣型の泳動機構について、その実用化のための検討を数種類の機体の製作に基づいて実施した。本研究では特に、一般的なスラスタを用いた水中ロボットでは実現が困難とされる急発進または急旋回動作を可能とするための推進機構の開発を目的として様々な観点より調査を行った。生物模倣型泳動機構によるこれらの動作の再現によって将来的に、複雑な流れを有する実海域での作業や調査において、水中ロボットの運用が可能になると期待される。本研究では主に2種類の生物模倣型水中ロボットを調査対象とした。1つは胴体と共に各部の鰭を駆動して旋回性能の向上を目指した機体であり、他方は機構の駆動振動数を高めて加速及び前進性能の向上を目指したものである。さらに、これらの機体について、その運動制御方法と障害物の巻き込みの発生についても調査した。

第1章では、緒論として、魚類型ロボット及び生物模倣型泳動機構の研究の背景と現状について述べるとともに、本研究の目的と各章の内容を示した。

第2章では、機体の胴体と共に各部の鰭を駆動するためにサーボモータと人工筋肉を併用した魚類型ロボットにおいて、アクチュエータの搭載スペースが大きい胴体には出力の高いサーボモータを搭載し、アクチュエータの搭載スペースが小さい尾鰭や胸鰭部に人工筋肉を搭載することで、機体の広い範囲を駆動させ泳動能力の向上を目指した。ここでは、まず鰭を持つ魚類の魚体の形状及び泳動方式の分類について調査し、必要とする泳動能力の再現に適した機体形状及び泳動方式を検討した。その結果、大洋を航行するための機体形状には紡錘型が、沿岸域や浅水域での使用を目的とする場合には側扁型やフグ型が適していることが示された。また、大洋を航行するための泳動方式には **Thunniform mode** が、沿岸域や浅水域での使用を目的とするならば **Subcarangiform mode** もしくは **Carangiform mode** が適していることを示した。次に、胸鰭及び尾鰭として機能する屈曲型フィン機構を考案し、使用する人工筋肉の仕様をもとに、フィン機構の材質、形状、人工筋肉の配置形状について検討した。製作したフィン機構とサーボモータを搭載する機体の設計及び製作を行い、その泳動性能を評価した。その結果、急旋回動作における機体の横すべり角の平均角速度は、フィン機構を使用した場合のほうが使用しない場合に比べて、約2.4倍増大することが確認できた。さらに、泳動性能の向上を目指すため胴体駆動用のサーボモータを追加した機体の泳動性能についても考察した。

以上の泳動性能は、細長体理論に基づく推進力の推定と、泳動実験による最高前進速度と急旋回時の平均回頭角速度の計測により評価した。数種類の胴体の駆動パターンについて推力を測定した結果、いずれのパターンの場合においても駆動周期が 0.3sec の

ときに最も高い平均推力が得られることが確認できた。ある特定の駆動周期で機体の推力が極大となる現象は、Lighthill による魚類の推進力推定論によって説明された。また、胴体の駆動パターンの違いによって得られる推力に差が生じる結果には、胴体の振動を加速する瞬間の尾鰭の角度が影響していることが明らかとなった。また、狭い水路で機体を 180° 方向転換させる状況を想定し、急旋回動作を 4 回連続で行う泳動の水槽試験を実施したところ、開発された機体は狭い水域での作業のための十分な旋回性能を有していることが確認された。

第 3 章では、第 2 章で開発した機体を用いた実水域での機体の自律制御と生物観測を目指し、機体の制御方法を検討し実水域での実験を実施した。また海藻やゴミなどの異物が多く浮遊する水域を想定した実験を実施した。

機体の運動制御系の開発においては、魚類の走流性に注目した運動制御方法を検討した。制御に使用するセンサとして加速度センサとジャイロセンサを機体に搭載し、水槽で機体に外力を与えた場合の機体の応答を水槽実験で確認した。その結果、機体に与えた外力とは逆方向へ方向転換する様子を確認した。

