



水中自動充電を目指したビジュアルサーボ型水中ロボットの自動嵌合制御

矢納 陽^{*1}, 大西 祥太^{*2}, 石山 新太郎^{*1}, 見浪 譲^{*1}**Autonomous docking control of visual-servo type underwater vehicle system aiming at
underwater automatic charging**Akira YANOU^{*1}, Shota OHNISHI^{*2}, Shintaro ISHIYAMA^{*1} and Mamoru MINAMI^{*1}^{*1,*2} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama university
3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan**Received 15 July 2015****Abstract**

A visual-servo type remotely operated vehicle (ROV) system with binocular wide-angle lens was developed to survey submarine resources, decontaminate radiation from mud in dam lake and so on. This paper explores the experiments on regulator performance and underwater docking of the robot system utilizing Genetic Algorithm (GA) for real-time recognition of the robot's relative position and posture through 3D marker. The visual servoing performances have been verified as follows; (1) The stability performances of the proposed regulator system have been evaluated by exerting abrupt disturbance force while the ROV is controlled by visual servoing. (2) The proposed system can track time-variant desired target position in x-axis (front-back direction of the robot). (3) The underwater docking can be completed by switching visual servoing and docking modes based on the error threshold, and by giving time-varying desired target position and orientation to the controller as a desired pose.

Key words : ROV, Visual servoing, Genetic algorithm, Underwater vehicle, Underwater docking**1. 緒 言**

2011年3月11日の東北大震災以降、地震・津波・原子力発電事故が重なった福島県では、汚染地区での除染作業が進む中で、河川、溜池等の水中底泥の放射能汚染問題が新たに惹起されてきており、福島県内の農業用のダムやため池の底にたまる土や泥中の放射性物質の濃度を農林水産省や福島県が調べたところ約2,000か所のうち600か所で指定廃棄物の基準である1 kg当たり8,000 Bqを超える値が検出された（農林水産省, 2013）。そのため環境省や農水省では、これら指定廃棄物（原発事故に伴って発生した放射性物質を含む廃棄物のうち、濃度が1 kg当たり8,000 Bqを超えるもの）について国が責任を持って処理することとしている。しかしながら、これら水中底泥の除染回収においては、水の放射線遮蔽効果や水中での作業性の悪さなどから、その検出作業やダム池等100 m以下の水深での除染回収作業は困難を極めるものと考えられる。そのため石山らは、多機能センシング環境対応型技術の開発（日本経済新聞, 2014; 石山, 山下, 2014; 石山, 見浪, 2014）やビジュアルサーボをROVに搭載して一部自動化することにより深水中の放射能汚染底泥の自動回収を目的とした水中ロボット（石山, 2014）の開発を進めている。このロボットで期待される性能は、(1) 対象物の自動認識、(2) 無索化による自律航行（柳他, 2000; 近藤他, 2000），(3) 高線量下での長期間連続的な除染回収作業、(4) 高精度な放射線濃度分布計測、(5) 自動

No.15-00391 [DOI:10.1299/transjsme.15-00391], J-STAGE Advance Publication date : 25 November, 2015

^{*1} 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)^{*2} 岡山大学大学院自然科学研究科

E-mail of corresponding author: yanou-a@cc.okayama-u.ac.jp

充電, (6)複数のセンサー情報による深水環境情報（温度, 濃度, 流速等）の取得・分析などであり, 著者らは地上における複眼カメラによるビジュアルサーボ搭載ロボット性能検証試験において遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA (宋他, 2010; 宋, 見浪, 2010; Yu et al., 2012)) を用いた3Dモデルベーストマッチング法により, 対象物へのロボットによる物理的働きかけを0.5 mmの精度で制御できることを示した (日本経済新聞, 2014)。

これまで, 水中ロボットの自律航行に関する研究はさまざまに行われている。吉田ら (吉田他, 2012) は水中ロボットの遠隔監視や制御に関する現状について報告しており, 自律型水中ロボットは今なお発展途上の段階にあるとともに, 今後の重要性について論じられている。例えば, 鈴木, 伊藤ら (鈴木, 2004; 伊藤, 木村, 2004) は水中ロボットの開発について報告しているが, これらはいずれもロボットから送られてくる画像をもとに操作者が遠隔操縦することによってロボットの運動を制御する ROV 型水中ロボットである。また, ロボットが自律して行動できるようにするため人工水中ランドマークを利用した Vision System による手法 (柳他, 2002) や複眼カメラを利用した自律航法・調査システムの構築 (Ura et al., 2005) に関する提案がなされている。さらに, AUV による自動嵌合実験も実施されている (Palomeras et al., 2014a, 2014b)。これらの研究ではドッキング用のパネルがカメラによって検出可能な場合に, 本手法と同様にカメラ画像によってパネルとの相対的位置・姿勢を検出し, 自動嵌合を達成している。この方法では二つのカメラが搭載され, そのうちの一つがパネルの位置と姿勢を推定するために用いられており, 二つのカメラが同一対象物を同時に見ているわけではない。具体的には, 単眼カメラによって得られたパネルの写った画像から特徴点を抽出し, マッチングを行うことでパネルの位置と姿勢を推定している。これに対し, 本研究のシステムは複眼カメラによって同時に同じ立体対象物を撮像して得られる二つの画像を利用することで, 対象物との相対的位置・姿勢を認識し, 自動嵌合を達成した点に新規性がある。

また, 提案手法で用いた GA は新しい画像が入力されるタイミングで, 直前の画像によって世代交代が繰り返されて得られた最良の個体, すなわち GA がその時点で認識した3次元対象物の最良の位置・姿勢の情報が得られ, その情報が新しい画像に基づいて進化を繰り返すための初期値として引き継がれる。すなわち, 使用している GA は連続して入力される動画像列の中で進化 (位置・姿勢の実時間認識) を続けるという特徴がある。この実時間認識性能については逃げる魚をロボットハンドに取り付けたハンドアイカメラで認識しロボットハンドにセットした網によって捕獲した実験 (Suzuki and Minami, 2005) により, 有効性を示した。さらに複眼ハンドアイによって3次元立体マーカを認識 (宋他, 2010) し軌道追従実験 (宋, 見浪, 2010) を行った。さらに非線形制御を行っているビジュアルサーボの制御安定性について評価 (Yu et al., 2013) し, 動画像中の GA の収束性能に関する議論も発表 (Song et al., 2010) している。

動画像列の中で対象物を認識しその位置・姿勢を計測することは, 時変多峰性分布関数の実時間最適化問題を解くことと等価となる。33 [ms] 毎に新しい画像が入力され, 次の画像が入力されるまでの時間に最適化問題を解く必要がある。ここで, (1):計算時間の短い単純な GA の進化回数を多くすべきか, (2):計算時間が長いがより高度な手法を用い, 繰り返し回数が少ない方法にすべきかという戦略の選択肢が考えられるが, 本研究は(1)を用いて対象物の位置・姿勢の実時間計測を行っている。以上の気中での制御性能の評価等の準備の上で, 本報は GA による認識方法が水中ロボットのビジュアルサーボに有効であることを示した内容である。ビジュアルサーボを搭載して一部自動化した ROV により水中でさまざまな作業 (自動充電, 生魚捕獲 (Suzuki and Minami, 2005)・観察等) を行わせる場合, 対象物形状の正確な認識とともに作業環境中の外乱 (流れ等) に抗するように対象物に対する正確な姿勢制御を自律的に行えなければならない。そこで本報告では ROV に搭載した複眼カメラから得られる画像と GA により対象物との相対的位置・姿勢を認識するシステムを構築した。また, ROV と対象物との間の相対的位置・姿勢制御に関するレギュレート性能について報告し, 新規に提案したシステムが ROV に外力を与えるという物理的外乱に対して安定であることを実験的に示す。さらに, 水中自動充電を想定した水中嵌合手法と, この手法を提案システムに実装した水中嵌合実験の実施結果について報告し, その有用性を示す。

2. 提案システムの概要

提案するシステムの概要を図1に示す。図の上部の点線は制御対象となる ROV を表しており, 四つのスラスターを介して位置 (x , y , z) と姿勢 (ヨー角) を変えることができる。ROV が目標位置 (x_d , y_d , z_d)・姿勢 (ε_{2d}) の状態に近づくためには, まず自身の位置と姿勢を実時間で計算できる必要がある。そのため, 提案システムでは

色付きの立体形状モデル（3次元マーカのモデル）と搭載されている二つのカメラから得られる実際の3次元マーカの入力画像を利用して位置・姿勢をリアルタイムに計測し、ROVの制御に用いることとする。図1の実線で囲まれた下部の3D model based matching system ブロックではGAの個体が3次元マーカの位置・姿勢情報を表現するよう定義されており、二つのカメラから得られた3次元マーカの画像とGAの各個体が与えた3次元マーカのモデルの位置・姿勢の評価が行われる。提案システムではこの値をもとにROVの3次元マーカに対する相対的位置・姿勢の計算を行い、目標位置・姿勢との差に基づき、その差を修正する動作が推力 f_d として計算され、そして電圧 V に変換されてROVが駆動される。実際の3次元マーカの位置・姿勢とモデルの位置・姿勢が一致しているGAの遺伝子個体が与える適合度の値が最も高くなるよう適合度関数を定義（Song et al., 2007a, 2007b）している。このため動画像中の3次元マーカの位置・姿勢の認識は、多変数時変分布関数となる適合度関数の最適化問題と置き換えることができる。このため動画像中の3次元マーカの移動速度と多変数時変分布関数の最適化の収束速度との競合状態となり、最適化収束速度の方が速い場合、3次元マーカの実時間計測が可能となる（Suzuki and Minami, 2005）。二つのカメラに入力される動画は、画像入力ボード（インターフェイス社製、PCI-5523）より時間遅れなくコンピュータのメモリに展開されるため、GAによる動画像を用いた実時間最適化が可能となり、ROVの3次元ビジュアルサーボを実現することができる。上で述べたGAを用いた3次元マーカの位置・姿勢の実時間計測方法を用いてROVの位置・姿勢制御を行い、水中固定円筒形物体とROVに取り付けたロッドの嵌合実験により図1に示す制御系の評価を行うことが本報の目的である。

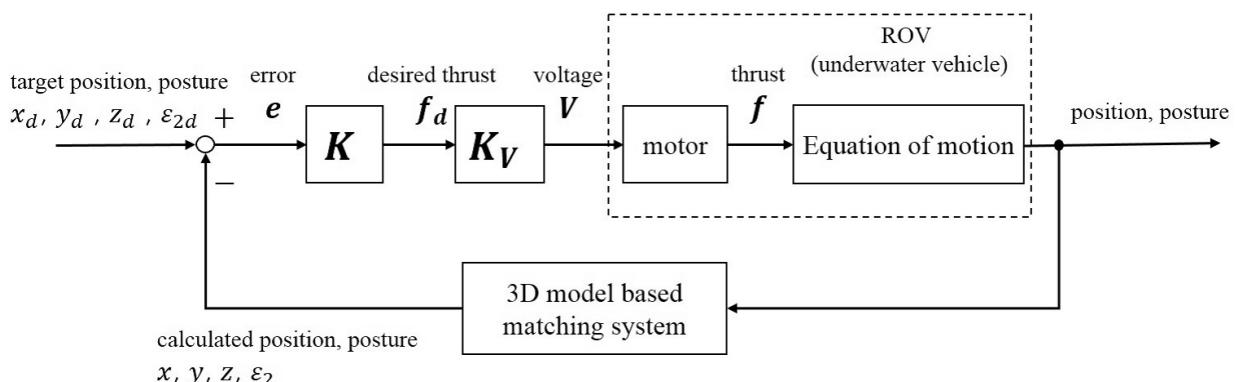


Fig. 1 Control logic for the proposed system

3. 実験方法

3.1 水中実験環境

3.1.1 水中ロボット系

水中実験で使用した遠隔操作型水中ロボット（広和（株）製ROV、最大水深50m）を図2に示す。本ロボットは複眼視覚センサーとして、遠隔操縦用チルト機構付きカメラ1台（撮像素子CCD、画素数38万画素、信号方式NTSC、最低被写体照度1.5lx、光学ズーム10倍）と制御用として前方2台および下方2台（撮像素子CCD、画素数38万画素、信号方式NTSC、最低被写体照度0.8lx、ズームなし）を搭載しており、ビジュアルサーボで対象物の立体認識を行うため、前方2台を同時使用する。水中動力系では、前進方向スラスター2基（最大推力9.8N以下同様）、横方向スラスター1基（4.9N）、鉛直方向スラスター1基（4.9N）を搭載している。また、照度確保のためLEDライト（5.8W）を2基搭載している。その性能仕様を表1にまとめて示す。

