

魚を追尾する小型魚ロボットが  
射出する銚の射出挙動に及ぼす影響

2022年9月

川崎 直樹

魚を追尾する小型魚ロボットが  
射出する銚の射出挙動に及ぼす影響

2022年9月

大阪市立大学大学院

工学研究科

かわ さき なお き  
川 崎 直 樹

# 目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	論文概要	2
第 2 章	金魚の自動追尾のための二つの関節を有する小型魚ロボット	4
2.1	緒言	4
2.2	小型魚ロボット COMET	5
2.2.1	金魚追尾のための旋回性能	5
2.2.2	COMET の構造	6
2.2.3	COMET の旋回性能	9
2.3	制御と画像処理	9
2.3.1	追尾のための画像処理手順	9
2.3.2	赤色の対象の追尾実験	11
2.4	金魚の自動追尾	13
2.5	結言	16
第 3 章	ローリング運動を起こす魚追従 ロボット における撮影回転画像のリアルタイム補正	17
3.1	緒言	17
3.2	回転補正画像処理	18
3.2.1	ロボットのロール運動が目標物追尾に及ぼす影響	18
3.2.2	回転補正画像処理手法	21
3.3	回転補正方法の評価	25
3.3.1	目標物の位置を変えた場合の実験	25
3.3.2	ローリングシャッター方式が回転補正回路に及ぼす影響	28
3.3.3	回転試験機の角速度を変えた場合の実験	30
3.3.4	画像データと角度データの同期タイミングを変えた場合の実験	31
3.4	COMET での回転補正実験	33
3.5	結言	35
第 4 章	矢の選別のためのアーチェリーロボットの開発	36
4.1	緒言	36
4.2	シューティングマシン 2 号機の開発	37
4.2.1	土台部	37
4.2.2	弦を引くための駆動部	38

4.2.3	弓を保持する左手部分	39
4.2.4	発射機構	40
4.3	シューティングマシン 2号機を用いた実験と実験結果	41
4.3.1	実験方法	41
4.3.2	シューティングマシンの精度の評価	41
4.3.3	異常矢の選別	42
4.4	結言	43
第5章	射出機構を搭載した魚ロボットの運動が射出挙動に及ぼす影響	44
5.1	緒言	44
5.2	実験に用いた機構	46
5.2.1	銚の射出機構	46
5.2.2	回転試験機の概要および実験環境	47
5.3	回転試験機を用いた銚の射出実験	49
5.3.1	銚の射出実験	49
5.3.2	射出された銚の軌道の分布	53
5.3.3	射出後の銚の軌道に関する考察	57
5.4	水中で射出された銚の挙動解析	59
5.5	結言	63
第6章	結論	64
	参考文献	66
	公開論文	71
	謝辞	72

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景と目的

日本のみならず世界中の水環境下において、外来魚が与える生態系への悪影響が深刻な問題として提起されており[1]-[3]、在来魚が捕食されたり、在来魚の生息環境や食物、繁殖場所等を奪うことにより、在来魚の減少が確認されている。例えば琵琶湖では琵琶湖固有（亜）種のホンモロコおよびニゴロブナ、ゲンゴロウブナが激減しており、その主要な原因の一つとして、外来魚であるオオクチバス（ブラックバス）とブルーギルの増加が挙げられている[4]。そのため、生態系を取り戻すために、外来魚駆除や在来魚の保護が必要とされている。実際にオオクチバスやブルーギルなどの外来魚を生態系に歪みを生じさせる害魚として捉え、外来魚駆除を行う県や自治体も存在しており、その一例として琵琶湖でのオオクチバスやブルーギルの駆除が行われている[5][6]。一般的に外来魚を駆除する方法として、釣り、電気ショッカーボート、置き網、さらには水中銃による捕獲が行われている[7]-[9]。これらの方法は主に人の手によって行われているため、その成果については駆除を行う人の練度や人数に依存する為、効率的な取り組みと言えないのが実情である。今後は自律制御されたロボットで対象の生物を追尾し、自動で駆除まで行う等、先進的かつ効率的な技術革新が求められている。

先行研究において、須磨海浜水族園で行われた **Techno-Ocean 2010 Pre-Event** で、魚ロボットと一緒に泳いでいる水族館の魚は警戒しないことが確認された。そのため、魚ロボットを保護対象の水棲生物等へ自動追尾させて1個体を連続的に観察するといった生態調査や、外来魚に警戒させずに追尾し、近づいた後駆除するといった活用方法が今後期待される。

実際の生物に着目した場合、鉄砲魚は珍しい捕食方法をすることで有名であり、水辺の昆虫などを狙い、エラをポンプとして用いることで水滴を銚のように発射し、撃ち落として捕食する習性が確認されている[10]-[12]。

このように獲物を撃つという一部の珍しい生物の特性を工学的に模倣し、魚型ロボットに搭載できれば、外来魚の駆除において非常に有益な手法となり得るとともに、魚型ロボットが駆除対象を自動追尾できれば、省人化にも寄与し駆除コストも大きく削減できることが予想される。

そこで本研究では、銚の射出によって外来魚の駆除を行うことを念頭においた魚ロボットの検討を行う。水中の魚を追尾することができる魚ロボットの開発、および魚ロボットが対象物を追尾する為の画像処理と制御を行わせるためのプログラム、水中で魚ロボットから射出された銚の挙動の把握に取り組む。

## 1.2 論文概要

本論文は、目標物を自動追尾する魚ロボットの開発に加え、このロボットに銚の射出機構を搭載し目標物に的中させるため、射出機構と銚の挙動に関する研究を行う。

第2章では、小型魚ロボット COMET を開発し、頭部に取り付けたカメラから得られた画像から画像処理により、金魚の体色を認識し、COMET に金魚の自動追尾を行わせる。開発する小型魚ロボット COMET の設計指針として、画角を広くし、角速度を金魚の角速度に近づけることとした。そのため、広い視野角のカメラを COMET の頭部に搭載する。また、旋回能力を高めるために、関節数を2個とし、それぞれを独立して動作させることができる構造とする。また、画像処理には高速な演算が必要となるため、小型で高速な演算が可能な FPGA を用い、金魚の特徴的な体色の赤色を認識するプログラムを作成する。開発した魚ロボット COMET とプログラムを動作させ、金魚の自動追尾が可能であるかを確認する。

第3章では、第2章で行った実験時に得られた画像を確認したところ、金魚の追尾時に常に画像が回転していることが分かった。この画像の回転は金魚自動追尾に悪影響を及ぼしていると考えられる。そのため、この画像の回転を抑制しなければならない。画像の回転を抑制する手法として、カメラ自体をロボットのロールと逆の方向に回転させることによって画像の回転を防ぐ方法と、ロールした状態で取得した画像を電子的に回転して補正する方法が考えられる。前者の方法を取る場合、カメラにモータを取り付けてロールと逆方向に回転させることにより、カメラの回転を防ぐ方法が考えられる。しかし、この場合はロボット内部に新たな機構を追加する必要があり、ロボットの大型化につながるため、小型ロボットとしては適さない。さらに、モータを介するため反応に遅れが生じ、完全に画像回転を取り除くことができない。一方、電子的な補正を行う場合は新たな機構を追加することなく、ロボットのサイズを維持したまま正常な画像を取得することができる。しかしながら、電子的にこの画像の回転の補正を行うにあたって、小型な魚ロボットの内部に搭載可能な大きさの各種マイコン類でリアルタイムに画像の回転補正を行うには計算負荷が大きい。そこで、魚ロボット COMET に搭載している FPGA を用いて電子的に回転補正を行う。この FPGA を用いたリアルタイム回転画像補正にはテーブル参照法を用いる。しかし、そのままでは多くのブロックメモリを消費するため、ブロックメモリ消費量の低減の工夫を行う。また、使用するカメラはローリングシャッター方式であるため、ジャイロ加速度センサから得られた角度情報の適切なタイミングについて検討する。それらの後、回転画像補正が期待する動作を行

っているか、および、金魚の自動追尾時に補正の有無による効果について検討する。

第4章では、先行研究によって開発されたアーチェリーロボット1号機は、マシンの安定性が問題点となっており、これを改善すべく2号機を製作した。これの発射部分を人の腕を模した形状かつ、射出のトリガーをクリッカー音とするなどの検討を重ねることで、異常矢を選別できる精度を持った射出装置の実現を目指すとともに、射出機構の仕組みと射出精度についての検討を行う。

第5章では、魚ロボット COMET で銚の射出による外来魚の駆除を行うにあたって、魚ロボットから水中で発射された銚の挙動の把握は必要不可欠である。そのため、魚ロボット COMET が推進時に起こすヨーイング運動とローリング運動を回転試験機により再現し、銚を COMET から発射し、その様子を上部と側面からカメラにより撮影し、銚の挙動のデータを得る。また、得られたデータを統計的に処理し、水中で魚ロボットから発射された銚の挙動について検討する。また、水中での銚の挙動を再現するプログラムを作成し、水中で発射された銚の挙動について検討を行う。

第6章は結論であり、本研究によって得られた成果を要約する。

## 第2章 金魚の自動追尾のための二つの関節を有する

### 小型魚ロボット

#### 2.1 緒言

水中ロボット[13]-[16]は時に水棲生物の生態調査に用いられている。しかしながら、川や池などの狭い空間で調査を行えるものはほとんど存在しない。水中の藻や水草が絡まる恐れがあるため、ロボットにスクリュープローペラを搭載することはできない。さらに、魚類などの水中生物の調査を行う際に、観測対象に気づかれにくくするために、小型かつ静音であることが望ましい。従って、小型魚ロボット[17]-[21]は水棲生物の生態調査に適している。

魚ロボットを水中に投入し、対象の魚を探させ、対象の魚を見つけた時には、魚ロボットは対象に気づかれずに追尾と観測を行う。数時間の調査の後、魚ロボットを回収し、PCへデータを送信する。ロボットがデータを取得することができればロボットを生態調査ロボットとして使用できる。そのためには、ロボットには次のような機能が必要である。(1)対象に気づかれずに追尾遊泳する機能。(2)水中の物体が調査対象であることを認識する機能。(3)内部に取得したデータを蓄積し、外部の機器に出力する機能。

1番目の機能については、須磨海浜水族園で行われた **Techno-Ocean 2010 Pre-Event** において、魚ロボットと一緒に泳いでいる水族館の魚は警戒しないことが確認された。魚ロボットの尾ひれは静音で魚を傷つけることはないが、現状、尾ひれ推進方式はスクリュード駆動方式に比べて推進性能、旋回性能において劣っている。本研究では、魚類は体を曲げて大きく旋回することに着目する。尾ひれの駆動範囲を広げるために複数の関節を搭載したロボットを作製する。

2番目の機能について、画像処理による魚の検出には、色情報、形状情報、動作情報による手法がある。形状や動作による方法では色情報に比べ、魚の検出ができる可能性は高い。しかしながら、色情報による手法に比べ、難易度が高い。従って、本研究では色情報を用いる。また、小型かつ特徴的な体色を持つ金魚を対象として用いた。

3番目の機能について、水中では電波は減衰するため、Wi-Fiのような高速電波通信は用いることができない。水中通信として、音響通信が研究されている。しかし、音波は低周波数であるため、画像のような大容量データの送信には適さない。従って、取得した画像をロボット内部に保存し、調査終了後、データをディスプレイに出力する手法を考えた。

本研究では、50 から 200 mm の魚を追尾するために、魚ロボット COMET

(compact observation machine equipped with tailfin)を作製し、COMETで金魚を認識し、追尾を行う。

## 2.2 COMETの駆動機構

### 2.2.1 金魚追尾のための旋回性能

追尾実験には体長 74 mm の金魚を用いる。追跡時のロボットの回転性能と画角がどのように関係するかを明確化するために、図 2-1 に示すようなモデルを作成した。金魚がロボットから距離  $L$  でロボットから見て角速度  $\omega_g$  で泳ぐとする。ロボットは角速度  $\omega_r$  で旋回し、金魚を画角  $\theta$  に収める。このとき、 $\varphi$  はロボット正面に対する金魚の位置を示す。 $\varphi$  が  $\theta$  よりも大きければ、ロボットは金魚を見失う。ロボットの角速度および画角を変更し、式(2-1)で得られる金魚を視界内に保持する追尾時間  $t_t$  を計算する。

$$t_t = \frac{\theta}{\omega_g - \omega_r} \quad (2-1)$$

金魚の遊泳速度に関しては長時間持続可能な最高速度の巡航速度を用いる。Radcliffの研究[22]によれば、金魚の巡航速度は体長の 3.4 倍の速度となる。本研究で用いた金魚の体長は 74 mm であるため、巡航速度を 252 mm/s と設定した。金魚とロボットの距離を 300 mm とすると、金魚のロボットを中心とした角速度を 0.84 rad/s とする。この計算結果を図 2-2 に示す。

図 2-2 において、x 軸はロボットの角速度、y 軸は追尾時間を示す。各線はそれぞれ異なる視野角を示す。この図において、式(2-1)で示した  $t_t$  と  $\theta$  の関係から、追尾時間は画角  $\theta$  に比例する。さらに、ロボットの角速度が金魚の角速度に近いほど、追尾時間は長くなる。ロボットが金魚と同等、もしくはより高速に旋回することができれば、ロボットは常に金魚を視野内に収めることができる。しかし、金魚は高い運動性能を持っており、同等の性能を持つロボットを製作することは困難である。ここで、金魚は常に特定の方向に泳ぐわけではなく、しばしば遊泳方向を変えることから、ロボットが金魚を視野内に数秒収めることができれば、ロボットが金魚を追尾できると考えた。そのため、ロボットの設計指針として、画角を広くし、角速度をロボットから見た金魚の角速度  $\omega_g$  に近づけること試みた。

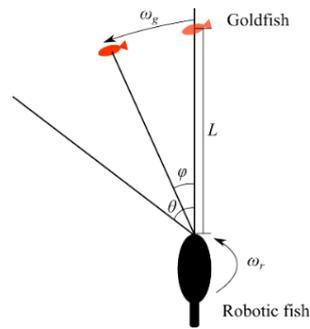


Fig. 2-1 Tracking model of goldfish.

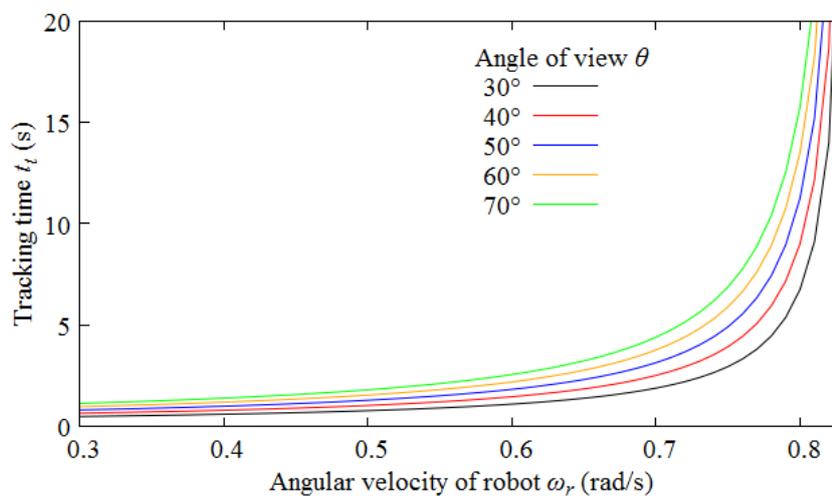


Fig. 2-2 Relationship between tracking time and angular velocity of the robot for different angles of view.

### 2.2.2 COMET の構造

図 2-3 に COMET の側面と正面からの写真を，図 2-4 に内部構造を，表 2-1 に諸元を示す．ロボット頭部には対象を観測するための CMOS カメラ(日本ケミコン社製， NCM13-K2)を搭載している． CMOS カメラの諸元を表 2-2 に示す．画像処理及び動作制御は XC7Z020(Xilinx 社)を搭載した ZYNQ ボード(Trenz Electronic 社製， GigaZee, TE0720)で行う． ZYNQ ボードの諸元を表 2-3 に示す．

COMET の筐体はアクリル製の部品で構成されている． 図 2-4(c)に COMET の尾ひれの構造を示す． 尾ひれは異なる硬さの天然ゴム， 尾ひれの硬さを調整するポリエチレンテレフタレート製の棒で構成されている． 尾ひれの中央部先端は周囲より柔らかくしている[23]． 尾ひれは本体と 2 つの関節を通して繋がっており[24][25]， それぞれの関節は独立して動作する． COMET はこれら 2 つの関節により  $90^\circ$  尾ひれを曲げることができる． この広範囲の動作によって旋回性能が向上する． マグネットアクチュエータ[26]-[28]が各関節に取り付けられてい

る．前方のマグネットアクチュエータのコイルは  $0.16\text{ mm}$  のポリウレタン皮膜線を  $1200$  回巻きしたもので，抵抗値は  $53\ \Omega$  である．球形の直径  $15\text{ mm}$  のネオジム磁石がコイル内部に搭載されている．後方のマグネットアクチュエータのコイルは  $0.16\text{ mm}$  のポリウレタン皮膜線を  $1200$  回巻きしたもので，抵抗値は  $46\ \Omega$  である．球形の直径  $10\text{ mm}$  のネオジム磁石がコイル内部に搭載されている．使用したマグネットアクチュエータの磁力が強力であるため，磁束漏れにより，他方の動作を阻害する．そこで，マグネットアクチュエータを鉄製ヨークで囲み，磁気回路の閉ループを構成している．従って，マグネットアクチュエータは適切に動作する．電力元としてリチウムポリマバッテリー ( $3.7\text{ V}$ ,  $750\text{ mAh}$ ) を使用する．電力はパワーMOSFET (SP8M4) を含む H ブリッジ回路を通してマグネットアクチュエータに供給される．マグネットアクチュエータは ZYNQ から信号によって制御される．マグネットアクチュエータは正負の電圧によって動作する．ロボットが直進する時には，尾ひれの動作周波数は  $2\text{ Hz}$  であり，第二関節は  $90^\circ$  の位相遅れで駆動する．また，ロボットが左右に旋回する時には前側の第一関節を旋回方向に固定する．

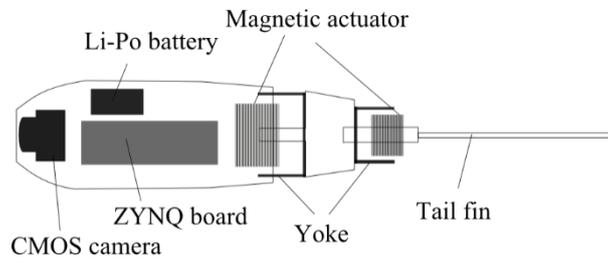


(a) Side view

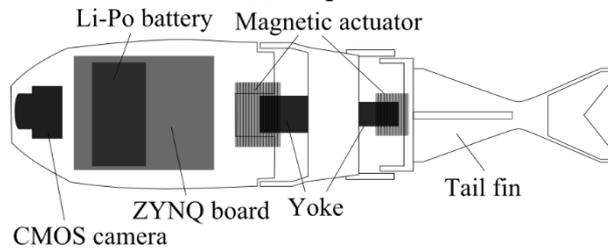


(b) Front view

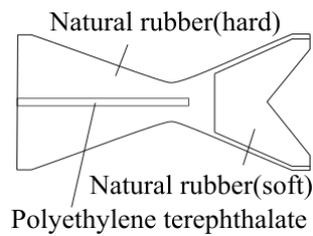
Fig. 2-3 Images of COMET.



(a) Top view



(b) Side view



(c) Details of the tail fin

Fig. 2-4 Structure of COMET.

Table 2-1 Specifications of COMET.

Length	250 mm
Width	45 mm
Height	60 mm
Mass	270 g

Table 2-2 Specifications of the CMOS camera.

Optical format	1/4 inch	
Resolution	Max 1280×1024	
Frame rate	Max 15 fps	
Field of View	Horizontal	190°
	Vertical	156°
Structure	5 lenses	

Table 2-3 Specifications of ZYNQ board.

Device name	GigaZee (TE0720)
Board size	50 × 40 mm
Logic cell	85,000
External RAM	1 GB DDR3
Number of user IO ports	152
Supply voltage	3.3, and 5 V

### 2.2.3 COMET の構造

COMET の遊泳性能を測定するために水槽で実験を行った。用いた水槽は長さ 2390 mm, 幅 1500 mm, 深さ 580 mm(水深 200 mm)である。また, COMET は水槽に取り付けられた CCD カメラで撮影した。

実験結果を図 2-5 に示す。図 2-5 の白と黒の線は 50 mm 間隔で記載している。カメラの焦点と画角を考慮すると, 図 2-5 の白と黒の線は 72.9 mm 間隔となる。COMET の旋回半径は 101 mm と読み取った。実験時, 角速度は 0.67 rad/s であった。

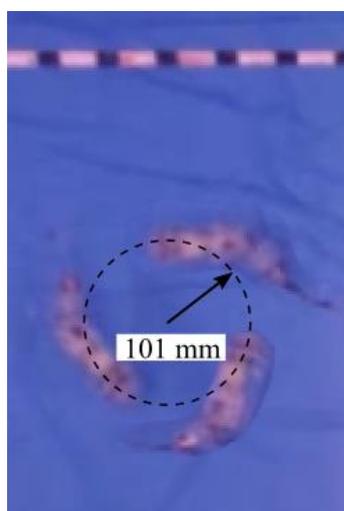


Fig. 2-5 Turning radius of COMET.

