

水中ロボットの海底充電システム構築のための 海流外乱適応型嵌合システム

正会員 戸田 雄一郎* 山下 耕平*
 門田 拓也* 許 弘毅*
 齊藤 和裕* 見浪 護*

Current-adaptive docking station
for building submarine recharging system of underwater robot

by Yuichiro Toda, *Member* Kohei Yamashita,
Takuya Monden, Horng-Yi Hsu,
Kazuhiro Saito, Mamoru Minami,

Summary

Aiming at developing underwater battery recharging system, we have been researching on automatic docking of an underwater robot using stereo-vision-based visual servoing and 3D marker. The docking function deems to be an important role not only for battery recharging but also for other advanced applications, such as information transmissions. The authors have proposed an optical docking system and conducted real sea experiments to verify the practicability of the proposed docking system composed of stereo-vision-based 3D pose (position and orientation) realtime measurement system. The docking experiments have forced laboratory members to endure heavy burdens of preparing, conducting, and dismantling the experimental devices at sea, which hinders the efficiency of experiments at real sea. To improve the efficacy, firstly, the authors report that permanent stage for underwater robot experiments has been constructed on a shallow sea. Secondly, we propose a docking station that can adapt and change its docking direction to the current direction, through which the burden of controlling the underwater robot's heading can be reduced. Thirdly, the effectiveness of the docking station adaptive to the changing current direction has been proven by successful repeated docking experiments in the environment with fluctuating current and turbidity disturbances in real sea. This also has shown that the combined system of the stereo-vision based 3D pose estimation and the current-adaptive docking station can improve the adaptive abilities against current changing disturbances, having shown the practicality of the combined system has been enhanced.

1. 緒言

深海底には、現在調査の行われていない場所が多く存在しており、潤沢な鉱山資源回収や未知の生物などの発見を目的とした深海底での研究が様々な分野で期待されている。しかしながら、深海底は水圧等の要因で人間が直接調査するには難しい極限環境である。そのため近年、海底探査等の無人化・効率化のために、自律型水中ロボットの活躍に注目が集まっている。このような環境下において、水中ロボットによる自律探査を実現することで、作業の効率化を図ることができるが、自律移動型水中ロボットが長時間活動するための電力をどのように供給するかといった課題が存在する。現在、ロボットへの電力供給方法には有線とバッテリーの2つの方法が主流であるが、いくつかの問題点がある。例えば Remotely Operated Vehicle

(ROV) の場合、ケーブルが海底の岩との接触等で損傷しやすく、また深海に潜るためにはケーブル自体が数千 m の長さになり、その張力の影響により水中ロボットの遠隔操作は難しい作業となる。バッテリーによる電力供給を受ける Autonomous Underwater Vehicle(AUV) の場合、活動可能時間が充電されたエネルギー量に依存するという問題があり、充電のたびに船舶と海底の作業場所を往復しなければならないため、現在まで効率的な運用ができないという現状がある。このような問題を解決し水中での活動時間を延ばすために、水中に給電設備を設置しロボットが自動で充電を行うシステムの研究が行われてきた^{1), 2), 3), 4)}。水中ロボットの嵌合に関する研究は主に、タスクの終了後、嵌合ステーションへ帰還するための長距離からの誘導制御に関する研究とステーション付近に帰還し、最終的に嵌合部へ嵌合するための短距離の嵌合制御に大別される。前者に関しては、一般的に、水中ロボットの位置推定手法として、帰還のための誘導軌跡の生成や制御に関する研究が多く行われている。このような、長距離に関するドッキングのための

