水中6脚ロボットにおける機体姿勢制御

佐藤 翔太*・高木 基樹**・三好 扶**

Development of Attitude Control for Underwater Six-legged Robot

Shota SATO*, Motoki TAKAGI** and Tasuku MIYOSHI**

The goal of this study was to construct a multi-legged robot to provide stable operation on the seabed. It would be difficult to reach the work destination only by walking movement, since the ocean floor is often an irregular area owing to the rocks of various sizes and also there are many obstacles such as marine resources in the shallow area. We propose a remotely operated vehicle (ROV) that avoids obstacles on the seabed by swimming locomotion. In this paper, we implemented an algorithm to control the posture control and the output direction of thrust by moving the center of gravity (COG) of a radially arranged six-legged octopus-motion-like ROV (RASOL), and demonstrated the swimming locomotion in a three-dimensional manner. As a result, RASOL could swim by flapping its legs and move toward the goal in a three-dimensional manner by controlling the position of the COG.

Key Words: six-legged ROV, three dimensional motion in water, pitch and roll motion control

1. 緒言

一般にプロペラ駆動型的水中ロボットによる海底付近の定点観測は、当該地点での作業を達成するために高度を維持するホバリング機能が求められる。しかしながら、海底付近でのプロペラ駆動による推力生成を利用したホバリングは泥や砂などの海底堆積物を攪拌するため、たとえば海底画像取得には不利に働く。したがって、脚ロボットであれば接地することで推力を利用しない姿勢の保持や接地面積を小さくすることが可能となり、ホバリングによる海底堆積物の攪拌を抑えられると示唆されている¹⁾。一方、浅い海域では磯根資源が障害物となり、海底面に対する姿勢保持能力や踏破能力の限界などが課題として想定される。

障害物回避に言及すると、Boxerbaumら²⁾やZhangら³⁾は水中を3次元的に移動できるようプロペラやヒレとして利用できる脚機構を開発した。しかしながら脚ロボットが接地面内で安定した姿勢を確保するには脚機構の自由度が3以上を求められるため、これらの脚機構^{2),3)}の自由度が2以下であることから、不整地では接地できない可能性がある。またYooら⁴⁾やHanら⁵⁾は、歩行移動と水中移動において脚機構の自由度を切り替えることを提案した。この場合は水中移

動用の自由度増設が機体の肥大化を招き、結果的に踏破能力の低下を引き起こす。

このような背景のもと、われわれのグループでは、不整地帯において安定した姿勢保持ができるよう脚の自由度を3とし、この脚による推力生成によって水中を移動する6脚ロボット“RASOL (Radially Arranged Six-legged Octopus-Like remotely operated vehicle)”を開発し、脚の羽ばたきによる推力生成によって泳動作を実現し、重力軸方向への移動を可能にした⁶⁾。本稿では、RASOLの水中における3次元的な移動が可能となるよう、機体重心移動によって姿勢制御と推力の出力方向を制御するアルゴリズムを開発し、これを実装した評価実験結果を示す。

2. RASOLについて

Fig. 1 AにRASOLの概観および機体座標系を示す。RASOLは接地時の安定性を考慮して脚数を6脚とし⁷⁾、脚配置は前後左右に対する特性が平滑化され、接地箇所を機体の向きにかかわらず選択できるよう放射状に均等配置した⁸⁾。また、機体諸元は脚を含めて全長約0.85 m、全高約0.1 m、乾燥重量は5.0 kgとなった。水中重量は0.1 kgとなるよう浮力を調節した。

Fig. 1 BにRASOLに実装した脚機構の自由度構成を示す。1脚あたり3自由度とし、 θ_i ($i = 1 \sim 3$) は各関節角度 [deg]、 l_j ($j = 1 \sim 3$) は各リンク長さ [mm] を表わす。なお、座標系は脚ごとのローカル座標とする。これまでに水中ロボットとして回転駆動系を用いてヒレまたは脚を羽ばたかせることで抗力を生成し、推進を行なう機体が開発されてきた^{9)~11)}。本機構でも回転駆動系を使用していることから水中移動のため