## 2.3 制御と画像処理

### 2.3.1 追尾のための画像処理手順

魚ロボットで水棲生物の調査を行うには, 周囲の情報を収集し, 自動で動作する必要がある。周囲の情報を収集する手法として超音波センサ, 光センサ, カメラ等がある。多くの情報を収集でき, 小型であることから, 小型魚ロボッ

トにはカメラが取り付けられるセンサとして適している。そこで、COMET に小型 CMOS カメラを搭載した。さらに、COMET には小型の FPGA を搭載しており、FPGA は大容量のデータを高速に処理することができる。従って、魚ロボット内部に画像を保存するためのメモリとして DDR3 SDRAM を使用することにする。本章では次のことを確認する。

- (1) COMET がカメラからの画像情報を基に赤い対象を追尾することができる。
- (2) COMET が画像データを内部のメモリに保存し、調査後に画面に出力することができる。

図 2-6 に FPGA の機能、及び接続を示す。ロボット頭部のカメラは  $640 \times 512$  の解像度、YUV422 フォーマットであり、7.6 fps で DDR SDRAM に画像データが送られる。FPGA が行う画像処理、画像のメモリへの保存、ロボット外部への信号送信、尾ひれ制御のプログラムは VHDL で記述している。COMET はカメラで取得した画像情報に基づいて自動で赤い対象への進行方向を決定する。図 2-7 に示すように、COMET は赤い対象を視野の中心に移動させるように動作する。

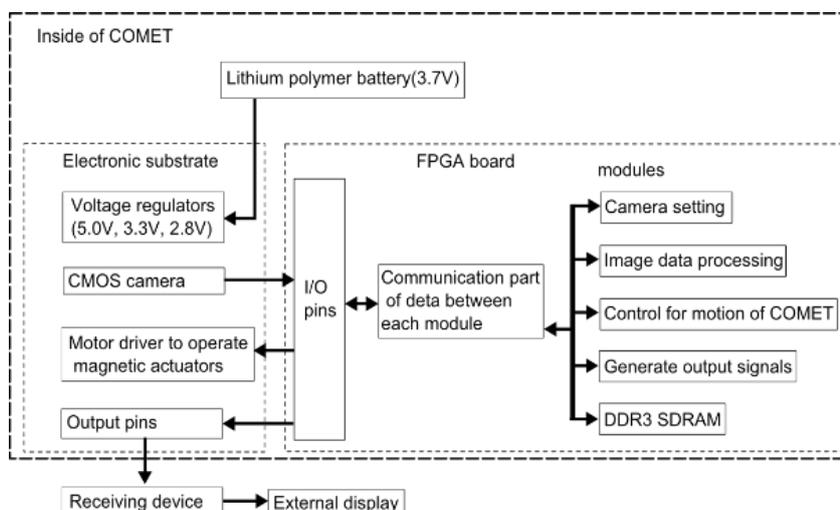


Fig. 2-6 Functions and connections in an FPGA.

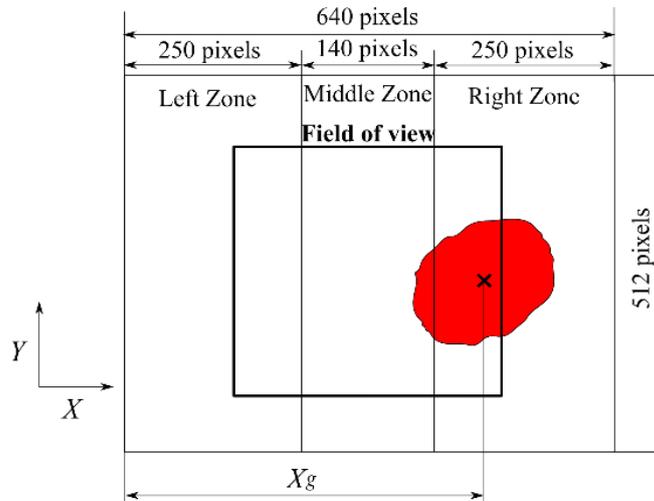


Fig. 2-7 The division of the turn control region based on the centroid of the red target.

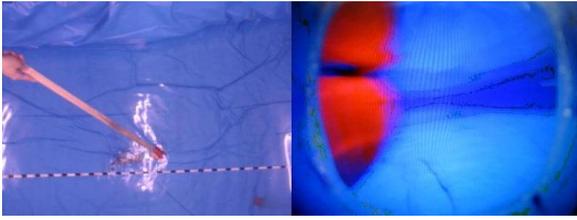
最初に、赤色の対象の位置を認識する方法を示す。画像に赤色と識別した画素が存在する時、それらのピクセル値の合計( $\Sigma X$ )を計算する。赤の領域の  $x$  方向の関心  $X_g$  は赤のピクセル数  $N$  で割って求める。しかし、魚ロボットは体を左右に振りながら泳ぐため、誤った関心  $X_g$  を認識することがある。そこで、尾ひれ 1 周期の  $X_g$  の平均( $\Sigma X$ )をとることで本問題に対処した。また、COMET が物体を視覚できる範囲を COMET の視界として図 2-7 に示す。

次に、COMET が対象を追尾する制御をどのように行っているかを述べる。最初に、図 2-7 に示すように視野を 3 つの領域に分ける。そして、対象の関心が存在する領域によって COMET の推進方向を制御する。例えば図 2-7 において、関心が右側領域に存在するため、COMET は右旋回する。従って、対象の関心は COMET の視界の中心に動く。COMET は連続してこの制御、及び画像取得を行うことで、対象を追尾することができる。COMET が視界から対象を見失った時には、前の関心が制御の計算に用いられる。

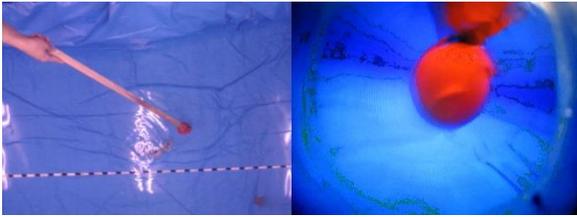
画像は ZYNQ ボード内の DDR3 SDRAM に蓄積される。調査終了後、画像はロボット頭部のピンを使って 4-bit パラレルで送信される。受信用端末として、FPGA 評価ボード、ZYBO を用いる。受信用プログラムは ZYBO に事前に書き込まれ、画像はアナログ RGB 端子からディスプレイに映し出す。

### 2.3.2 赤色の対象の追尾実験

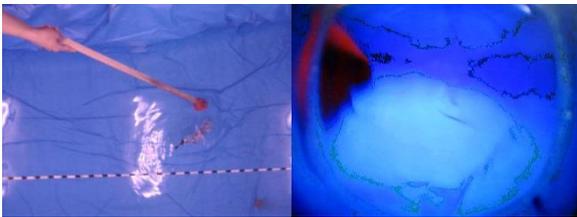
実験において、赤色の対象を追尾、及び画像処理を FPGA で行うことができることの確認を行った。



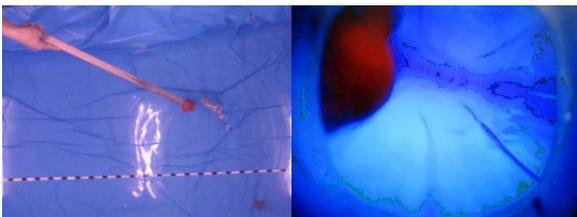
(a)  $t = 0.0$  s



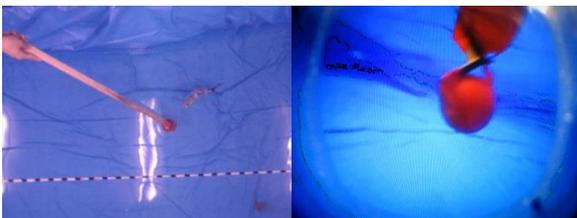
(b)  $t = 2.0$  s



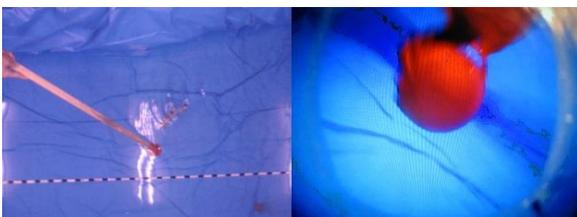
(c)  $t = 4.0$  s



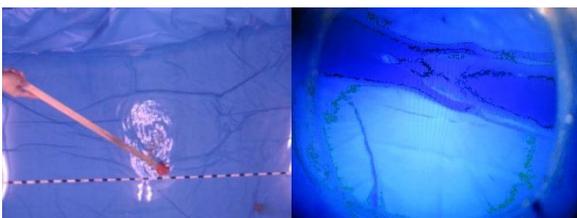
(d)  $t = 6.0$  s



(e)  $t = 8.0$  s



(f)  $t = 10.0$  s



(g)  $t = 12.0$  s

Fig. 2-8 Comparison of images from the CCD and CMOS cameras in the COMET.

ロボットの巡回性の測定を同じ実験設備で行った。水槽のそばから人力で先端に 64 mm の赤色のボールを取り付けた 910 mm の棒を動かし、COMET にその対象を追尾させる。実験後に図 2-8 に示す上部の CCD カメラと COMET により得られた画像を比較した。図 2-8 の左カラムは CCD カメラから得られた画像、右カラムは COMET の CMOS カメラから得られた画像である。これらの画像より、魚ロボットは動く赤色のボールの方へ進行方向を変えることが分かる。また、画像送信が正常に動作することが分かる。

## 2.4 金魚の自動追尾

COMET による金魚の自動追尾実験を行った。巡回性能を測定した時の装置をそのまま用いた。さらに、COMET の画像処理のしきい値は金魚の体色に合わせて調整した。実験に用いたしきい値を RGB888 フォーマットで表 2-4 に示す。また、金魚を認識できたかを確認するために COMET の上部に LED を搭載した。しきい値を超える画素が 6 pixel よりも多くなると、COMET が金魚を認識したとした。

COMET の前方に金魚を水槽で泳がせ、COMET に自動で金魚を追尾させた。COMET が金魚を完全に見失った後、COMET を取り出し、データを取得した。

Table 2-4 Threshold of COMET in RGB888.

	min	max
red	112	255
green	0	72
blue	0	192

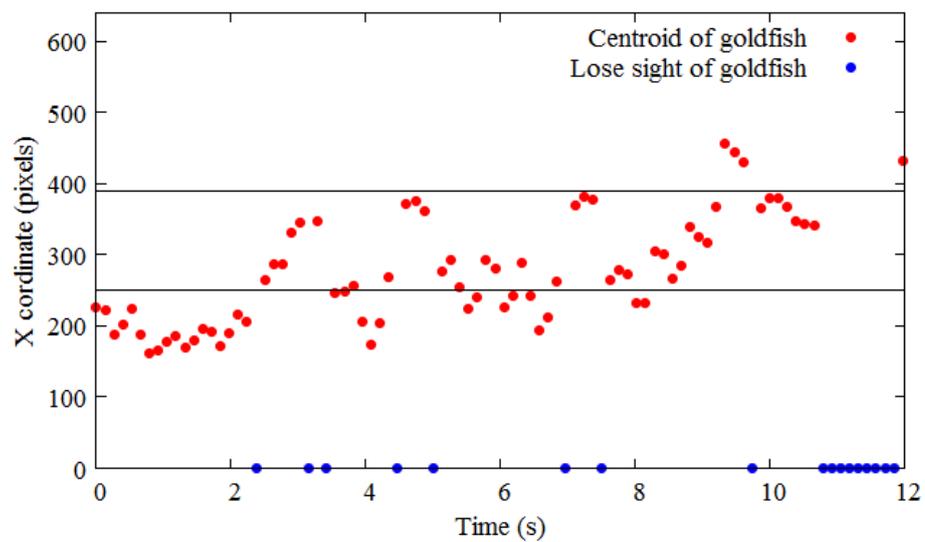


Fig. 2-9 The behavior of the centroid of goldfish.

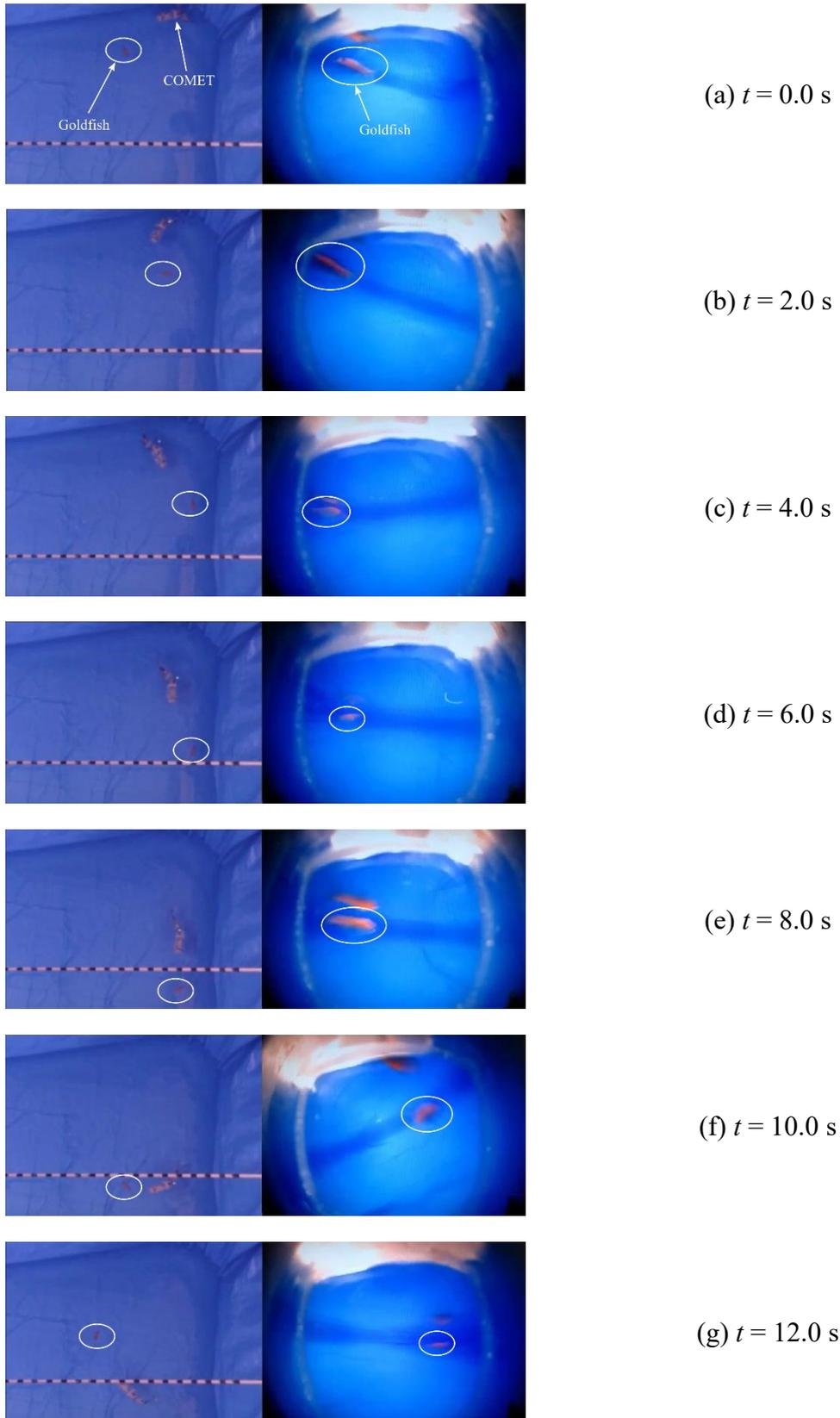


Fig. 2-10 Comparison of images captured during tracking goldfish.

図 2-9 に COMET が金魚を追尾している時にどのように認識したかを示す。この図の x 座標は COMET に搭載したカメラのフレームレートから求められた時刻を、y 座標は図 2-7 に示すように、COMET によって得られた画像のピクセル値の x 座標を示す。赤色の点は金魚の x 方向の図心を示す。青色の点は COMET が金魚を見失ったことを示している。図 2-9 の 250 pixel, 及び 350 pixel の水平の線は図 2-7 に示した 3 個の領域の境界を示す。図 2-9 より、COMET は金魚を中心領域に留めるよう制御されていることが分かる。赤色の点が中心領域から外れた時には、COMET は旋回するように制御している。

図 2-10 に上部の CCD カメラ (左) と COMET (右) によって得られた同時刻の画像の比較を示す。図 2-10 の時刻は図 2-9 の時刻と同じである。図 2-10(a) より、金魚が COMET の視野の左側領域から現れたことが分かる。続いて、図 2-10(b) から COMET が左に旋回し、視野に収めている。その後も、COMET が視野内の金魚の位置によって遊泳方向を変えて金魚を追尾していることが分かる。この図より、COMET が視野に捉えた金魚を認識して追尾していることが分かる。追尾時の COMET と金魚の距離は最長 260 mm, 最短 100 mm であった。金魚は最も高速で泳いだのは距離が最短の時であった。その時の速度は 171 mm/s であり、金魚は突進速度で逃げているわけではない。この実験により、COMET が左右方法に金魚を追尾できることが分かった。

## 2.5 結言

本研究では、CMOS カメラ、FPGA を搭載し、2 関節を持つ小型魚ロボット (COMET) を開発した。さらに、COMET 用の画像処理による金魚の自動追尾プログラムを作製した。結果、COMET が生きた魚の追尾が可能であることが分かった。しかし、本研究にはいくつかの制限がある。1 点目は、左右方向の追尾実験を行ったが、水深方向の研究は行っていない。2 点目は金魚のみに関して COMET が追尾できることを確認したが、他の種類の魚では確認を行っていない。3 点目は、1 匹の金魚のみで実験を行ったため、統計的結果を得られていないことである。

# 第3章 ローリング運動を起こす魚追従ロボットにおける 撮影回転画像のリアルタイム補正

## 3.1 緒言

水棲生物の生態調査に関して、大海原で活躍するロボットは多数存在する [13]-[16]。これらの多くは大型かつスクリュウ駆動である。しかしながら、川や池などの淡水域で実用化されている水中ロボットは存在しない。その理由としては、まず、淡水域は海洋と比べて空間が狭く、大型ロボットを投入することはできない。さらに、用途を水棲生物の生態調査とした場合、スクリュウ駆動の水中ロボットは騒音が発生するだけでなく、水の流れを大きく乱してしまうため、観察対象に警戒されやすい。加えて、スクリュウ駆動は水中のごみや浮草を巻き込んでしまう危険性がある。一方で、尾ひれ駆動の魚ロボット [18]-[21][29]-[31]の場合、上記の問題が生じないため、淡水域での水棲生物の生態調査には小型の尾ひれ駆動の魚ロボットが適している。Katzschmann ら[17]は水棲生物の調査を目的とした魚ロボットを作製しているが、ダイバーが魚ロボットを直接見て操縦を行っており、水棲生物を自動で追尾して調査を行うのではない。

著者らは小型魚ロボット COMET[32]を開発し、金魚を自動追尾できることを確認している。しかしながら、金魚を左右方向に見失ったり、前後方向にすれ違い、見失ったりするために長時間の追尾はできていない。そこで、本論文では金魚を左右方向に見失うことを減らすことを考える。COMETの追尾時の水中映像を確認したところ、得られる映像が常に全体的に回転していることが分かった。この画像の回転によって画像上の座標が、魚ロボットを正しい操作量で制御できない状態にしている。つまり、この映像の回転はロボットが自動追尾を行うときに悪影響を及ぼしている。したがって、映像の回転を抑止しなければならない。なお、映像の回転は推進時、旋回時共にロボットがロール運動を起こしていることが原因であり、ロール運動が生じないようにすることや、得られる映像をリアルタイム補正することが改善策として考えられる。ただし、このCOMETという魚ロボットは、生きた魚の自動追尾を達成させるために高い旋回性能を持つように設計されており、その設計段階からロール運動の発生を犠牲にしている。以上の経緯より、ロール運動を抑え込むより、映像をリアルタイム補正の方が適切であろうと考えて研究を実施する。しかし、映像のリアルタイム補正は各種マイコンでは負荷が大きく、また、パソコンは狭いロボット内部に押し込むことができない。そこで、本研究ではこのロール運動に

よる画像回転の座標補正を，優れた処理能力を持つ FPGA を利用して電子的に行うプログラムを作成し，その性能を評価する．さらに，このプログラムを COMET に組み込んで金魚の追尾実験を行い，座標補正により正確な金魚の位置を把握できるかを調べる．

## 3.2 回転補正面像処理

### 3.2.1 ロボットのロール運動が目標物追尾に及ぼす影響

COMET の水中映像を確認したところ，図 3-1 に示すように尾ひれ駆動による左右方向の振動の他に映像が全体的に回転していることが分かった．これは，推進時（図 3-1(a)～(f)），旋回時（図 3-1(f)～(i)：左旋回，図 3-1(i)～(l)：右旋回）共にロボットがロール運動を起こしていることが原因となっており，特に旋回時において大きく回転している．また，取得した映像から，ロール運動による回転角度は最大で約 40 deg，角速度は約 180 deg/s であると分かった．このローリング運動によりカメラで捉えた追従対象の位置が実際に追従すべき方向と異なることがある．例として図 3-2 に示すように COMET の最大ロール角の 40° で回転するとき左の回転補正前の画像では画面中心から右側にある点が回転補正後の画像では画面中心から左側にあり，回転補正をしない場合左右を誤ることになる．

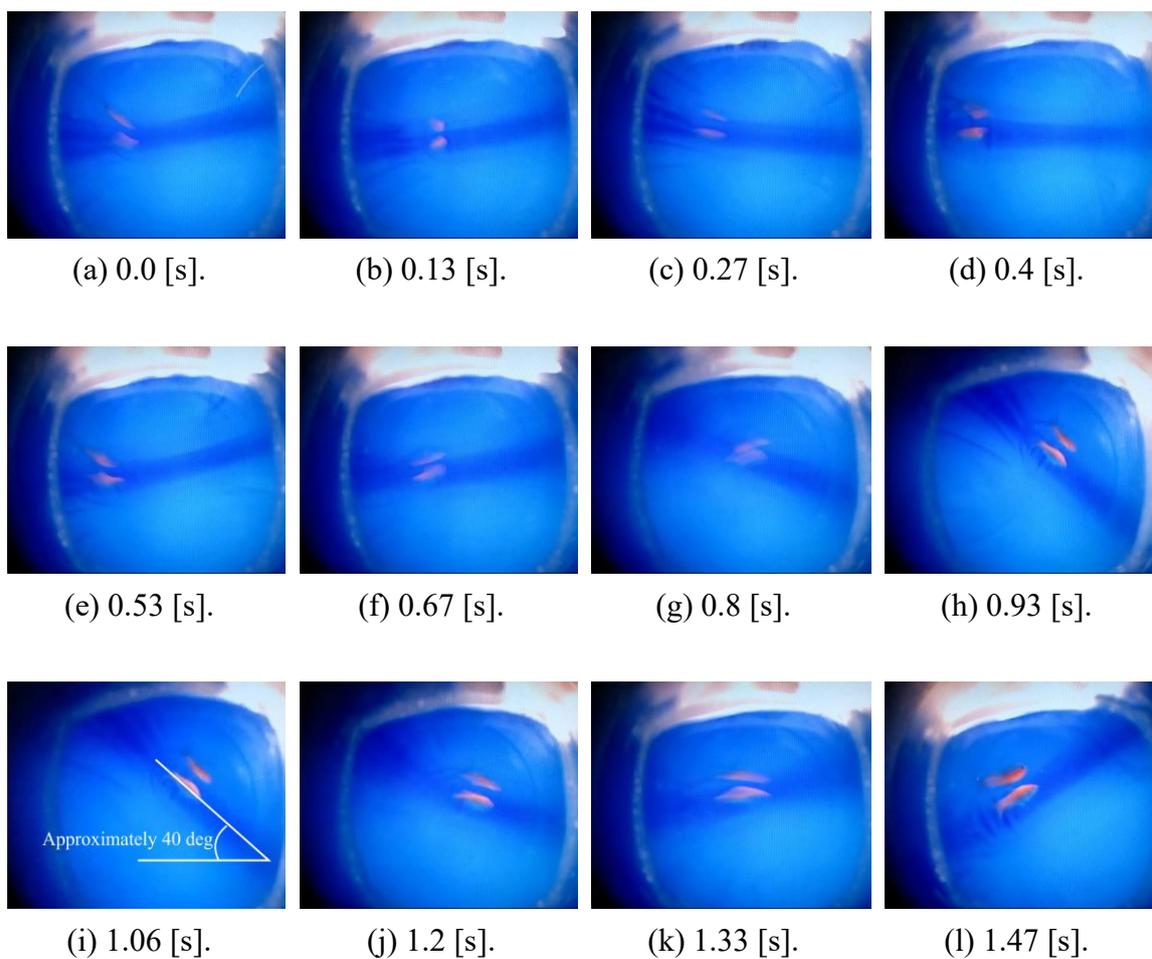


Fig. 3-1 Images acquired by COMET.