次に、機体に小型カメラを搭載して実水域での制御と、そこに生息する水生生物の撮影を試みた。実験の結果、機体の最大前進速度よりも周りの水流の速度のほうが若干上回っていたため、走流行動を再現できたのは最初の数秒のみであった。実験中の動画を確認したところ、機体が急旋回動作のような激しい動きをした場合は観測対象のニシキゴイが驚いて逃避行動をとるが、通常の前進泳動時にはニシキゴイを驚かせることがないため、開発されたロボットを用いて対象生物にごく近い距離まで接近して観測できることを確認した。

最後に、機体近傍に吸い込み流が発生し難いという生物模倣型ロボットの利点に焦点を当て、海藻やゴミなどの異物が多く存在する水域を想定した実験を行った。この実験には、第 2 章で製作した魚類型ロボットと、新たに製作したスラスト駆動型ロボットを使用し、それぞれの機体をポリエチレンから成る模擬海藻が投入された水槽で泳動させて、それぞれの推進機構に模擬海藻が絡む確率を算出した。その結果、それぞれの機体に模造海藻が絡まる確率は魚類型ロボットで 0%、スラスト駆動型ロボットで 54%となった。これにより、浮遊物が多く存在する水域において魚類型ロボットの運用は有用であると判断できる。

第 4 章では、流れが速い水域において十分な加速性能と前進速度を有する泳動機構を提案し、その性能を調査した。

はじめに、泳動機構に採用する泳動方式について検討した。ここでは、高い加速性能と前進速度を実現する推進機構として、Carangiform mode と Subcarangiform mode の泳動方式を模した魚類型泳動機構を提案した。Carangiform mode と Subcarangiform mode の泳動方式を持つマアジ、ウグイ、フナの泳動振動数を過去データと泳動数の式を用いて推定した結果、これらの 3 種の中では、マアジの泳動振動

数が 5.92Hz で最小であることを示し、製作する泳動機構は水中での駆動時に少なくともこの駆動振動数以上で使用可能である必要があることを明らかにした。

次に、上記の泳動方式の挙動と泳動振動数を再現できる推進機構として、直流モータをアクチュエータとした新たな泳動機構を考案、製作した。また、各推進機構の推力を細長体理論に基づき推定し、水槽試験結果と比較した。その結果、機構の簡易さ、前進速度、加速性能、推進効率などの面から考えると、Subcarangiform 型泳動機構よりも Carangiform 型推進機構の方が優れていることが確認できた。

さらに、それぞれの泳動機構において機構頭部と尾鰭後端の幅方向振幅を計測し、その振幅の大きさが推進性能にどのように影響するかを確認した。Lighthill が唱える理想的な魚類の定常泳動では、魚体中心線の体幅方向振幅は魚体後半部で大きく前半部で小さいことを条件としており、この条件を満たしていない場合には、平均推力及び最高前進速度の増加量が小さくなることが実験により確認された。よって、本章で使用した推進力の計算式は魚類型泳動機構において適切な駆動振動数を推定する際に有用であると考えられた。

以上の研究開発により、高い急旋回性能を有する魚類型水中ロボットと、推進性能に優れた高速振動型泳動機構について明らかにしたが、今後の検討課題としては以下のようなものが挙げられる。まず、第 3 章で行った機体の運動制御において、加速度センサとジャイロセンサのみでは機体の長時間の運動制御には限界があるため、他のセンサを取り入れた複合的な運動制御を行う必要がある。また、推進機構への異物の絡まり易さは、その機体の形状や機構の回転数及び駆動振動数、さらに異物の形状や堅さにも影響されるため、更なる検討が必要であると考えられる。今後は、これらの課題を解決し、本研究において開発した機体を大型化し、多種類のセンサを搭載して運動制御方法を改良することで、複雑な流れや、強い潮流の中でも各種の調査や作業に使用可能な魚類型ロボットが実現できるものとする。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々から様々な御意見、御助言、並びに温かい励ましのお言葉を頂きました。

本研究の具体的な計画と実施から、本論文を取りまとめに至るまで、終始懇切丁寧な御指導、御教授を賜りました九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 准教授 山口悟 先生に心より御礼申し上げます。