* 岩手大学大学院工学研究科 盛岡市上田 4-3-5

** 岩手大学理工学部 盛岡市上田 4-3-5

* Graduate School of Engineering, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka

** Faculty of Science and Technology, Iwate University, 4-3-5 Ueda, Morioka

(Received March 15, 2017)

(Revised May 26, 2017)

Fig. 1 (A) Overview of underwater hexapod robot “RASOL”; (B) schematic figure of the three-jointed leg

Fig. 2 System configuration of RASOL

足先にヒレを搭載し、第2関節と第3関節を駆動させることで抗力を生成する。本機構では足先を z 軸正方向へ動かす行程を打ち下ろし、 z 軸負方向へ動かす行程を打ち上げとする。製作した脚機構は、全長250mm、全幅65mmとなり、ヒレは3Dプリンタを用いて作成し、縦65mm、横140mmとした。1脚の全重量は0.4kgとなった。

システム構成をFig. 2に示す。本機は陸上のPCと機体をLANケーブルによって接続し制御信号の伝達を行なう。電装系収納用として防水容器(KBOXDS-A, MISUMI)を用いた。内部にはマイコンボード(Arduino Mega 2560, Arduino)を2台搭載し、PCからの制御信号をPWM信号に変換し、各脚のサーボモータを駆動させる。電源は防水容器内に搭載したバッテリー(RC-HSC612TM4500, AA Portable Power Cor-

poration)より供給される。機体姿勢計測用として慣性計測装置(IMU; BNO055, Bosch Sensortec), 深度計測用として圧力センサ(MS5837, TE Connectivity Measurement Specialties), センサ類の動作用としてマイコンボード(Arduino Pro mini, Arduino)を搭載した。

2.1 RASOLの羽ばたき動作

RASOLの水中移動は、脚機構の先端部にヒレを搭載し、これを羽ばたかせることで抗力 F_D [N]を生成する抗力型推進とし F_D は次式で表わされる。

$$F_D(t) = \frac{1}{2} C_D \rho A r^2 \omega(t)^2, \quad (1)$$

ここで C_D は抗力係数[-], ρ は流体の密度[kg/m³], A は物体の流れに対する最大投影面積[m²], r は回転半径[m], $\omega(t)$ は関節の角速度[rad/s]である。モータへの入力角度と角速度の関係式をつぎに示す。

$$\theta_{ki}(t) = \theta_{0ki} - \theta_{aki} \sin \{2\pi \cdot f_{ki} \cdot t + p(t)\}, \quad (2)$$

$$p(t) = \frac{\pi}{180} \theta_{kp} \sin(2\pi \cdot f_{ki} \cdot t), \quad (3)$$

$$\omega(t) = \frac{\pi}{180} \frac{d}{dt} \theta_{ki}(t), \quad (4)$$

$\theta_{ki}(t)$ はサーボモータへの入力角度[deg], θ_{0ki} は各関節振幅中心[deg], θ_{aki} は各関節振幅[deg], f_{ki} は各関節動作周波数[Hz], $p(t)$ は位相オフセット[deg], θ_{kp} は位相オフセットの振幅[deg], t は時間[s], k は脚番号($k=1\sim6$), i は関節番号($i=2, 3$)を表す。これまでに条件として $\theta_{0ki} = -30$ deg, $\theta_{aki} = 30$ deg, $f_{ki} = 1.0$ Hz, $\theta_{kp} = 50$ degのとき1脚につき0.24Nの抗力を生成し、6脚による羽ばたき動作によってRASOLが水中を推進可能であることを確認している⁶⁾。