* 岡山大学大学院自然科学研究科
原稿受理 平成 23 年 9 月 15 日

誘導制御の場合、水中ロボットとステーション間の位置を把握するためのセンサとして、音響センサによる音波通信が多くの研究で用いられている⁵⁾。一方で、後者の短距離における嵌合制御においては、嵌合部に対して正確に嵌合制御をする必要があり、より精度の高い位置姿勢制御が必要となる。本研究では、音波通信などを用いステーションがカメラによって視認できる距離まで誘導した後の短距離における安定的な嵌合制御の実現を目標として研究を行っており、著者らは、ステレオカメラにより取得した視覚情報を用いた実時間3次元位置姿勢認識（著者らは、3 D-MoS, 3 Dimension Move on Sensing, と呼んでいる⁶⁾）によって、水中ロボットの制御を実現している^{7), 8)}。提案した実時間遺伝的認識手法は、既知の認識対象物に対して、遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm, 以下GA）を用いてオンラインで計算させ、適合度の最も高い遺伝子が持つ位置姿勢情報を水中ロボットが認識した認識対象物の実時間位置姿勢計測結果として利用する方法である⁹⁾。他手法と異なる点は（1）認識対象物を複眼カメラで認識している点と、（2）動画像中の画像とモデルの相関をGAの進化における適合度として用いることで認識対象物の位置姿勢を実時間で計測している点である。先行研究では、上記の提案した認識手法を制御に用いることで、ROVの実海域連続嵌合実験に成功している^{10), 11)}。さらに、暗闇混濁環境における嵌合を実現するために発光3次元マーカーを提案し、高い濁度環境下においても嵌合が可能であることを示している¹²⁾。しかしながら、それらの実験は、潮流方向の変化が比較的緩やかな環境下で成功したものであり、ROVの進行方向に対して数十度の角度をもつ潮流方向の変化が生じた場合に、定常偏差が発生し嵌合に失敗してしまう状況が存在したため、長時間の繰り返し連続嵌合は、これまで成功に至っていない（Fig.1 (A)）^{11), 12)}。提案手法の運用を想定する海底には海流が存在し、岩などにぶつかることで乱流が発生することも考えられるため、この問題の解決は重要であり、海流の外乱に対するロバスト性を向上させるために様々な研究が行われている⁵⁾。この問題を解決するために、本研究で著者らは、海流による外乱が小さくなるように、充電設備（以下ステーション）嵌合部が海流下手方向に向くように変化する回転型嵌合ステーション（Fig.1 (B)）の設計・構築を行った。さらに、これまで開発を行った混濁環境下でも適用可能な発光3次元マーカーと複眼カメラによる実時間3次元位置姿勢認識手法を用いた嵌合システムと統合することにより、濁度や海流といった実海域で想定される外乱に対してロバスト性を持つ海流外乱適応型嵌合システムを本研究では提案し、実海域で実験を行った。結果として、海流の影響による水中ロボットのヨー角の定常偏差を小さくすることができ、海流方向の変化に適応した長時間の繰り返し連続嵌合に成功した。

また、このような水中ロボットの研究を実際に海で行うことは多大な準備が伴うため、プールが主な実験環境になっている傾向がある。しかしながら、海中は濁度環境や海流などプールでは再現が難しい外乱が数多く存在し、実際に使える技

術を構築するには実海域での試行と改良が必要になってくる。そこで、本論文では、まず、岡山県瀬戸内市牛窓町の岡山大学牛窓臨海実験所の専用海域に設置した常設やぐらについて述べる。次に、海流外乱適応型嵌合システムとして水中ロボットの制御手法、回転型嵌合ステーションの構成及び実海域での繰り返し連続嵌合実験の結果について報告する。常設やぐらは、実海域での水中ロボット実験を容易にするばかりでなく、潮汐による海流方向と海流速度の変化、また、自然な濁度環境下での実験を容易にする。本論文で報告する実海域実験は、この海上施設を用いて実施したものであり、海流外乱適応型嵌合システムの効果について検証する。

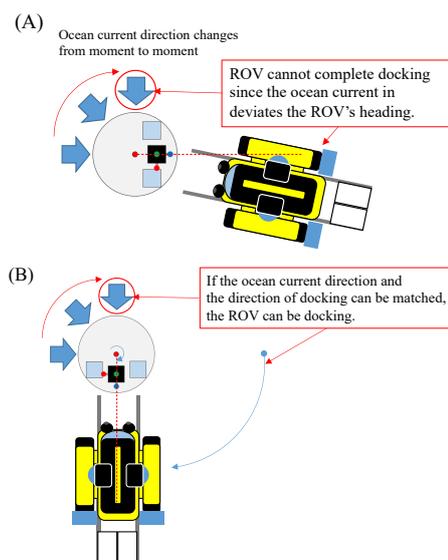


Fig. 1 Problems caused by changes in ocean current direction

2. 実海域実験系の構築

海洋開発技術や水中ロボットの技術開発の特徴は、「実験実証的に開発を進める」という点にあり、実験室のみでの研究は大きな意味を持たない。そこで、本研究開発では、岡山大学理学部附属牛窓臨海実験所に充電ステーションを建設し深夜の海を利用して深海模擬環境を作り出し、(a) 帰巢, (b) 嵌合, (c) 充電, (d) 離脱, (e) 海底想定タスクを繰り返す深海自律行動シナリオを達成する海底長期滞在型水中ロボットの開発と実証実験を行う実験場として、水中ロボットを投入するための常設やぐらの構築を行った。Fig.2に構築した常設やぐらを示すが、常設やぐらの部材にはアルミ材を使用し、縦 3000[mm]、横 3000[mm]、高さ 4000[mm]の直方体である。本研究では、この常設やぐらを用いて、その近くに回転型嵌合ステーションを投入し、実海域における実証実験を行う。

本章では、これまでに著者らが開発し、海流外乱適応型嵌合システムの構成要素となる発光3次元マーカー¹³⁾を用いた実時間3次元位置姿勢推定手法に基づく手法に関する説明を



Fig. 2 Permanent stage for underwater robot experiments and installation procedure and the location