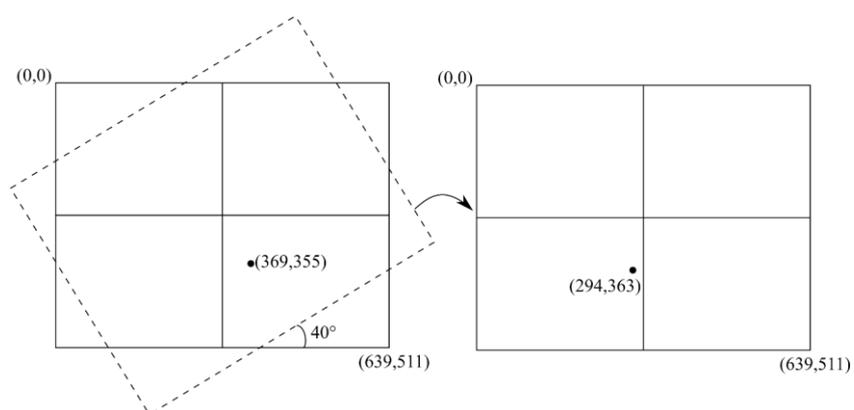


Fig. 3-2 Example of coordinate change by Image rotation.

COMET は色情報をもとに追尾対象の図心を計算し、推進方向を決定する。ここで、ロールしていない場合の目標物のカメラ座標を極座標系で $(r, \varphi)$ とすると、

視界が $\theta_i$ ロールした場合の目標物は極座標系で $(r, \varphi + \theta_i)$ となる。ロボットは対象物の位置をXY座標系で認識するため、これらをXY座標系で表すとそれぞれ $(r\cos\varphi, r\sin\varphi)$ ,  $(r\cos(\varphi + \theta_i), r\sin(\varphi + \theta_i))$ となる。このとき、ロールの有無によるX座標における座標変化量 $\Delta x$ とY座標における座標変化量 $\Delta y$ は以下の式で計算される。

$$\begin{cases} \Delta x = |r\cos(\varphi + \theta_i) - r\cos\varphi| \\ \Delta y = |r\sin(\varphi + \theta_i) - r\sin\varphi| \end{cases} \quad (3-1)$$

この式を三角関数の和積公式を用いて変換すると

$$\begin{cases} \Delta x = \left| 2r \sin \frac{\theta_i}{2} \sin \frac{\theta_i + 2\varphi}{2} \right| \\ \Delta y = \left| 2r \sin \frac{\theta_i}{2} \cos \frac{\theta_i + 2\varphi}{2} \right| \end{cases} \quad (3-2)$$

となる。この式から、ロール運動の影響を受けることによる目標物の座標変化量は初期位置の座標 $(r, \varphi)$ によって変化することが分かる。ここで、COMETのカメラで取得できる広さは極座標で $r = 200$  pixel程度であり、この値とCOMETの最大ロール角度40度を用いて式(3-2)を計算すると、X方向の変化量 $\Delta x$ は最大で136 pixelとなり、追尾の際の座標計算に大きな悪影響を及ぼすことが分かる。ローリング運動が起きる原因として、尾ひれが揺動することにより、ロボットの重心位置が変化することに加え、COMETの構造として将来的に浮沈動作を行うことを想定し、浮心と重心の距離を短く設計しているためであると考えられる。このローリング運動を抑制するために本体部分に対し相対的に尾ひれ揺動部の重量を減らせば、マグネットアクチュエータの発生トルクが減少するため旋回性能が低下し、浮心と重心の位置を離せば、浮沈動作が不十分になる。そこで、ロール運動が起こることを前提として研究を進め、撮影された画像の回転を防ぐことにした。その手法としては、カメラ自体をロボットのロールと逆の方向に回転させることによって画像の回転を防ぐ方法と、ロールした状態で取得した画像を電子的に回転して補正する方法が考えられる。前者の方法を取る場合、カメラにモータを取り付けてロールと逆方向に回転させることにより、カメラの回転を防ぐ方法が考えられる。しかし、この場合はロボット内部に新たな機構を追加する必要があり、ロボットの大型化につながるため、小型ロボットとしては適さない。さらに、モータを介するため反応に遅れが生じ、完全に画像回転を取り除くことができない。一方、電子的な補正を行う場合は新た

な機構を追加することなく、ロボットのサイズを維持したまま正常な画像を取得することができる。また、COMETに搭載しているGigaZeeはFPGAを備えており、計算処理を並列化することによってリアルタイムで計算が可能である。以上のことから、画像の回転補正はFPGAを用いて電子的に行うことに決めた。

### 3.2.2 回転補正画像処理手法

カメラが640×512 pixelの画像を取得する場合に関して、回転補正の概要を述べる(図3-3)。回転補正時に画像の欠損が起きないようにするため、820×820 pixelの計算領域で考える。また、回転補正前後の座標の計算において、回転補正前の座標をもとに回転補正後の座標を求めると、座標が整数値で表されるため、一部の画素において複数の回転補正前の座標が同じ回転補正後の座標に対応することがある一方で、一部の回転補正後の画素がどの回転補正前の画素にも対応しないということも発生するため、回転補正後の画像の中に情報を持たない領域を含むことになってしまう。しかし、この座標の計算は、回転補正後の座標をもとに、回転補正前の座標を求めればそのようなことは生じない。この後者の方法を採用する場合、回転中心を(410, 410)とすると、回転補正前の画素 $(x_1, y_1)$ と回転後の画素 $(x_2, y_2)$ の関係性は回転角度 $\theta_i$ を用いて以下の式(3-3)で表され、この式により、画像の回転補正を行う。なお、COMETは設計上、ロール運動の中心と画像中心に関して左右方向は一致するようになっており、上下はロール運動の中心がやや画像中心より下になる。COMETが取得した画像から回転中心の上下方向の座標を調べたところ、ロール運動の中心が画像中心より約10 pixel下になっており、COMETのロール角 $40^\circ$ を用いて計算すると、ロール運動の中心が画像中心より下にある影響は座標(320,0)で最大値の約6 pixelとなるが、このずれによって追尾の制御へ影響を及ぼすことはない。また、ロール軸とカメラ視線軸に関して、設計上、平行になるように設計している。

$$\begin{cases} x_1 = (x_2 - 410)\cos\theta_i - (y_2 - 410)\sin\theta_i + 410 \\ y_1 = (x_2 - 410)\sin\theta_i + (y_2 - 410)\cos\theta_i + 410 \end{cases} \quad (3-3)$$

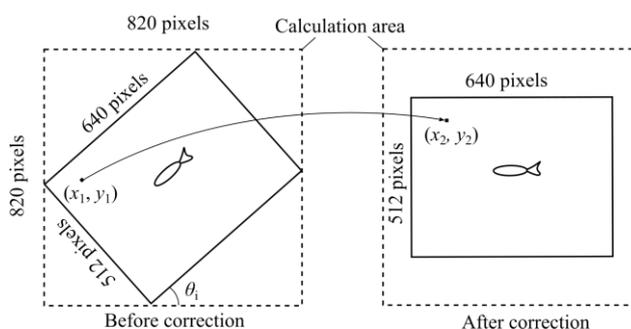


Fig. 3-3 Correction method of image rotation.

式(3-3)の計算を GigaZee で計算する方法を説明する．まず，式(3-3)には積算と三角関数が含まれている．ここで，FPGA は論理ゲートの組み合わせで計算を行うため，これら进行处理するためには多くのリソースを消費することになる．そのリソース消費を避けるため，積算と三角関数を含む項を， $(x_2, y_2, \theta_i)$ の変数を取りうる値の領域であらかじめ計算し，その結果をルックアップテーブル (LUT)として RAM に保存しておく方法を用いる．この方法によって，積算と三角関数を FPGA で計算することなく計算結果を得ることができる．

LUT の内容について説明する．本研究で用いたロボット COMET はピッチング運動が生じない．そのため，ピッチング運動が生じないロボット用 LUT に関して $(x_2 - 410)$ ,  $(y_2 - 410)$ と $\theta_i$ の取り得る値を考える．ここで，角度 $\theta_i$ は $-89^\circ \sim 89^\circ$ の範囲で変化するものとする．さらに，今回の回転補正回路では $\theta_i$ の分解能を $1^\circ$ とする．加えて，三角関数には Y 軸を中心とした対称性があり， $-1^\circ \sim -89^\circ$ の $\mathbf{A}$ の値は $1^\circ \sim 89^\circ$ の $\mathbf{A}$ の値の符号を変えることで表現できる．次に，変数 $x_2, y_2$ は共に  $0 \sim 819$  pixel の値をとるため，LUT 上では同じ値を参照することができる．また， $(x_2 - 410)$ の値は $x_2$ が  $0$  のとき $-410$ ， $x_2$ が  $819$  のとき $409$ の値をとるため，LUT 内では  $0 \sim 410$  のみを扱えば良い．

以上のことから，以下 2 つの行列を作成し，これらをメモリに保存した LUT を利用する．

$$\mathbf{A} = (A_{k,\theta_i}) = \begin{pmatrix} 0\cos 0^\circ & 1\cos 0^\circ & \cdots & 410\cos 0^\circ \\ 0\cos 1^\circ & 1\cos 1^\circ & \cdots & 410\cos 1^\circ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0\cos 89^\circ & 1\cos 89^\circ & \cdots & 410\cos 89^\circ \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

$$\mathbf{B} = (B_{k,\theta_i}) = \begin{pmatrix} 0\sin 0^\circ & 1\sin 0^\circ & \cdots & 410\sin 0^\circ \\ 0\sin 1^\circ & 1\sin 1^\circ & \cdots & 410\sin 1^\circ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0\sin 89^\circ & 1\sin 89^\circ & \cdots & 410\sin 89^\circ \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

ここで，LUT を利用して式(3-3)の簡略化を行うと下の式(3-6)が得られる．FPGA では式(3-6)で表される加減算のみを行う．

次に，この計算方法によるリソース消費を考える．まず， $\mathbf{A}$ の計算結果から得られるデータ数は  $411 \times 90 = 36990$  個となる．また，計算結果の最大の値は  $410$  (整数)となり，これを表すためには  $9$  bit のデータ幅が必要となる．つまり， $36990 \times 9 = 332910$  bit となり，このデータを保存するのに必要なメモリ容量は  $41614$  byte となる．ここで， $\mathbf{B}$ も同じデータ量を持つので回路全体で必要となるメモリ容量は  $41614 \times 2 = 83228$  byte であることが分かる．ここで，GigaZee が有する Block RAM

の容量は 630 Kbyte であることから、約 13%の BRAM を利用することになる。この BRAM は画像処理やデータの一時保存に用いられるため、今後新たな画像処理を組み込むことを考慮すると極力使用量を抑える必要がある。そこで、得られた計算結果を初期値と差分値に分割してデータ量を圧縮する方法を用いる。まず、 $A_{k,\theta_i}$  は整数  $k$  と  $\cos\theta_i$  の積算であることから、 $k$  が 1 変化することによる、 $A_{k,\theta_i}$  の列方向の変化量は最大で 1 になることが分かる。つまり、 $A_{k,\theta_i}$  を整数として、計算結果は差分値を用いると 1 bit のデータ幅で表現できる。本回路では 32 個のデータを一つのブロックとして定義し、これを 9 bit の初期値 1 つと、32 bit の差分値で表現した。これにより、式(3-6)を表すのに必要なメモリ容量は約 11993 byte となり、GigaZee の BRAM の使用量を約 1.9%に抑えることができる。

$$\begin{cases} x_1 = A_{(x_2-410),\theta_i} + B_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \\ y_1 = -B_{(x_2-410),\theta_i} + A_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 > 410, y_2 > 410, 0^\circ \leq \theta_i \leq 89^\circ)$$

$$\begin{cases} x_1 = A_{(x_2-410),\theta_i} - B_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \\ y_1 = B_{(x_2-410),\theta_i} + A_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 > 410, y_2 > 410, -89^\circ \leq \theta_i \leq -1^\circ)$$

$$\begin{cases} x_1 = -A_{(410-x_2),\theta_i} + B_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \\ y_1 = B_{(410-x_2),\theta_i} + A_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 \leq 410, y_2 > 410, 0^\circ \leq \theta_i \leq 89^\circ)$$

$$\begin{cases} x_1 = -A_{(410-x_2),\theta_i} - B_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \\ y_1 = -B_{(410-x_2),\theta_i} + A_{(y_2-410),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 \leq 410, y_2 > 410, -89^\circ \leq \theta_i \leq -1^\circ)$$

(3-6)

$$\begin{cases} x_1 = A_{(x_2-410),\theta_i} - B_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \\ y_1 = -B_{(x_2-410),\theta_i} - A_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 > 410, y_2 \leq 410, 0^\circ \leq \theta_i \leq 89^\circ)$$

$$\begin{cases} x_1 = A_{(x_2-410),\theta_i} + B_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \\ y_1 = B_{(x_2-410),\theta_i} - A_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 > 410, y_2 \leq 410, -89^\circ \leq \theta_i \leq -1^\circ)$$

$$\begin{cases} x_1 = -A_{(410-x_2),\theta_i} - B_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \\ y_1 = B_{(410-x_2),\theta_i} - A_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 \leq 410, y_2 \leq 410, 0^\circ \leq \theta_i \leq 89^\circ)$$

$$\begin{cases} x_1 = -A_{(410-x_2),\theta_i} + B_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \\ y_1 = -B_{(410-x_2),\theta_i} - A_{(410-y_2),\theta_i} + 410 \end{cases}$$

$$(x_2 \leq 410, y_2 \leq 410, -89^\circ \leq \theta_i \leq -1^\circ)$$

座標計算方法を実装する際のプログラムの計算手順を以下に示す。ただし、画像の回転角度 $\theta_i$ はあらかじめ取得できているものとする。

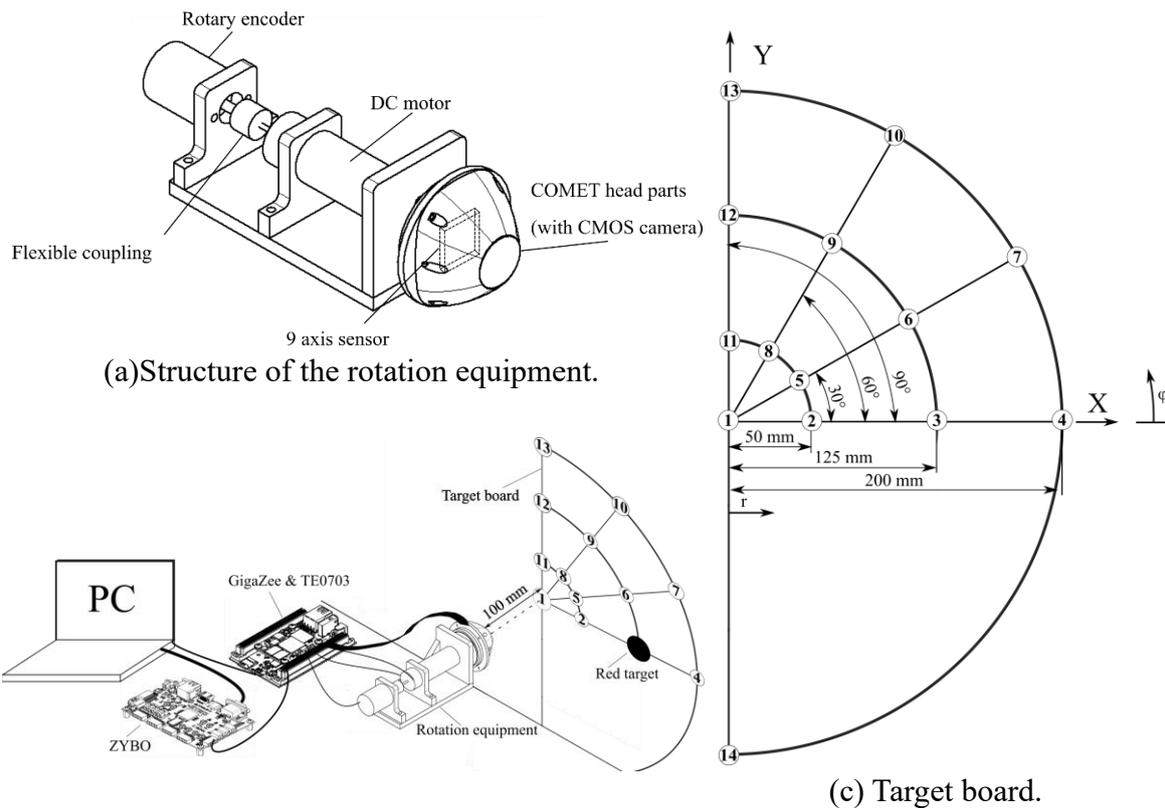
- (a) 回転補正後のある画素の座標 $(x_2, y_2)$ を指定する.
- (b)  $x_2, y_2, \theta_1$ の値に対応した値の初期値と差分値のブロックが保存されている BRAM のアドレスを計算する.
- (c) (b)で算出した BRAM にアドレスと読み出し信号を送信する.
- (d) BRAM から読み出した初期値と差分値を FPGA 上の変数に保存する.
- (e) 初期値と差分値を元に式(4)と式(5)の値を復元する
- (f) (e)と式(6)を用いて,  $(x_1, y_1)$ の座標を算出する.
- (g)  $(x_1, y_1)$ のデータが保存されている DDR3 メモリのアドレスを計算する.
- (h)  $(x_1, y_1)$ に保存されている画素の情報を $(x_2, y_2)$ に移動させる転送信号を送出する.

以上の処理を遅延なく, 並列して行うため, 理論上 1 枚の画像の回転補正にかかる計算回数は  $820 \times 820 + 8 = 672408$  回となる. ここで, 座標の計算の処理速度は  $62.5 \text{ ns}$ , DDR3 メモリの読み出し速度は  $4 \text{ ns}$  として利用した. その結果, 画像の回転補正にかかる時間は  $42.0 \text{ ms}$  となるが, これは画像 1 枚の取得にかかる時間  $131 \text{ ms}$  よりも速いためロボットへの搭載が可能である.

### 3.3 回転補正方法の評価

#### 3.3.1 目標物の位置を変えた場合の実験

回転補正プログラムの性能を評価するために, 魚ロボットのローリング運動を再現する回転試験機を製作した(図 3-4). 回転試験機にはギア比 84:1 のギア付 DC モータ (Maxon, 343185) が配置され, その DC モータのギアの無い方の軸に 100 P/R のロータリーエンコーダ(OMRON, E6A2-CW3C)を接続し, このロータリーエンコーダを 1 逡倍で利用した. その場合, モータ主軸 (ギアによって減速した軸) の角度は  $0.043^\circ$  の分解能で計測できる. また, DC モータの主軸側には 9 軸センサモジュール (共立電子産業社, KP-9250) と COMET の頭部パーツ (CMOS カメラを含む) を固定した.



(b) Schematic figure of experimental environment

Fig. 3-4 Experimental environment.

DC モータを駆動させることによって COMET 頭部パーツと 9 軸センサモジュールと一緒に回転し、魚ロボットがロール運動を起こしているときのカメラ撮影を再現することができる。また、COMET の頭部パーツからカメラと 9 軸センサの信号線が GigaZee に接続されている。GigaZee では回転補正回路の有無によるデータの比較を行うため、カメラ撮像内における赤色物体の座標データとその画像のそのものの記録を行う。

回転試験を行うにあたって 9 軸センサモジュールによって正しく角度が取得できているかを確認する実験を行った。回転試験機の角速度を  $360 \text{ deg/s}$  で往復回転運動をさせ、ロータリーエンコーダと 9 軸センサからの角度データ取得を行った。なお、ロータリーエンコーダのデータ取得周期は  $8 \times 10^{-9} \text{ s}$ 、9 軸センサモジュールのデータ取得周期は  $6.55 \times 10^{-4} \text{ s}$  とした。取得したデータの比較を図 3-5 に示す。図 3-5 から 9 軸センサモジュールからのデータを用いて算出した角度はロータリーエンコーダから算出した角度と対応しており、9 軸センサモジュールから正しく角度を算出できている。

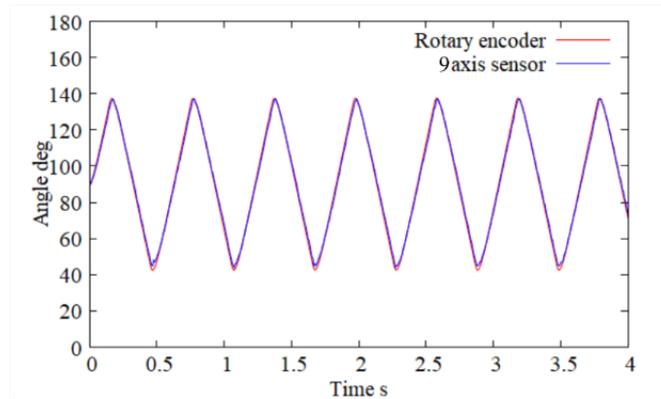


Fig. 3-5 Comparison of measured angle between 9-axis sensor and rotary encoder.  
Angle measured by 9-axis sensor matches angle measured by rotary encoder.