2.2 RASOLの機体重心移動による姿勢制御

(1) 機体重心移動と姿勢制御の関係性

水中ロボットは目標進行方向に応じて推力を生成および出力する。このとき推力の出力方向を制御する方法は、(i)複数の推進器を搭載し複合的に駆動する¹²⁾, (ii)推進器の向きを変更する機構によって出力方向を操作する¹³⁾, (iii)バラストなどによって復原力を発生させ機体姿勢を制御して出力方向を操作する方法がある¹⁴⁾。(i)と(ii)は運動の自由度に合わせた推進器を配置し、推進器1基あたりが生成する推力が十分な場合に有効な手段となる。一方、(iii)は復原力を利用するために機体回転中心に対する浮心または重心の移動機構が必要となる。しかしながら、多脚ロボットは胴体から伸びる脚の姿勢および位置に伴い重心位置が変化させられ¹⁵⁾, 脚の姿勢や位置を操作パラメータとすることで機体重心移動が可制御となる。RASOLはこの(iii)を適用し、6脚による同一方向への抗力を生成しつつ、脚による重心移動によって機体姿勢を制御し、結果的に推力の出力方向を操作することとした。

(2) 機体重心の移動方法

RASOLの重心移動は脚配置が放射状に均等であることから、各脚で操作可能な重心移動量は等しくなる。機体水平面上の重心位置は以下の式を用いて算出される。

Fig. 3 (A) Schematic figure of the six radially arranged legs and the definition of the rotational direction; (B) locomotion of the COG coordination by changing the leg geometries

$$x_{gk} = S_k \cdot \sin(\delta_k) + \frac{L \cdot \sin(\delta_k + \theta_{k1})}{2}, \quad (5)$$

$$y_{gk} = S_k \cdot \cos(\delta_k) + \frac{L \cdot \cos(\delta_k + \theta_{k1})}{2}, \quad (6)$$

$$(x_{og}, y_{og}) = (0, 0), \quad (7)$$

$$X_g = \frac{\sum m x_{gk} + M x_{og}}{M + 6m}, \quad (8)$$

$$Y_g = \frac{\sum m y_{gk} + M y_{og}}{M + 6m}. \quad (9)$$

x_{gk} および y_{gk} は脚の質量中心の座標 [mm], S_k は機体中心から脚の付け根位置までの距離 [mm], L は水平面投影脚長 [mm], δ_k は脚の取り付け位置角度 [deg], θ_{k1} は第 1 関節角度 [deg], m は脚の質量 [kg], M は胴体の質量 [kg], x_{og} および y_{og} は胴体の質量中心の座標 [mm], X_g および Y_g は機体全体の質量中心の座標 [mm], k は脚番号 ($k = 1 \sim 6$) をそれぞれ表す. S_k , δ_k は機体の設計値であり, L は脚の第 2 関節および第 3 関節の角度で決定される. RASOL は全脚で同一の羽ばたき動作を行なうため, 泳動作中のすべての L は等しくなることから, 機体重心移動は **Fig. 3 A** に示すように

第 1 関節の駆動によって実現する. **Fig. 3 B** は $m = 0.4 \text{ kg}$, $M = 2.6 \text{ kg}$, $S_k = 175 \text{ mm}$, $L = 250 \text{ mm}$ とし, 脚番号 1~6 の第 1 関節角度をそれぞれ $-50 \sim 50 \text{ deg}$ の範囲で 5 deg 刻みで変化させたときの重心位置の変化を表す. これより各脚の第 1 関節角度の操作に伴い重心移動が行なわれていることが確認され (図中 COG with $\theta_{11} \sim \text{COG with } \theta_{61}$), 重心移動は各脚の回転半径に応じた円弧様を描く. 一方, 脚は均等放射配置であるため, ある脚とその対角に位置する脚の重心移動は点対称となることから, 対角の脚についてその第 1 関節角度を $\theta_{11} = -\theta_{41}$, $\theta_{21} = -\theta_{51}$, $\theta_{31} = -\theta_{61}$ と設定することで **Fig. 3 B** に示す線形な重心移動が可能となる (パターン 1, COG with θ_{11} and θ_{41} ; パターン 2, COG with θ_{21} and θ_{51} ; パターン 3, COG with θ_{31} and θ_{61}). ここで, RASOL の浮力は防水容器および胴体フレームに取り付けた浮力材のみから得ている. したがって, 浮力は胴体部のみで発生することとなり, 浮心位置は全体の重心移動に影響しないものと定義した.