3.1.2 水中実験系

水中実験では、水道水を満たした簡易プール（縦×横×高さ、2m×3m×0.75m）を実験槽として使用した。上記ROVを実験槽に入水させ、図3に示すようにテザーケーブル（200m）を介してROVへの給電ならびに実験槽脇に設置したPCを介して対象物の画像情報ならびに制御信号等の通信を行った。PC側ではROV搭載の2台のカメラから送られる対象物の立体像情報を基に、GAによる3Dモデルベーストマッピングを行った。また、水

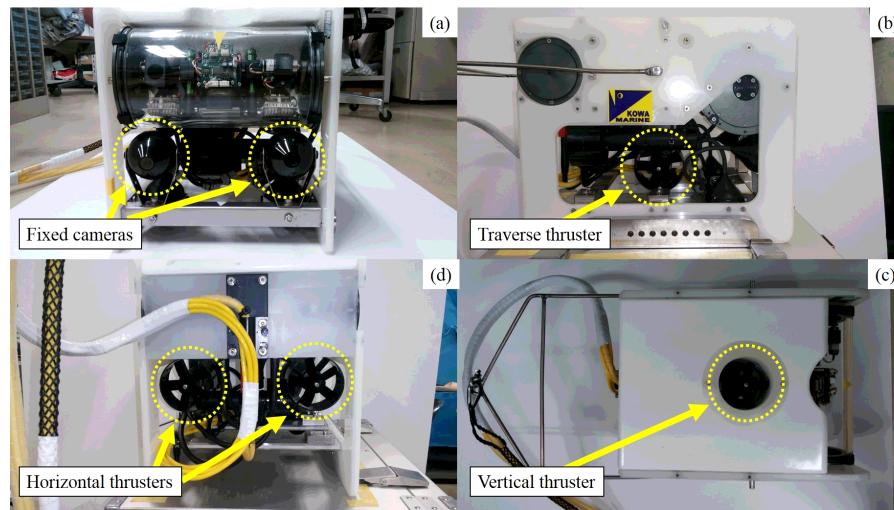


Fig. 2 Overview of ROV (a)Front view (b)Side view (c)Top view (d)Back view

Table 1 Specification of ROV

Maximum operating depth	50 m
Dimension	280 mm (W) × 380 mm (L) × 310 mm (H)
Dry weight	15 kg
Number of Thrusters	2 (Horizontal), 1 (Vertical), 1 (Traverse)
Number of Cameras	2 (Front, fixed), 2 (Downward, fixed), 1 (Tilting and zooming)
Number of LED lights	2 (5.8 W)
Number of Line lasers	2 (2 mW)
Tether cable	50 m
Structial materials	Aluminum alloy and acrylate resin
Maximum thrust force	9.8 N (horizontal), 4.9 N (vertical, Traverse)

中自動充電を想定した実験を行うため、嵌合用の棒を水中ロボットの右側に取り付けるとともに、水中ロボットが対象物と正対した時に、嵌合用の棒が嵌合用の穴と正対するよう、被嵌合用円筒を対象物横に設置した。さらに、実験条件において設定する時変の相対的目標位置・姿勢に水中ロボットが追従し、最終的な目標位置・姿勢でレギュレートすることを嵌合完了と定義する。本システムでは、複眼カメラから取得した画像をPCに転送し、

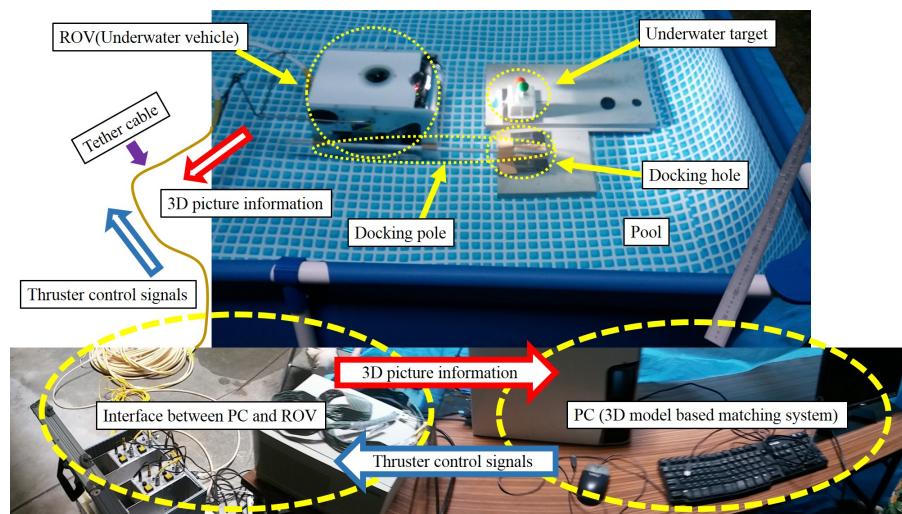


Fig. 3 Layout of underwater experimental devices

3D モデルベーストマッチングと GA を組み合わせて対象物との相対的位置・姿勢を実時間で認識させている。さらに、認識結果と相対的目標位置・姿勢との誤差に基づく P 制御によって計算された指令電圧値を水中ロボットのスラスターに与えることで、推力を発生させている。ここで水中ロボットの座標系は、図 6 に示すように ROV の前進方向、右横方向、鉛直下方向をそれぞれ x 軸（サージ）、y 軸（スウェイ）、z 軸（ヒーブ）の正方向と定義している。なお、本実験系では ε_2 は図 6 における Σ_H の z 軸回りの角度（ヨ一角）を表している。 ε_1 (y 軸 (ピッキング軸) 回りの姿勢), ε_3 (x 軸 (ローリング軸) 回りの姿勢) については静安定であり、制御は不要と判断し GA による認識および制御を行っていない。また、本実験系における GA は動画像の実時間認識が可能な 1-step GA (Suzuki and Minami, 2005; 宋他, 2010; 宋, 見浪, 2010) を用いている。この手法は、認識対象物の 3 次元形状と色で構成される 3D モデルと認識対象物の位置・姿勢情報を表現する遺伝子を複数用意しておき、33 ms 毎に送られてくるカメラ画像（ビデオレート 30 画面/秒）に対して 3D モデルベーストマッチングを行い、適合度の高い遺伝子（認識対象物の実際の位置・姿勢情報と近い遺伝子）をその時間内でのみ進化させている。さらに、進化させた遺伝子をつぎに送られてくるカメラ画像の認識へ引き継ぐことで、認識精度の向上を図っている実時間動画像認識方法である。本システムでは 33 msあたり 9 世代進化できることを確認している。

3.2 水中実験条件

3.2.1 GA による 3 次元対象物認識条件

複眼カメラを用いた GA による認識条件について述べる。本研究の実験は実験槽内の水中任意位置に図 4(a) に示すボックス (100 mm×100 mm×100 mm) 周りに赤・青・緑の三原色球（直径 40 mm）を配置した対象物を固定設置することによって実施した。また、GA による 3D モデルベーストマッチングによる対象物の位置・姿勢の

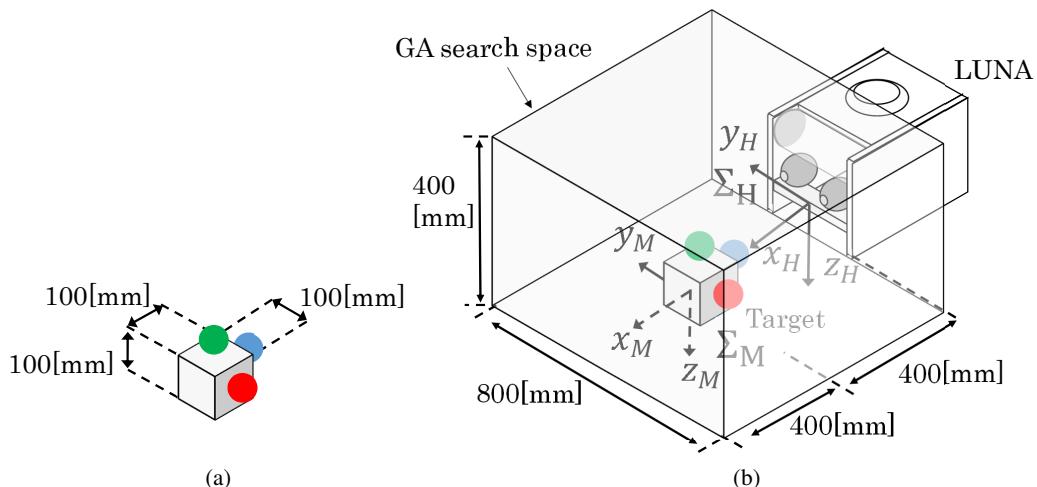


Fig. 4 (a)3D marker and (b)Underwater target and GA search space

認識情報は、同図 (b) に示す水中ロボットと対象物間で設定した GA 探索領域内で獲得されると仮定している。各条件を表 2 に示す。さらに本システムにおける GA のフローチャートを図 5 に示す。前述の通り、提案システムの GA は 33 ms 後に新しい画像が入力されるまでの間、現在与えられている画像に基づいて進化を繰り返す。新しい画像が入力されるタイミングで、直前の画像によって世代交代が繰り返されて得られた最良の個体、すなわち GA がその時点で認識した最良の位置・姿勢の情報が得られるとともに、その情報が新しい画像に基づいて進化を繰り返すための初期値として引き継がれる。すなわち、使用している GA は連続して入力される動画像列の中で進化を続けている。本システムではこの手続きを実時間認識と呼んでおり、水中ロボットの自動嵌合のための位置・姿勢制御に利用している。

3.2.2 制御の条件

水中の任意位置に固定設置した対象物を GA により認識後、ビジュアルサーボを介して水中ロボットに搭載した 4 基のスラスターへ指令電圧値を送ることで、水中ロボットと対象物間とで以下の相対的目標位置・姿勢 (x_d mm,

Table 2 Parameters for GA

Target variables calculated by GA	Positions (x mm, y mm, z mm), Posture (ε_2 deg)
Number of genes	60
Length of gene	72 bit
Selection rate	0.6
Crossover	two-point crossover
Mutation rate	0.1
Search area (as centering the target in this area)	$\{x,y,z\} = \{\pm 400 \text{ mm}, \pm 400 \text{ mm}, \pm 200 \text{ mm}\}$
Control period (same as video input rate 33 ms/frame)	33 ms
Number of GA evolution in the control period	9