行う。

2.1 嵌合実験におけるレイアウト

ここではまず、嵌合の実験構成及び装置に関して説明する。本研究における嵌合実験のレイアウトを Fig. 3 に示す。本研究では、これまで濁度を含む水中環境下において複眼カメラ構成による実時間 3 次元位置姿勢認識手法を用いたビジュアルサーボによる嵌合を行っており、濁度と本研究で用いる水中カメラの視認性の関係から水中ロボットと嵌合ステーションに搭載された発光 3 次元マーカーの距離が 600[mm] となった位置を嵌合開始距離とする¹²⁾。本研究において嵌合の成功条件は、Fig. 4 に示す 100[mm]×100[mm] の 2 つの嵌合穴に対して、水中ロボットの先端に取り付けた 2 本の棒が嵌合した（水中ロボットの位置が嵌合終了距離以下かつ後述の嵌合条件範囲を満たした）状態が 500 ステップ持続したときとする。1 ステップは 0.033[s] であるので、500 ステップは 16.5[s] を意味する。ここで、1 ステップは、水中カメラから画像を取得し、3 次元位置姿勢認識を行った回数を表す。また、このときの嵌合終了距離は、Fig. 3 に示すように取り付けられた嵌合棒の長さの関係から 350[mm] となっている。

2.2 水中ロボット

本研究は、上述の通り 100[mm]×100[mm] の嵌合穴に対する嵌合を行っていくため、この範囲に収まるホバリング能力を有する水中ロボットが必要となってくる。そこで本研究では、この性能を満たす水中ロボットとして、株式会社キュー・アイによって開発された ROV である Delta-150 (Fig. 5) を用いる。ROV の仕様を Table 1 に示す。ROV は、後方の 2 つのスラスターで、Fig.5 に示す x 軸方向、 z 軸回転の推力を生

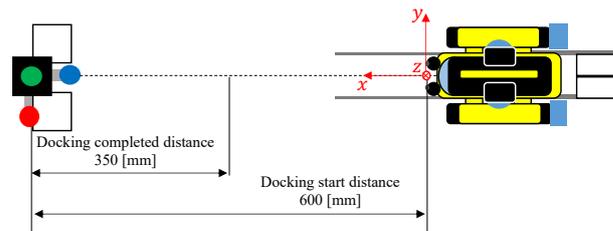


Fig. 3 Docking layout

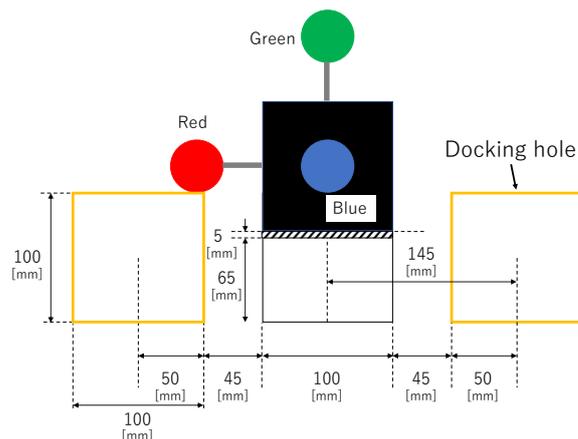


Fig. 4 Docking layout

み出しており、上方 2 つの斜めに取り付けられているスラスター (V 型スラスター) に整流板 (Rectifier) を取り付けることで y 軸、 z 軸方向の推力を生み出している。さらに、 y 軸方向に移動するとき発生する x 軸回転を抑制するためにダンパ (Damper) が付けられている。また、船体前方に広和株式会社によって開発された水中カメラである MARINE EYE (Table 2) を 2 台固定しており、この複眼カメラの構成によって発光 3 次元マーカーの認識を行う。2 台のカメラ間距離は 178[mm] とし、ROV の座標系は複眼カメラ中央に x 軸方向とカメラ光軸方向が一致するように設定してある。

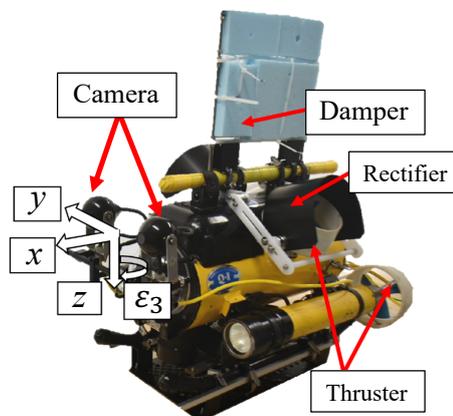


Fig. 5 ROV (Remotely operated vehicle)