3. RASOL の機体姿勢制御実験

3.1 機体姿勢制御パラメータ同定

2.2 節のとおり, 機体重心位置を操作することで機体姿勢は可制御となる. 一方, 水中環境では機体姿勢変化による慣性的流体力, 復原力を含む非慣性的流体力が外乱因子となる. そこで, RASOL の機体姿勢制御に資するよう, パターン 1-3 に応じた各脚第 1 関節角度と機体姿勢角度の入出力関係をシステム同定によって導出する¹⁶⁾. なお, 機体姿勢角度は α [deg] をロール角度, β [deg] をピッチ角度とし, 機体座標系における X 軸回りの回転をロール, Y 軸回りの回転をピッチとした. システム同定実験の結果, **Fig. 3 B** の各パターンを満たす係数は以下のように同定された; パターン 1: $\alpha = -0.4824\theta_{11}$, $\beta = -0.2522\theta_{11}$, ($\theta_{11} = -\theta_{41}$), パターン 2: $\alpha = 0.0037\theta_{21}$, $\beta = -0.5967\theta_{21}$, ($\theta_{21} = -\theta_{51}$), パターン 3: $\alpha = 0.5306\theta_{31}$, $\beta = -0.2485\theta_{31}$, ($\theta_{31} = -\theta_{61}$). これらの係数をそれぞれ $b_0 = -0.2522$, $b_1 = -0.5967$, $b_2 = -0.4824$, $b_3 = -0.2485$, $b_4 = 0.5306$ とする.

3.2 機体姿勢制御系の構築

各脚の第 1 関節角度は独立した機構であるから, 各パターンはそれぞれ独立して操作可能であるが, その組み合わせは機体重心移動に対して相互に影響を及ぼす. そこで, RASOL が全方位への重心移動が達成できるよう, 目標姿勢角度を入力とし, これに対する各脚の第 1 関節角度を決定することで機体姿勢制御系を構築する.

Fig. 3 B より, 各パターンを表わす 3 本の直線によって 6 領域に分割される. 入力となる目標姿勢角度 ($\alpha_{\text{target}}, \beta_{\text{target}}$) は, この 6 領域に対し以下の境界条件によって分類され, (10) 式によって各脚の第 1 関節角度が算出される; 領域 I: ($\alpha_{\text{target}} \geq 0$, $\beta_{\text{target}} \leq a_0\alpha_{\text{target}}$), 領域 II: ($\alpha_{\text{target}} \geq 0$, $a_0\alpha_{\text{target}} < \beta_{\text{target}} < a_1\alpha_{\text{target}}$), 領域 III: ($\alpha_{\text{target}} \geq 0$, $a_1\alpha_{\text{target}} \leq \beta_{\text{target}}$), 領域 IV: ($\alpha_{\text{target}} < 0$, $a_0\alpha_{\text{target}} \leq \beta_{\text{target}}$), 領域