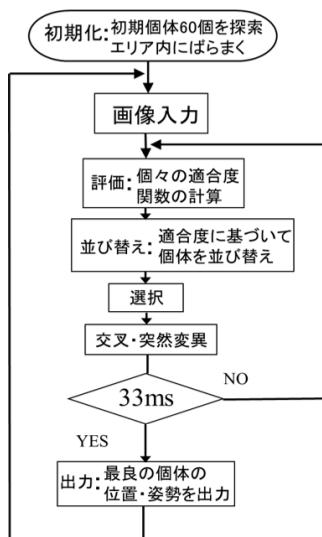


Fig. 5 Flowchart of GA

y_d mm, z_d mm, ε_{2d} deg) を保つように制御し, レギュレート性能の確認を行った. さらに, 外乱に対する安定性を検証するため, レギュレート中の水中ロボットに対して実験槽外部から物理力による外乱を加え, 元の位置・姿勢へ復元できるかどうかについて確認した. 次式の各数値は, 対象物の発見直後に水中ロボットがレギュレートすべき目標値である. なお括弧()内の数値は, 水中嵌合実験における嵌合完了時の目標値として定義している. 図6に本研究の実験における座標系を示す.

$$x_d = {}^H x_M = 600 (350), \quad y_d = {}^H y_M = 0 (0), \quad z_d = {}^H z_M = -67 (-67), \quad \varepsilon_{2d} = 0 (0)$$

また, x mm, y mm, z mm, ε_2 deg は GA で認識した水中マーカーの位置・姿勢を表すこととする. 相対的目標位置・姿勢に水中ロボットをレギュレートさせるため, 以下の P 制御から計算される指令電圧値 $v_1 \sim v_4$ を各スラスターへ与えた. ただし, x_H , y_H , z_H は図6に示す座標軸を表す.

$$x_H \text{ 方向 (サーボ)} : v_1 = k_{p1}(x_d - x) + 2.5 \quad (1)$$

($v_1 = 0$ V のとき Σ_H の x_H 軸方向に推力 9.8 N, $v_1 = 5$ V のとき -9.8 N)

$$y_H \text{ 方向 (スウェイ) } : v_2 = \begin{cases} 5.0 & (y_d - y < -5 \text{ mm}) \text{ のとき } \Sigma_H \text{ の } y_H \text{ 軸方向に推力 } -4.9 \text{ N} \\ 0.0 & (y_d - y > 5 \text{ mm}) \text{ のとき } \Sigma_H \text{ の } y_H \text{ 軸方向に推力 } 4.9 \text{ N} \end{cases} \quad (2)$$

$$z_H \text{ 方向 (ヒーブ) } : v_3 = k_{p3}(z_d - z) + 2.5 \quad (3)$$

($v_3 = 0$ V のとき Σ_H の z_H 軸方向に推力 -4.9 N, $v_3 = 5$ V のとき 推力 4.9 N)

$$z_H \text{ 軸回転 (ヨー) } : v_4 = k_{p4}(\varepsilon_{2d} - \varepsilon_2) + 2.5 \quad (4)$$

($v_4 = 0$ V のとき Σ_H の z_H 軸回りに旋回トルク 0.882 Nm, $v_4 = 5$ V のとき -0.882 Nm)

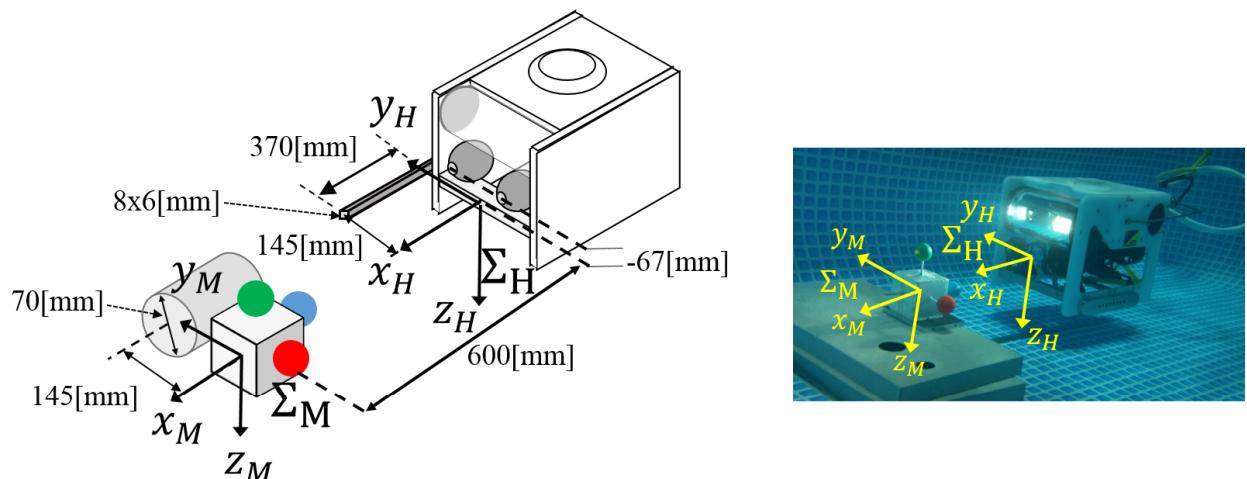


Fig. 6 Coordinate system provided in underwater experiment

3.3 スラスタ出力

遠隔操作型 ROV ではコントローラーのジョイスティック指示による手動操作時において、人間の指の動きによる誤動作を防止するためスラスタ推進制御信号発信時にある程度の不感帯を持たせている。これに対し本研究では、対象物へのスラスタ推進による接近移動の際、mm 単位での高い精度の移動ならびに姿勢制御性能の実現を目指している。そこで、ここでは各スラスタ動力への推力-制御電圧変化特性における従来の不感帯の制御電圧に対して、推力の計算が容易にできるように制御電圧と推力の近似式を求めた。具体的には、予備実験で確認した ROV の不感帯特性（図 7(a)(c)(e)）を取り除き、同図 (b)(d)(f) の実線のように直線近似した推力を発生するように制御ソフトウェアを構成した。不感帯補償前はニュートラル状態（制御電圧 2 V）近傍の電圧変化に対して出力応答に不感帯があったが、補償後は推力-制御電圧間の関係が直線近似で表現できるようになり、推力の計算が容易にできるようになった。なお、ROV の y_H 軸方向に関する推力は、正方向、負方向用にオン/オフ制御がそれぞれ実装されており、各方向ともオン時には 4.9 N の推力が発生し、オフ時には推力は発生しない。

4. 結果と考察

4.1 水中における GA 認識精度

図 8(a) に $x_d = 600$, $y_d = 0$, $z_d = -67$, $\varepsilon_{2d} = 0$ でレギュレートさせた水中ロボットの GA 認識時の適合度の時間変化を示す。これによると、認識開始から数秒以内で適合度が 1 以上となるとともに、適合度計測時間中においてほぼ 0.8 以上の高い適合度を維持していることがわかる。一般的にビジュアルサーボにより精度よく対象物への物理的作業を行う場合、GA 認識精度は 0.5 以上必要であると考えられており、宋らは（宋他, 2010; 宋, 見浪, 2010; Yu et al., 2012），本実験に使用した同一対象物を用いて気中における複眼認識精度の測定を行っている。これら複眼により陸上で得られた適合度の結果と今回水中で得られた結果を比較しても両者において同程度の適合度が得られていることがわかる。すなわち GA による水中での対象物認識精度は、気中における場合との比較においてもほぼ同程度の適合度が得られることがわかった。なお、本研究では適合度とは認識の確からしさを表す指標であり、立体形状の各部位に対応する色を定義した色付き立体形状モデルと入力画像内の対象物との相関関数を GA 進化の適合度関数として用いている。本システムでは実時間制御における計測ルーチンが GA 認識であるため、時間コストが制御性能に大きく影響する。したがって 33 ms 内で認識精度を出来るだけ上げるため、適合度の最大値を 1 として正規化する計算は行わず、その分の時間も GA の進化計算のために使っている。

4.2 レギュレート性能

後述する嵌合実験に関連し、ここではレギュレート中の定常誤差の許容範囲を ± 20 mm と定義した。実験槽外から物理的に外乱を与えた場合のレギュレート性能を図 8, 9 に示す。図 8(a) は水中ロボットが 1-step GA で認識した対象物の適合度、(f) は 1-step GA で測定したレギュレート中の水中ロボットの位置、(b)～(e), (g)～(j)

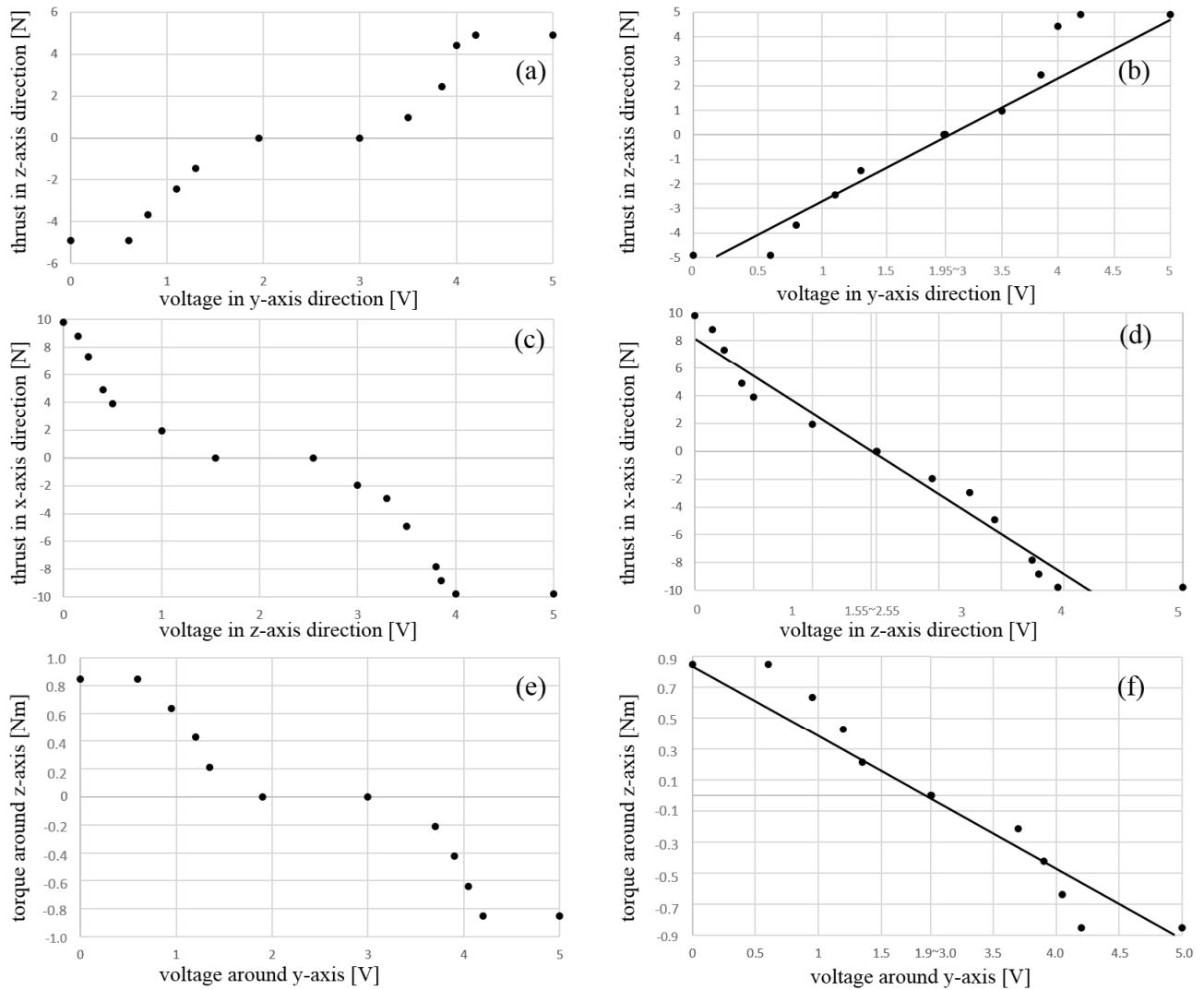


Fig. 7 Initial characteristics of thrust and torque control voltage and adjusted ones by removing dead-band and linearization: (a) initial characteristics in z-axis direction, (b) characteristics removing dead-band (solid line) and adjusted one (broken line) in z-axis direction, (c)(d) characteristics in x-axis direction and (e)(f) characteristics around z-axis

