

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560301

研究課題名(和文) カメラとFPGAを搭載した小型魚ロボットによる淡水魚調査の実現

研究課題名(英文) Practical searching for freshwater fish by small robotic fish equipped with camera and FPGA

研究代表者

高田 洋吾 (Takada, Yogo)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70295682

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：研究期間内に開発した小型魚ロボットFOCUSには、前方確認用カメラと底面撮影用カメラを搭載している。底面撮影用カメラとFPGAを用いてリアルタイムに実施される、魚ロボットの推進に応じて変化する画像に基づくデジタル画像相関法と、ロボットに取り付けられたジャイロセンサによって得られる姿勢情報によって、水中における魚ロボットの位置が特定できる。また、新開発した小型魚ロボットSAPPAは、全長170ミリメートルまで小型化した。高い機動性を有し、また、搭載している広角レンズ付きカメラで、前方の魚(和金など)を認識できる。

研究成果の概要(英文)：The small robotic fish which we developed in this study period has a camera to look ahead and another camera to take pictures of the bottom of the water. Internal FPGA executes the digital image correlation (DIC) by using the bottom image of which the camera took a picture to estimate the robot's position. This robot can estimate its position by using the DIC and the gyro sensors which can measure the roll and yaw angle of robot in water. Moreover, we developed another robotic fish SAPPA which miniaturized up to 170 millimeters in the total length. Although the robot is very small, it has high mobility and can recognize a fish, for example, goldfish.

研究分野：ロボット工学

キーワード：移動ロボット アクアロボット 数値流体力学 魚 生態系修復・整備

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景：日本には純淡水魚の他、回遊魚、汽水魚、外来魚を含めて、300種類以上の淡水魚が棲息している。しかし、メダカやタナゴなど絶滅危惧種として保護すべき魚も数多く存在する。棲息および生育の状況を調査し、情報を集積することは各種の保護対策として必要不可欠である。しかし、活発な情報集積活動および保護活動は、地域住民の負担となる。そこで、魚を驚かさない機械(魚ロボット)で調査を実施することに大きい価値がある。

(2) 学術的背景：淡水魚の調査に適したアクアロボットは未だ存在しない。理由として大きく3つある。スクリュウ駆動の機械では、魚は驚いて逃げるため、調査にならない。ロボットの消費電力が大きく、長時間調査活動が出来ない。小型ロボット内部に搭載できるサイズのマイコンでは演算能力が低いため、十分な画像処理が出来ず自律的に行動できない。

2. 研究の目的

(1) スクリュー駆動と異なり、尾ひれ駆動では、保護対象の魚を驚かさないことを既に確認していた。駆動音がほとんど無く、見た目も魚に似ているためである。しかし、スクリュウ駆動に比べて、尾ひれ駆動では推進効率を高めることが難しく、特に魚の推進メカニズムを適切に模擬してようやく推進させることが可能になる。そこで、魚ロボット周りの流動計測を実施し、さらに数値流体力学(CFD)を駆使して、尾ひれで泳ぐ魚ロボットの推進性能向上策を検討する。

(2) また、ロボットの遊泳時間を長くするため、アクチュエータの消費電力を低減する研究を行う。魚ロボットの消費電力を、尾ひれ駆動と後述のカメラやFPGAの消費電力を含めても500mW前後まで抑え込みつつ、長時間遊泳を実現する。

(3) 魚ロボットに、複数個のCMOSカメラとカメラ情報に基づいて画像処理するためのFPGAを搭載する。プログラムコードはハードウェア記述言語であるVHDLを使用して、魚ロボットの自己位置推定を行うコードを作成する。FPGAはハードウェア(電子回路)であるため、H8やPICマイコンに比べ、比較にならない程に演算能力が高く、カメラの取得情報に基づいて、ほぼ瞬時に画像処理の演算を行うことが出来る。

(4) 本研究では、上の学術的背景で示したロボットによる淡水魚調査を阻害する要素全てを排除したアクアロボットを開発し、実際に淡水魚を遊泳中にカメラで撮影できるかどうかを検討する。