Fig. 4 Attitude angle controller based on the PID feedback theorem

V: $(\alpha_{target} < 0, a_1\alpha_{target} < \beta_{target} < a_0\alpha_{target})$, 領域 VI: $(\alpha_{target} < 0, \beta_{target} \leq a_1\alpha_{target})$, 係数 a_0, a_1 は Fig. 3 B の各パターンから θ_{k1} を消去することで $a_0 = -0.4683$, $a_1 = 0.5228$ と算出される. 係数 b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 は 3.1 節と同値である.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ \theta_{41} \\ \theta_{51} \\ \theta_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -b_3 & 1 \\ \frac{1}{b_1b_4} & b_1 \\ \frac{1}{b_4} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{b_3}{b_1b_4} & -\frac{1}{b_4} \\ -\frac{1}{b_4} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_o \\ \beta_o \end{bmatrix} \quad (\text{I, IV}) \\
 & \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ \theta_{41} \\ \theta_{51} \\ \theta_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{b_3}{b_2b_3 - b_0b_4} & \frac{-b_4}{b_2b_3 - b_0b_4} \\ 0 & 0 \\ \frac{-b_0}{b_2b_3 - b_0b_4} & \frac{b_2}{b_2b_3 - b_0b_4} \\ \frac{-b_3}{b_2b_3 - b_0b_4} & \frac{b_4}{b_2b_3 - b_0b_4} \\ \frac{0}{b_2b_3 - b_0b_4} & \frac{0}{b_2b_3 - b_0b_4} \\ \frac{b_0}{b_2b_3 - b_0b_4} & \frac{-b_2}{b_2b_3 - b_0b_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_o \\ \beta_o \end{bmatrix} \quad (\text{II, V}) \\
 & \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ \theta_{41} \\ \theta_{51} \\ \theta_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{b_2} & 0 \\ -\frac{b_0}{b_1b_2} & \frac{1}{b_1} \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{b_2} & 0 \\ \frac{b_0}{b_1b_2} & -\frac{1}{b_1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_o \\ \beta_o \end{bmatrix} \quad (\text{III, VI})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Fig. 4 は RASOL の機体姿勢制御系のコントローラである. 本コントローラは PID 制御器をベースとし, 目標姿勢角度 $(\alpha_{target}, \beta_{target})$ と現在の姿勢角度 $(\alpha_{out}, \beta_{out})$ から操作量 (α_o, β_o) が決定され, 第 1 関節角度算出器への入出力は入力 $[\alpha_o, \beta_o]^T$, 出力 $\theta_{k1} = [\theta_{11}, \theta_{21}, \theta_{31}, \theta_{41}, \theta_{51}, \theta_{61}]^T$ とし, $\theta_{k1} = \mathbf{B}[\alpha_o, \beta_o]^T$ で表わされる.

3.3 RASOL 機体姿勢制御評価実験

3.2 節では目標姿勢角度を入力とした全方位への重心移動を行なう制御則について述べた. 本実験では制御則を用いることで目標姿勢角度に対し, 適切な第 1 関節駆動による重心

Fig. 5 Typical results of step responses

移動を行ない, 姿勢制御が可能かを評価する.

実験は全長 1.57 m × 幅 1.2 m × 高さ 1.27 m の水槽において静水で行なった. 動作条件は羽ばたき動作 ($\theta_{0ki} = -30$ deg, $\theta_{aki} = 30$ deg, $f_{ki} = 1.0$ Hz, $\theta_{kp} = 50$ deg) を行なわせ, 浮上中に目標姿勢角度をステップで入力し, そのときの姿勢角度の計測を行なった. 計測機器には搭載した IMU を用い, サンプリング周波数は 100 Hz とした. 目標姿勢角度は, 1 パターンのみでは達成できない条件として (A) $\alpha_{target} = 20$ deg, $\beta_{target} = 0$ deg; (B) $\alpha_{target} = -10$ deg, $\beta_{target} = 10$ deg の条件で各 1 回ずつ実施した. PID ゲインについては動作確認時⁶⁾の結果を基に ± 4 deg に収束するよう調節を行ない決定した $K_P = 0.6$, $K_I = 800$, $K_D = 20$ を用いる.

計測結果を Fig. 5 に示す. 結果には 4 次のバターワースフィルタを用いてカットオフ周波数 5 Hz で処理を行なっている. 解析区間を 10 s から 20 s 間とし, その区間の平均値を各試行の出力とした. 各条件の出力 (平均 ± 標準偏差) は (A) $\alpha = 23.87 \pm 1.21$, $\beta = -0.41 \pm 1.55$; (B) $\alpha = -12.18 \pm 1.44$, $\beta = 13.34 \pm 0.90$ となった.