回転試験における撮影対象は、図 3-4(c)のようなターゲットボードを使用した。ターゲットボードは中心からの距離  $r$  を 0, 50, 125, 200 mm, 水平線を基準とした角度  $\varphi$  を 0, 30, 60, 90 deg とした場合の交点の計 13 点に、 $r = 200$  mm,  $\varphi = -90$  deg の地点を加えた計 14 点で測定を行うことができる。実験を行うときはそれぞれの点に直径 50 mm の赤色の円を設置する。また、試験機とターゲットボード間の距離はカメラの先端を基準点として 100 mm とした。なお、カメラ等の信号は一旦、FPGA 試験ボード ZYBO を介して PC ヘデータが送られる。また、実験は 10 秒間行い、回転試験機を  $\pm 45$  deg, 角速度は 90 deg/s で往復運動させた。

実験で得られた結果を初期角度別に分けて散布図として表したものが図 3-6 である。この散布図は画像の左上を原点として、横軸が取得画像の X 座標、縦軸が取得画像の Y 座標を示しており、カメラの座標系と対応している。まず、回転補正前を示す赤色の点に注目すると、中心からの距離  $r$  が大きいほどターゲットの座標変化が大きくなっている。また、X 方向の座標変化は  $\varphi$  が 90 deg に近いほど大きくなっている。特に、点⑬での X 座標変化は最大で約 250 pixel になることが確認できた。次に、青色の点に注目すると、どの位置においてもターゲットの座標変化を軽減できていることが分かる。このことから、回転補正回路はロールによるターゲットの座標変化を軽減できることいえる。

点⑬と点④の青色の点の分布を比較すると、点④での分布の広がりの方が大きいことが分かる。つまり、点④では点⑬と比較して回転補正回路による補償の効果が小さくなっていることが分かる。この問題の要因として、CMOS カメラの特性であるローリングシャッター[33]による各行の撮影時期のずれが影響しているのではないかと考えた。

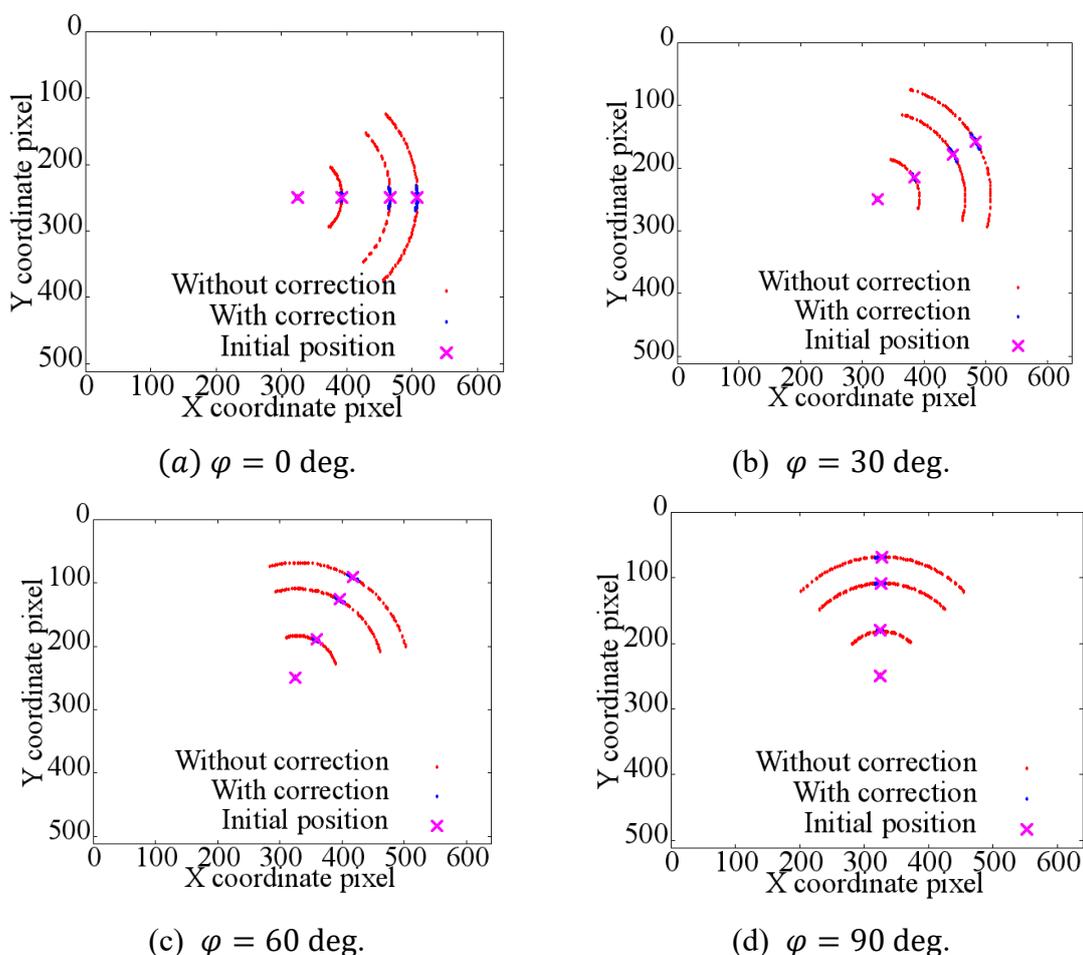


Fig. 3-6 Comparison of target coordinate change with and without correction circuit.  
Correction circuit is reducing target coordinate change.

### 3.3.2 ローリングシャッター方式が回転補正回路に及ぼす影響

はじめに、回転補正後の目標物の座標に関連する定義を行う。なお、本節では X 座標に関する定義のみを示すが、Y 座標についても同様に考えるものとする。まず、初期の X 座標を  $x_{ini}$  とすると、ある時刻における回転補正後の X 座標の変化量  $\Delta x_{cor}$  は以下の式で表される。ここで、 $x_{cor}$  は回転補正後の X 座標を表す。

$$\Delta x_{cor} = |x_{cor} - x_{ini}| \quad (3-7)$$

さらに、10 秒間の実験中における最大の変化量を  $\Delta x_{max}$  とする。この  $\Delta x_{max}$  には、回転補正回路の分解能が  $1^\circ$  であることや、レンズの画角の違いなどが原因となる誤差が含まれる。これを  $\Delta x_e$  として定義する。さらに、ローリングシャッター方式の影響を受けて生じる x 軸方向の変化量を  $\Delta x_{rs}$  とすると、これらの関係

は次式で表される.

$$\Delta x_{\max} = \Delta x_e + \Delta x_{rs} \quad (3-8)$$

この式の $\Delta x_e$ は 5~10 pixel 程度で,  $\Delta x_{rs}$ と比較して回路に及ぼす影響が小さいため,  $\Delta x_{rs}$ のみについて考える.

$\Delta x_{rs}$ が生じる原因について検討する. COMET に搭載している CMOS カメラの露光はローリングシャッター方式で行われている. ローリングシャッター方式は, センサ素子の上部ラインから順に露光が開始されている. そのため, 画像の下側に行くほど, 露光を行う時期が遅くなる. ここで, 3.3.1 節の実験では画像の先頭データを取得した時刻を基準にして角度同期を行っていた. つまり, 画像の下側の露光は角度の取得時刻より遅れて行われることになる. この画像と角度の同期時期のずれが回転補正回路に悪影響を及ぼしていると考えた.

$\Delta x_{rs}$ を検討するため, 図 3-7 のような場合を考える. この図は試験機が $\omega$ の角速度, 目標物の位置を点 $\textcircled{A}$ とした場合にカメラが取得する画像を表したものである. まず, 画像と角度データの同期は画像の 1 Line 目のデータ取得時の時期を表す $n_{hs} = 1$ を基準としている. よって, この時間を $t = 0$ として考える. また, この時刻にターゲットの座標は $A(0, -r)$ にあるとする. 次に, ローリングシャッター方式により, このターゲットが実際に画像として撮影される時刻は $t = \Delta t_{rs}$ となる. この $\Delta t_{rs}$ 秒の間に, 試験機が $\omega$ の角速度で回転している影響を受けて画像内のターゲットの位置は $A'(r \sin \omega \Delta t_{rs}, -r \cos \omega \Delta t_{rs})$ に遷移している. 以上のことから, 以下の式が成り立つ.

$$\Delta x_{rs} = r \sin \omega \Delta t_{rs} \quad (3-9)$$

この式から, ローリングシャッター方式の影響を受けて生じる変位量 $\Delta x_{rs}$ は, 画像中心から目標物までの距離 $r$ と角速度 $\omega$ , 画像取得時期とのずれ $\Delta t_{rs}$ によって変化する.

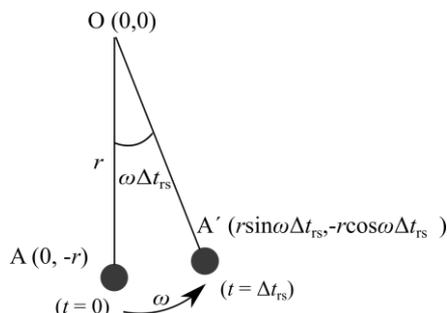


Fig. 3-7 X coordinate change of the target due to the delay of exposing.

### 3.3.3 回転試験機の角速度を変えた場合の実験

3.3.2 節の考察から  $x$  軸方向の変化量  $\Delta x_{\max}$  の値が試験機の角速度  $\omega$  と撮像時間のずれ  $\Delta t_{rs}$  によって影響を受けると予測される。そこで、 $X$  方向変化量が最大となった点⑬と、 $X$  軸を境界として点⑬と対称の位置にある点⑭で実験を行う。なお、ローリングシャッターの影響がない場合、式(3-2)からこの2点は同じ座標変化量となる。

実験時の条件は、回転試験機を  $\pm 45 \text{ deg}$ 、角速度は  $90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 \text{ deg/s}$  の7通りの値で実施する。それぞれの点に対して10秒間の測定を行い、回転補正回路の有無によるターゲットの  $X$  座標変化を比較する。

取得したデータの COMET のロール運動の角速度と同じ  $180 \text{ deg/s}$  のうち、特徴的なデータである点⑬および点⑭の  $X$  座標変化を図 3-8 に示す。さらに、ロール運動の各角速度に対応する  $\Delta x_{\max}$  の値を図 3-9 に示す。図 3-8, 3-9 から、点⑬では角速度が変化してもその値は大きく変化しなかった。一方、点⑭では角速度の増加に比例して  $\Delta x_{\max}$  の値が増加していることが分かる。つまり、 $\Delta x_{\max}$  の値が  $\omega$  と  $\Delta t_{rs}$  によって影響を受けている。特に、COMET の角速度とほぼ同じ  $\omega = 180 \text{ deg/s}$  における  $\Delta x_{\max}$  は最大で  $56 \text{ pixel}$  ( $59 \text{ mm}$ ) の変化をしていることが分かった。

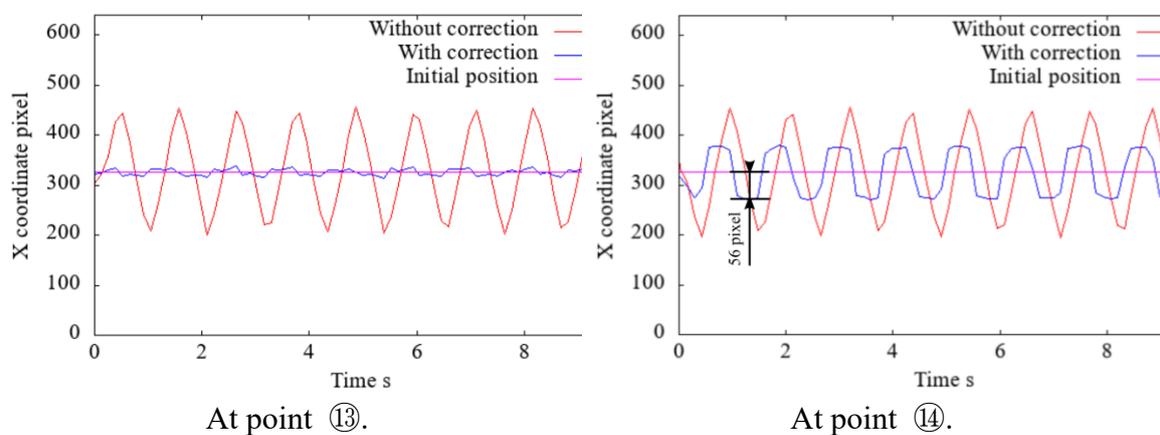


Fig. 3-8 Time change of X coordinate with and without rotation correction at  $180 \text{ deg/s}$ .

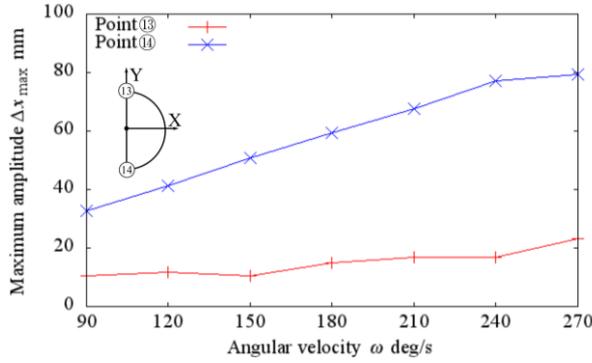


Fig. 3-9 Relationship between angular velocity  $\omega$  and maximum amplitude  $\Delta x_{\max}$ . Point ⑭ is affected by the rolling shutter.

### 3.3.4 画像データと角度データの同期タイミングを変えた場合の実験

3.3.3 節の実験で、角度の取得時期と画像の露光時期のずれによって回転補正回路の性能が低下することが分かった。そこで、回転補正回路の性能を発揮するために適切な角度取得時期を選定する。

点①~⑭のうち、ローリングシャッターによる影響が最も小さい点⑬と最も大きい点⑭において、角速度を一定にして角度の取得時期を変えて実験を行い、 $\Delta x_{\max}$  の変化量を調べる。角度の取得時期は CMOS カメラの水平同期信号 (周期  $249 \mu\text{s}$ ) のカウント数  $n_{\text{hs}}$  を基準にして決定する。本実験での試験機の角速度は  $\omega = 180 \text{ deg/s}$  で、角度取得時期を示す  $n_{\text{hs}}$  の値を 1, 64, 128, 192, 256, 320, 386, 448, 512 の 9 通りで実験を行う。得られたデータからそれぞれ  $\Delta x_{\max}$  を算出して比較を行う。

実験の結果を図 3-10 に示す。この図から、点⑬の  $\Delta x_{\max}$  は  $n_{\text{hs}} = 64$  の時に最小になり、点⑭の  $\Delta x_{\max}$  は  $n_{\text{hs}} = 320$  の時に最小になっていることが分かる。ここで、1 行目のデータ転送時を基準とすると CMOS カメラの水平同期信号の周期  $249 \mu\text{s}$  から点⑬は  $15.9 \text{ ms}$ 、点⑭は  $79.7 \text{ ms}$  の露光遅れが生じていることが分かる。さらに、 $n_{\text{hs}} = 192$  の時には 2 つの地点の  $\Delta x_{\max}$  がほぼ一致していることが分かる。つまり、この時が画像の中央部が露光された時刻を示している。

ここで、同一の角度取得時期  $n_{\text{hs}}$  において、点⑬の  $\Delta x_{\max}$  を  $\Delta x_{\max}(13)$ 、点⑭の  $\Delta x_{\max}$  を  $\Delta x_{\max}(14)$  と定義する。さらに、回転補正回路の性能を示す評価関数  $J$  を以下の式で定義する。

$$J = \{\Delta x_{\max}(13)\}^2 + \{\Delta x_{\max}(14)\}^2 \quad (3-10)$$

この評価関数  $J$  の値が最小になるときの  $n_{\text{hs}}$  を利用した場合、回路全体で見た時の  $\Delta x_{\max}$  を最小にすることができる。この評価関数  $J$  と  $n_{\text{hs}}$  の関係を図 3-11 に

示す。図 3-11 より、実験で用いた 9 通りの  $n_{hs}$  のうち、 $n_{hs} = 192$  のときの角度を用いると回転補正回路は最大の性能を発揮することが分かった。ここで、ローリング運動の角速度  $\omega$  の変化はローリングシャッターの露光時期に影響を与えないと考えられるため、角速度  $\omega$  の変化に依らずこの  $n_{hs}$  を用いることができると予測される。

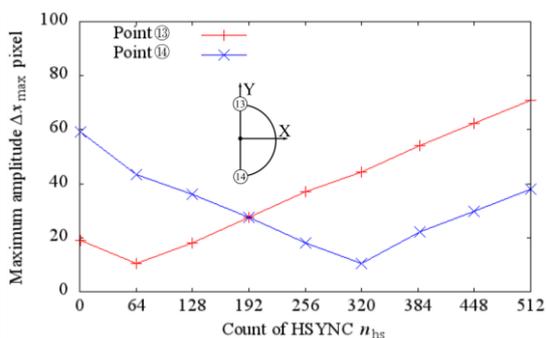


Fig. 3-10 Relationship between count of HSYNC  $n_{hs}$  and maximum amplitude  $\Delta x_{max}$ .

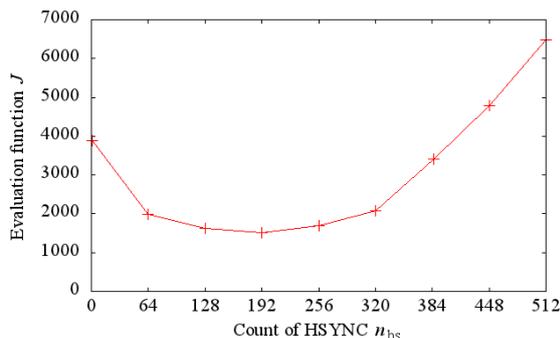


Fig. 3-11 Relationship between count of HSYNC  $n_{hs}$  and evaluation function  $J$ . Effect of the rolling shutter is smallest at  $n_{hs} = 192$ .

最後に、この回転補正回路の性能を評価するため画像の中央部分の露光時刻と角度データを一致させたときの  $\Delta x_{max}$  を調べる。角度の取得時期を示す  $n_{hs}$  を 192 として設定し、回転試験機を  $\pm 45 \text{ deg}$ 、角速度を 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270  $\text{ deg/s}$  の 7 通りに設定して実施する。それぞれの点に対して 10 秒間の測定を行い、それぞれの角速度での  $\Delta x_{max}$  を比較する。実験の結果を図 3-12 に示す。

図 3-12 と図 3-9 を比較すると、点⑬と点⑭における  $\Delta x_{max}$  の差が小さくなり、その値も小さくなっていることが分かる。つまり、画像全体で考えるとローリングシャッターの影響を小さくできている。ここで、点⑬と点⑭の間に最大 10 mm 程度の差があるが、これは自動設定の露出が変わったために生じていると考えられる。また、COMET の角速度とほぼ同じとなる  $\omega = 180 \text{ deg/s}$  における  $\Delta x_{max}$  は点⑭において最大で 31 pixel の変化をしていることが分かった。

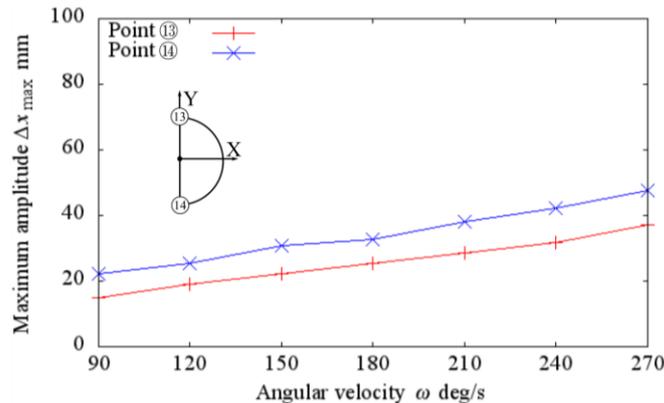


Fig. 3-12 Relationship between angular velocity  $\omega$  and a maximum value of X coordinate amplitude  $\Delta x_{\max}$  when  $n_{hs} = 192$ .

### 3.4 COMETでの回転補正実験

作成した回転補正回路を COMET に組み込んで追尾性能の評価を行う。また，3.3 章での実験結果をもとに，角度の同期タイミング  $n_{hs}$  は 192 の値を用いる。追尾対象は図 3-13 に示す体長 80 mm の琉金である。実験時の COMET のプログラムは，取得した画像をリアルタイムで回転補正し，回転補正後のデータから得られた金魚の図心をもとに追尾制御を行う。その際，回転補正前後の画像データを保存しておき，実験終了後に比較をする。

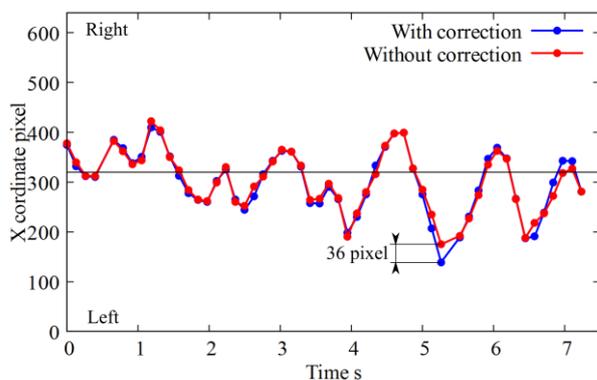
実験環境は図 3-1 を取得した時と水深以外は同じである。今回の実験に用いた琉金は水槽の底を這うようにして泳ぐ習性があり，水面近くを泳ぐ COMET とすれ違ってしまい，うまく追尾ができなかった。そこで，水槽の水深を 200 mm から 100 mm に変更して実験を行った。

この実験により約 7 秒間の追尾映像を取得した。回転補正前後の画像をもとに金魚の図心がどのように変化するかを示したものが図 3-14 である。この図から，Y 方向の座標の補正量と比べて X 方向の座標の補正量が小さいことが分かる。これは，水槽の水深を下げたことにより，金魚の Y 方向の移動が制限されたことによるものと考えられる。なぜなら，Y 方向の移動を制限すると，式(3-2)の  $\varphi$  の値が小さくなることにより， $\Delta x$  が小さくなるからである。さらに，図中の 5.2 秒付近では，X 方向，Y 方向ともに座標の補正量が最大になっていることが分かる。この時，X 方向の座標補正量は  $-36$  pixel，Y 方向の座標補正量は  $-54$  pixel となった。また，この時の回転補正前後の画像の関係を示したものが図 3-15 である。まず，回転補正前の画像に着目すると，金魚が左下の端におり，水面が傾いていることが分かる。次に，回転補正後の画像に着目すると，水面の傾きが水平になっていることから回転補正が行われていることが分かる。この回

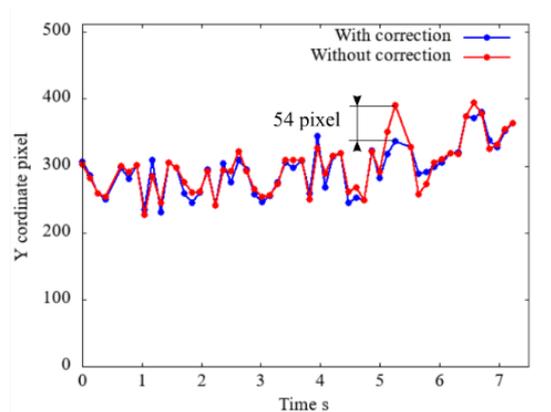
転補正により，金魚の座標は X 軸，Y 軸方向共に負の向きに移動する．これは 図 3-14 での座標変化とも一致する．このことから，回転補正回路は，COMET のロール運動により生じる映像内の金魚の座標変化を補正し，より正確な位置を把握できている．



Fig. 3-13 Image of fringetail goldfish.