は対象物との相対的目標位置・姿勢と水中ロボットが認識した対象物の位置・姿勢との誤差、およびそれを復元しようとする力・トルクをそれぞれ表している。また、図9(a)～(d)、(e)～(h)は図8(b)～(e)、(g)～(j)を実験開始後105～110 sについて拡大したものである。GAの認識誤差、ロボット移動時に生じるテザーケーブルからの反力、さらに移動時に発生する水圧変化による実験槽側面からの反射波を受け、相対的目標位置・姿勢からの誤差が定常的に現れるものの、4基のスラスタを常時同時稼働させることでこれら外乱要素をキャンセルさせることにより相対的目標位置・姿勢近傍にレギュレートできることができることが確認できる。なお、図8(c)（図9(b)）に現れる誤差の緩慢な振る舞いは水中ロボット側面に設置されているスタビライザー板の抵抗とスロッシングに対する横スラスタの推力不足にその主要因があると考えられる。図8よりレギュレート中の定常誤差が許容範囲内におおよそ収まることが分かった。

4.3 外乱に対する安定性

ここでは対象物を認識してレギュレート中の水中ロボットに対して、障害物との衝突や海流等の外乱が加わった場合の安定性を検証するため、実験槽外から棒（木製全長2 m）を介した人力により制御中のロボットの位置を恣意的にずらすような外力を横方向（図10(a)）、上方向（図10(b)）、後方（図10(c)）、鉛直軸周り（図10(d)）にそれぞれ加え、水中ロボットが対象物との相対的目標位置・姿勢に復元するかについて確認を行った。なお、こ

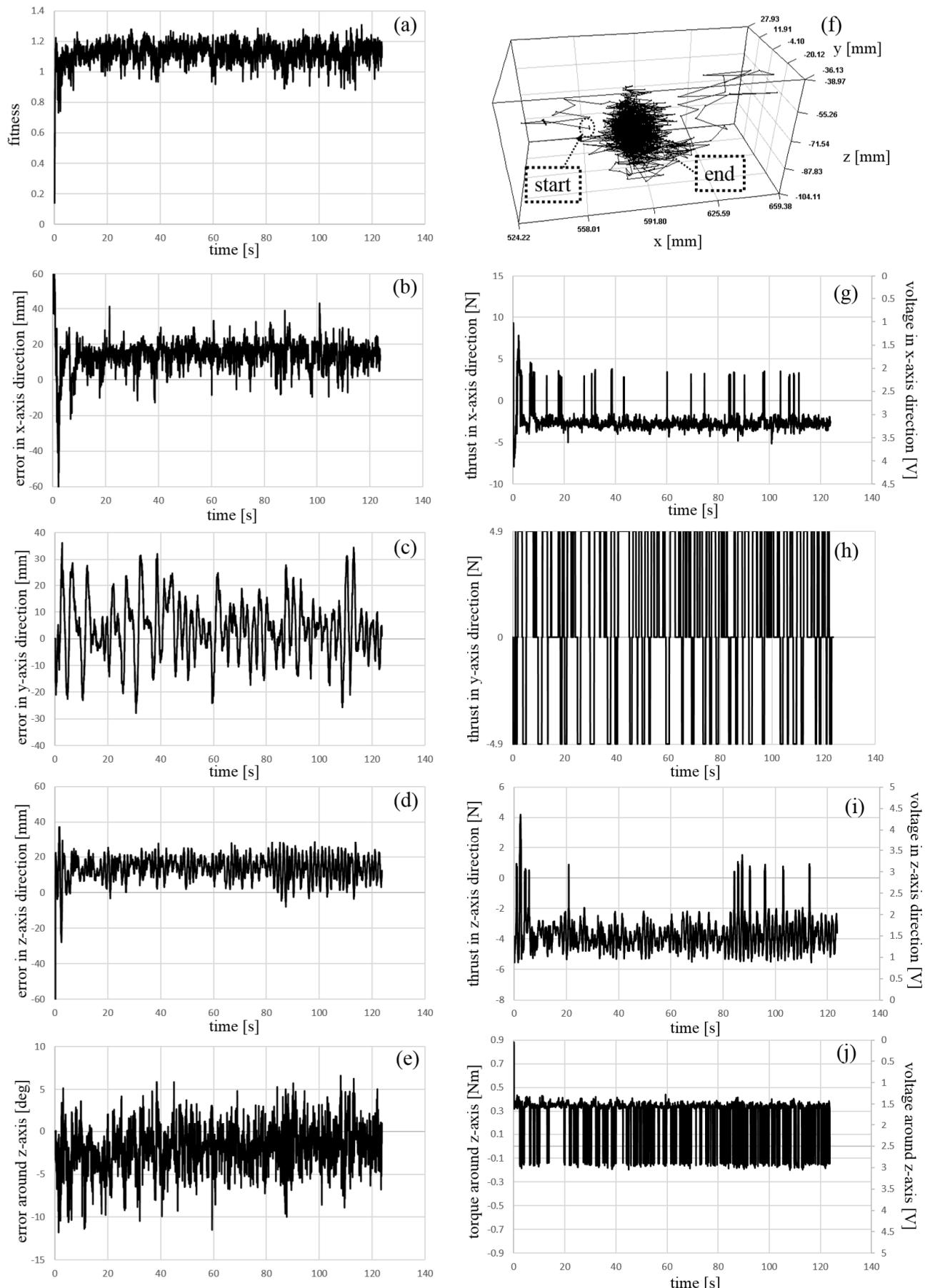


Fig. 8 Regulator performance without additional disturbance: (a)fitness value, (b)error in x-axis direction, (c)error in y-axis direction, (d)error in z-axis direction, (e)error around z-axis, (f)3D trajectory of underwater vehicle (g)thrust in x-axis direction, (h)thrust in y-axis direction, (i)thrust in z-axis direction and (j)torque around z-axis

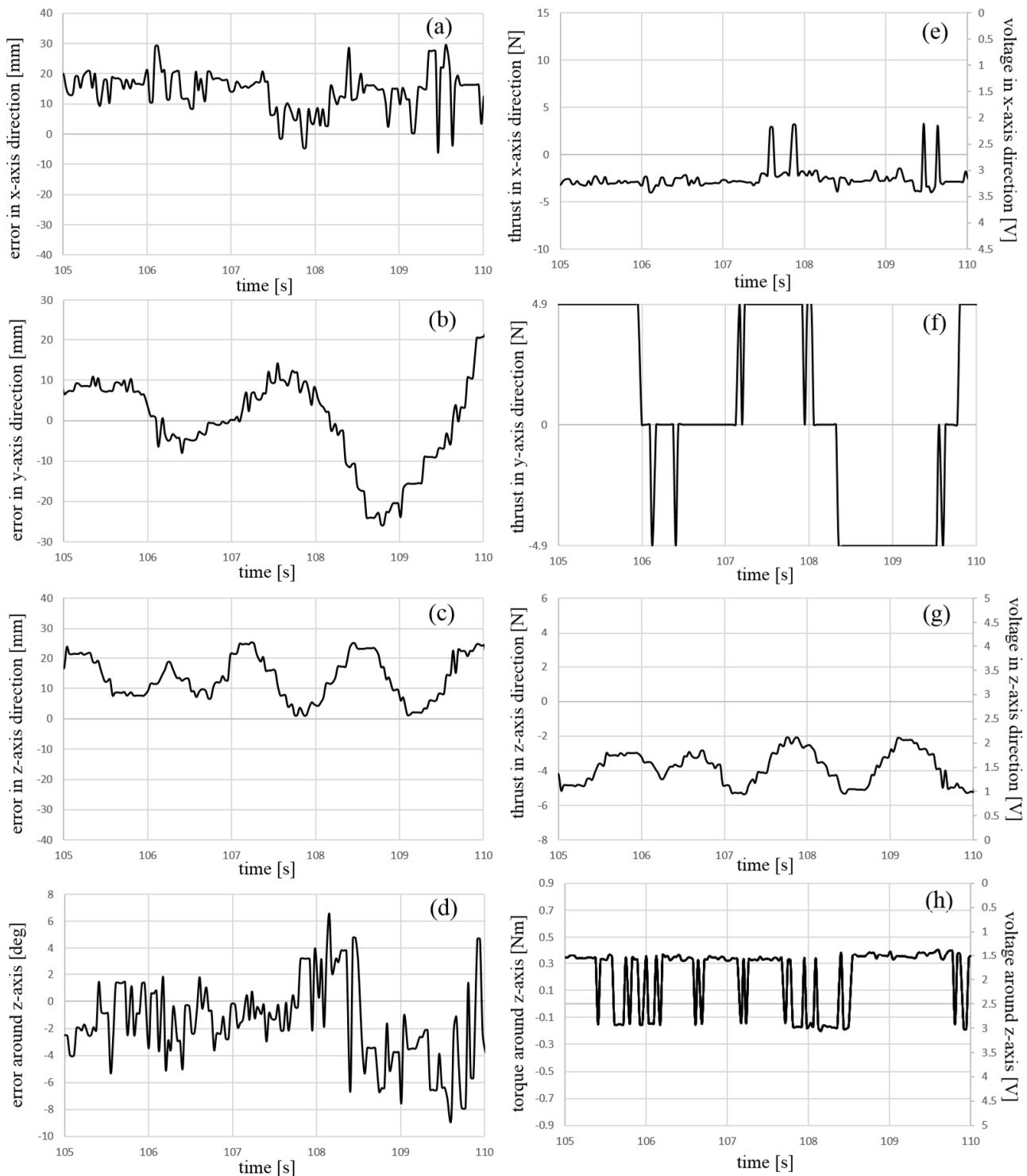


Fig. 9 Regulator performance without additional disturbance (enlarged view from 105 s to 110 s): (a)error in x-axis direction, (b)error in y-axis direction, (c)error in z-axis direction, (d)error around z-axis, (e)thrust in x-axis direction, (f)thrust in y-axis direction, (g)thrust in z-axis direction and (h)torque around z-axis

この外乱は横方向、上方向、後方については水中ロボットをゆっくり押し、1.5~2.0 s の間に 150~200 mm 程度移動するように与えた。鉛直軸周りについては 1 sあたり 15 deg 程度回転するように与えている。横方向、上方向、後方および鉛直軸周りに外乱を加えた場合の制御結果を図 11~図 14 に示す。また、本論文での安定性とは、水中ロボットの位置・姿勢に対して外乱が与えられたとしても、対象物との相対的目標位置・姿勢に復元できる性質のことを意味している。図 11~図 14 とも、(a) が GA 認識の適合度、(b) は各変数についての相対的目標位置・姿勢と水中ロボットが認識した対象物の位置・姿勢との誤差、(c) は (b) のグラフと同様であるが実験開始