また、本論文の執筆に際し、九州大学大学院工学研究院 海洋システム工学部門 名誉教授 新開明二 先生より多数の有益なご助言と暖かい激励の言葉を賜りました。心より御礼申し上げます。

更に、あらゆる方面において御協力いただきました鹿児島大学 水産学部水産学科 教授 重廣律男 先生、同じく助教 須本祐史 先生に篤く御礼申し上げます。

最後に、研究期間中にさまざまな面でお世話になった船舶設計・海洋環境情報学講座の同期及び先輩後輩の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 浦 環, 高山 真一 : 海中ロボット, 成山堂書店, 1997.
- [2] Woods Hole Oceanographic Institute, <http://www.whoi.edu/>
- [3] 海洋研究開発機構, <http://www.jamstec.go.jp/>
- [4] Massachusetts Institute of Technology, <http://web.mit.edu/>
- [5] Tokyo University of Marine Science and Technology, <http://www.ocean.e.kaiyodai.ac.jp/vehicles.html>
- [6] 岩楯 好昭, 堀 学 : ゾウリムシ繊毛運動の制御とメタクロナル波の伝達, エアロ・アクアバイオメカニズム学会講演会資料集, 第 33 回, pp3-4, 2015.
- [7] Defense Advanced Research Projects Agency, <http://www.darpa.mil/>
- [8] ETH Zurich, <https://www.ethz.ch/en.html>
- [9] Osaka City University, <http://www.osaka-cu.ac.jp/ja>
- [10] Parry, D.A. : The Swimming of Whales and a Discussion of Gray's Paradox, *Journal of Experimental Biology*, 26, pp24-28, 1936.
- [11] Anderson, J.M. : The Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle, *Proceeding of the International Symposium on Seawater Drag Reduction*, pp479-483, 1998.
- [12] 樋口 士朗, 伊東 明俊 : マグロ型振動翼推進魚ロボットにおける首振り機構の効果, エアロ・アクアバイオメカニズム学会 講演会資料集, 第 33 回, pp27-28, 2015.
- [13] MIT News, <http://news.mit.edu/2014/>
- [14] 平田 宏一, 藁科 真一 : 実験用魚ロボットの旋回性能に関する研究, 日本設計工学会 東北支部 講演論文集, 1999.
- [15] 鈴木 博善, 加藤 直三 : 胸鰭運動装置付き水中ロボット”PLATYPUS”周りの流れの数値計算, 日本機械学会 2005 年度年次大会講演論文集, Vol.6, pp107-108, 2005.
- [16] 山口 悟, 鍵山 溪, 寺田 昌史 : 魚類型ロボットのための運動機構の開発, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.1, 2005.
- [17] 寺田 昌史 : 魚類の泳動に基づく水中ロボット用推進機構の開発に関する研究, 九州大学博士論文, 2009.
- [18] 須本 祐史 : 魚類型水中ロボットのための人工筋肉制御方法と自律化に関する研究, 九州大学博士論文, 2011.
- [19] 松原 喜代松, 落合 明, 岩井 保 : 新版魚類学(上), 恒星社厚生閣, 1979.
- [20] Breder, C.M. : The locomotion of fishes, *Zoologica*, Vol.4, pp159-256, 1926.
- [21] 永井 實 : イルカに学ぶ流体力学, オーム社, 1999.