(a) The behavior of X coordinate of the centroid.



(b) The behavior of Y coordinate of the centroid.

Fig. 3-14 The behavior of the centroid of goldfish. With rotation correction, effect of rolling motion is reduced.

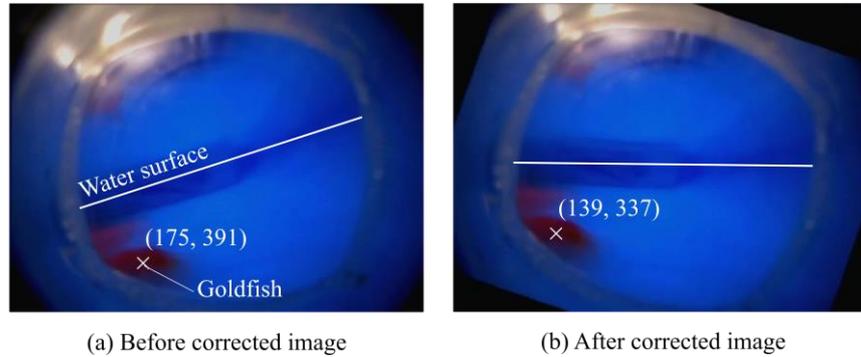


Fig. 3-15 Comparison of images between before and after correction at 5.2 s.

### 3.5 結言

本研究では、ローリング運動を起こす魚追従ロボット COMET が得る映像のリアルタイム補正を行い、金魚の自動追尾実験を行い、以下の知見を得た。ローリング運動を起こす魚ロボットが取得する被写体の座標を補正するために、ジャイロセンサと加速度センサから得たロボットのロール角度をもとに、電子的に画像を回転させて被写体の座標変化を補正する回転補正回路を作成した。また、このプログラムの計算量と BRAM 使用量を軽減する方法を検討し、実際に小型魚ロボットに適用可能な水準までプログラムの規模を小さくすることができた。

魚ロボットのローリングを再現できる回転試験機を作製し、回転補正回路の性能評価を行った。その結果、回転補正回路は CMOS カメラのローリングシャッターの影響を受けて画像の上下位置によってずれが生じることが分かった。このずれは回転試験機の角速度と画像と角度同期のタイミングによって変化し、適切なタイミングで同期すればずれの影響を最小限にできることが分かった。

補正回路を COMET に組み込んで金魚の自動追尾実験を行ったところ、ロール運動による画像の回転の抑制が可能であることが分かった。さらに、画像の回転による金魚の図心の座標変化を補正し、より正確な座標を認識できることが確認できた。

## 第4章 矢の選別のためのアーチェリーロボットの開発

### 4.1 緒言

魚ロボットによる銚の射出による外来魚駆除を行うには、目的の外来魚に銚を的中させる必要がある。そこで、水中での銚の挙動について検討を行う前に、まず、地上で発射機構の事前検討として、アーチェリー選手の動作を模倣したシューティングマシンを開発し、その精度について評価する。アーチェリーのオリンピック選手は非常に高い精度で的中させる。そのため、目的の外来魚に銚を的中させることに関する知見を得られると考え、シューティングマシンを開発する。

本章では、シューティングマシンを設計、実験を行う。また、的中精度について検討するうえで、競技会での使用に適しない欠陥のある矢の識別を行うことについても検討する。

アーチェリーは、オリンピックの正式競技種の1つとして採用され続けている。日本では、近年多くの選手がワールドカップやチャンピオンシップイベントに積極的に参加している。これは全日本アーチェリー連盟がアスリートを支援していることも一因である。アーチェリーの試合において、パフォーマンスは精神面に大きく依存する。選手が欠陥のある矢が確実に除外されたと確信しているならば、不安要素が減少する。この点で、欠陥のある矢を見分けることができるシューティングマシンは有用であると考えられる。宮崎らは矢の空力特性を評価する実験を実施している[34][35]。しかし、日本において、この分野の研究はほとんどない。そのため、日本はこの点において世界にやや遅れをとっている。

イタリアの iCub[36]というヒューマノイドロボットは弓で矢を放つことができる。しかし、70 m の距離で競うオリンピックでの支援にこのマシンを使うには不向きである。Spot-Hogg Hooter Shooter Bow Tuning Machine [37]や Coop's Bowsmith Pro [38]といったシューティングマシンが市販されている。Spot-Hogg Hooter Shooter Bow Tuning Machine と Coop's Bowsmith Pro はそれぞれ 18 m, 36 m から同じ位置に矢を打つことができるとされている。しかし、これらのマシンの 70 m の距離における精度には言及されていない。本研究では、次の要件でシューティングマシンを開発する。(1)70 m の距離のターゲットを射抜くことができる。(2)発射時の反動で左手の保持部分が前方に飛び出すこと。(3)右手がアーチャーズパラドックス[39]を起こす。(4)全ての選手に対応して保持部を容易に脱着することができる。

マシンの全体図を図 4-1 に示す。左手は弓を支え、右手の指で弦を保持する。

台形ねじは手動で回転させ、調整を行う。そのように、右手の部品を後に動か  
し、弦を引く。続いて、右手の指を放すことによって矢を放つ。このマシンの  
開発から次のことがわかった。(1)ハンドルを手で回した時にマシン全体が振動  
し、的中精度が低下する。(2)左手はより良く弓を支えられるように設計、製  
作しなければならない。(3)土台部は矢を放った時に動かないように十分重く作  
るべきである。

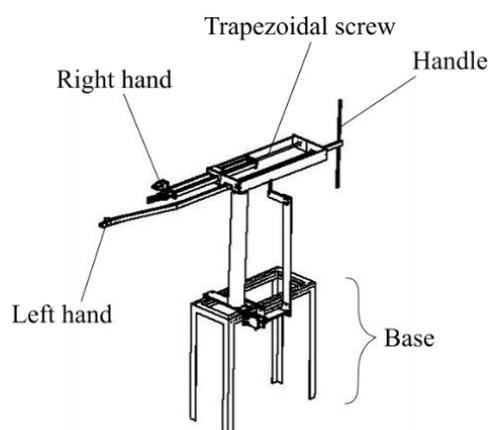


Fig. 4-1 Shooting machine 1 [40].

本研究では、改良した2号機を開発し、矢の特性の識別、及び正常な矢と異  
常な矢を識別できるかを調査する。

## 4.2 シューティングマシン2号機の開発

### 4.2.1 土台部

シューティングマシン1号機と2号機の大きさと重量の比較を表4-1に示す。  
2号機は矢の発射時の衝撃で動かないように100 kgを超える重量になるように  
設計した。2号機の重量は114.4 kgであり、これは1号機の約4.7倍である。

Table 4-1 Comparison of shooting machine 1 and 2.

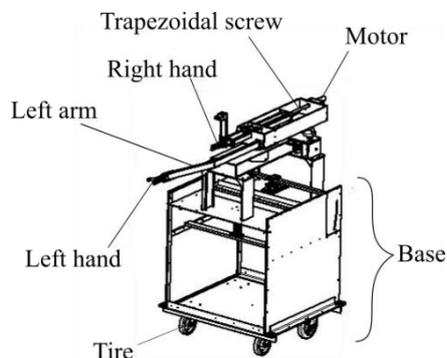
	Length	Width	Hight	Mass
Machine 1	1785 mm	399 mm	1575 mm	24.1 kg
Machine 2	1872 mm	903 mm	1607 mm	114.4 kg

2号機の写真を図4-2(a)に、概要を図4-2(b)に示す。重量を増加させたため、  
移動を容易にするために土台部の下部にタイヤを設けた。また、移動後に矢の

発射位置を固定するために M24 のボルトを用いる。さらに、固定後に垂直、水平方向に照準を調整するための機構を搭載している。



(a) Image of machine 2.



(b) Schematic diagram of machine 2.

Fig. 4-2 Shooting machine 2.

#### 4.2.2 弦を引くための駆動部

矢を弦につがえた後、マシンで引く。1号機では、台形ねじに取り付けたハンドルを回して弦を引く構造のため、手の動きによってマシンが振動を起こしていた。したがって、2号機では振動を最小限に抑えるため、ハンドルの代わりにモータで弦を引く構造（図 4-2(b)右上）を採用した。

図 4-3 にモータ制御の概要を示す。モータの動作は大きく 3 つのモードに分けられる。モード 1 は速く弦を引くモード、モード 2 はクリッカー近くになった時に速度を落とすモード、モード 3 はクリッカーの落ちるすぐ近くのモードである。それぞれのモードは図 4-3(a)に示すような位置で分かれている。モードの変更位置は図 4-3(b)に示しており、その位置は容易に変更することができる。モータの PWM(pulse width modulation)制御のデューティ比はモード 1 において 30%、モード 2 において 12%、モード 3 において 10%である。モードは図 4-3(a)に示すリミットスイッチによって切り替えられる。モードは矢の動作に応じた信号を Raspberry Pi によって処理し、自動で変更される。

弦を引くためには DC モータ (Maxon Motor 社製, 310007) 用い、4 つの MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor) (K100E08N1 and IRF4905) を用いた H ブリッジ回路により駆動、制御を行った。リミットスイッチの状態に応じた PWM 信号を MOSFET のゲートに入力した。

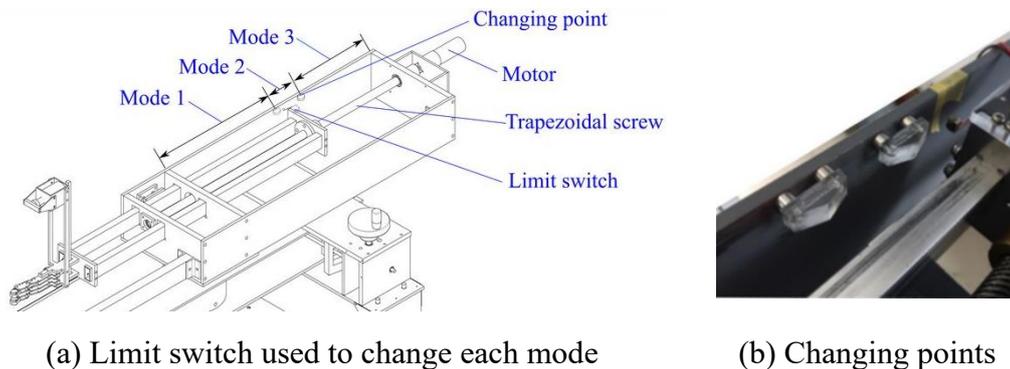


Fig. 4-3 System used to draw a bowstring.

#### 4.2.3 弓を保持する左手部分

アーチェリー選手は左手で弓を持ち、弓は照準を定めている時、完全に静止している。矢が放たれた後もわずかな時間、静止している。1号機では  $t1.5 \times 15 \times 25$  のアルミニウム角パイプを使用していたが、容易に振動を起こした。従って、2号機では振動を低減するために太いパイプを使用することとし、 $t2 \times 20 \times 40$  の鉄パイプを使用した。

マシンの左手（保持部）は弓を保持する。1号機では、左手と弓は固定されていなかった。そのため、矢を発射するたびに弓が左手部から離れていた。アーチェリー選手の場合は、毎回同様に保持する一方で、1号機の場合は、毎回保持位置が異なるため、射撃精度が低下する。従って2号機では、図4-4(a)に示すように、ポリアセタールを使用し弓を保護しつつ、保持部が弓を強く保持する。また、図4-4(b)に弓の保持方法を示す。さらに、矢を放った時に保持部が腕部から前方に飛び出す。

引き尺が異なると矢が的の垂直方向に散らばる。そのため、矢の先端がクリッカーの位置に達すると音が鳴り、アーチェリー選手が矢を放つタイミングがわかる。このクリッカーにより、アーチェリー選手は同じ引き尺で矢を放つことができる。このマシンの場合、クリッカーは約 1400 Hz の音を 0.15 秒鳴らす。図4-4(c)に示すように、この音をマイクで取得する。図4-5にマイクによる音の取得と Raspberry Pi への送信フローを示す。マイクによって取得された音の信号はプリアンプ回路、CR(capacitor-resistor)ローパスフィルタ、1次ローパスフィルタ、6次ハイパスフィルタ、パワーアンプ、アナログデジタルコンバータ、Raspberry Pi の順に通過し、その後即座に矢が放たれる。

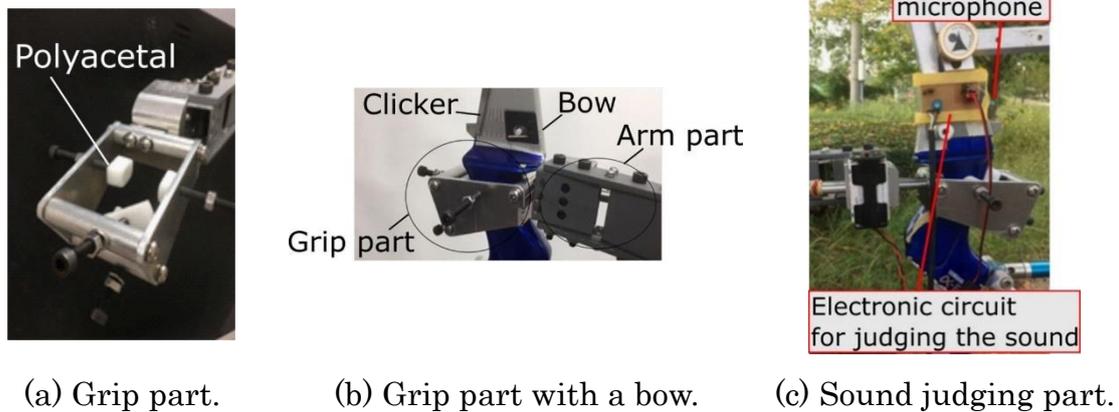


Fig. 4-4 Left hand.

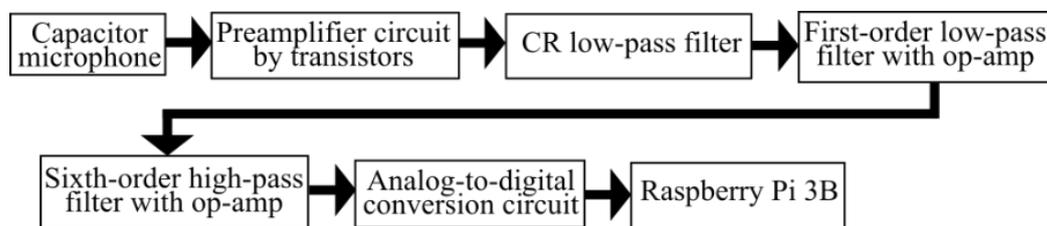
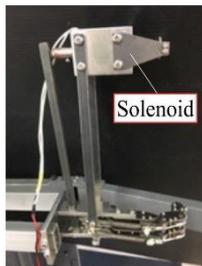


Fig. 4-5 Flow of the acoustic signal from the microphone to a small PC (Raspberry Pi 3B).

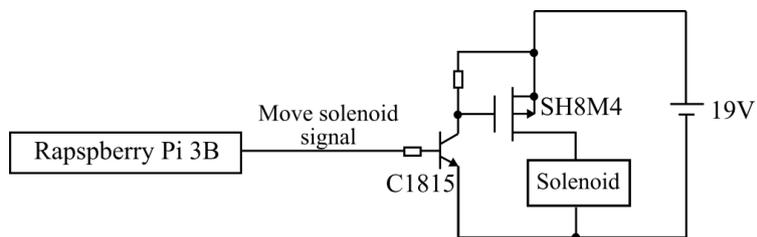
#### 4.2.4 発射機構

図 4-6(a)に弦をつがえる右手の写真を示す。2号機の右手部は矢を放った時にアーチャーズパラドックスを起こすために指と同じ構造としている。また、指を曲げたり伸ばしたりする動作はワイヤやばねを用いて引くことで模倣している。指部は曲げた状態で保持することができ、矢を放つときにはソレノイドに電流を流すことによって伸ばすことができる。

ソレノイドはパワーMOSFET(SH8M4)を含む回路によって駆動される。図 4-6(b)に示すように、Raspberry Pi がクリッカーが鳴ったと認識すると、パワーMOSFET のゲートに電圧を掛ける。



(a) Image of the electronic circuit.



(b) Illustration of the electronic circuit.

Fig. 4-6 Right hand.

### 4.3 シューティングマシン2号機を用いた実験と実験結果

#### 4.3.1 実験方法

シューティングマシンをアーチェリーレンジに移動し、精度評価のための実験を行った。この実験は2019年10月2日、水曜日、午後4時に行い、その時の風は弱かった。使用した弓はヤマハ製、 $\alpha$ -EXである。矢は引き尺が382 mm になった時に発射するように設定した。また、その時の弦を引く重量は18 kgf である。

シューティングマシンを的から70 mの距離に設置し、6本の矢を放った。なお、これらの矢には2本の欠陥のある矢を含めており、1本は常に右側に的中する矢、もう1本は羽が欠けており、常に下側に的中する矢である。水平距離  $x$  と垂直距離  $y$  は的の中心から6本の矢の的中位置として計測した。実験はクリッカーの音を発射信号として使用した場合と使用しなかった場合の2通りで行った。

本実験の目的は、同条件で矢を放った時にどの程度ばらつきが生じるかを評価することである。従って、中心に的中させることを目的としていない。また、本セクションの図の原点は矢の的中位置の平均位置としている。

#### 4.3.2 シューティングマシンの精度の評価

参考に、図4-7(a)に先行研究で得られた1号機の実験結果を示す[7]。この実験では、同じ矢を用いて18 mの距離から10回矢を放っている。その時の弓を引く重量は9 kgであった。また、70 mの距離からの実験は、弦の力が弱すぎ、矢が的に届かないため行うことはなかった。図4-7(b),(c)に2号機で正常な矢を用いて得られた結果を示す。図4-7(b)はクリッカーの音を発射用信号として用いず行った実験で得られた矢の的中位置、図4-7(c)はクリッカーの音を発射用信号と

して用いた実験で得られた矢の的中位置である。また、矢の的中位置のばらつきを調べるため、的の中心から矢の的中位置の距離の標準偏差  $\sigma$  を求め、この値を半径とする円として示した。

図 4-7(c)に示すように、2号機において、クリッカーの音を用いた場合の方が明らかに的中精度が向上していることが分かる。風のない日であればシューティングマシン2号機は10本の矢を的の10点、つまり直径122 mmの円の中の的中させることができた。

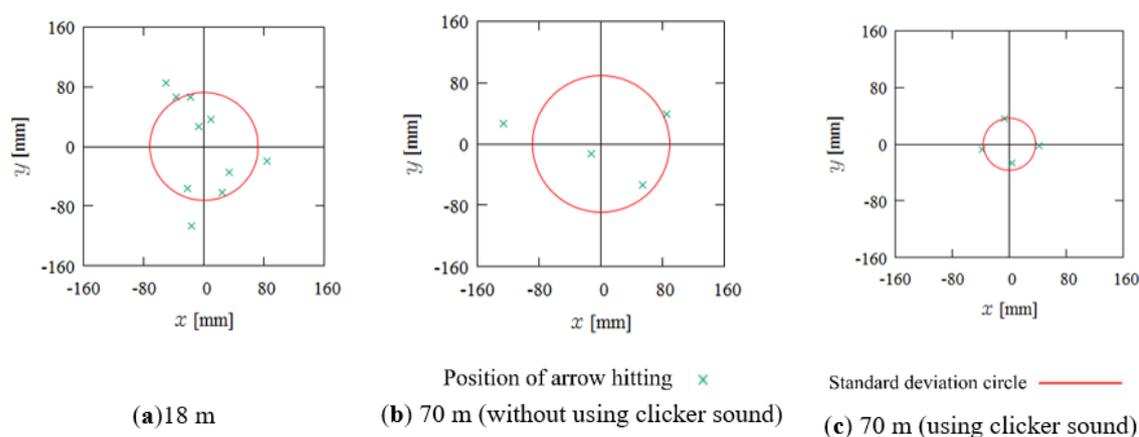


Fig. 4-7 Test shooting results.