Table 1 Specification of ROV

Operating depth [m]	150
Dimensions [mm]	450 (W) × 600 (L) × 395 (H)
Dry weight [kg]	20
Number of thrusters	2 (Horizontal), 2 (Vertical and Traverse)
Max. thrust force [N]	30 (Horizontal and Vertical and Traverse)
Number of LED lights	2 (Forward, 70 W), 1 (Downward, 75 W)

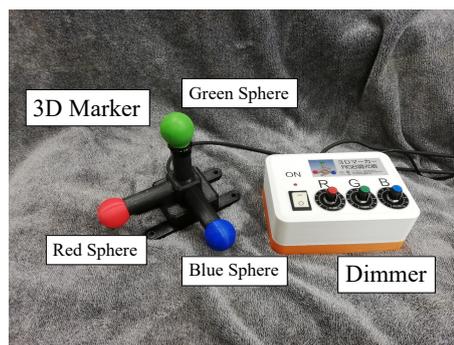


Fig. 6 Active 3D marker

Table 2 Specification of camera

Resolution	640 [pixel] × 480 [pixel] (0.00638[mm/pixel])
Angle of view	80.4° × 64.9°
Focal length	2.9 [mm]
Frame rate	30 [fps]
Distance of cameras	178 [mm]
Camera direction	Along to x axis

2.3 発光3次元マーカー

Fig.6に発光3次元マーカーの構造を示す。発光には、赤色・緑色・青色のLEDをそれぞれ用いている。さらにLEDは、ABS樹脂を用い3Dプリンタで製作した直径40[mm]の球体の中に内蔵し、さらに、球体内部に耐圧防水樹脂を詰め込むことによって、防水性、耐圧性に優れた構造となっている。また、LEDを点灯させるための電源は外部のAC100V電源から供給しており、AC-DCコンバーターでAC100VからDC12Vへ変換している。長時間の運用を考えた場合、安定な電流の供給が必要となる。そこで電源は電池ではなく、AC100Vの電源を用いた。実際に海底に給電設備を設置した際には、給電設備から直接電源を供給できるため、実際の運用を考慮しても発光3次元マーカーへの電源の供給源は、電池のような内部電源ではなく、外部電源が望ましいといえる。さらに、それぞれの色の光度を調整可能にするため、可変抵抗器を回路に組み込んでいる。このように、発光3次元マーカーを用いることによって、夜間や深海などの環境においても適用可能なマーカーとなっている。

2.4 ステレオビジョンを用いた実時間3次元位置姿勢推定

ここでは、発光3次元マーカーとステレオビジョンを用いた3次元位置姿勢認識手法の概略に関して説明する。詳細な手法に関しては文献¹⁴⁾に記載されている。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。33ms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) 計算時間が長いが高精度な手法を用い、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。具体的には、動画像列の中でGAの遺伝子を進化させて画像列に写っている3次元マーカーに3次元モデルを収束させることで、対象物の位置姿勢を実時間で計測する手法であるRealtime Multistep Genetic Algorithm (RM-GA)を用いる。RM-GAでは*i*番目の遺伝子に与えている6つの情報(位置姿勢) ϕ_i を、それぞれ12bitで定義しており、位置姿勢情報 $[x \text{ [mm]}, y \text{ [mm]}, z \text{ [mm]}, \varepsilon_1 \text{ [°]}, \varepsilon_2 \text{ [°]}, \varepsilon_3 \text{ [°]}]$ で構成されている。また、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ の単位 $[\text{°}]$ は、無次元であることを示しており、それぞれ、 x 軸、 y 軸、 z 軸の回転量を表す。ユニットクォータニオンを用いているため、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ のみで姿勢を確定させることができる。Fig.7にRM-GAによる3次元マーカーの認識フローチャートを示す。図の右側における初期化では、遺伝子 ϕ_i をランダムに生成する。その後、ビデオレート(33ms)で画像入力を繰り返し、現在の世代に生成された個体に対して、左右のカメラ画像上に写っている3次元マーカーと3次元マーカーのモデルとを比較することによって一致度の評価を行う。次に、適者生存の原理に基づき優秀な遺伝子(適合度が高い値を示す遺伝子)を選択し、遺伝的操作である交叉と突然変異を選択された個体に対して適用し、次世代の個体を生成する。さらに、新たな入力画像に対する認識の際、前画像の優秀な遺伝子が引き継がれるエリート保存戦略を採用することによって、3次元位置姿勢の探索を行っている。このため、動画像列の中で3次元マーカーを見失うことなく実時間で位置姿勢計測を実現している。一致度の計算では、左右のカメラの640×480画素それぞれについてRGB値を入力し、それらの値からHSV表色系のH(Hue)の値を算出し、以下の式を用いて適合度関数を計算している。

$$F(\phi_i) = [F_L(\phi_i) + F_R(\phi_i)] / 2 \quad (1)$$

$$F_L(\phi_i) = \frac{1}{N} \left(\sum_{\mathbf{r}_j^L(\phi_i) \in S_{in}^L} p(\mathbf{r}_j^L(\phi_i)) + \sum_{\mathbf{r}_j^L(\phi_i) \in S_{out}^L} p(\mathbf{r}_j^L(\phi_i)) \right)$$

$$F_R(\phi_i) = \frac{1}{N} \left(\sum_{\mathbf{r}_j^R(\phi_i) \in S_{in}^R} p(\mathbf{r}_j^R(\phi_i)) + \sum_{\mathbf{r}_j^R(\phi_i) \in S_{out}^R} p(\mathbf{r}_j^R(\phi_i)) \right)$$