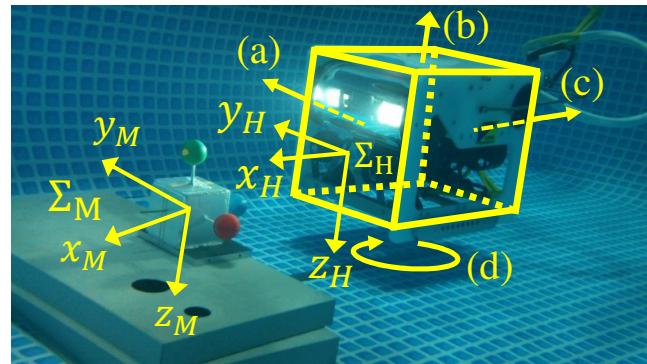


Fig. 10 Additional disturbance direction for Regulator performance test: (a)disturbance in x-axis direction, (b)disturbance in y-axis direction and (c) disturbance in z-axis direction

後 105~110 s における様子である。特に図 11、図 12 の当該のグラフからは各誤差の振る舞いがスロッシングの影響を受けていることが分かる。また (d) はスラスターに与えた推力（トルク）を表している。各図とも実験開始から 20 s および 60 s あたりで外乱が加えられている。それぞれの図 (a)(b)(d) に記した (A) および (B) の区間において、外乱が加えられた際に適合度が一時的に低くなるが、ビジュアルサーボを維持しつつ、相対的目標位置・姿勢からの誤差に応じてスラスターに与えられる推力（トルク）が変化することが分かる。すなわち、誤差を修正するための操作量が発生し、その結果として相対的目標位置・姿勢に復元するよう水中ロボットの位置・姿勢が変化していくことを確認できる。以上より、提案システムではこれら全ての外乱に対して数 s~数 10 s 以内に元の位置に復元でき、外乱に対する安定性も有することを確認できた。ただし、複眼カメラの映像から対象物が完全に外れるような大きな変位を加えられた場合、ビジュアルサーボが切れてしまうため、水中ロボットが対象物との相対的目標位置・姿勢にレギュレート出来なくなる可能性がある。

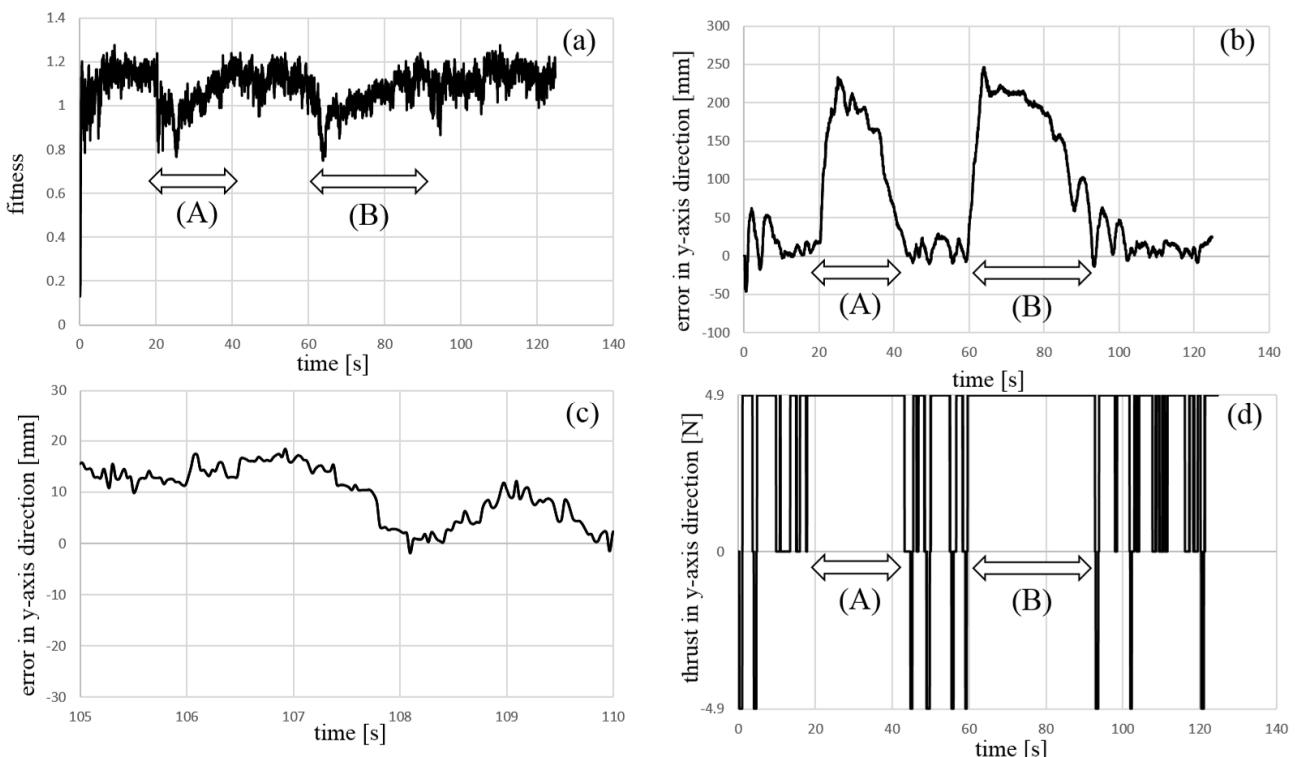


Fig. 11 Regulator performance with disturbance in y-axis direction: (a)fitness value, (b)error in y-axis direction, (c)error in y-axis direction(enlarged view from 105 s to 110 s) and (d)thrust in y-axis direction

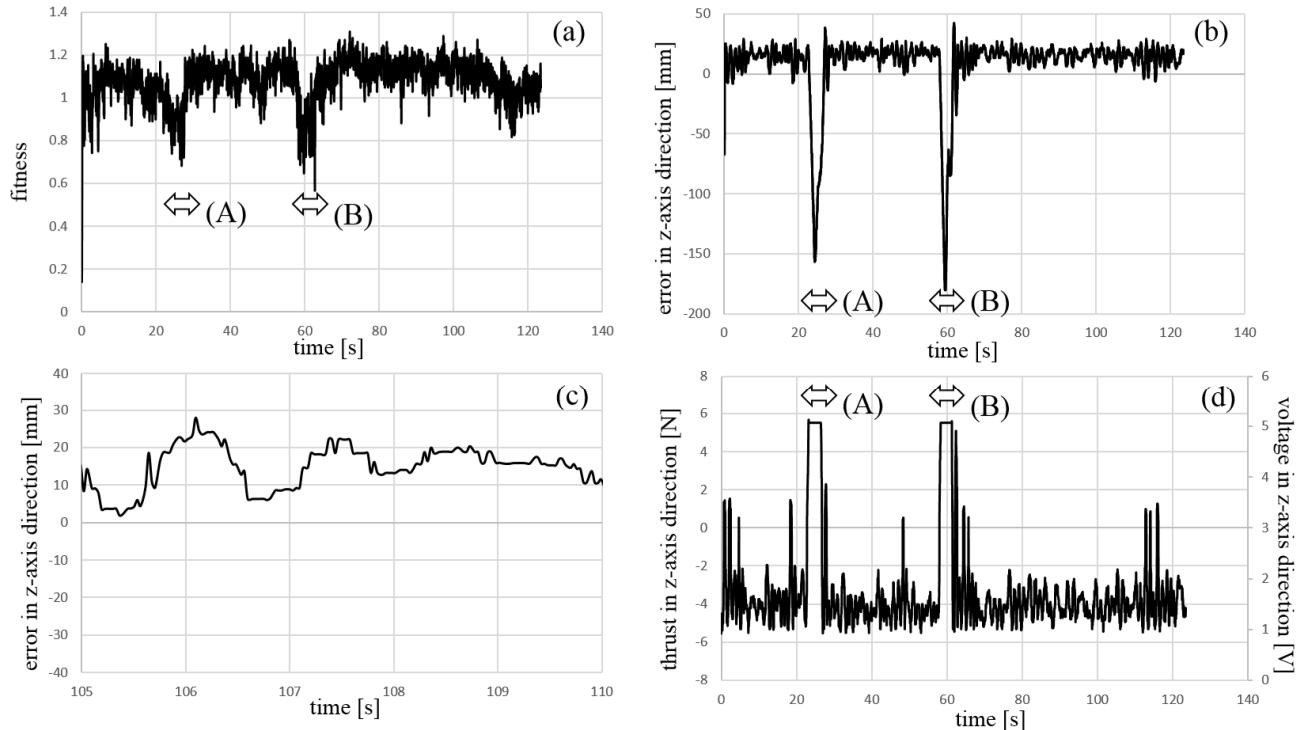


Fig. 12 Regulator performance with disturbance in z-axis direction: (a)fitness value, (b)error in z-axis direction, (c)error in z-axis direction(enlarged view from 105 s to 110 s) and (d)thrust in z-axis direction

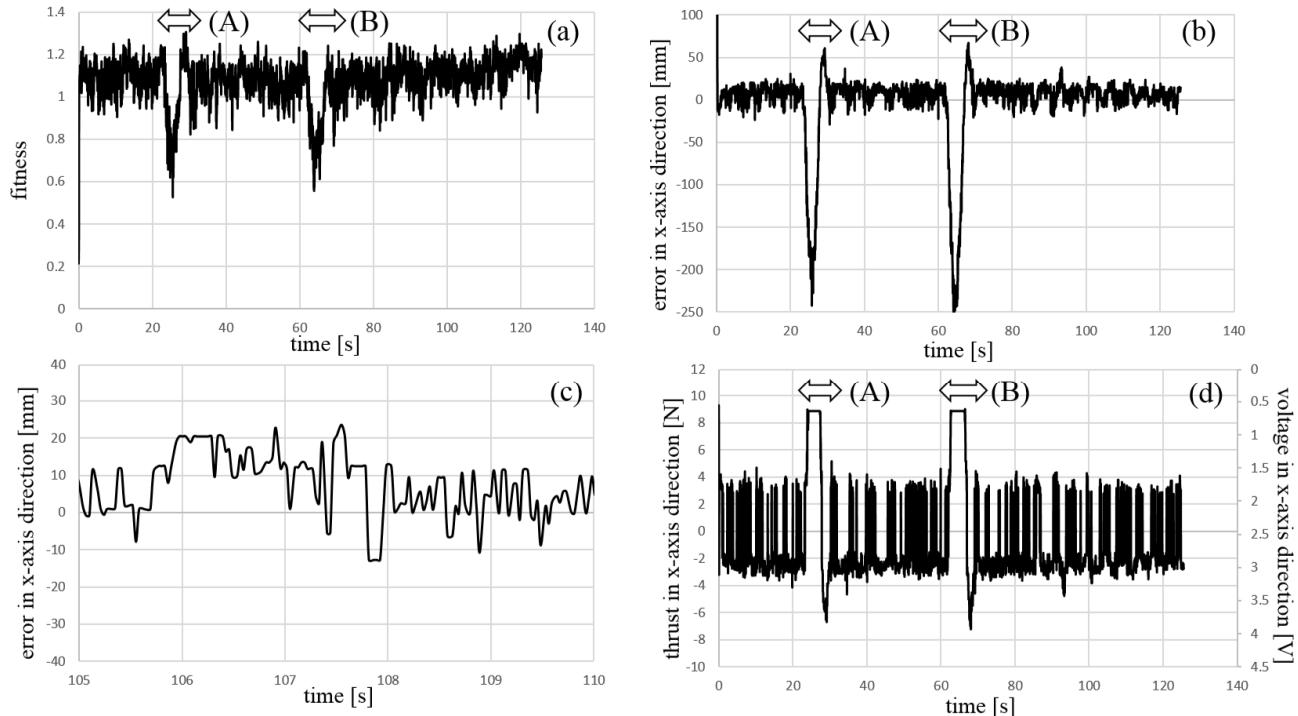


Fig. 13 Regulator performance with disturbance in x-axis direction: (a)fitness value, (b)error in x-axis direction, (c)error in x-axis direction(enlarged view from 105 s to 110 s) and (d)thrust in x-axis direction