3. 研究の方法

(1) 本研究における小型魚ロボット内部には小型CMOSカメラとFPGAを搭載する。ロボット下部において、下向きに取り付けられたカメラでプール底部を撮影し、その模様の変り変わりをデジタル画像相関法によって計算することで、一定時間あたりのロボットの移動量が分かる。この移動量を積算することによって、自己位置を推定できる。

しかし、ロボットにピッチング(縦揺れ運動)、ヨーイング(旋回運動)、ローリング(横揺れ運動)が発生すると、カメラの向いている方向が大きく変わるため、自己位置推定の精度が低下する。そこで、3軸ジャイロセンサを装着して、自己位置推定の精度を向上させる。

(2) 鯉やアジなどと同じ形状の尾ひれを持つ魚は、尾ひれ後流部に逆カルマン渦列を作り出す。魚ロボットで、その逆カルマン渦列を生成させることは容易ではない。逆カルマン渦列が生成しているかどうかはPIVで水の流れを測定しなければ判らないため、実験で試行錯誤を繰り返す。

CFDを用いて、三次元流動解析結果に基づく遊泳速度向上に向けた検討を行う。魚ロボットの駆動部に対する指令信号の与え方次第で、本ロボットの遊泳速度は変化するが、その変化する要因がどこかを探る。また、最高遊泳速度が得られる条件について検討する。

(3) 魚ロボットの自律遊泳の実現を目指す。まず、水中で頭部カメラによる被写体撮影が可能な距離を見つけ出す。空気中とは異なり、水中では視野範囲が大幅に悪くなり、遠くまで撮影することが出来ない。つまり、魚ロボットが被写体に十分近づいて、撮影可能領域に到達後、撮影することになる。次に、被写体のところまで画像処理技術に基づいて、被写体に近づく手法を確立する。被写体は動物(魚)であるため、動いている。つまり、被写体までの距離が遠すぎて明確に何か判らない状態でも、それが動いているかどうかを判断することで被写体である魚と判断して行動させれば目的は達成できる。本研究では、その可能性について検討する。

(4) 魚ロボットによる淡水魚撮影と撮影位置推定の実現を目指す。3メートル×2メートル程度の組み立て式プール(フレームプール)を大学内に設置し、そのプール内に複数匹の淡水魚を入れて、魚ロボットと一緒に泳がせる。撮影結果をFPGA内メモリにデータとして保存させる。試験終了後、メモリ内に保存された魚の写真をパソコンによって確認し、その結果について評価・検討する。

4. 研究成果

(1) 本研究で開発した小型魚ロボット FOCUS の写真を図 1 に示す。このロボットは全長約 300 mm の小型ロボットである。尾ひれ駆動機構には 2000 巻のコイルの中に、ネオジム磁石を挿入して作られたマグネットアクチュエータを用いる。このマグネットアクチュエータをパワー MOSFET である SP8M4 (今は製造されておらず、SH8M4 に引き継がれている) を複数個使用することによって、尾ひれの左右揺動制御を実現している。このマグネットアクチュエータが作り出すトルクは非常に小さいが、推進速度は 123 mm/s で尾ひれ駆動式ロボットとしては比較的高速に遊泳することが出来ている。非力なアクチュエータであることが、消費電力量の著しい低減に結び付き、500mW 未満を達成している。3.7V, 1000mAh のリチウムポリマーバッテリーを電力減とした場合には、理論上 7 時間以上遊泳可能で、実験的にも 5 時間以上、追加充電しないまま遊泳させ続けることが出来ている。



図 1 小型魚ロボット FOCUS

FOCUS には、図 2 に示すように動力系以外に、画像処理および遊泳制御用の FPGA 基板、CMOS カメラ、ジャイロセンサ、浮沈装置が取り付けられている。前方部に取り付けられた CMOS カメラは、前方物体に対する観察および色情報検知、赤色物体認識のために用いられる。下面部の CMOS カメラは、プール底面の模様を撮影し、その模様の時間的移り変わりから、デジタル画像相関法によって自己位置を推定するために用いられる。これらカメラ用画像処理に関しては、FPGA 内部で行われる。使用した FPGA は Spartan-6 XC6SLX9 (Xilinx 製) である。ジャイロセンサは、ロボットのヨー運動、ロール運動を検知するために用いられる。