### 4.3.3 異常矢の選別

図 4-8 に異常矢を2本含めた6本の矢の的中位置を示す。異常矢は統計的な外れ値として扱った。外れ値は標準偏差、スミルノフ・グラブス検定、トンプソン検定等で得られる。今回の場合、正常な矢の分布は実験より既知であるため、外れ値は正常な矢の標準偏差として識別することができる。図 4-8 では、標準偏差( $\sigma$ )を半径として赤の円を示し、標準偏差の2倍( $2\sigma$ )を半径として緑の円を示す。一般的に、68%の値が $\sigma$ の範囲に収まり、95%の値が $2\sigma$ に収まることが知られている。クリッカーの音を使用した、しなかったにかかわらず、正常な4本の矢は緑色の円の内側に分布し、異常矢は外側に分布している。したがって、シューティングマシン2号機は矢の選別を行うことができると判断できる。

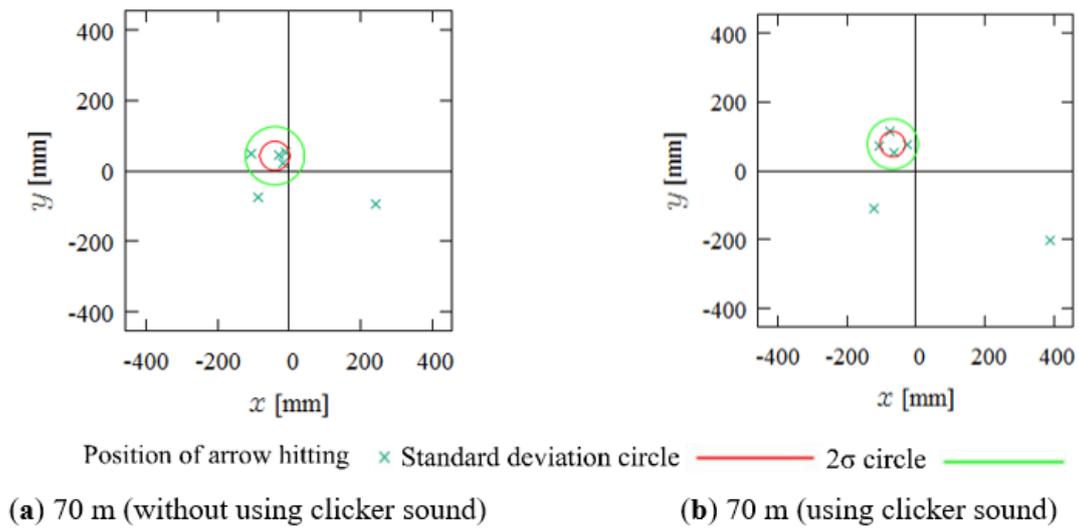


Fig. 4-8 Test shooting results including faulty arrows.

#### 4.4 結言

本研究では、選別矢の信頼性評価を行うためのシューティングマシン2号機を開発し、大阪市立大学のアーチェリーレンジで試射実験を行い、以下の知見を得た。風のない日であれば、的から70 m離れた距離からの射的により、矢の選別が可能な精度が確認できた。実際に異常矢を含めて試射実験を行った結果、異常矢を選別することができた。特にクリッカーの音を用いた場合には、より明確に正常矢と異常矢を選別することが可能であることが分かった。

## 第5章 射出機構を搭載した魚ロボットの運動が

### 射出挙動に及ぼす影響

#### 5.1 緒言

日本のみならず、世界中で外来魚による生態系の破壊が問題となっている[1]. 特に日本国内の池や沼ではオオクチバス（ブラックバス）やブルーギルなどを含む多種多様な魚が棲み着き、江戸時代の生態系を取り戻すことは困難とされている[2][3]. 実際にそれらの外来魚を生態系に歪みを生じさせる害魚として捉え、外来魚駆除を行う県や自治体も存在している[5][6]. 一般的に外来魚を駆除する方法として、釣り、電気ショッカーボート、置き網、さらには水中銃による捕獲が行われている[7]-[9]. これらの方法は主に人の手によって行われているのが現状である. 釣りや水中銃では外来魚のみを駆除できるが、多くの人員を要する. また、電気ショッカーボートや置き網での駆除は要する人員は少なくなるが、外来魚でない魚まで駆除してしまう恐れがある. そこで、魚ロボットから銚の射出による駆除であれば人手が不要となる.

ところで、現在、生態調査を目的とした魚ロボットにおいて、画像処理を用いた追従など、様々な研究が行われている[26][41][42]. さらに、先行研究において、有谷らによって開発された魚ロボット COMET により、水中において金魚に警戒されずに追尾できることが確認されている[32]. この、小型魚ロボット COMET の諸元を表 5-1 に、概要を図 5-1 に、外観写真を図 5-2 に示す. COMET 本体は、アクリルを切削加工した部品を組み立てて製作されており、二つの関節を有する構造をしている. さらに、それらの関節にはネオジム磁石とコイルで構成されたマグネットアクチュエータが取り付けられている. COMET は電源として、2セル、7.4V、250mAh のリチウムイオンバッテリーを搭載しており、マグネットアクチュエータへの電力はバッテリーから供給される. さらに、制御ボードにはバッテリーから 5V、3.3V、2.8V に降圧し、供給している. また、COMET の直進時のローリング運動の角速度はおよそ  $120^{\circ}/s$ 、ヨーイング運動の角速度はおよそ  $40^{\circ}/s$  である.

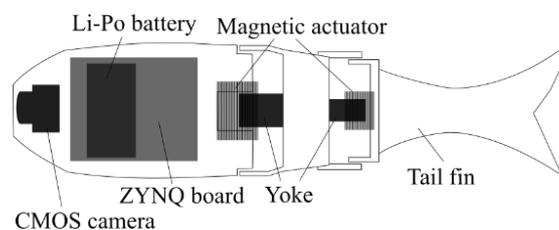


Fig. 5-1 Structure of COMET.

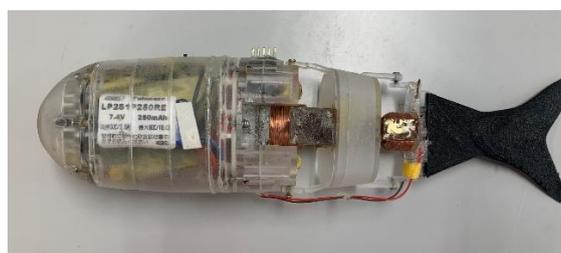


Fig. 5-2 Image of COMET.

Table 5-1 Specifications of the robotic fish.

Length	252 mm
Width	45 mm
Height	60 mm
Mass	274 g

また、鉄砲魚は水辺の昆虫などを狙い、エラをポンプとして用いることで水滴を発射し、撃ち落として捕食する習性が確認されている[43]-[45]。この、獲物を撃つという鉄砲魚の特性を工学的に模倣して、外来魚駆除の方法として水中の魚ロボットからの銚の射出による方法を検討してきた。

銚を用いた外来魚の捕獲において、人の手で行われる場合は標的まで2 mほどまで接近する必要があるが、魚に警戒されにくいという魚ロボットの特徴を用いることで外来魚に対してさらに接近できると考えた。

そのため、小型魚ロボット COMET に銚の射出による、外来魚を駆除する機能を付与し、外来魚の駆除および捕獲作業を担わせることで、外来魚駆除作業の負担軽減に貢献できると考えた。しかし、射出された銚の挙動を陸上において調査した文献は存在するものの、水中において調査を行った先行研究は存在していない。したがって、水中の小型魚ロボットから銚を射出し、外来魚に的中させるためには、まず、水中での射出後の銚の挙動を調査する必要がある。

そこで、本研究では、先行研究で用いられた小型魚ロボット COMET に装着

可能な銚の射出機構の作製を行い，小型魚ロボットに銚を射出できる機能を搭載する．さらに，小型魚ロボットの運動特性を再現した状況で銚の射出実験を行い，ロボットの運動が銚の軌道に与える影響を考察する．その結果により，小型魚ロボットから指定した目標物に銚を到達させるための条件を見つけ出すことを目的とする．

## 5.2 実験に用いた機構

本章では，銚の射出機構および回転試験機について述べる．

### 5.2.1 銚の射出機構

本研究では銚の射出機構を本体の外側に取り付けることで銚の射出機能を小型魚ロボット COMET に付与することを考えてきた．COMET に取り付け可能な銚の射出機構の諸元を表 5-2 に，概要を図 5-3 に示す．

Table 5-2 Specifications of the shooting mechanism.

Length	74 mm
Width	38 mm
Height	48 mm
Mass	45 g

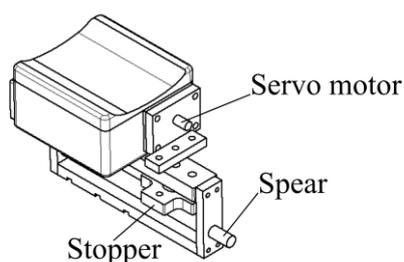


Fig. 5-3 Structure of the shooting mechanism.

次に，射出される銚の諸元を表 5-3 に，概要を図 5-4 に，外観写真を図 5-5 に示す．この銚は一様なアルミニウム合金（A1050，密度  $2700 \text{ kg/m}^3$ ）の丸棒に加工を施し，作製した．なお，この銚は画像処理によって位置を特定できるよう，表面を赤色に着色した．

Table 5-3 Specifications of the spear.

Length	40.8 mm
Diameter	3.89 mm
Mass	1.23 g

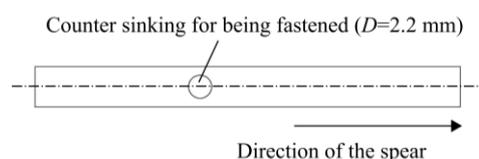


Fig. 5-4 Structure of the spear.



Fig. 5-5 Image of the spear.

最後に、銚の射出方法について述べる．銚を固定する時は銚に開けた穴にストッパーを入れた．サーボモータでストッパーを上を動かして外すことで、筒内部のばね（ばね定数  $k=0.37\text{ N/mm}$ ）の復元力によって銚が射出されるように製作した．

### 5.2.2 回転試験機の概要および実験環境

本研究では、魚ロボット COMET の動作を模倣するため、下記(1)から(4)を行うことができる試験機を作製した。

(1) 小型魚ロボット COMET のローリング運動の角速度( $\omega=180\text{ }^\circ/\text{s}$ ) および最大回転角 ( $\pm 22.5^\circ$ ) で COMET の頭部および射出機構を、銚の射出方向を回転軸として回転させることができる。

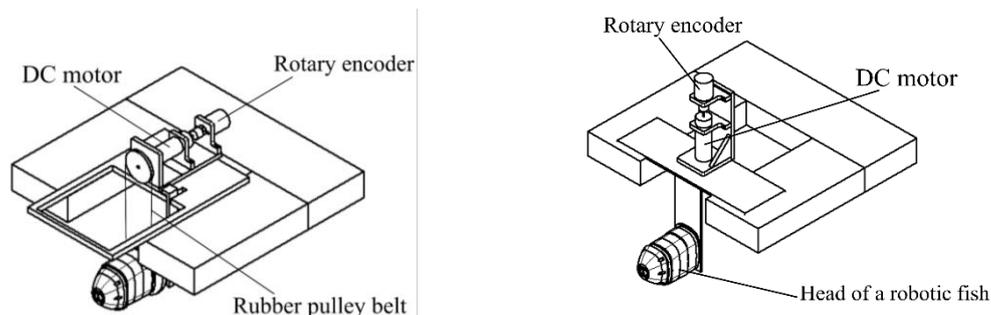
(2) 小型魚ロボット COMET のヨーイング運動の角速度 ( $\omega=160\text{ }^\circ/\text{s}$ ) および最大回転角 ( $\pm 20^\circ$ ) で COMET の頭部および射出機構を、高さ方向を回転軸として回転させることができる。

(3) 上記の運動すべてを水中で行うことができる。

(4) 上記の運動それぞれを独立して行うことができる。

作製した回転試験機の概要を図 5-6 に示す．回転試験機には、ギア比 84:1 の

DC モータ (Maxon, 343185) を用い, その DC モータの末端部に 100 P/R のロータリーエンコーダ (OMRON, E6A2-CW3C) を接続した. このロータリーエンコーダを 1 通倍で利用した. この場合, モータ主軸の角度は  $0.043^\circ$  の分解能で計測することが可能であった. この構成は, ローリング運動およびヨーイング運動の再現に共通するものであった.



(a) Experimental device for rolling motion      (b) Experimental device for yawing motion

Fig. 5-6 Structure of the rotational testing machine.

水中でローリング運動を再現するため, 図 5-6(a)に示すように DC モータの主軸にプーリーを固定し, ゴムプーリーベルトを伝達機構として COMET の頭部を動かした. また, 頭部を固定した回転台を COMET のローリング運動を再現するように水中で動くようにした. 同様に, 水中でヨーイング運動を再現するため, 図 5-6(b)に示すように DC モータの主軸側に積層型 3D プリンタで製作を行った土台を固定の上, その土台に COMET の頭部を固定した. DC モータを駆動させることによって, 土台および COMET の頭部が一緒に回転し, COMET のヨーイング運動を再現するようにした. また, COMET 頭部の回転角速度や回転角度については, Arduino Uno を用いて回転軸に接続されたロータリーエンコーダから回転角速度を取得し, DC モータに接続されたモータドライバー

(DRV8835) の PWM(Pulse Width Modulation) の Duty 比の調節によって制御した.

射出機構から射出された銜の軌道を観測する方法について述べる. 図 5-7 に示すように, 回転試験機を用いた銜の射出実験は, 縦 900 mm, 横 450mm, 高さ 450 mm (水深 225 mm) のアクリル製の水槽で行った. その様子を水槽の上部と側面側の定位置に固定されたカメラで撮影した. また, フレームレートが高速であるほうが, より精密に銜の軌道を測定することが可能であるため, 用意したカメラで最も高速の撮影設定であった 240 fps の設定で動画を撮影した. ここで, 座標系は, 銜の射出地点を原点とし, 側面部カメラ方向を X, 射出方向を Y, 高さ方向を Z とした.

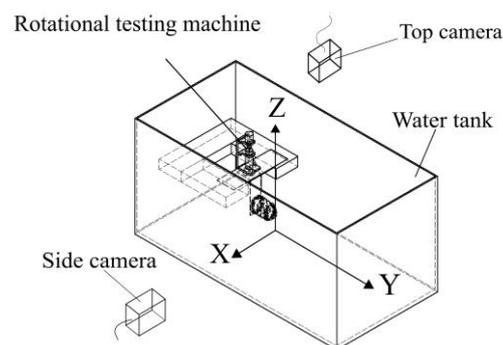


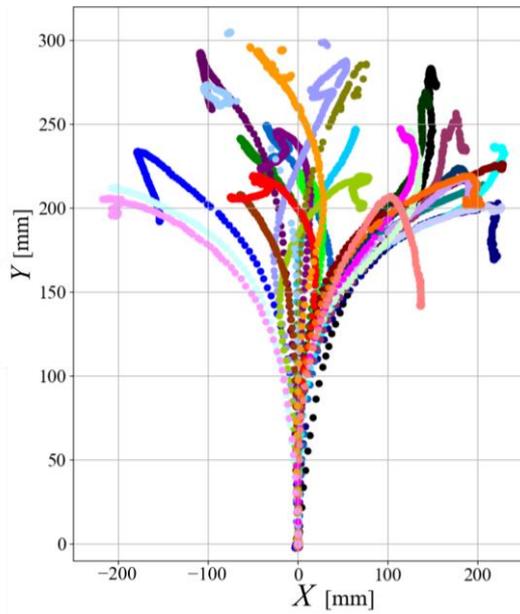
Fig. 5-7 Experimental environment for the spear shooting.

グラフに関して、銚の射出地点の座標を  $(0,0)$  とし、 $XY$  座標の値は、射出地点からの距離を  $\text{mm}$  単位で表した。また、銚の座標は画像処理によって赤色の図心を算出し求めた。なお、画像処理で赤色の図心を算出する際に他の物が誤検出されている場所が一部あった。

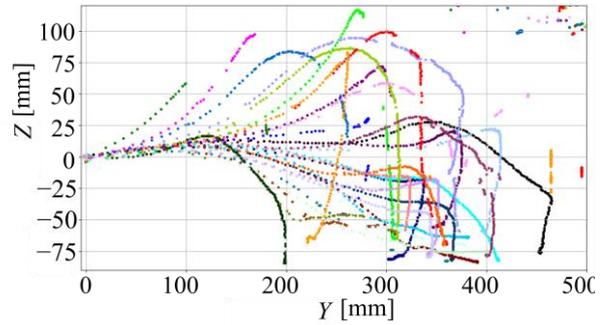
### 5.3 回転試験機を用いた銚の射出実験

#### 5.3.1 銚の射出実験

ローリング運動およびヨーイング運動が銚の軌道に及ぼす影響を比較調査するために、まずローリング運動およびヨーイング運動を行わない条件で銚の射出実験を行った。銚の軌道を統計的に調査できるように、射出実験を同じ条件で 30 回行った。ここで、30 回行った場合の実験結果から、12 個のデータを 5 回、無作為に抽出し  $t$  検定を行った。この検定を行うにあたり、次節の表 5-4 の値および同様の方法で 30 回のデータから算出した値を用いた。その結果、射出後の銚の  $Y$  座標が  $150 \text{ mm}$  に達した地点における  $X$  座標の母平均に差はなかった。したがって、その他の条件下での実験においては、12 個のデータのみを示し、考察を行った。図 5-8 に、同じ条件下で射出された 30 回すべての銚の軌道の観測結果を示す。また図 5-9 に無作為に抽出した 12 回の銚の軌道の観測結果を示す。

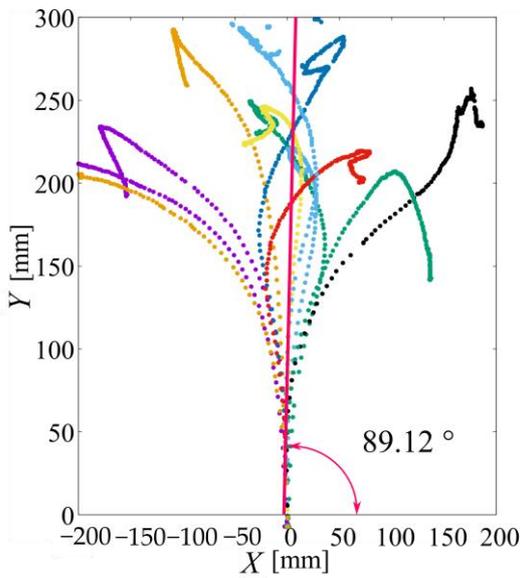


(a) Top view

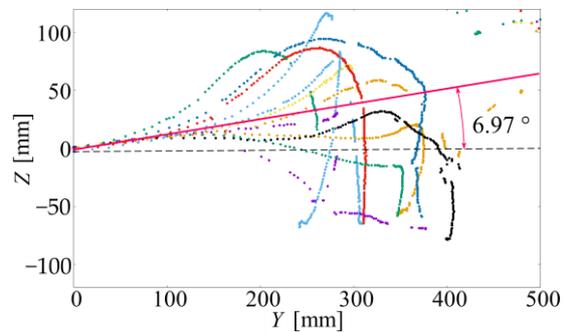


(b) Side view

Fig. 5-8 Trajectories of the spear shot from stationary shooting mechanism (30 times).



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 5-9 Trajectories of the spear shot from stationary shooting mechanism 12 times.

図中にピンク色で示している線および角度は、魚ロボットの X 軸に対する傾きの角度と、定義した座標系における XY 平面に対する傾きの角度を表す。これらの角度は、射出実験で得られた画像データから、鋸が射出される直前の鋸の角度を読み取り、12 回のデータを平均して算出した。以下、静止時以外の条件下に対しても同様の方法で角度を算出した。

図 5-8 および図 5-9 より，魚ロボットは約  $6.97^\circ$  Z 軸正の方向に，約  $0.88^\circ$  射出方向に対して X 軸正の向きに傾いて銚を射出していた．COMET は浮沈機構を有しない魚ロボットであるため，地面に対して平行になるように固定したが，Z 軸に対しても傾いて射出している場合があった．

続いて，ローリング運動が銚に及ぼす影響を調査するために，回転試験機を用いて COMET の頭部およびそれに固定された銚の射出機構を遊泳時の COMET において発生するローリング運動の回転角速度で回転させ，銚を射出する実験を行った．

それぞれの射出条件で射出された 12 個の銚の軌道の観測結果を図 5-10，5-11 に示す．なお射出方向から見て時計回りに回転する条件を **Rolling to the right**，反時計回りに回転する条件を **Rolling to the left** と定めた．

図 5-10 および図 5-11 より，ローリング運動の場合は，射出方向からみて右回りの時は，魚ロボット自体が X 軸正の方向に約  $7.9^\circ$ ，Z 軸正の方向に約  $6.63^\circ$  傾いて射出していた．また射出方向からみて左回りの時は，X 軸正の方向に約  $1.3^\circ$ ，Z 軸正の方向に約  $3.88^\circ$  傾いて射出していた．この実験の結果より，ローリング運動は射出後の銚の軌道に影響を及ぼさないことが分かった．

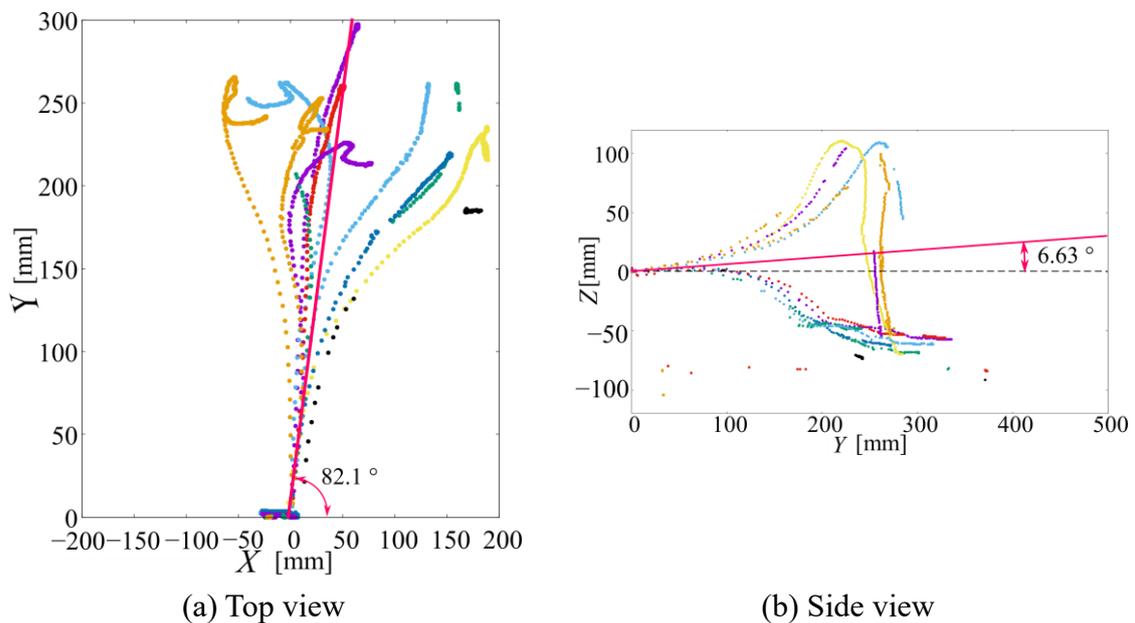
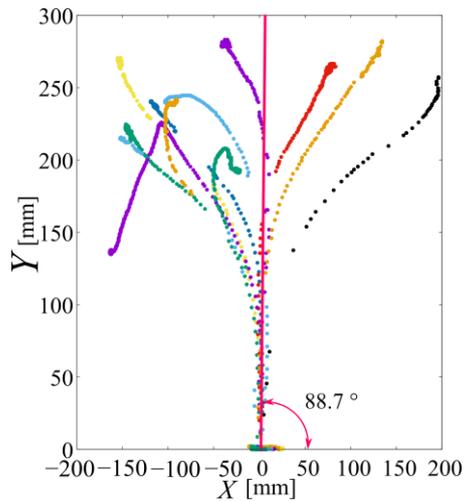
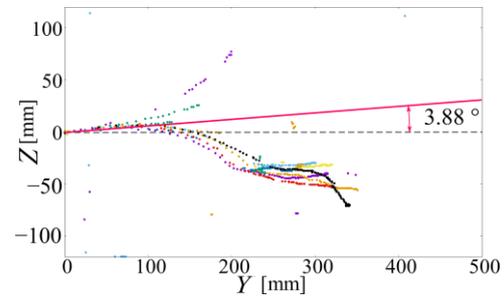


Fig. 5-10 Trajectories of the spear shot from rotating shooting mechanism (Rolling to the left).