実験結果より最大の偏差は (A) でのロールにおける 3.87 deg であった. 本機の姿勢制御は推力の出力方向を操作することにより機体姿勢を変更できたと判断する. また標準偏差より, どの条件においても ± 2.0 deg 以内の値域に収まることから, 姿勢角度変化後も推力の出力方向を保つことが可能であると示唆された.

4. 推力出力方向操作による 3 次元的移動の生成

RASOL は機体重心移動によって機体姿勢を操作し, 推力出力方向を制御することで, 水中での 3 次元的な移動を実現する. したがって, ピッチ角度あるいはロール角度を維持し

Fig. 6 Result of validation (Condition A)

た状態で泳動作を実施することにより、ヒープ運動（重力軸方向）だけでなく水平運動も同時に生成され、これによって3次元的な移動が可能となる。

本実験では、RASOLが“初期”の目標姿勢角度 $\alpha_{target} = 0 \text{ deg}$, $\beta_{target} = 0 \text{ deg}$ で水槽底面から浮上中に、“新たな”目標姿勢角度をステップ入力し、そのときの姿勢角度および深度を計測することで、3次元的な移動が生成されたか否かを確認した。目標姿勢角度の条件は (A) $\alpha_{target} = 0$, $\beta_{target} = -10$, (B) $\alpha_{target} = 0$, $\beta_{target} = -15$ の2条件とした。機体姿勢角度および水深はサンプリング周波数 100 Hz で計測した。取得した機体姿勢角度データの解析区間は動作開始後 10 s から 20 s 間とし、その区間の平均値を各試行の出力とした。なお計測データには4次のバターワースフィルタ（カットオフ周波数 4 Hz）を用いて平滑化処理を行なった。

結果を Fig. 6 および Fig. 7 に示す。各条件の出力（平均 ± 標準偏差）は (A) $\alpha = 0.35 \pm 1.15$, $\beta = -9.6 \pm 0.91$, (B) $\alpha = 0.52 \pm 0.77$, $\beta = -17.75 \pm 1.12$ となった。Fig. 6 A, Fig. 7 A より、深度は目標姿勢角度入力後に勾配が変化しており、これは推力の出力方向が変化しヒープ動作（上下運動）への推力が減じた結果を示す。勾配が変化した時点を探索するため、以下の手法を用いた。まず深度計測結果を時間軸によって分割し、分割された2つの時間領域における深度をもとに平方二乗和を算出、2つの時間領域における平方二乗和の合計が最小となる分割点を求め、分割された各領域にお

Fig. 7 Result of validation (Condition B)

る回帰式を算出する。算出された2つの回帰式の交点を勾配が変化した時点とした。

探索の結果、(A)においては7.71 s、(B)は6.93 s付近で勾配が切り替わることがわかった。よってこの時点から水平方向への移動が開始されたと判断できる。また、Fig. 6 B, Fig. 7 Bの連続動作写真からも左手方向への水平移動を始めているようすが読み取れる。以上から RASOL は機体姿勢角度を入力することで、推力の出力方向が操作でき水平方向への移動も可能となり、結果的に水中にて3次元的な移動を達成できることが示された。

5. 結 言

本稿では水中6脚ロボットにおける泳動作中の姿勢制御則構築を行なった。本機は脚機構のみで泳動作を行ないつつ重心移動によって姿勢制御を達成する。評価実験によって本稿で構築した制御則が妥当であることを確認した。また、動作確認によって推力の出力方向を操作でき、水平方向への移動が可能であることが示された。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 17K08029 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) 田中敏成：海岸および港湾整備にかかる水中作業の無人化に関する研究，港湾空港技術研究所資料，1236 (2011)
- 2) A. Boxerbaum, P. Werk, R. Quinn and R. Vaidyanathan:

Design of an Autonomous Amphibious Robot for Surf Zone Operation: Part I Mechanical Design for Multi-Mode Mobility, International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1459/1464 (2005)

- 3) S. Zhang, X. Liang, L. Xu and M. Xu: Initial Development of a Novel Amphibious Robot with Transformable Fin-Leg Composite Propulsion Mechanisms, Journal of Bionic Engineering, **10**-4, 434/445 (2013)
- 4) S. Yoo, B.H. Jun, H. Shim, J.Y. Park, H. Baek, B. Kim, G.M. Lee, H. Kang, W.Y. Jeong, S.H. Baek and P.M. Lee: Preliminary Water Tank Test of a Multi-legged Underwater Robot for Seabed Explorations, OCEANS'15 MTS/IEEE Washington, 1/6 (2015)
- 5) B. Han, X. Luo, X. Wang and X. Chen: Mechanism Design and Gait Experiment of an Amphibian Robotic Turtle, Advanced Robotics, **25**-16, 2083/2097 (2011)
- 6) 佐藤, 高木, 三好: 脚移動機能を有する水中6脚ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 予稿集, 1A2-16b6 (2016)
- 7) F. Tedeschi and G. Carbone: Design Issues for Hexapod Walking Robots, Robotics, **2014**-3, 181/206 (2014)
- 8) 前, 高橋, 新井, 井上, 小谷内: 腕脚統合型ロボットの全方向移動, 日本ロボット学会誌, **22**-3, 329/335 (2004)
- 9) P. Sitorus, Y. Nazaruddin, E. Leksono and A. Budiyo: Design and Implementation of Paired Pectoral Fins Locomotion of Labriform Fish Applied to a Fish Robot, Journal of Bionic Engineering, **6**-1, 37/45 (2009)
- 10) M. Fakiotakis, A. Kazakidi and D. Tsakiris: Octopus-inspired multi-arm robotic swimming, Bioinspiration & Biomimetics, **10**-3, DOI:10.1088/1748-3190/10/3/035005 (2015)
- 11) 高木, 三好: 胸鰭機構を有する水中ロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 予稿集, 1A2-16b4 (2016)
- 12) J. Pyo, H. Cho, H. Joe, T. Ura and S. Yu: Development of hovering type AUV "Cyclops" and its performance evaluation using image mosaicking, Ocean Engineering, **109**, 517/530 (2015)
- 13) 不破, 桑原, 西村, 松尾, 滝本: 全方向移動可能なホバリング型 AUV の開発—行動決定メインモジュールの開発—, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2014, 1P1-F05 (2014)
- 14) M. Loc, H. Choi, J. Seo, S. Baek and J. Kim: Development and Control of a New AUV Platform, International Journal of Control, Automation, and Systems, **12**-4, 886/894 (2014)
- 15) A. Irawan and Y. Tan: Hexa-Quad Transformation Control for Hexapod Robot Based on Support Polygon Pattern, ISAROB 2013, 529/534 (2013).
- 16) 佐藤, 高木, 三好: 泳動作による移動が可能な6脚ロボットの開発, 第17回システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), 0591/0596 (2016)

高 木 基 樹

2007 年芝浦工業大学大学院工学研究科修了。博士 (工学)。名古屋工業大学特任研究員などを経て、2016 年から岩手大学理工学部の特任研究員 (現在に至る)。水中ロボット, コンピュータビジョンの研究に従事。

三 好 扶 (正会員)

2002 年芝浦工業大学大学院工学研究科単位取得の上退学。博士 (学術)。現国立障害者リハビリテーションセンター研究所流動研究員などを経て、2008 年から改組などを経て岩手大学理工学部准教授 (現在に至る)。水産ロボティクスの研究に従事。

[著 者 紹 介]

佐 藤 翔 太

2017 年岩手大学大学院工学研究科前期博士課程修了。