ここで、 $F_L(\phi_i)$ と $F_R(\phi_i)$ は、左カメラ画像、右カメラ画像における適合度関数を表す。Fig. 8 (a) に 3次元探索モデルの構成を示す。探索モデルは 3次元マーカーの色・形状を基に点群を用いて作られている。さらに、それぞれの球モデルを Fig. 8 (b) に示すが、1つの球モデルは、内部領域 S_{in} の点群数を 36 個、外部領域 S_{out} の点群数が 24 個となる点群で構成されている。従って 1つの球に対して 60 個の点群が割り当てられており、3つの球の総点群数 N は、180 となっている。Fig. 8 のように 3次元モデルと実際の 3次元マーカーの球体が空間の中でずれている場合（推定した位置姿勢と 3次元マーカーのそれが一致していない場合）に比べて、モデルと実際の球体が一致している場合に、適合度が高くなるようにモデルと画像の相関関数を設定することで、最適化問題を適合度の最大化問題に落とし込んでいる。このように、本研究では、RM-GA を用い、遺伝子の評価を 3次元で定義されたモデルの位置姿勢情報を基に、3次元空間から 2次元画像に撮像されたモデルと同様に 3次元マーカーが、2次元の画像面に射影された画像との相関を評価する問題に落とし込むことによって、実時間での 3次元位置姿勢推定を実現している。

2.5 ドッキング制御

水中ロボットの制御については、認識手法で推定した推定位置姿勢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をスラスタに与えることで行う。ROV には、Fig.5 に示す x 軸回りと y 軸回り ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) の水力を生み出すスラスタが搭載されていないが、ROV 本体の重心・浮心の関係から $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ に自然に安定する。このため、これらに関する能動的姿勢制御は行わない。水中ロボットと対象物との相対的な目標位置・姿勢を $(x_d, y_d, z_d, \varepsilon_{3d})$ 、水中ロボットが推定した対象物との相対的な位置姿勢を $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\varepsilon}_3)$ とすると、水中ロボットのスラスタを駆動するための必要な電圧は式 (2) ~ (5) で表される。 ε_{3d} は z 軸周りの姿勢である。

$$\text{Surge}(x \text{ 方向}) : V_1 = k_{p1}(x_d - \hat{x}) + 2.5 \quad (2)$$

$$\text{Yaw 角} : V_2 = k_{p2}(\varepsilon_{3d} - \hat{\varepsilon}_3) + 2.5 \quad (3)$$

$$\text{Heave}(z \text{ 方向}) : V_3 = k_{p3}(z_d - \hat{z}) + 2.5 \quad (4)$$

$$\text{Sway}(y \text{ 方向}) : V_4 = k_{p4}(y_d - \hat{y}) + 2.5 \quad (5)$$

また、本嵌合制御では、 $|y_d - \hat{y}| < 30$ [mm] かつ $|z_d - \hat{z}| < 30$ [mm] かつ $|\varepsilon_{3d} - \hat{\varepsilon}_3| < 0.0436$ [] の嵌合条件範囲を満たすとき、嵌合開始からの経過時間を t とすると、奥行き方向の目標