4.4 相対的位置・姿勢レギュレータを用いた水中嵌合実験

本節では水中自動充電を目指した自動嵌合制御実験の結果について示す。図6に示すように、嵌合用の棒は水中ロボットの右側に設置され、断面が 8×6 mm、長さが370 mmである。被嵌合穴は3次元マーカの左側に設置され、その直径は70 mmである。従って本実験では穴に内接する一辺およそ50 mmの正方形の領域内に（言い換え

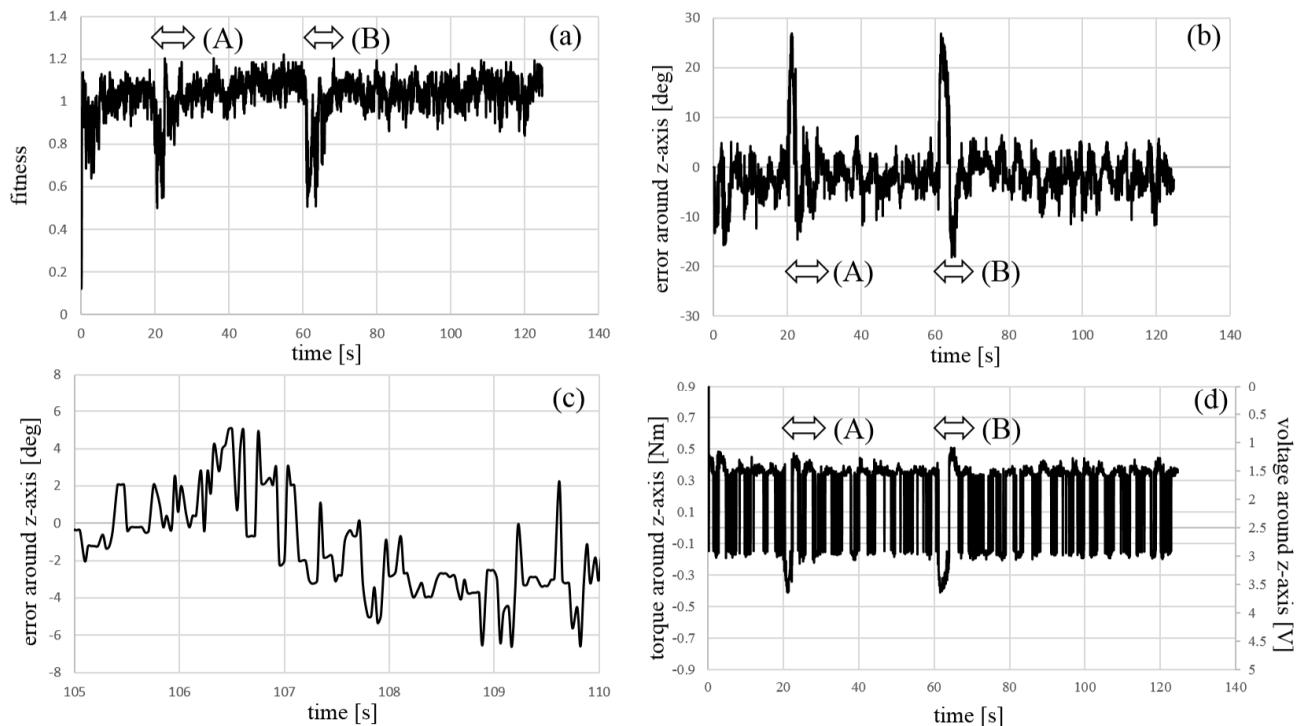


Fig. 14 Regulator performance with disturbance around z-axis: (a)fitness value, (b)error around z-axis, (c)error around z-axis(enlarged view from 105 s to 110 s) and (d)torque around z-axis

れば、正方形の中心から各辺に向かっておよそ ± 20 mm の精度で）棒が嵌合することを成功の条件であると定義する。なお、位置の計測に USBL (Ultra Short Base Line) やデッドレコニングを用いた研究 (McEwen et al., 2008; Singh et al., 2001; Teo et al., 2015) があるが、それらの絶対位置の評価は m 単位である。一方、本研究ではカメラによる計測誤差を含んでいるものの、絶対位置の評価は mm 単位で行っており、他の手法と比較して精度が高いと言える。図 15 に示すように水中ロボットの初期位置を (a)3 次元マーカ正面 (b)3 次元マーカに対してプール左側 (c) プール右側とした実験を行った。本報告での水中嵌合は図 16, 18, 19 の各 (a) が示すように次の 4 つの状態を経て行われる。 (A) 対象物への接近と発見 (Approach), (B) 対象物との相対的目標位置・姿勢を保つビジュ

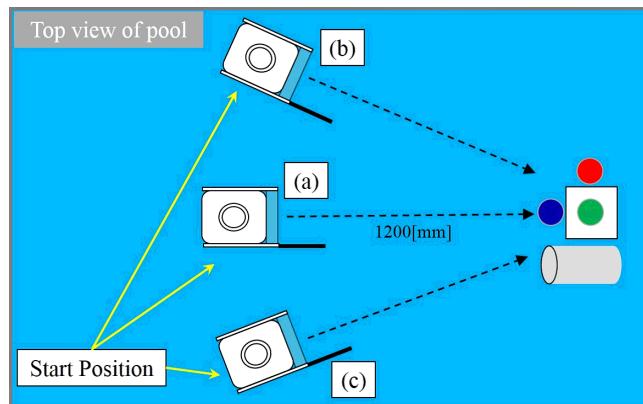


Fig. 15 Start position of underwater vehicle: (a)front of 3D marker, (b)left side of pool against 3D marker, (c)right side of pool against 3D marker

アルサー (Visual servoing), (C) 被嵌合装置への嵌合 (Docking), (D) 被嵌合装置との嵌合完了 (Completion of docking)。

Approach は、水中ロボットが対象物を発見（認識）するまでの状態を意味しており、対象物が水中ロボット前方に存在すると仮定したうえで、水中ロボットを微速前進させている。すなわち、初期状態では水中ロボットは

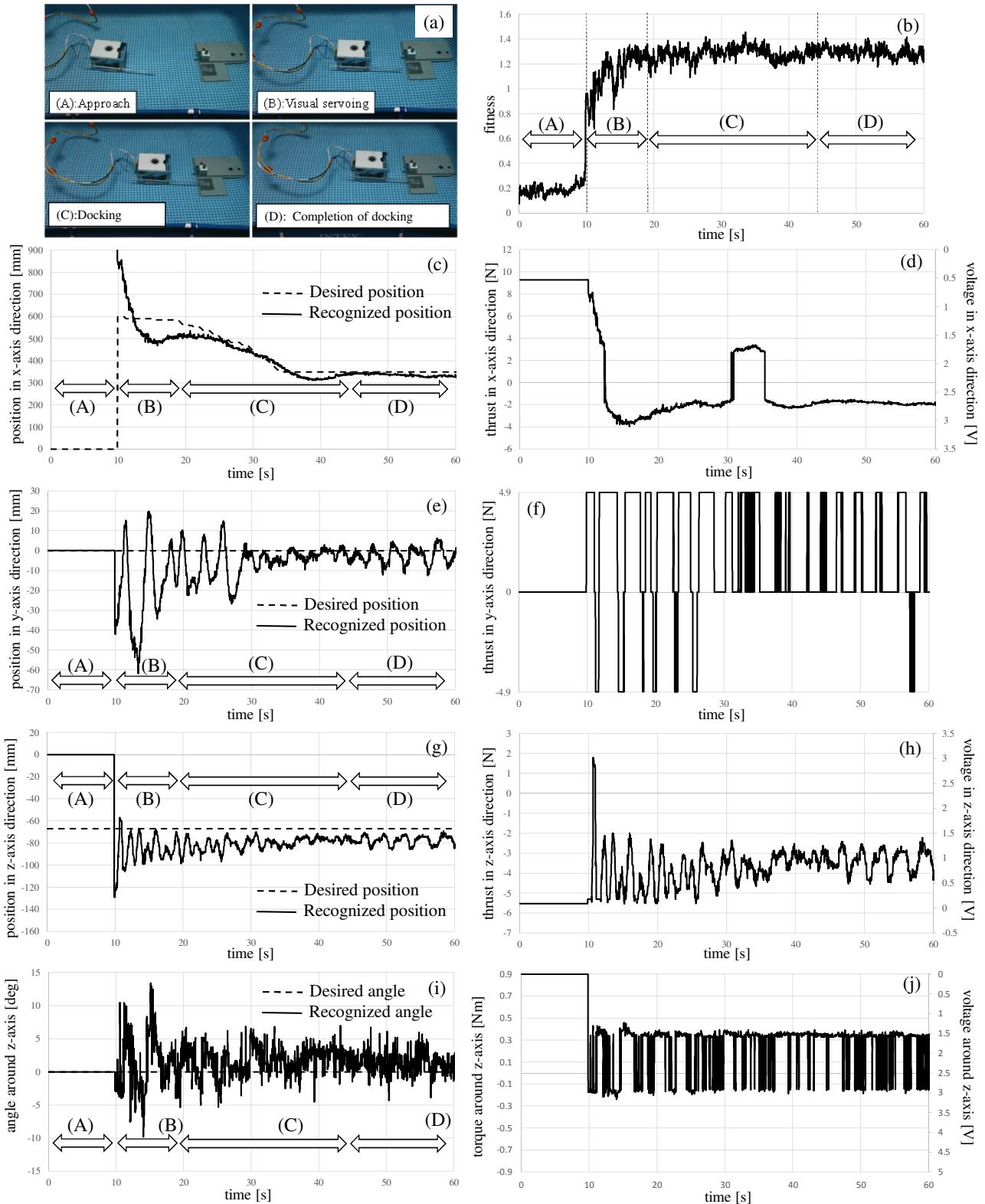


Fig. 16 Docking experiment result (start position of underwater vehicle: front of 3D marker, position (a) in Fig.15): (a)snapshot of docking experiment, (b)fitness value, (c)position in x-axis direction, (d)thrust in x-axis direction, (e)position in y-axis direction, (f)thrust in y-axis direction, (g)position in z-axis direction, (h)thrust in z-axis direction, (i)angle around z-axis and (j)torque around z-axis