- [22] National Maritime Research Institute,
https://www.nmri.go.jp/eng/khirata/fish/general/principle/index_j.html
- [23] 平田 宏一：海上技術安全研究所における魚ロボットの開発，設計工学，第 38 巻，pp293-301, 2003.
- [24] Lindsey, C.C.：Form, function and locomotory habits in fish, in “Fish Physiology” edited by W.S. Hoar and D.J. Randall., Academic Press, pp1-100, 1978.
- [25] Michael, S., David, M.L., Bruce, C.D.：Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.24, No.2, 1999.
- [26] Liang, L., Jiang L., Wang, C., Wei W., Xing, Z., Guangming, X.：Application of Taguchi Method in the Optimization of Swimming Capability for Robotic Fish, International Journal of Advanced Robotic Systems, pp1-11, 2016.
- [27] Azuma, A.：The Biokinetics of Flying and Swimming, Springer-Verlag, 1992.
- [28] 岩井 保：魚学入門，恒星社厚生閣，2005.
- [29] George, V.L., Peter, G.A.：Fish locomotion: kinematics and hydrodynamics of flexible foil-like fins, Springer-Verlag Exp Fluids, Vol.43, pp641-653, 2007.
- [30] 有吉 友和, 加藤 直三, 鈴木 博善, 安藤 義人, 鈴木 康一, 神田 岳文, 遠藤 聡：生物模倣型水中ロボットののための弾性体胸鰭アクチュエータ，日本船舶海洋工学会論文集，第 5 号，pp15-25, 2007.
- [31] 加藤 直三, 鈴木 博善：魚の胸ひれ運動と水中ロボットへの応用，日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌，第 12 巻，第 3 号，pp143-153, 2005.
- [32] 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，第 2 巻，第 3 号，2002.
- [33] 古川 英昭, 金野 祥久, 平田 宏一, 仁木 洋一, 川田 正國：尾ヒレを用いてクイックターンする水中ロボットの検討，日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集，Vol.6, pp153-154, 2009.
- [34] 双葉電子工業株式会社：S3470SV データシート
- [35] トキ・コーポレーション株式会社：Bio Metal Fiber データシート
- [36] 有江 幹男, 木谷 勝, 藤兼 敏則：流体力による弾性平板の変形と流力特性の変化，北海道大学工学部研究報告，第 76 号，pp19-30, 1975.
- [37] 高橋 幸伯, 町田 進, 角 洋一：基礎材料力学，培風館，2004.
- [38] ARM：mbed NXP LPC1768 データシート
- [39] 双葉電子工業株式会社：S9570SV データシート
- [40] 一色 尚次, 森川 裕久, 加藤 恒, 柳原 浩, 和田裕：振動翼推進の研究，日本船舶機関学会誌，第 14 巻，第 7 号，pp85-91, 1979.

- [41] 東 昭：生物の動きの事典，朝倉書店，1997.
- [42] 高野 泰斉：水棲生物の推進の研究，日本機械学会 バイオエンジニアリング部門報，No.27，1999.
- [43] 種子田 定俊：流れの可視化，流体力学シリーズ Vol.4 日本流体力学会編，朝倉書店，1996.
- [44] 数学教育研究会編：フーリエ解析と偏微分方程式，東京電機大学出版局，2003.
- [45] Lighthill, M.J.：Aquatic Animal Propulsion of High Hydromechanical Efficiency, *J.Fluid Mech*, Vol.44, part2, pp265-301, 1970.
- [46] Jukka, T.：Computer Readout, Popular Rotorcraft Flying, Vol.7, No.4, 1969.
- [47] 鈴木 和夫, 川村 隆文, 佐々木 紀幸：船体抵抗と推進 船舶海洋工学シリーズ 2, 成山堂, 2012.
- [48] 川村 軍蔵, 安樂 和彦, 中原 真弥, 重里 憲広：負走光性マダイ稚魚の光馴致と光による誘導，日本水産学会 短報, Vol.68(5), pp706-708, 2002.
- [49] 上田 宏：サケの感覚機能と母川回帰，バイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.3, 2007.
- [50] 安永 義暢, 日向野 純也：2,3 の海産魚の走流性状に関する基礎的考察，水工研報告, Vol.6, pp17-26, 1985.
- [51] Fukuda, H., Torisawa, S., Yamane, T., Takagi, T.：Concernment of Rheotactic Reaction and Schooling Behaviour Traits of the Dwarf Sweetfish, *Plecoglossus Altivelic* on a Capture Process of the Set-Net “Eri”, Fisheries Engineering Research Article, Vol.48, No.2, pp117-124, 2011.
- [52] 川田 昌克, 西岡 勝博：MATLAB/Simulinkによる わかりやすい制御工学，森北出版，2001.
- [53] Kionix：KXR94-2050 データシート
- [54] 村田製作所：ENC-03R データシート
- [55] ファイアスター：FS-MD700 データシート
- [56] 竹内 俊郎, 中田 英昭, 和田 時夫, 上田 宏, 有元 貴文, 渡部 終五, 中前 明：水産海洋ハンドブック，生物研究社，2004.
- [57] 永井 實, 照屋 功, 中井 哲朗：振動翼推進機構の研究，日本機械学会論文集(B編), 62 巻, 604 号, pp113-120, 1996.
- [58] 横田 源弘, 山元 憲一, 平 雄一郎, 半田 岳志, 森元 映治：マアジの酸素消費量と遊泳能力について，水産大学校 研究報告, Vol.56(4), pp267-271, 2008.
- [59] 泉 完, 矢田谷 健一, 東 信行, 工藤 明, 加藤 幸：自然河川流水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験，水工学論文集, 第 51 巻, pp1285-1290, 2007.