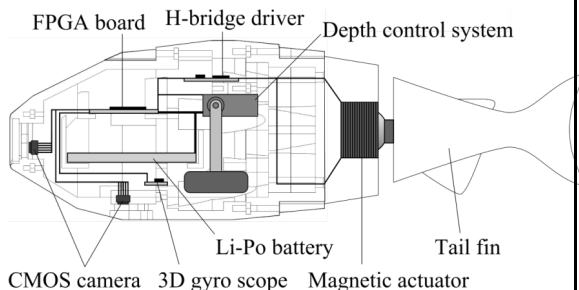


図 2 FOCUS の内部構造

(2) 本研究で開発したロボット FOCUS を用いて、自己位置を推定する実験概要と実験結果について述べる。図 3 に示す水槽内にランチャーを設置し、その中に魚ロボットを入れる。その後、尾ひれを駆動させて、魚ロボットの推進をスタートする。FOCUS には赤色物体を追従する能力があるので、前方に赤色の移動物体を移動させて、FOCUS を誘導する。魚ロボット FOCUS の背部にマークを付けておき、上方に設置したカメラを用いてモーションキャプチャすることによって、ロボットの軌跡を計測することが出来る。この軌跡を基準として、ロボットが自ら推定した自己位置の軌跡と比較し、自己位置推定結果の良し悪しを判断した。

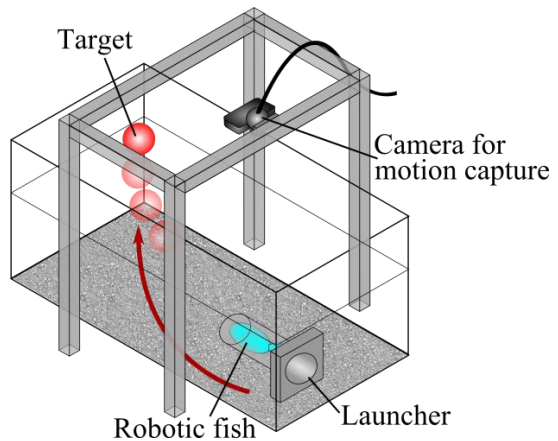


図 3 自己位置推定の実験概要

図 4 に自己位置推定結果を示す。赤の実線が基準軌跡で、黒の実線がデジタル画像相関法 (DIC) のみを用いた場合、緑の実線が DIC とヨーセンサ (ジャイロセンサでヨー運動のみ計測) を用いた場合、青の実線が DIC とヨーセンサ、ロールセンサを用いた場合である。青線が最も赤線に近いことが分かる。

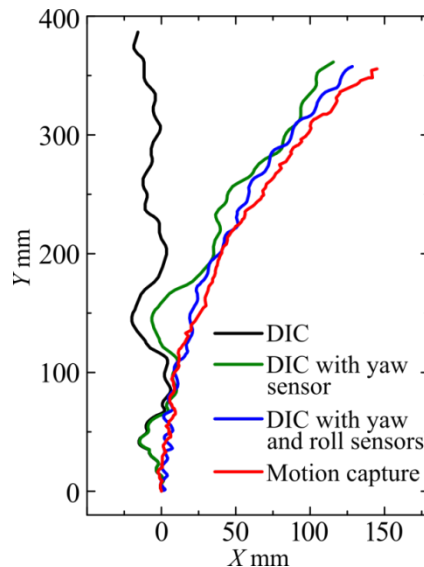


図 4 自己位置推定の実験結果

DIC に関して、回転や傾きも考慮に入れて計算することは理論上不可能ではないが、魚口ロボット内部に収納可能なサイズの FPGA においては、ロジックセル数が不足するなどの理由により、現実的でない。しかし、ジャイロセンサとの併用により、自己位置の推定結果を大幅に改善できることが確認できた。

(3) 魚口ロボットの性能改善を目的として、粒子画像流速測定法 (PIV) や数値流体力学 (CFD) を用いて実験および解析を行った結果、尾ひれの関節数は 2 関節であることが望ましいと分かったため、FOCUS を参考にして、新しく図 5 に示す小型魚口ロボット SAPPA を開発した。全長が 170 mm しかないが、このロボットの中には、2 関節駆動を実現するサーボモータ 2 つ、リチウムポリマー電池、Hブリッジ回路、FPGA、広角レンズ付き CMOS カメラ、浮沈装置など、魚口ロボットとして主要な要素が全て含まれている (図 6)。