対象物との相対的位置・姿勢を認識していないが、前進していく中で対象物を発見し、Visual servoingの状態に遷移する。

次に、Visual servoingは水中ロボットが対象物を認識している状態を意味している。前述の通り、あらかじめ定

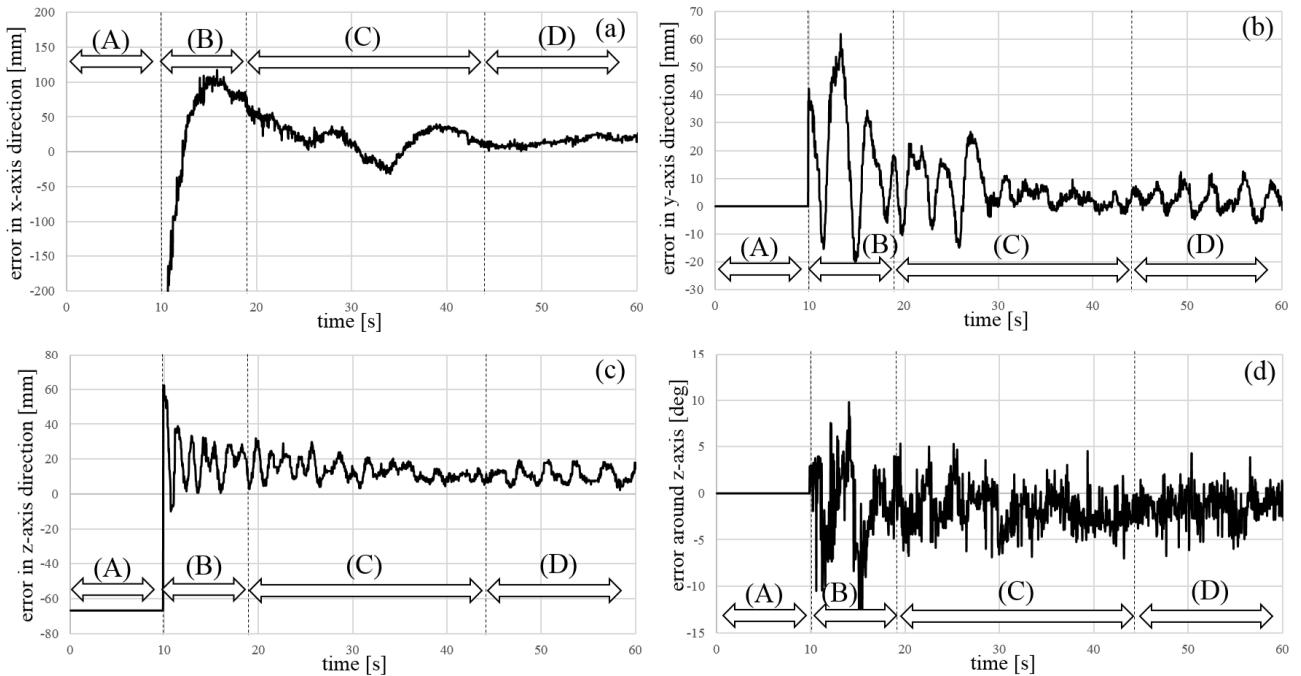


Fig. 17 Docking experiment result (start position of underwater vehicle: front of 3D marker, position (a) in Fig.15):
(a)error in x-axis direction, (b)error in y-axis direction, (c)error in z-axis direction and (d)error around z-axis

義した対象物との相対的目標位置・姿勢を保つような制御がなされる。ただし、この状態に遷移後は、対象物と水中ロボットの相対的位置の誤差が y_d および z_d それぞれに関して ± 20 mm 以内に 165 ms (制御ループ 5 回) 以上連続して収まった場合に、水中ロボットは x_H 軸方向に秒速 30 mm/s で前進する (相対的目標位置 x_d を毎秒 30 mm ずつ減少させる)。すなわち被嵌合装置への嵌合を実行する状態 (Docking) に移る。ただし、外乱によって嵌合中に前述の誤差の範囲を超えた場合、嵌合を実行する前述の条件を再び満たすまで、水中ロボットはその時点における対象物との相対的位置・姿勢を保つようにビジュアルサーボを行う。

Docking は、水中ロボットが対象物を認識しつつ被嵌合装置への嵌合を果たすまでの状態を意味している。Visual servoing の状態において、対象物と水中ロボットとの相対的目標位置・姿勢からの誤差が前述の閾値以下に達すると、本状態に遷移する。相対的目標位置 x_d を時変で与えつつビジュアルサーボを行うことで、最終的に嵌合を果たす位置・姿勢 ($x_d = 350$, $y_d = 0$, $z_d = -67$, $\varepsilon_{2d} = 0$) まで水中ロボットが移動する。

Completion of docking は、水中ロボットが被嵌合装置と嵌合を果たした状態を意味している。Visual servoing の状態と同様に、嵌合状態における対象物との相対的目標位置・姿勢を保つような制御がなされる。

図 16, 18, 19 の各 (b)～(j) は対象物が水中ロボット前方にある状態で嵌合実験を行った結果を示している。(b) は適合度、(c)(e)(g)(i) は水中ロボットが認識している位置と姿勢、(d)(f)(h)(j) は各軸における推力とトルクを表している。また図 17 は図 16 に関する相対的目標位置・姿勢からの誤差を表している。それぞれの図から、(A) Approach, (B) Visual servoing, (C) Docking, (D) Completion of docking へと状態が遷移していることが分かる。すなわち、提案システムが水中ロボットに嵌合能力を与えていていることが確認できる。

5. まとめ

深水汚染底泥の水中ロボットによる自動回収を目的に、ビジュアルサーボを ROV に搭載して一部自動化するための研究開発を進めている。そのため本研究では複眼カメラによるビジュアルサーボを搭載した水中ロボットのレギュレート性能の検証と水中自動充電を想定した水中嵌合実験を行い、下記結論を得た。(1) 提案するレギュレートシステムは、ビジュアルサーボ中に物理的外乱に対して対象物との相対的目標位置・姿勢に復元できたことから、外力外乱に対する安定性を有することが分かった。(2) 水中嵌合実験の結果から、 x 軸方向の時変目標値に対する追従性能を有することが分かった。(3) 目標位置との誤差の閾値に基づき Visual servoing と Docking を切り替

えることで、水中嵌合を実現できることが分かった。今後は水中自動充電システムの開発をめざし、実海域で提案システムの有効性の検証を進めていく。

謝 辞

本研究では広和株式会社マリンシステム部の協力を得ました。ここに謝意を表します。

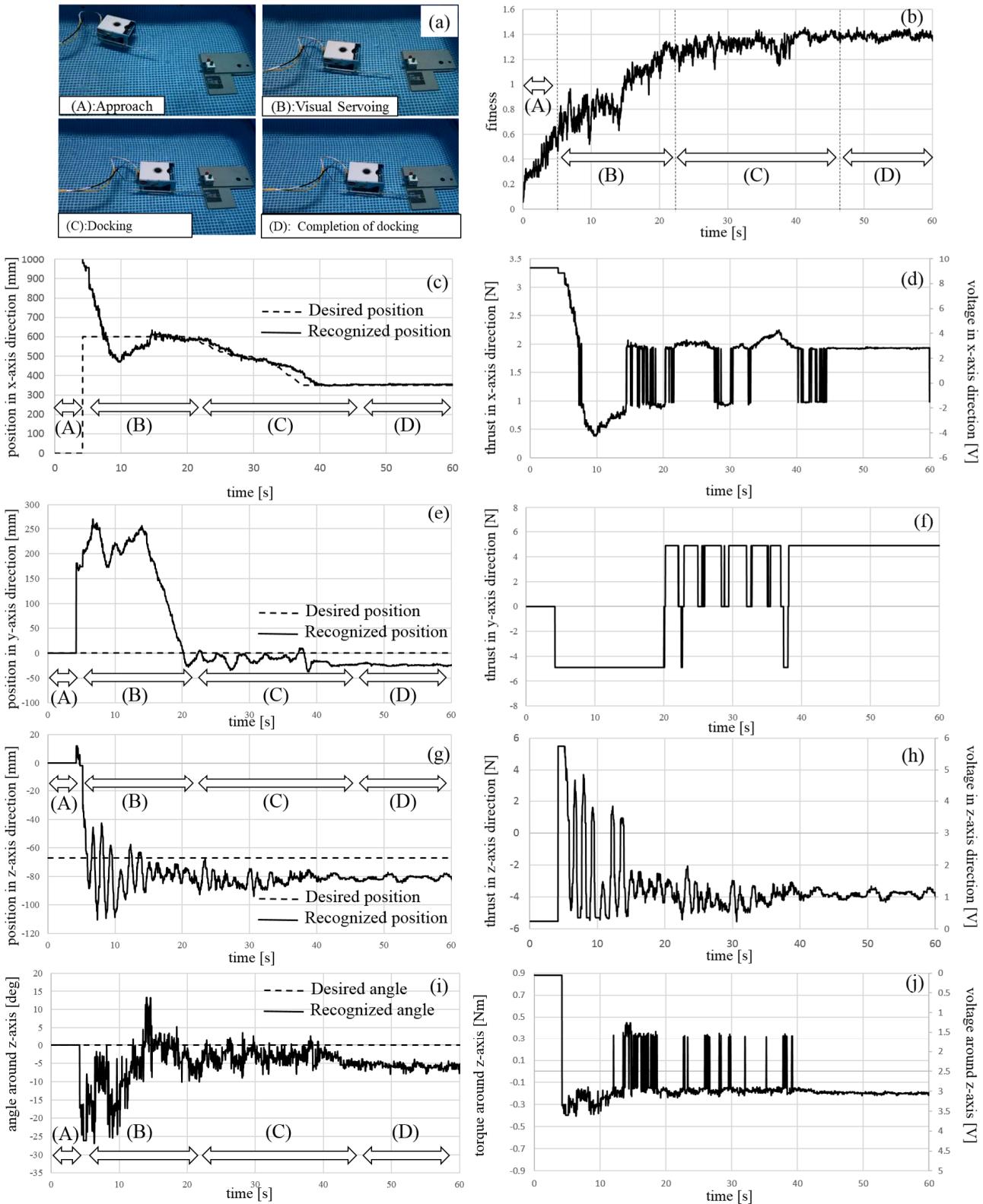


Fig. 18 Docking experiment result (start position of underwater vehicle: left side of pool against 3D marker, position (b) in Fig.15): (a)snapshot of docking experiment, (b)fitness value, (c)position in x-axis direction, (d)thrust in x-axis direction, (e)position in y-axis direction, (f)thrust in y-axis direction, (g)position in z-axis direction, (h)thrust in z-axis direction, (i)angle around z-axis and (j)torque around z-axis