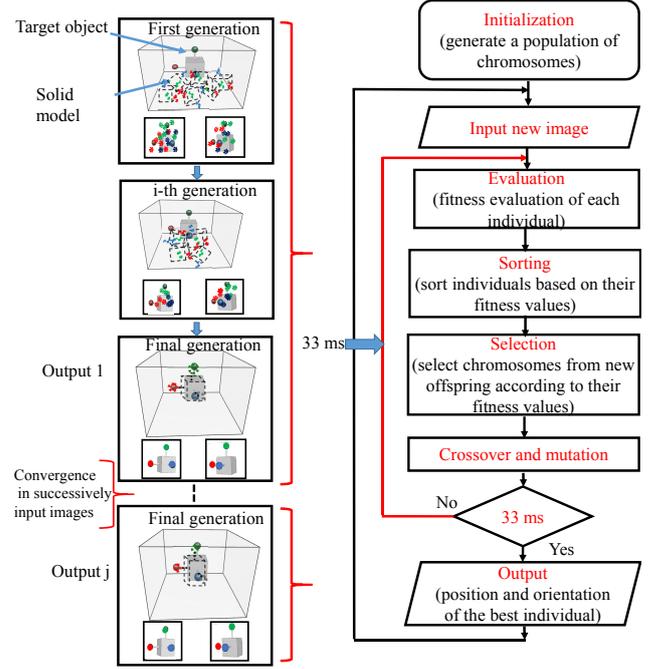


Fig. 7 Flowchart of the 3D pose estimation using RM-GA

値を $x_d = 600 - 30t$ [mm] と時変で減少させることで x 軸方向に ROV が、前進し嵌合穴に嵌合する。しかし、外乱によって偏差が嵌合範囲外に出ると x_d を一定に保ち減少させないことで、定位置姿勢制御に切り替える。その後、安定して嵌合可能範囲に運動が減衰したことを確認して x_d を減少させ、嵌合を行っている。 ε_3 は Fig. 5 に示す z 軸周りの姿勢である。ROV は上下と左右方向への移動が同じ V 型スラスタで行われているため、上下 (z 軸) と左右 (y 軸) 方向への制御がお互いに干渉しあう。そのため、式 (4), (5) に示すように y と z 軸の目標位置との偏差により水中ロボットへの推力指示入力電圧を非干渉化して計算することが困難であった。そこで、本研究では、水中ロボットの観測速度と入力電圧の関係からヤコビ行列 \mathbf{J} を算出し、 \mathbf{J} を用いた制御系を以下のように構築した¹⁵⁾。

$$\begin{bmatrix} V_{\varepsilon_3} \\ V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \mathbf{K}_p \begin{bmatrix} \varepsilon_{3d} - \hat{\varepsilon}_3 \\ x_d - \hat{x} \\ y_d - \hat{y} \\ z_d - \hat{z} \end{bmatrix} + 2.5 \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{K}_p は $\mathbf{K}_p = \text{diag}(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}, k_{p4})$ で定義される各偏差に対するゲインである。本実験では $(k_{p1}, k_{p2}, k_{p3}, k_{p4}) = (0.02, 0.5, 0.6, 0.55)$ を用いる。これらのゲインは、これまでの実海域における嵌合実験を通して経験的に決定したものである。本研究では制御を容易にするために、式 (6) の電圧値を直接用いておらず、不感帯を取り除いて電圧と推力の関係を線形化した場合の電圧値をスラスタに入力している。

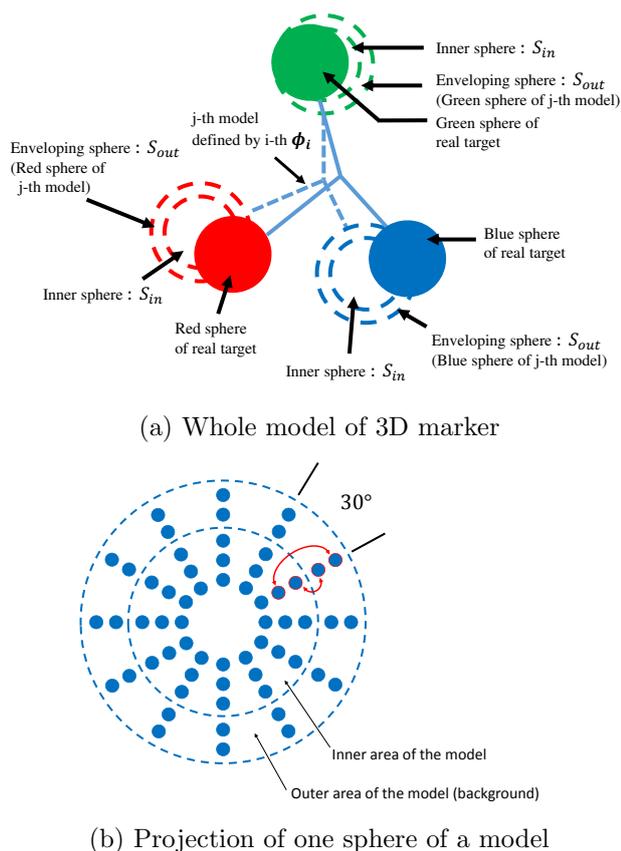


Fig. 8 Construction of solid 3D model to estimate pose of 3D marker

3. 回転型嵌合ステーション

本研究では、実海域における海流方向の変化に対して適応的なドッキングシステムを実現するために、海流下手方向に嵌合穴を向ける回転型嵌合ステーションを開発する。以下では、回転型嵌合ステーションに関して説明する。