(a) Top view

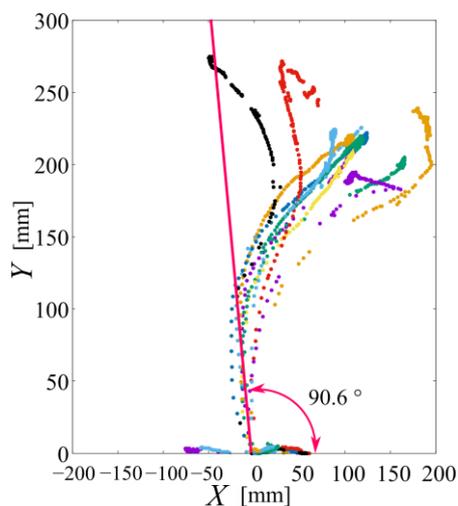


(b) Side view

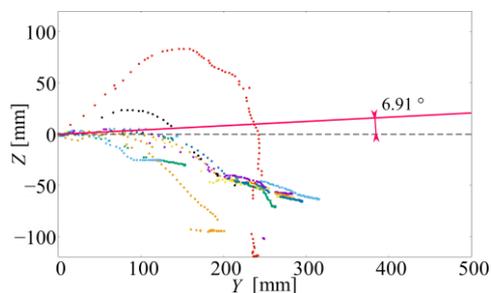
Fig. 5-11 Trajectories of the spear shot from rotating shooting mechanism (Rolling to the right).

ヨーイング運動が銚に及ぼす影響を調査するために、回転試験機を用いて小型魚ロボットの頭部およびそれに固定された銚の射出機構を遊泳時の COMET において発生するヨーイング運動の回転角速度で回転させ、銚を射出する実験を行った。ここで、高さ方向から見て時計回りに回転する条件を **Yawing to the right**, 反時計回りに回転する条件を **Yawing to the left** と定めた。

それぞれの射出条件で射出された銚の軌道を図 5-12, 5-13 に示す。図 5-12 および図 5-13 より、ヨーイング運動の時は高さ方向からみて時計回りの時は、魚ロボット自体が X 軸負の方向に約  $0.6^\circ$ , Z 軸正の方向に約  $6.91^\circ$  傾いて射出していた。また高さ方向からみて反時計回りの時は、X 軸正の方向に約  $2.7^\circ$ , Z 軸負の方向に約  $2.84^\circ$  傾いて射出していた。この実験よりヨーイング運動は回転方向に関わらず、銚の射出後の到達位置の散らばり具合を狭めることが分かった。

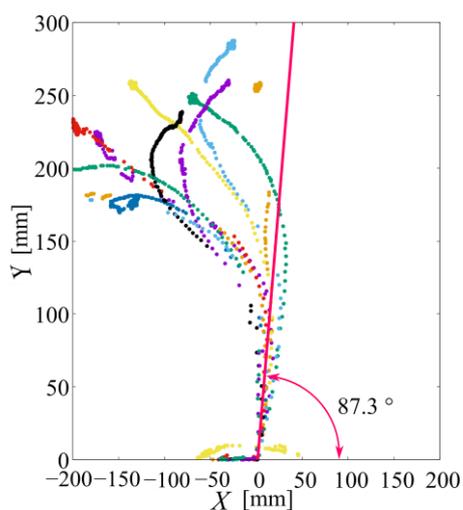


(a) Top view

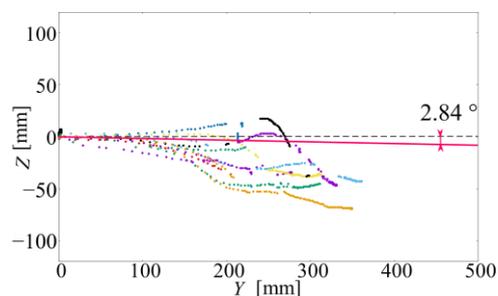


(b) Side view

Fig. 5-12 Trajectories of the spear shot from rotating shooting mechanism (Yawing to the left).



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 5-13 Trajectories of the spear shot from rotating shooting mechanism (Yawing to the right).

### 5.3.2 射出された銚の軌道の分布

前節において示した銚の軌道のデータを用いて、銚の軌道の傾向について調査を行った。先行研究において、小型魚ロボット COMET は約 100 mm から約 200 mm の距離まで近づいて金魚を追尾できることを確認している[32]。そのため、本研究では、銚の射程として 150 mm から 200 mm を想定し、銚の軌道の傾向の調査を行った。

まず、鉛のY座標が150 mmに到達した地点でのX座標を調べ、標準偏差および平均値を求めた。ただし、これらの値は図5-9に示す12個のデータを用いて算出した。なお、カメラの画像から得られる座標は時間的に離散的であるため、鉛のY座標が150 mmに到達した地点でのX座標は、Y座標が150 mmに達する前後の位置を直線で繋いだものから求めた。さらに、Y座標が150 mmに達する前後においてデータに欠損がみられた場合は、取得したデータを用いて、べき乗関数で近似し補間してX座標の値を求めた。以上により求めた平均値および標準偏差を用いて、静止時と運動時に対してt検定を行い、母平均に差があるかを調査した。上記と同様の方法で、160 mmから200 mmについても10 mm刻みで評価した。

それぞれの射出条件において、観測したX座標の標準偏差および平均値を表5-4から表5-9に示す。ただし、ローリング運動において、射出方向からみて、反時計回りに回転する条件をRL、時計回りに回転する条件をRR、またヨーイング運動において、高さ方向からみて反時計回りに回転する条件をYL、時計回りに回転する条件をYRとして表す。また、t検定において、母平均に差がないと評価された場合はEqual、差があると評価された場合はDifferentと示す。

Table 5-4 Standard deviation and mean of X-coordinates (Y=150 mm).

	Standard Deviation	Mean (mm)	The result of t-test
Standard	32.2	-1.85	-
RL	32.9	32.9	Different
RR	29.0	-14.9	Equal
YL	21.2	24.9	Equal
YR	26.9	-22.6	Equal

Table 5-5 Standard deviation and mean of X-coordinates (Y=160 mm).

	Standard Deviation	Mean (mm)	The result of t-test
Standard	39.8	-2.08	-
RL	38.7	36.6	Different
RR	34.7	-20.3	Equal
YL	25.7	38.1	Different
YR	30.7	-33.9	Different

Table 5-6 Standard deviation and mean of X-coordinates (Y=170 mm).

	Standard Deviation	Mean (mm)	The result of t-test
Standard	47.9	-2.8	-
RL	46.3	41.2	Different
RR	42.2	-24.3	Equal
YL	33.1	55.6	Different
YR	39.0	-53.1	Different

Table 5-7 Standard deviation and mean of X-coordinates (Y=180 mm).

	Standard Deviation	Mean (mm)	The result of t-test
Standard	57.4	-3.71	-
RL	55.1	47.8	Different
RR	49.7	-28.3	Equal
YL	39.8	71.5	Different
YR	60.6	-80.5	Different

Table 5-8 Standard deviation and mean of X-coordinates (Y=190 mm).

	Standard Deviation	Mean (mm)	The result of t-test
Standard	70.1	-5.92	-
RL	57.0	45.0	Equal
RR	59.7	-34.0	Equal
YL	43.1	81.8	Different
YR	53.0	-68.3	Different

Table 5-9 Standard deviation and mean of X-coordinates (Y=200 mm).

	Standard Deviation	Mean (mm)	The result of t-test
Standard	85.1	-9.88	-
RL	63.6	50.7	Equal
RR	69.4	-37.7	Equal
YL	45.9	92.7	Different
YR	58.8	-79.9	Different

表 5-4 から表 5-9 より, ヨーイング運動の条件下で射出された鉛の X 座標に対する t 検定においては, Y 座標が増加するにつれて, すなわち, 鉛が進むにつれて, 母平均が異なっていた. 一方, ローリング運動の条件下で射出された鉛に

関する t 検定に関しては、母平均が等しい場合と等しくない場合があり、静止時と比較して射出後の軌道の精度に優位性はみられなかった。このことから、ローリング運動は射出後の銚の軌道の精度の向上に影響しないが、ヨーイング運動は銚の軌道の精度に影響を及ぼすことが示唆された。

さらに、異なる魚ロボットの運動条件において射出された銚の軌道の傾向を調べるために、カーネル密度推定を用いてそれぞれの条件における確率密度関数を推定した。カーネル密度推定とは、統計学において確率変数の確率密度関数を推定する方法のひとつであり、今回の調査ではカーネル関数としてガウス関数を用いた。また、バンド幅  $h$  については、Scott のルールから算出された値を用いた[46]。

カーネル密度推定によって、推定された確率密度関数のグラフを図 5-14 に示す。

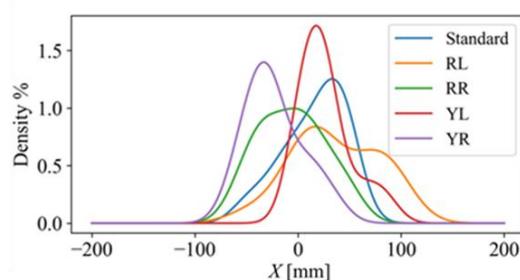


Fig. 5-14 Kernel Density Estimation of the target X-coordinates.

表 5-4 より Y 座標が 150 mm の地点においては魚ロボットが静止時と運動時において、左まわりのローリング運動をしている場合を除いて母平均に差はみられなかった。一方、表 5-5 から表 5-9 より、Y 座標が 160 mm を超えると、t 検定の結果よりヨーイング運動の条件下と静止時では母平均が異なった。また、190 mm 以降でローリング運動時と静止時では母平均は同じであったが、ヨーイング運動時は母平均が異なることが分かった。また、図 5-14 より標準偏差の値については、ヨーイング運動をしている射出機構から射出された銚は、静止状態から射出された場合よりも、射出後の銚の挙動が安定し軌道が散らばりにくい傾向がみられた。このことから、静止時とヨーイング運動時では、銚の射出後の軌道が統計的にも異なり、ヨーイング運動時における射出後の銚の軌道が安定することが分かった。さらに、小型魚ロボットがヨーイング運動をしている状態で銚を射出した場合、射出機構が持つ回転速度とは逆の方向に銚が進む傾向があることが明らかになった。

### 5.3.3 射出後の銚の軌道に関する考察

射出実験は、十分な大きさを持つ水槽で行ったことから実験開始時の水槽内部の流体は静止していたとみなし、水槽内水流は誤差要因として考えなかった。また、誤差要因の一つとして、射出時の銚の姿勢を考えた。まず、本研究で用いた銚の射出機構では、それぞれの実験の際に、銚を筒内部に装填したが、銚の外径 (3.89 mm) と筒の内径 (4.00 mm) には 0.11 mm の違いがあった。このことにより射出姿勢がそれぞれの実験時に異なる可能性があった。この射出姿勢について、計算上、銚の射出方向に対して最大で  $0.19^\circ$  傾いた姿勢で射出された。実験時に定義した座標系で、銚が Y 軸上を進行すると想定し射出した場合、射出時に筒内部で銚が傾いていることにより、射出後、銚の Y 座標が 150 mm に達した時、X 座標は最大で  $\pm 0.5$  mm となった。しかし、実際には射出された銚は流体 (水) から抵抗力を受けることになるため、X 軸方向に大きくずれると考えた。図 5-15 に水中にて Y 軸に対して角度を持ったまま進行する銚に作用する力を示す。また表 5-10 に Hoerner's rule を用いて算出した流体から作用する抵抗力および揚力を示す[47][48]。Y 軸と銚の進行方向とのなす角を  $\alpha$  とし、 $15^\circ$  刻みで変化させたときに作用する力の大きさを表す。

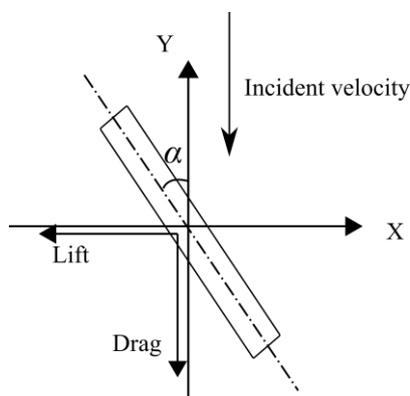


Fig. 5-15 Definition sketch of velocity and force components.

Table 5-10 Drag and lift of the spear.

Angle $\alpha$ [°]	Drag [N]	Lift [N]
0	0.013	0
0.19	0.013	$-4.1 \times 10^{-5}$
15	0.015	0.010
30	0.034	0.039
45	0.076	0.067
60	0.13	0.073
75	0.18	0.048
90	0.20	0

次に、筒内部で銚が進行方向に対して傾くことで、ばねの復元力により発生した銚の重心まわりの初期トルク $\tau$ の影響を考えた。図 5-16 に筒内部で傾いた銚に作用する力を示す。

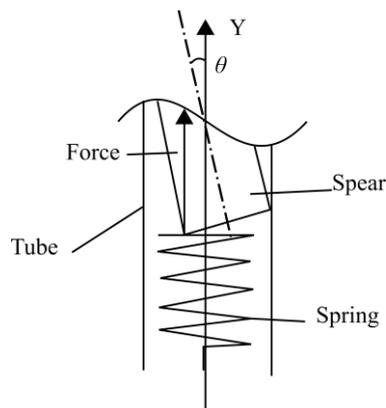


Fig. 5-16 Definition sketch of initial torque.

初期トルクは図 5-16 を参考に、幾何学的解析から式(1)にて算出した。

$$\tau = kx l \sin\theta \quad (5-1)$$

ここで、 $k$ はばね定数、 $x$ はばねの縮みを表しており、実測値を用いた。また、 $l$ は銚の重心から復元力の作用点までの距離、すなわち銚の長さの半分であり、 $\theta$ はY軸と銚がなす角とした。

表 5-11 に角度 $\theta$ を $0.5^\circ$ 刻みで変化させた場合の式(5-1)を用いて算出した初期トルクを示す。ただし、表 5-11 に示す初期トルクにおいては、大きさのみを示し、傾きの方向は考慮しなかった。

Table 5-11 Initial torque of the spear.

Angle $\theta$ [°]	Initial torque $\tau$ [N · m]
0	0
0.05	$1.1 \times 10^{-4}$
0.10	$2.1 \times 10^{-4}$
0.15	$3.2 \times 10^{-4}$
0.19	$4.1 \times 10^{-4}$

表 5-11 に示すとおり，筒内部で銚が傾くことにより銚にトルクが作用し，射出直後に  $0.19^\circ$  以上の角度を持つと考えた．その結果，表 5-10 より Y 軸となす角度に比例して，X 軸方向に作用する力も大きくなることで，到達位置が X 軸方向に散らばると推測した．

最後に，ヨーイング運動およびローリング運動をしている状態では，装填された銚の先端に流体から約  $0.004 \text{ N}$  の抵抗力が作用した．この抵抗力の向きは魚ロボットの回転運動に逆らう方向，すなわち，常に装填時の銚が Y 軸となす角度を  $0^\circ$  にする方向に作用した．これに従い，回転運動が装填時の銚の傾きの角度範囲の幅を狭め，射出後の X 座標の標準偏差を小さくした．しかし，回転運動であるローリング運動をしている状態で射出された銚の軌道の到達点での X 座標の散らばりは大きかった．この理由は，ローリング運動の回転半径はヨーイング運動の回転半径と比べて小さく，銚の先端の速度も小さくなり，流体からの抵抗力が小さくなるためであると考えた．

#### 5.4 水中で射出された銚の挙動解析

前節の考察の有意性を検証するために，水中での銚の挙動を再現するプログラムを作成した．

グローバル座標系での射出後の銚の重心座標およびオイラー角を  $\mathbf{q}$  で定義した．

$$\mathbf{q} = (x_0 \ y_0 \ z_0 \ \alpha \ \beta \ \gamma)^T \quad (5-2)$$

ラグランジュ関数  $L$  は運動エネルギー  $T$  とポテンシャルエネルギー  $U$  を用いて以下で表される．

$$L = T - U \quad (5-3)$$

上記のラグランジュ関数からラグランジュの運動方程式を導出すると，以下の通りである．

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (5-4)$$

ただし、 $Q$ は $q$ で定義されたそれぞれの軸および角度方向に作用する力およびトルクを示しており、式(5-5)のように表した。

$$Q = (F_x \ F_y \ F_z \ \tau_\alpha \ \tau_\beta \ \tau_\gamma)^T \quad (5-5)$$

これらの式に値を代入し、ラグランジュの運動方程式を解くことで、射出後の銚の軌道の解析を行った。

銚のグローバル座標系での位置は $\mathbf{x}_0 = (x_0 \ y_0 \ z_0)^T$ で表した。またグローバル座標系における角速度を $\boldsymbol{\omega}_0$ とした。ここで、 $\boldsymbol{\omega}_0$ とオイラー角の角速度 $\dot{\boldsymbol{\alpha}} = (\dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma})^T$ の間には以下の関係が成り立つ。

$$\boldsymbol{\omega}_0 = \mathbf{K}_c \dot{\boldsymbol{\alpha}} \quad (5-6)$$

$$\mathbf{K}_c = \begin{pmatrix} 0 & -S_\alpha & C_\alpha C_\beta \\ 0 & C_\alpha & S_\alpha C_\beta \\ 1 & 0 & -S_\beta \end{pmatrix} \quad (5-7)$$

ただし、 $\cos \alpha = C_\alpha$ ,  $\sin \alpha = S_\alpha$ ,  $\cos \beta = C_\beta$ ,  $\sin \beta = S_\beta$ ,  $\cos \gamma = C_\gamma$ ,  $\sin \gamma = S_\gamma$ のように表した。さらに

$$\mathbf{a}_c = {}^0_c \mathbf{R}^T \mathbf{K}_c \dot{\boldsymbol{\alpha}} = {}^0_c \mathbf{R}^T \boldsymbol{\omega}_0 \quad (5-8)$$

を導入した。 ${}^0_c \mathbf{R}$ は、ローカル座標系での位置をグローバル座標系から見た位置に変換する回転変換行列であり、次式で表される。

$${}^0_c \mathbf{R} = \begin{pmatrix} C_\alpha C_\beta & C_\alpha S_\beta S_\gamma - S_\alpha C_\gamma & C_\alpha S_\beta C_\gamma + S_\alpha S_\gamma \\ S_\alpha C_\beta & S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma & S_\alpha S_\beta C_\gamma - C_\alpha S_\gamma \\ -S_\beta & C_\beta S_\gamma & C_\beta C_\gamma \end{pmatrix} \quad (5-9)$$

すなわち、変数 $\mathbf{a}_c$ はローカル座標系での銚の角速度として定義した。

上記で定義した銚の位置 $\mathbf{x}_0$ 、角速度 $\mathbf{a}_c$ に加え、銚の質量 $m$ 、ローカル座標系での慣性モーメント $I_c^c$ を用いて、銚の運動エネルギー $T_0$ を式(5-10)で算出した。

$$T_0 = \frac{1}{2} (m \dot{\mathbf{x}}_0^T \dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{a}_c^T I_c^c \mathbf{a}_c) \quad (5-10)$$

ただし、 $I_c^c$ は式(5-11)で定義した。

次に、グローバル座標の原点を基準とした銚のポテンシャルエネルギー $U_0$ を算出すると

$$I_c^c = \begin{pmatrix} I_{cxx}^c & I_{cxy}^c & I_{cxz}^c \\ I_{cyx}^c & I_{cyy}^c & I_{cyz}^c \\ I_{czx}^c & I_{czy}^c & I_{czz}^c \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

$$U_0 = mg^T x_0 \quad (5-12)$$

となった.

ここで、 $\mathbf{g} = (g_x \ g_y \ g_z)^T$ であり、各軸方向の重力加速度とした。  
式 (5-10)および式(5-12)で求めた運動エネルギー $T_0$ とポテンシャルエネルギー $U_0$ を  
式(3)に代入することで鋸に関するラグランジュ関数 $L_0$ を求めた。

$$L_0 = \frac{1}{2}m\dot{x}_0^T\dot{x}_0 + \frac{1}{2}\mathbf{a}^T\mathbf{I}_c^c\mathbf{a} - mg^T x_0 \quad (5-13)$$

さらに式(5-13)を式(5-4)に代入し、ラグランジュの運動方程式を算出した後、4  
次のルンゲクッタ法により常微分方程式を解くことで $\mathbf{q}$ を求めた。

以上の方法により作成したプログラムに、初速度 $v_0 = 1.6 \text{ m/s}$  および初期トルク  
を代入し、初期角度を $-0.190^\circ$  から  $0.19^\circ$  までの間を  $0.019^\circ$  刻みで増加させ  
て射出させた場合のシミュレーションを行った。以上の条件にしたがって算出  
した鋸の軌道の結果を図 5-17 に示す。

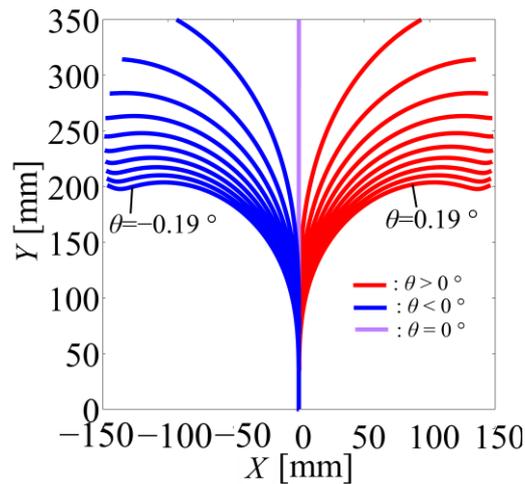


Fig. 5-17 Trajectory of the spear which was shot from stationary shooting mechanism  
on the simulation (XY-coordinates).