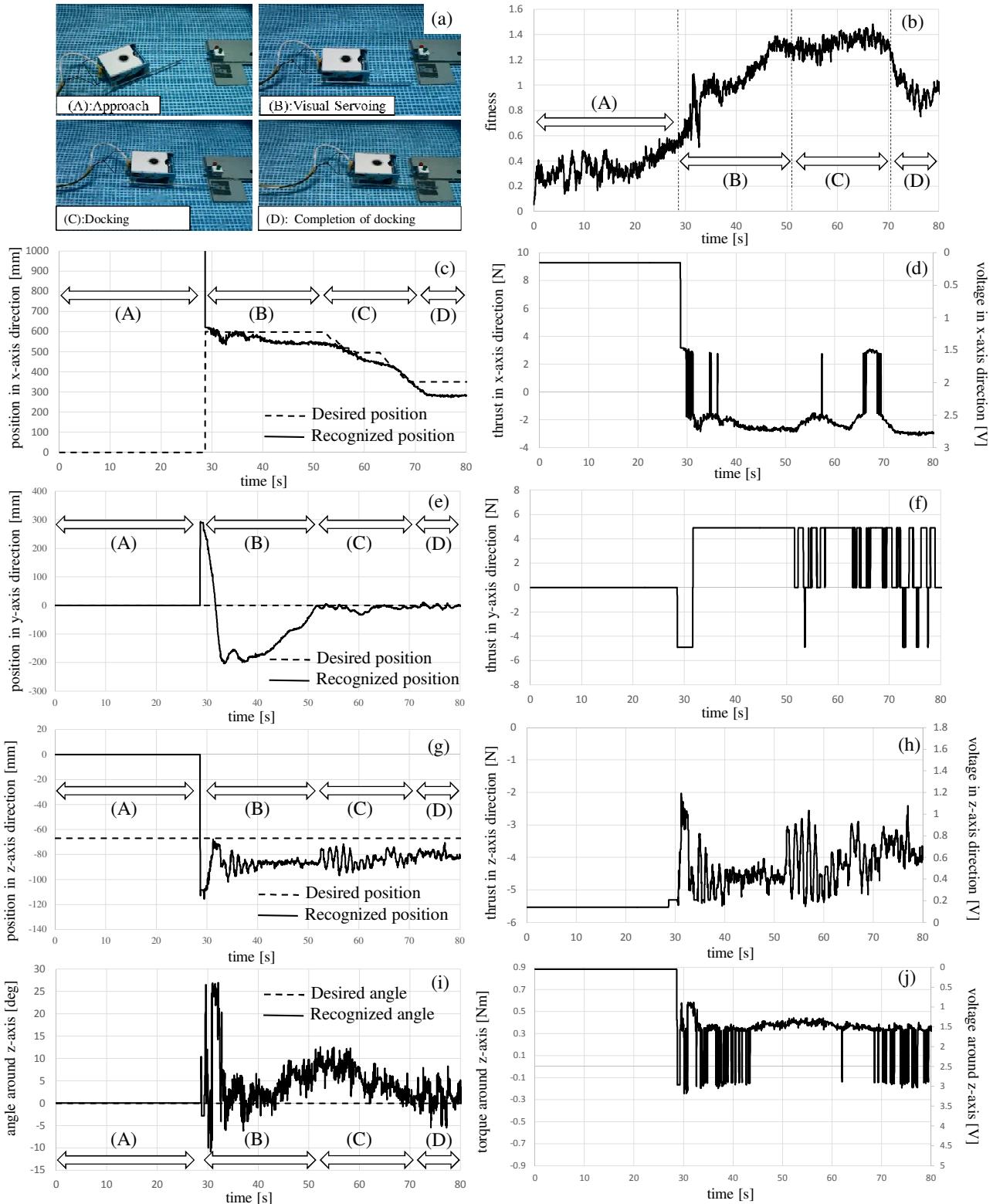


Fig. 19 Docking experiment result (start position of underwater vehicle: right side of pool against 3D marker, position (c) in Fig.15): (a)snapshot of docking experiment, (b)fitness value, (c)position in x-axis direction, (d)thrust in x-axis direction, (e)position in y-axis direction, (f)thrust in y-axis direction, (g)position in z-axis direction, (h)thrust in z-axis direction, (i)angle around z-axis and (j)torque around z-axis

文 献

- 石山新太郎, 山下学 (連載) 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(2)放射能汚染土壤の洗浄再生化技術 (第 2 報) , 「検査技術」 (日本工業出版) , Vol.19, No.4(2014), pp.45-49.
- 石山新太郎, 見浪護 (連載) 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(3)Move on Sensing 技術開発の現状 (第 3 報) , 「検査技術」 (日本工業出版) Vol.19, No.5(2014), pp.57-69.
- 石山新太郎, (連載) 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術(I)水中サーベイメータ搭載遠隔操作無人海中探査機による水中汚泥の動態調査技術 (第 1 報) , 「検査技術」 (日本工業出版) , Vol.19, No.3(2014), pp.46-53.
- 伊藤智之, 木村元比古, 小型水中点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6(2004), pp.702-705.
- 近藤逸人, 浦環, 能勢義昭, 自律型海中ロボット “Tri-Dog 1” の設計とミッション, 生産研究, Vol.52, No.5(2000), pp.243-246.
- McEwen, R. S., Hobson, B. W., McBride, L. and Bellingham, J. G., Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.33, No.4(2008), pp.550-562.
- 農林水産省, 福島県内におけるため池中の放射性物質に関する実態と対策について～中間とりまとめ概要～平成 25 年 4 月農林水産省農村振興局, available from < <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/tyukan.pdf> > (参考照日 2014 年 8 月 28 日).
- 日本経済新聞, 汚染土壤ろ過用布効果を自動化, Science and Tech フラッシュ (2014 年 7 月 8 日発刊).
- Palomeras, N., Penalver, A., Massot-Campos, M., Vallicrosa, G., Negre, P. L., Fernandez, J. J., Ridao, P., Sanz, P. J., Oliver-Codina, G. and Palomer, A., I-AUV docking and intervention in a subsea panel, Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(2014a), pp.2279-2285.
- Palomeras, N., Ridao, P., Ribas, D. and Vallicrosa, G., Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation, Preprints of the International Federation of Automatic Control(2014b), pp.12160-12165.
- Singh, H., Bellingham, J. G., Hover, F., Lerner, S., Moran, B. A., Heydt, K. and Yoerger, D., Docking for an autonomous ocean sampling network, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.26, No.4(2001), pp.498-514.
- Song, W., Minami, M., Mae, Y. and Aoyagi, S., On-line evolutionary head pose measurement by feedforward stereo model matching, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(2007a), pp.4394-4400.
- Song, W., Minami, M., Mae, Y. and Aoyagi, S., On-line stable evolutionary recognition by quaternion motion-feedforward compensation, Proceedings of the SICE Annual Conference(2007b), pp.1023-1030.
- 宋薇, 見浪護, 青柳誠司, クオータニオンを用いたフィードフォワードオンラインポーズ遺伝的認識法, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1(2010), pp.55-64.
- 宋薇, 見浪護, フィードフォワード遺伝的認識法を用いた 3-D ビジュアルサーボ, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5(2010), pp.591-598.
- Song, W., Yu, F. and Minami, M., 3D visual servoing by feedforward evolutionary recognition, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 4, No. 4(2010), pp.739-755.
- Suzuki, H. and Minami, M., Visual servoing to catch fish using global/local GA search, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.10, Issue 3(2005), pp.352-357.
- 鈴木正憲, 原子力発電プラント水中検査用 ROV の開発, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6(2004), pp.697-701.
- Teo, K., Goh, B. and Chai, O. K., Fuzzy docking guidance using augmented navigation system on an AUV, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.40, No.2(2015), pp.349-361.
- Ura, T., Kurimoto, Y., Kondo, H., Nose, Y., Sakamaki, T. and Kuroda, Y., Observation behavior of an AUV for ship wreck investigation, Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference, Vol.3(2005), pp.2686-2691.
- 吉田弘, 百留忠洋, 石橋正二郎, 越智寛, 志村拓也, 水中ロボットにおけるテレロボティクス, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.6(2012), pp.578-581.
- Yu, F., Minami, M., Song, W., Zhu, J. and Yanou, A., On-line head pose estimation with binocular hand-eye robot based on evolutionary model-based matching, Journal of Computer and Information Technology, Vol.2, No.1(2012), pp.43-54.
- Yu, F., Minami, M., Song, W. and Yanou, A., Eye-vergence visual servoing enhancing Lyapunov-stable trackability, Artificial Life and Robotics, Vol.18, Issue 1(2013), pp.27-35.

柳善鉄, 浦環, 藤井輝夫, 水中ランドマークを利用した水中ロボットの航法制御, 生産研究, Vol.52, No.5(2000), pp.247-250.

柳善鉄, 浦環, 藤井輝夫, 近藤逸人, 人工水中ランドマークと推測航法を利用した自律型水中ロボットの航法, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3(2002), pp.290-298.

References

- Ishiyama, S. and Yamashita, M., (Serial)Current sensing/manipulation coalesced technology 2, Reclamation technology of radiation contaminate soil(report No.2), Inspection engineering(NIHON KOGYO SHUPAN), Vol.19, No.4(2014), pp.45-49(in Japanese).
- Ishiyama, S. and Minami, M., (Serial)Current sensing/manipulation coalesced technology 3, Current R&D on move on sensing technology, Inspection engineering(NIHON KOGYO SHUPAN), Vol.19, No.5(2014), pp.57-69(in Japanese).
- Ishiyama, S., (Serial)Current sensing/manipulation coalesced technology 1, Investigation of actual condition of contaminated soil in regulation pond conducted by underwater radiation measuring instrument installed in remotely-operated vehicle, Inspection engineering(NIHON KOGYO SHUPAN), Vol.19, No.3(2014), pp.46-53(in Japanese).
- Ito, T. and Kimura, M., Development of small under water vehicle, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.22, No.6(2004), pp.702-705(in Japanese).
- Kondo, H., Ura, T. and Nose, Y., Design of autonomous underwater vehicle "Tri-Dog 1" and her mission, Production research, Vol.52, No.5(2000), pp.243-246(in Japanese).
- McEwen, R. S., Hobson, B. W., McBride, L. and Bellingham, J. G., Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.33, No.4(2008), pp.550-562.
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan, Recent status and provision of radiation contamination in FUKUSHIMA ponds, available from <<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/tyukan.pdf>> (accessed on 28 August, 2014)(in Japanese).
- NIHON KEIZAI SHINBUN, Science and Techno flush (2014/7/8)(in Japanese).
- Palomeras, N., Penalver, A., Massot-Campos, M., Vallicrosa, G., Negre, P. L., Fernandez, J. J., Ridao, P., Sanz, P. J., Oliver-Codina, G. and Palomer, A., I-AUV docking and intervention in a subsea panel, Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(2014a), pp.2279-2285.
- Palomeras, N., Ridao, P., Ribas, D. and Vallicrosa, G., Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation, Preprints of the International Federation of Automatic Control(2014b), pp.12160-12165.
- Singh, H., Bellingham, J. G., Hover, F., Lerner, S., Moran, B. A., Heydt, K. and Yoerger, D., Docking for an autonomous ocean sampling network, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.26, No.4(2001), pp.498-514.
- Song, W., Minami, M., Mae, Y. and Aoyagi, S., On-line evolutionary head pose measurement by feedforward stereo model matching, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(2007a), pp.4394-4400.
- Song, W., Minami, M., Mae, Y. and Aoyagi, S., On-line stable evolutionary recognition by quaternion motion-feedforward compensation, Proceedings of the SICE Annual Conference(2007b), pp.1023-1030.
- Song, W., Minami, M. and Aoyagi, S., Feedforward on-line pose evolutionary recognition based on quaternion, Journal of the Robot Society of Japan, Vol.28, No.1(2010), pp.55-64(in Japanese).
- Song, W. and Minami, M., 3-D visual servoing using feedforward evolutionary recognition, Journal of the Robot Society of Japan, Vol.28, No.5(2010), pp.591-598(in Japanese).
- Song, W., Yu, F. and Minami, M., 3D visual servoing by feedforward evolutionary recognition, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 4, No. 4(2010), pp.739-755.
- Suzuki, H. and Minami, M., Visual servoing to catch fish using global/local GA search, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.10, Issue 3(2005), pp.352-357.
- Suzuki, M., Development of remote operated vehicles for underwater inspection in nuclear power plants, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.22, No.6(2004), pp.697-701(in Japanese).

- Teo, K., Goh, B. and Chai, O. K., Fuzzy docking guidance using augmented navigation system on an AUV, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.40, No.2(2015), pp.349-361.
- Ura, T., Kurimoto, Y., Kondo, H., Nose, Y., Sakamaki, T. and Kuroda, Y., Observation behavior of an AUV for ship wreck investigation, Proceedings of the OCEANS 2005 MTS/IEEE Conference, Vol.3(2005), pp.2686-2691.
- Yoshida, H., Hyakudome, T., Ishibashi, S., Ochi, H. and Shimura, T., Telerobotics on underwater vehicles, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.30, No.6(2012), pp.578-581(in Japanese).
- Yu, F., Minami, M., Song, W., Zhu, J. and Yanou, A., On-line head pose estimation with binocular hand-eye robot based on evolutionary model-based matching, Journal of Computer and Information Technology, Vol.2, No.1(2012), pp.43-54.
- Yu, F., Minami, M., Song, W. and Yanou, A., Eye-vergence visual servoing enhancing Lyapunov-stable trackability, Artificial Life and Robotics, Vol.18, Issue 1(2013), pp.27-35.
- Yu, S., Ura, T. and Fujii, T., Navigation of underwater vehicle using artificial landmark, Production research, Vol.52, No.5(2000), pp.247-250(in Japanese).
- Yu, S., Ura, T., Fujii, T. and Kondo, H., Advanced navigation method of autonomous underwater vehicle using artificial underwater landmark and deadreckoning, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.20, No.3(2002), pp.290-298(in Japanese).