3.1 プロトタイプの開発

3.1.1 システム構成

本研究では、まず、海流方向の変化に対して回転型嵌合ステーションが有効であるか否かに対する検証を行うために、回転型嵌合ステーションのプロトタイプの開発を行った。開発したプロトタイプの構造を Fig.9 に示す。ステーション全体の大きさは縦に 3700 [mm] であり、嵌合穴は海底から約 500 [mm] の位置に設定してある。また、Fig.9 (A) に示すようにステーション最上部にはエンコーダーとモータが固定されている。この部分は、実験地海面上に位置し水没しない。エンコーダー側のシャフトには Fig.9 (B) に示すフィンが固定されており、これが海流方向の変化を検知する。海流を受けてシャフトが回転した回転角度をエンコーダーによって検知することによって海流方向の角度を推定する。次に、Fig.9 (C) に示すモーター側のシャフトには、嵌合穴と 3D マーカーを乗せた直径 475 [mm] のアクリルプレートが固定されており、計測した

エンコーダ角度に対して、モータの回転角度を一致させるように P 制御をかけることによってアクリルプレートが回転し、嵌合穴を海流下手方向に向ける仕様となっている。また、エンコーダ値の取り込みやモータの角度制御は、上述の常設やぐら上に設置した PC によって行われるシステムとなっている。

3.1.2 予備実験

開発した回転型嵌合ステーションを用いたドッキングシステムが海流方向の変化に対して適応可能であるか検証するための予備実験を行った。本実験は、常設やぐらを設置した実海域に置いて実験を行った。なお、瀬戸内市牛窓の実験海域には、前島、黒島、中ノ小島、端ノ小島があり、潮汐によって複雑な海流の変化がみられる。またこの潮汐の変化によって濁度の変化もみられる。実験条件について、Table 3 に示す。水の濁り具合については濁度 [FTU] という指標を用いており、濁りのない水の濁度を 0.0 [FTU] とし、それに対してどの程度濁っているのかを表すものである。本実験では、OPTEX 社製によって開発された TD-M500 の濁度計を用い、発光 3 次元マーカー付近の濁度計測を行った。予備実験結果を Fig. 10 に示す。ここで、Fig. 10 (A) における Fitness value は、式 (1) によって計算される適合度、(B) における Desired value は、奥行き (x 軸) 方向の目標値である x_d をそれぞれ表す。また、Fig. 10 (C) の Orientation angle は、回転型嵌合ステーションの回転角度であり、ステーションの投入時の角度を $0 [^\circ]$ とした時の回転角度を表している。回転型嵌合ステーションのプロトタイプを用いた繰り返し連続嵌合は 11 回成功し、その全体の継続時間は約 1 時間であった。その間、海流方向が変化していたことが、回転型嵌合ステーションのエンコーダ値の変化からわかる。また、 x 軸の目標値の変化を見てみると、嵌合回数が多くなるにつれて、1 回の嵌合時間が伸びている。そこで嵌合時間が伸び始めた 5 回目の嵌合について Fig. 11 に示す。5 回目の嵌合動作については、Fig. 11 (a) に示すように回転型嵌合ステーションは約 $65 [^\circ]$ ~ $90 [^\circ]$ の間で、変化している。それに対し (A) ~ (F) で表示される時刻の水中ロボットの認識画像を見てみると、ROV は常に発光 3 次元マーカーに対しておおよそ正面に位置していることがわかる。すなわち、流れの方向が変化する環境においても、嵌合可能な流れの方向に自動的に調整されている。しかしながら、900[s] 付近で y 軸方向の相対位置が嵌合条件範囲から外れてしまい、その後の y 軸位置誤差を修正するために ϵ_3 についても、比較的大きな誤差が生じてしまっている。位置姿勢誤差の全てが嵌合条件に入っている場合 ($y, z : 30[\text{mm}]$ 以下、 $\epsilon_3 : 5 [^\circ]$ 以下) のみ嵌合を行うため、この条件を満たす時間帯が狭くなり、嵌合穴から嵌合開始距離まで離脱し再嵌合する 1 回の嵌合に時間がかかったと考えられる。しかしながら、海流方向に対して嵌合穴を向けることによって、1 時間にわたるの繰り返し連続嵌合を成功していることから、回転型嵌合ステーションを用いることにより海流方向の変化に対して適応的なドッキングシステムを構築できたと考えられる。