- [60] 鬼東 幸樹, 秋山 壽一郎, 山本 晃義, 渡邊 拓也, 脇 健樹 : 河川に生息する数魚種の突進速度に関する研究～アユ,オイカワ,カワムツ,ギンブナを対象～, 土木学会論文集 B, Vol.65, No.4, pp296-307, 2009.
- [61] ツカサ電工 : TG-85R-SU-13.2-KA データシート
- [62] Vladislav, K., Maurizio, P. : Design, Modeling, and Characterization of a Miniature Robotic Fish for Research and Education in Biomimetics and Bioinspiration, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.18, No.2, pp471-483, 2013.
- [63] Lighthill, M.J. : Note on the Swimming of Slender Fish, *J.Fluid Mech*, Vol.9, pp305-317, 1960.

主要記号一覧

a	フィン機構に使用するポリ塩化ビニルシートの厚さの半分 (0.1mm)
a_x, a_y	一様流により機体に働く x 、 y 方向の加速度
a_n	フーリエ余弦級数の係数
b	平行に配置されている人工筋肉の間の長さ
Δb	長さ成分 b における人工筋肉の収縮量
B	体幅 (最大値)
b_n	フーリエ正弦級数の係数
c	位相速度
C_D	物体の抗力係数
D	抗力
f_{fish}	対象魚種の泳動振動数
g	重力加速度
H	駆動信号の振幅
k_d	微分ゲイン
k_i	積分ゲイン
k_p	比例ゲイン
k_{pc}	定常状態となるときの比例ゲイン
L	収縮前の人工筋肉の長さ
l_n, l_m, l_t	細長体魚類の口吻の位置、尾柄 (極小高さ)、尾鰭末端
l_{fish}	対象魚種の全長
L_1, L_2	フィン機構構造図に示すそれぞれの箇所的人工筋肉の長さ
L_{1z}	L_1 の縦方向成分
L_{OA}	魚体全長
ΔL	人工筋肉の長さの変化量
$\Delta L_{1z}, \Delta L_2$	それぞれ L_{1z}, L_2 の長さ成分における人工筋肉の収縮量
N	項数
Δp	魚体の微小要素での圧力差
S	物体の投影面積
S_w	泳動数
T	泳動周期
Th	細長体生物に働く推進力
t^*	尾鰭の後端から渦が放出された時間
U	前進速度

U_{fish}	対象魚種の前進速度
V	流体の相対速度
V_x, V_y	サージ及びスウェイ方向の加速度を時間積分して導出した速度
V_{com}	V_y と $V_x - V_{robot}$ の合成速度ベクトル
V_{robot}	静止流体中における機体の前進速度
w^*	後端から渦が放出された時刻（遅延時刻） t^* での横方向変位速度
α_r, α_p	機体のロール角及びピッチ角
β	機体中心線と合成速度ベクトル V_{com} の延長線が織りなす角度
ε	人工筋肉の歪みを表す
ε_{LB}	細長比
θ_{servo}	往復動作する胴体駆動部の基準角度
ρ	曲率半径
ρ_1	L_2 の収縮によって発生する鰭先部分の曲率半径
ρ_2	L_1 と L_2 の収縮によって発生する鰭先部分の曲率半径
ρ_w	流体の密度
ω	角速度