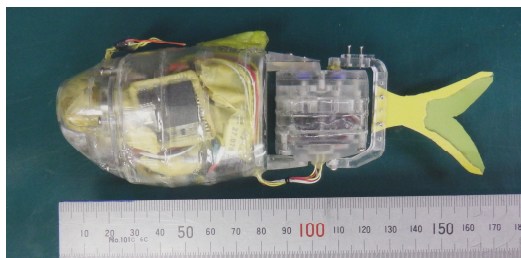


図 5 小型魚口ロボット SAPPA

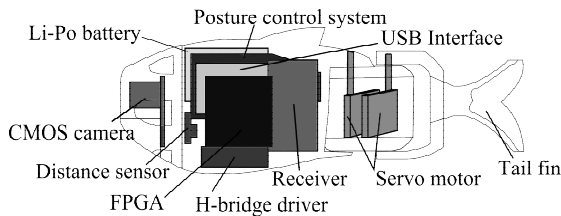


図 6 SAPPA の内部構造

推進速度は 111 mm/s であり、全長比では FOCUS を大きく上回る。図 7 にプール内で直線移動させたときの様子を示す。SAPPA のすぐ後ろに、金魚がロボットを追うように泳いでおり、ロボットが金魚に警戒感を与えていないことが分かる。また、図 8 のように旋回運動を試みた結果、その旋回半径は 125 mm であった。また、図 9 に示すように、浮上時および沈降時の角度はそれぞれ上向き 60° と下向き 50° であり、鋭く上下運動することが出来る。以上のことから極めて機動性に優れたアクアロボットであると言える。

図 10 には、遊泳中の SAPPA が撮影した写真を示している。魚を鮮明に撮影するとともに、特に赤色の濃い部分を、縦横白線の交点で捉えることが出来る。



(a) $t = 0.0$ sec



(b) $t = 1.0$ sec



(c) $t = 2.0$ sec

図 7 プール内で直線移動する SAPPA

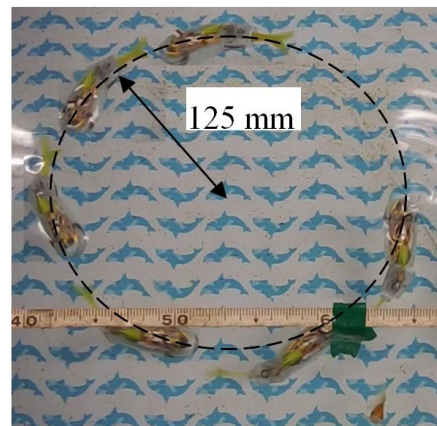


図 8 プール内で旋回運動する SAPPA

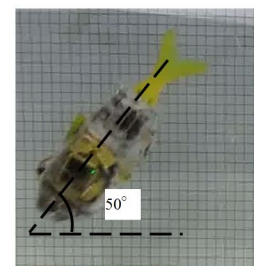
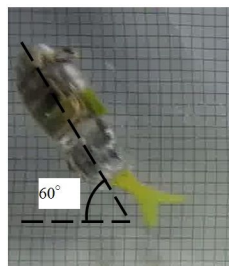


図 9 浮上時姿勢角度と沈降時姿勢角度

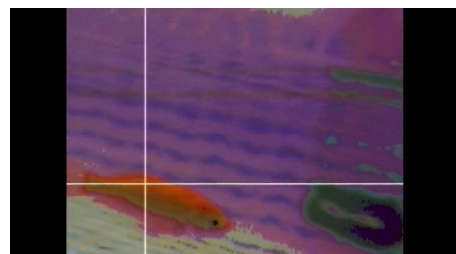


図 10 SAPPA のカメラが捕捉した金魚

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

Y. Takada, K. Koyama, T. Usami,
Position Estimation of Small Robotic
Fish Based on Camera Information and
Gyro Sensors, Robotics, 査読有, Vol.3,
No. 2, 2014, 149-162