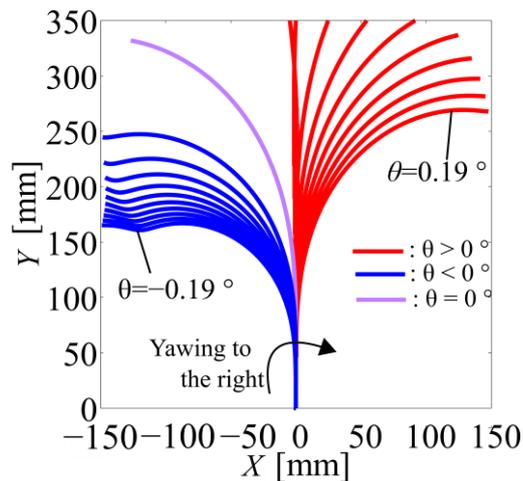


Fig. 5-18 Trajectory of the spear which was shot from rotating shooting mechanism on the simulation (XY-coordinates).

また上記の条件に加え，初角速度 $\omega_0 = 160$  °/s を高さ方向から見て右回りの向きに代入し，ヨーイング運動を想定した場合のシミュレーション上の銚の軌道を図 5-18 に示す。

図 5-17 において，射出後の銚の軌道の X 軸方向の到達位置にばらつきがあった。これは，実験結果と定性的に一致していた。一方，図 5-13(a) と図 5-18 を比較すると，シミュレーション結果では，X 軸正の方向にも銚が到達しているが，実験結果では X 軸負の方向にのみ，銚が進んだ。さらに，実験結果では，図 5-13(a) より射出直後に X 軸正の方向に推進した後，X 軸負の方向に進行していたがシミュレーションでは射出直後は Y 軸上を進行していた。この結果について，5.3.3 でも述べたが，回転運動により，装填された銚の傾きの角度の範囲が小さくなったことが要因であると考えた。例えば，シミュレーションの条件では，魚ロボットが高さ方向から見て，左から右に回転するとともに，銚は図 5-16 に示すように付け根が右，先端が左の形に傾く。これにより，射出後の軌道が X 軸負の方向に集中すると考えた。また，シミュレーションでは，X 座標が 0 の時に銚を射出すると想定しているが，実際は魚ロボット全体が傾いた状態で射出したと推測した。ここで以上の考察を考慮し，図 5-18 において，図全体を原点を中心として右回りに約  $2.7^\circ$  回転し，X 座標が負の銚の軌道にのみ着目すると，実験結果(図 5-13(a))と定性的に一致していることから，上記の考察は妥当であった。

以上より，筒に装填時の銚の初期角度が，射出後の銚の軌道に影響を及ぼしていることが示唆された。

## 5.5 結言

本研究では、魚ロボットが起こすローリング運動、ヨーイング運動による影響がある状態での銚の射出についてこれまで研究は行われてこなかったため、銚の射出精度を高める目的で魚ロボット COMET に取り付けることができる銚の射出機構を作製し、COMET の起こすヨーイング運動およびローリング運動を再現した状態での銚の射出実験を行った。その結果、ローリング運動は銚の到達位置の精度に大きな影響を与えることはなかった。一方で、ヨーイング運動は銚の到達位置の精度に影響を与えたが、それは到達位置の精度を高める方向の影響であった。また、ヨーイング運動時の銚の挙動を考察するためのシミュレーション結果より、装填時の銚の姿勢が射出後の銚の軌道に影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、魚ロボットが回転運動を行うことで、銚の先端に抵抗力が作用し、射出後の銚の軌道の X 座標の散らばりの範囲を小さくすることが確認できた。

## 第 6 章 結論

以下に、第 2 章から第 5 章まで得られた成果をまとめる。

第 2 章では、小型魚ロボット COMET を開発し、画像処理によって金魚の体色を認識しての自動追尾について研究した。小型魚ロボットに高い旋回性能を持たせ、広角なカメラを使用することで金魚に比べ、推進性能で劣る魚ロボットが金魚の自動追尾を行う手法を提案、検討した。

その結果、本研究で開発した、広角な CMOS カメラ、FPGA を搭載し、2 関節を持つ小型魚ロボット (COMET) に、作成した画像処理による金魚の自動追尾プログラムを搭載することで、COMET が生きた魚の追尾が可能であることが分かった。

第 3 章では、第 2 章で開発した魚ロボット COMET での金魚の自動追尾性能の向上を目的として、カメラからの取得画像のリアルタイム回転補正、および補正を行った後の追尾性能について検討を行った。設計指針上、COMET はローリング運動が起りやすいが、発生するローリング運動は、金魚の自動追尾に悪影響を及ぼす。そこで、カメラから取得した画像を FPGA を用いた画像処理によって回転補正を行うことで、この問題を解決について検討した。その結果、以下の成果が得られた。

ジャイロセンサと加速度センサから得たロボットのロール角度をもとに、電子的に画像を回転させて被写体の座標変化を補正する回転補正回路を作成できた。また、魚ロボットのローリングを再現できる回転試験機を作製し、回転補正回路の性能評価を行った。その結果、回転補正回路は CMOS カメラのローリングシャッターの影響を受けて画像の上下位置によってずれが生じることが分かった。このずれは回転試験機の角速度と画像と角度同期のタイミングによって変化し、適切なタイミングで同期すればずれの影響を最小限にできることが分かった。補正回路を COMET に組み込んで金魚の自動追尾実験を行ったところ、ロール運動による画像の回転の抑制が可能であることが分かった。さらに、画像の回転による金魚の図心の座標変化を補正し、より正確な座標を認識できることが確認できた。

第 4 章では、矢の射出機構を魚ロボット COMET に搭載することを念頭に、既存のアーチェリータイプのシューティングマシン 1 号機の問題点を洗い出し、安定性を高めた 2 号機を開発した。これによりシューティングマシンによる矢の的中精度について詳細な検討を実施することが可能となった。その結果、風のない日であれば、的から 70 m 離れた距離からの射的により、異常矢の選別ができるに足る射出機構の的中精度が確認できた。実際に異常矢を含めて試射実験を行った結果、異常矢を選別することができ、特にクリッカーの音を用いた

場合には、より明確に正常矢と異常矢を選別することが可能であることが分かった。

第5章では、第2章で開発した魚ロボット **COMET** に銚の発射機構を取り付け、**COMET** が推進時に起こすローリング運動、ヨーイング運動を再現した状態で水中での銚の射出実験を行い、水中で銚の挙動についての検討を行った。

その結果、魚ロボット **COMET** の起こすローリング運動は銚の到達位置の精度に大きな影響を与えることはなかった一方で、ヨーイング運動は銚の到達位置の精度に影響を与えたが、それは到達位置の精度を高める方向の影響であった。また、ヨーイング運動時の銚の挙動を考察するためのシミュレーション結果より、装填時の銚の姿勢が射出後の銚の軌道に影響を及ぼしていることが示唆された。さらに、魚ロボットが回転運動を行うことで、銚の先端に抵抗力が作用し、射出後の銚の軌道の左右方向の散らばりの範囲を小さくすることが確認できた。

以上、本研究では、小型魚ロボット **COMET** を開発し、画像処理によって金魚の自動追尾を試み、また、外来魚駆除を目的として、魚ロボット **COMET** に銚の発射機構を取り付け、水中での銚の挙動について検討した。

結果、広角な **CMOS** カメラを搭載し、関節を2つとし可動範囲を広くすることで、画像処理によって **COMET** が生きた魚の追尾が可能であること、画像の回転補正により、その追尾性の向上が期待できることを示した。また、水中での魚ロボットからの銚の射出に関して、魚ロボットが回転運動を行うことで、射出後の銚の軌道の左右方向の散らばりの範囲を小さくすることができることを示した。

## 参考文献

- (1) Nishizawa, E., Kurokawa, T., and Yabe, M.,  
Policies and resident's willingness to pay for restoring the ecosystem damaged by alien fish in Lake Biwa, Japan,  
*Environ. Sci. Policy*, Vol. 9, Issue 5, (2006), pp. 448–456.
- (2) 杉山 秀樹, 神宮字 寛,  
ため池における外来魚・オオクチバスの影響と駆除,  
*農業土木学会誌*, 第73巻, 第9号, (2005), pp. 797–800.
- (3) 中井 克樹,  
日本における外来魚問題の背景と現状 ～管理のための方向性をさぐる～,  
*保全生態学研究*, 5巻, 2号, (2000), pp. 171–180.
- (4) 藤岡 康弘,  
琵琶湖固有（垂）種ホンモロコおよびニゴロブナ・ゲンゴロウブナ激減の現状と回復への課題,  
*魚類学雑誌*, 60 巻, 1号, (2013), pp. 57-63.
- (5) Atsuhiko, I., and Shinsuke, S.,  
Countermeasures against Alien Fishes (Largemouth Bass and Bluegill) in Lake Biwa.,  
*Fishes Res Educ. Agency*, 29, (2010), pp.79–84.
- (6) 小西 雅樹, 北川 哲郎, 濱野 陽, 細谷 和海,  
近畿大学バスバスターズによる外来魚駆除の取り組み,  
*近畿大学農学部紀要*, 第45号, (2012), pp.241-249.
- (7) 片野 修,  
水産庁による「有害外来魚駆除マニュアル」,  
*日本水産学会誌*, 78巻, 4号, (2012), pp.773-776.
- (8) 吉岡 剛, 上垣 雅史, 太田 豊三,  
琵琶湖における有害外来魚ゼロ作戦事業,  
*日本水産学会誌*, 78巻, 4号, (2012), pp.765-768.
- (9) Michalski, T.,  
Multi-Jurisdiction Review of Fisheries Management Strategies for Illegally Introduced Non-native Sport Fish,  
Ministry of Environment: Nanaimo, BC, Canada, (2007).
- (10) Schlegel, T., Schmid, C.J., and Schuster, S.,  
Animal cognition: How archer fish learn to down rapidly moving targets.  
*Current Biolog*, Vol. 16, Issue 4, (2006), pp. 378–383.

- (11) Wöhl, S., and Schuster, S.,  
The predictive start of hunting archer fish: A flexible and precise motor pattern performed with the kinematics of an escape C-start,  
*Journal of Experimental Biology*, 210(2), (2007), pp. 311–324.
- (12) Lawrence, M.D.,  
Refraction and the spitting behavior of the archerfish (*Toxotes chatareus*),  
*Behavioral Ecology and Sociobiology*, Vol. 2, (1977), pp. 169–184.
- (13) Maeda, T., Ishiguro, S., Yokoyama, K., Hirokawa, K., Hashimoto, A., Okuda, Y., and Tani, T.,  
Development of Fuel Cell AUV “URASHIMA”,  
*Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review*, Vol.41, No.6, (2004), pp.344-347.
- (14) Wakita, N., Hirokawa, K., Ichikawa, T., and Yamauchi, Y.,  
Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) for Exploring Deep Sea Marine Mineral Resources,  
*Mitsubishi Heavy Industries, Technical Review*, Vol.47, No.3, (2010), pp.73-80.
- (15) Fiorelli, E., Leonard, N.E., Bhatta, P., and Paley, D.,  
Multi-AUV Control and Adaptive Sampling in Monterey Bay,  
*IEEE journal of oceanic engineering*, Vol. 31, No. 4, (2006), pp.935–948.
- (16) Zhou, J., and Clark, C.M.,  
Autonomous fish tracking by ROV using Monocular Camera,  
*The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision (CRV'06)*, (2006), pp.68.
- (17) Katzschmann, R.K., DelPreto, J., MacCurdy, R., and Rus, D.,  
Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish,  
*Science Robotics*, Vol. 3, No. 16, (2018), eaar3449.
- (18) Sitorus, P. E., Nazaruddin, Y. Y., Leksono, E., and Budiyono, A.,  
Design and implementation of paired pectoral fins locomotion of Labriform fish applied to a fish robot,  
*Journal of Bionic Engineering*, Vol. 6, No. 1, (2009), pp.37-45.
- (19) Yu, J., Tan, M., Wang, S., and Chen, E.,  
Development of a Biomimetic Robotic Fish and Its Control Algorithm,  
*IEEE TRANSACTIONS ON CYBERNETICS*, Vol. 34, No. 4, (2004), pp.1798-1810.
- (20) Wang, W., Guo, J., Wang, Z., and Xie, G.,  
Neural controller for swimming modes and gait transition on an ostraciiform fish

- robot,  
2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent  
Mechatronics, (2013), pp.1564-1569.
- (21) Wang, Z., Hang, G., Li, J. Wang, Y., and Xiao, K.,  
A micro-robot fish with embedded SMA wire actuated flexible biomimetic fin,  
Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 144, No. 2, (2008), pp.354-360.
- (22) Radcliffe, R. W.,  
The Effect of Fin-Clipping on the Cruising Speed of Goldfish and Coho Salmon  
Fry,  
Journal of the Fisheries Research Board of Canada, Vol. 8a, No. 2, (1950), pp. 67–  
73.
- (23) Takada, Y., Nakanishi, Y., Araki, R., Nonogaki, M., Wakisaka, T.,  
Effect of Material and Thickness about Tail Fins on Propulsive Performance of a  
Small Fish Robot,  
Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol. 1, No. 1, (2010), pp. 51-56.
- (24) Zhao, T., Fukuhara, M., Usami, T., and Takada, Y.,  
Performance of Very Small Robotic Fish Equipped with CMOS Camera,  
Robotics, Vol. 4, (2015), pp. 421–434.
- (25) Takada, Y., Fukuzaki, N., Ochiai, T., Tajiri, T., and Wakisaka, T.,  
Evaluation of Artificial Caudal Fin for Fish Robot with Two Joints by Using  
Three-Dimensional Fluid-Structure Simulation,  
Advances in Mechanical Engineering, Vol. 5, (2013), Article ID 310432.
- (26) 高田 洋吾, 中村 毅志, 小山 圭介, 福崎 昇, 田尻 智紀, 脇坂 知行,  
小型魚ロボットFOCUS の目標追従と自己位置推定  
日本マリンエンジニアリング学会誌, 第47巻, 第5号, (2012), pp. 108–113.
- (27) Takada, Y., Koyama, K., and Usami, T.,  
Position Estimation of Small Robotic Fish Based on Camera Information and  
Gyro Sensors,  
Robotics, Vol. 3, (2014), pp. 149–162.
- (28) Takada, Y., Araki, R., Nakanishi, Y., Nonogaki, M., and Ebita, K.,  
Development of Small Fish Robots Powered by Small and Ultra-Light  
Passive-Type Polymer Electrolyte Fuel Cells,  
Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 2, (2010), pp. 150–157.
- (29) 高田 洋吾, 荒木 良介, 野々垣 元博, 海老田 一章, 石井 利長, 脇坂 知行,  
小型・超軽量自立型固体高分子形燃料電池の開発と小型魚ロボットへの応  
用,

- 日本機械学会論文集 B編, Vol. 76, No. 764 (2010), pp. 650-659.
- (30) 高田 洋吾, 中西 志允, 荒木 良介, 脇坂 知行,  
PIV測定と3次元数値解析による小型魚ロボット周りの水の流動状態と推進能力の検討,  
日本機械学会論文集 C編, Vol. 76, No. 763 (2010), pp. 665-672.
- (31) 高田 洋吾, 中村 毅志, 小山 圭介, 田尻 智紀,  
色情報に基づく小型魚ロボットFOCUSの目標物追従制御,  
日本機械学会論文集 C編, Vol. 78, No. 792 (2012), pp. 2924-2934.
- (32) Aritani, T., Kawasaki, N., and Takada, Y.,  
Small robotic fish with two magnetic actuators for autonomous tracking of a goldfish,  
Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol. 8, No. 1 (2019), pp. 69-74.
- (33) Liang, C., Chang, L. and Chen, H. H.,  
Analysis and compensation of rolling shutter effect, IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING, Vol. 17, No. 8, (2008), pp. 1323-1330.
- (34) 若田部 淳, 金森 哉吏, 安藤 龍, 松本 樹昌, 宮寄 武,  
アーチェリーロボットの開発 ピッチ角可変弓把持部と準静的指開放機構を用いた飛翔実験  
Proceedings of the 2016 JSME Conference on Robotics and Mechatronics No. 16-2, (2016), 2A1-11b4(4).
- (35) Miyazaki, T., Mukaiyama, K., Komori, Y., Okawa, K., Taguchi, S., and Sugiura, H.,  
Aerodynamic properties of an archery arrow,  
Sports Eng, 16, (2013), pp. 43-54.
- (36) Kormushev, P., Calinon, S., Saegusa, R., and Metta, G.,  
Learning the skill of archery by a humanoid robot iCub,  
IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, (2010), pp. 417-423.
- (37) Spot-Hogg Hooter Shooter Bow Tuning Machine,  
Available online:  
<https://www.abbeyarchery.com.au/p/SHHS/Spot-Hogg+Hooter+Shooter+Bow+Tuning+Machine.html>  
(参照日2022年3月9日).
- (38) Coop's Bowsmith Pro,  
Available online: <https://www.lancasterarchery.com/coop-s-bowsmith-pro.html>  
(参照日2022年3月9日).
- (39) Kooi, B.W., and Sparenberg, J.A.,

- On the mechanics of the arrow: Archer's Paradox,  
*Journal of Engineering Mathematics*, No. 31, (1997), pp. 285–303.
- (40) Nakamura, T., Takada, Y., Watanabe, H.,  
 Statics investigation about archery robot in drawing a bow. In *Proceedings of the 2019 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, Hiroshima, Japan, 5–8 June 2019.
- (41) 高田 洋吾, 中村 毅志, 小山 圭介, 脇坂 知行,  
 カメラ情報に基づく小型魚ロボットの自己位置推定,  
*日本マリンエンジニアリング学会誌*, 第47巻, 第3号, (2012), pp.138-144.
- (42) Hirata, K., Takimoto, T., and Tamura, K.,  
 Study turning performance of a fish robot.  
*First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms*, Honolulu, HI, USA, (2000), pp. 287–292.
- (43) Schlegel, T., Schmid, C.J., and Schuster, S.,  
 Animal cognition: How archer fish learn to down rapidly moving targets.  
*Current Biolog*, Vol. 16, Issue 4, (2006), pp. 378–383.
- (44) Wöhl, S., and Schuster, S.,  
 The predictive start of hunting archer fish: A flexible and precise motor pattern performed with the kinematics of an escape C-start,  
*Journal of Experimental Biology*, 210(2), (2007), pp. 311–324.
- (45) Lawrence, M.D.,  
 Refraction and the spitting behavior of the archerfish (*Toxotes chatareus*),  
*Behavioral Ecology and Sociobiology*, Vol. 2, (1977), pp. 169–184.
- (46) Scott, D.,  
 On optimal and data-based histograms.,  
*Biometrika*, Vol. 66, Issue 3, (1979), pp. 605–610.
- (47) Hoerner, S.F.,  
*Fluid-Dynamic Drag: Practical Information on Aerodynamic drag and Hydrodynamic Resistance*,  
 2nd ed., USA, (1965).
- (48) Shields F.D., Jr.,  
 Alonso, C.V. Assessment of flow forces on large wood in rivers.  
*Water Resources. Research*, Vol. 48, Issue 4, (2012), pp. 1–16.

## 公表論文

本論文に収録した研究論文は以下の通りである。

### 第 2 章

Aritani, T., Kawasaki, N., and Takada, Y.,

Small robotic fish with two magnetic actuators for autonomous tracking of a goldfish,  
Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, Vol. 8, No. 1 (2019), pp. 69-74.

### 第 3 章

川崎 直樹, 有谷 拓也, 高田 洋吾,

ローリング運動を起こす魚追従ロボットにおける撮影回転画像のリアルタイム  
補正

日本機械学会論文集, 87 巻, 901 号, (2021), p. 21-00104.

### 第 4 章

Ohara, M., Kawasaki, N., Nakahama, J., Takada, Y., Watanabe, H.,

Development of an Archery Robot for the Selection of Arrows,  
Proceedings of the 13th Conference of the International Sports Engineering Association,  
49, 115, (2020).

### 第 5 章

Kawasaki, N., Tonomura, K., Ohara, M., Shinojima, A., Takada, Y.,

Effects on Trajectory of a Spear Using Movement of Robotic Fish Equipped with Spear  
Shooting Mechanism,

Robotics, 11, 14, (2022).

## 謝辞

本論文は、大阪市立大学大学院工学研究科機械物理系専攻後期博士課程において行った研究をまとめたものです。

本研究の遂行にあたり、大阪市立大学学部から大阪市立大学大学院後期博士課程における研究に至るまで、終始多大なご指導、ご鞭撻を賜りました大阪公立大学大学院工学研究科機械系専攻機械工学分野教授 高田洋吾博士に厚く御礼申し上げます。

また、本論文を作成するにあたり、ご教示を賜りました大阪公立大学大学院工学研究科機械系専攻機械工学分野教授 川合忠雄博士および同教授 山崎友裕博士に感謝の意を表します。

そして、本研究活動中には、大阪公立大学都市健康・スポーツ研究センター客員教授 渡辺一志博士および大阪市立大学大学院工学研究科機械物理系専攻ロボット工学研究室の学生諸氏にもご協力を得ました。皆様に厚く感謝の意を表します。

また、大阪市立大学大学院工学研究科機械物理系専攻後期博士課程在学中に入社した株式会社計測工業代表取締役 芝雄大氏をはじめ、株式会社計測工業の皆様が学業を継続することへの理解および協力に感謝いたします。

最後に、本研究の遂行中様々な面で支えてくれた家族一同に感謝の意を表し、結びと致します。