DOI:10.3390/robotics3020149

Y. Takada, T. Ochiai, N. Fukuzaki, T.
Tajiri, T. Wakisaka,
Analysis of Flow around Robotic Fish by
Three-dimensional Fluid-structure
Interaction Simulation and Evaluation
of Propulsive Performance, Journal of
Aero Aqua Bio-mechanisms, 査読有, Vol.
3, No.1, 2013, 57-64

DOI:10.5226/jabmech.3.57

Y. Takada, N. Fukuzaki, T. Ochiai, T.
Tajiri, T. Wakisaka,
Evaluation of Artificial Caudal Fin
for Fish Robot with Two Joints by Using
Three-dimensional Fluid-structure
Simulation, Advances in Mechanical
Engineering, Hindawi Publishing Co.,
査読有, Vol.2013, 2013, 9 pages,

<http://ade.sagepub.com/>

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), 査読有, 78 巻 792 号, 2012,
2924-2934

DOI:10.1299/kikaic.78.2924

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, 査読有,
47 巻 5 号, 2012, 108-113

DOI:10.5988/jime.47.742

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, 査読有, 47 巻 3 号, 2012,
138-146

DOI:10.5988/jime.47.437

〔学会発表〕(計9件)

趙洋, 高田洋吾, 2 つの関節を持った小
型魚ロボットにおける位相差が逆カルマ
ン渦列に及ぼす影響, ロボティクス・メ
カトロニクス講演会 2015, 2015 年 5 月
19 日, 京都大学桂キャンパス(京都府・京
都市)

宇佐美雄大, 安部将太郎, 池田洋平, 趙

洋, 高田洋吾, 小型魚ロボットに搭載し
たカメラによる淡水魚撮影の実現, 日本
機械学会関西支部第 90 回定時総会講演
会, 2014 年 3 月 16 日, 京都大学桂キャン
パス(京都府・京都市)

池田洋平, 宇佐美雄大, 趙洋, 高田洋吾,
レーザーと小型カメラを搭載した魚ロボ
ットの目標物検出, 日本機械学会関西支
部第 90 回定時総会講演会, 2014 年 3 月
16 日, 京都大学桂キャンパス(京都府・
京都市)

鳥羽晃平, 高田洋吾, スピーカーとマイ
クロホンを用いたロボットの位置検出シ
ステム, 日本機械学会関西学生会, 2015
年 3 月 14 日, 京都大学桂キャンパス(京
都府・京都市)

小山圭介, 高田洋吾, 宇佐美雄大, 小型
魚ロボット FOCUS における目標物追従
と遊泳経路取得の実現, 日本機械学会関
西支部第 89 回定時総会講演会, 2014 年
3 月 18 日, 大阪府立大学(大阪府・堺市)

福崎昇, 宇佐美雄大, 高田洋吾, 尾ひれ
推進の際に生じるヨー運動が魚ロボットの
推進性能に与える影響の検討, 日本機
械学会関西支部第 89 回定時総会講演会,
2014 年 3 月 18 日, 大阪府立大学(大阪
府・堺市)

池田洋平, 田尻智紀, 高田洋吾, 各アク
チュエータの位相差と尾ひれの素材が魚
ロボットの推進性能に及ぼす影響, ロボ
ティクス・メカトロニクス講演会 2013,
2013 年 5 月 23 日, つくば国際会議場(茨
城県・つくば市)

Y. Takada, T. Ochiai, N. Fukuzaki, T.
Tajiri, T. Omichi and T. Wakisaka,
Analysis for Flow around a Fish Robot
by Three-dimensional Fluid-structure
Simulation and Evaluation of the
Propulsive Performance, The Fifth
International Symposium on Aero Aqua
Bio-Mechanisms, August 28th 2012, 台
北(台湾)

小山圭介, 中村毅志, 大道崇文, 高田洋
吾, カメラ画像に基づいた遠隔制御が可
能な小型魚ロボットの開発, ロボティク
ス・メカトロニクス講演会 2012, 2012 年
5 月 29 日, アクオシティ浜松(静岡県・
浜松市)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 符号化装置、復号装置、方法

発明者：高田洋吾
権利者：大阪市立大学
種類：特許
番号：特願 2015-050181
出願年月日：2015年3月13日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://rdbsv02.osaka-cu.ac.jp/profile/ja.t.YxDwkcqZofyWrA02a3Qw==.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 洋吾 (TAKADA, Yogo)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70295682