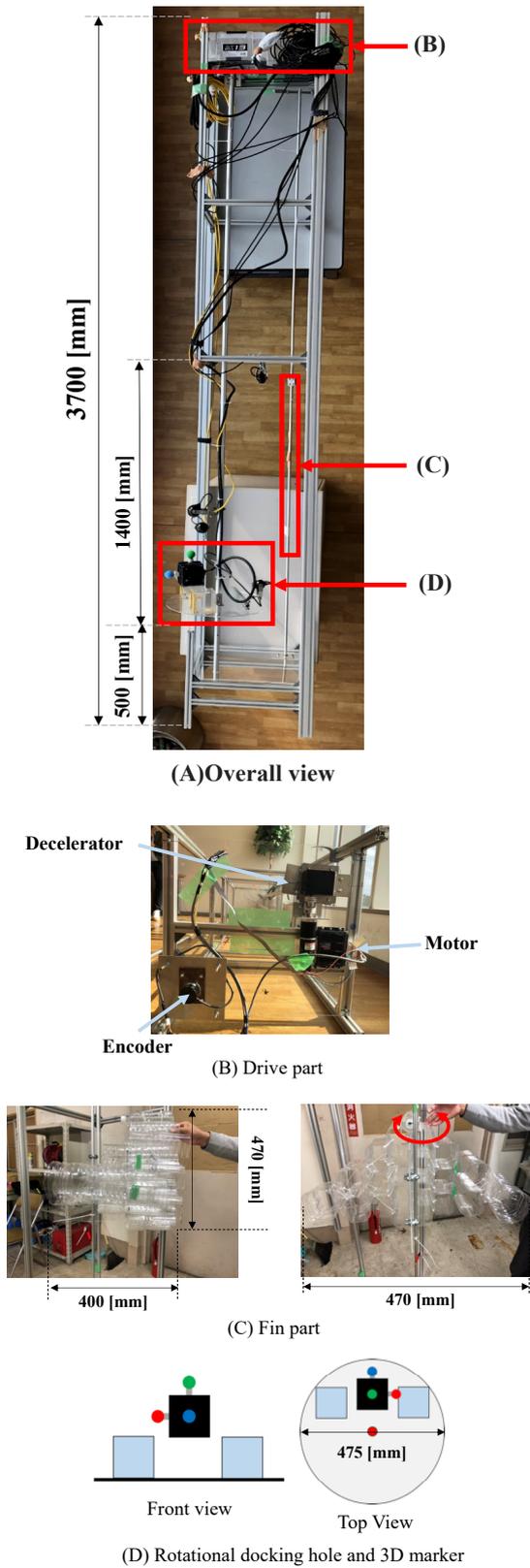


Fig. 9 The prototype of current-adaptive docking station. (A)Over view (B)Drive part (C)Fin of ocean current sensor (D)Docking table

Table 3 Experimental environment in the preliminary experiment

Date	8/21/2019
Time	20:26 ~ 21:34
Turbidity	1.2~2.2 [FTU]
Wave hight	1~4 [cm]
depth	1.6~1.7 [m]

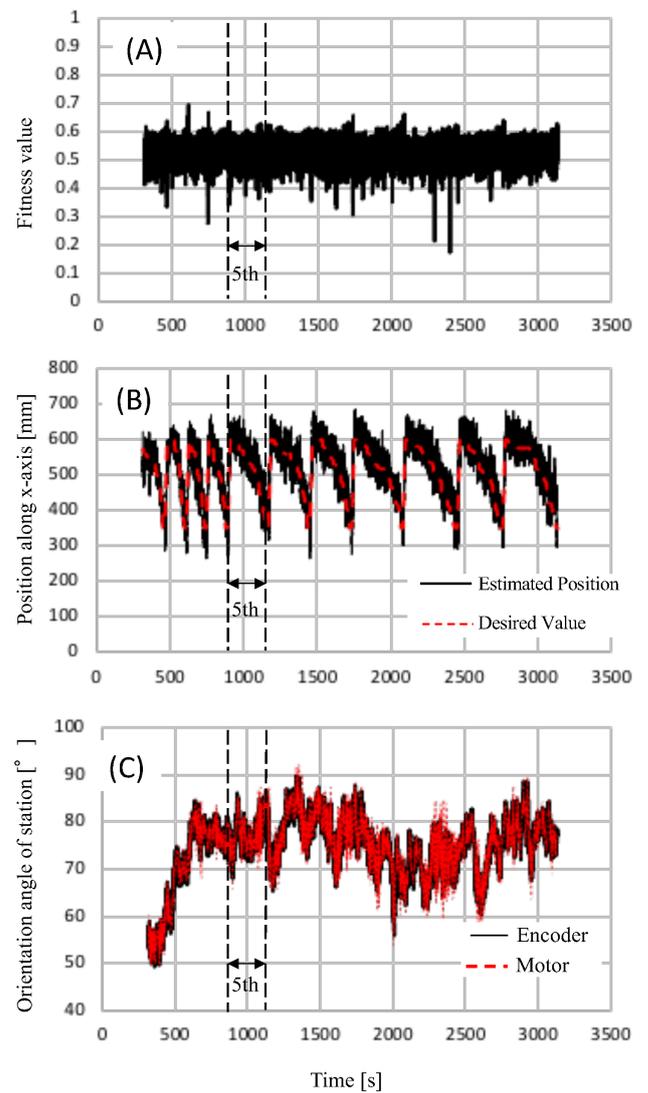


Fig. 10 Experimental result of successful repeated docking experiments using the prototype of the current-adaptive docking station. (A) Fitness value, (B) Position along x-axis direction, (C) Orientation angle of the rotational docking hole

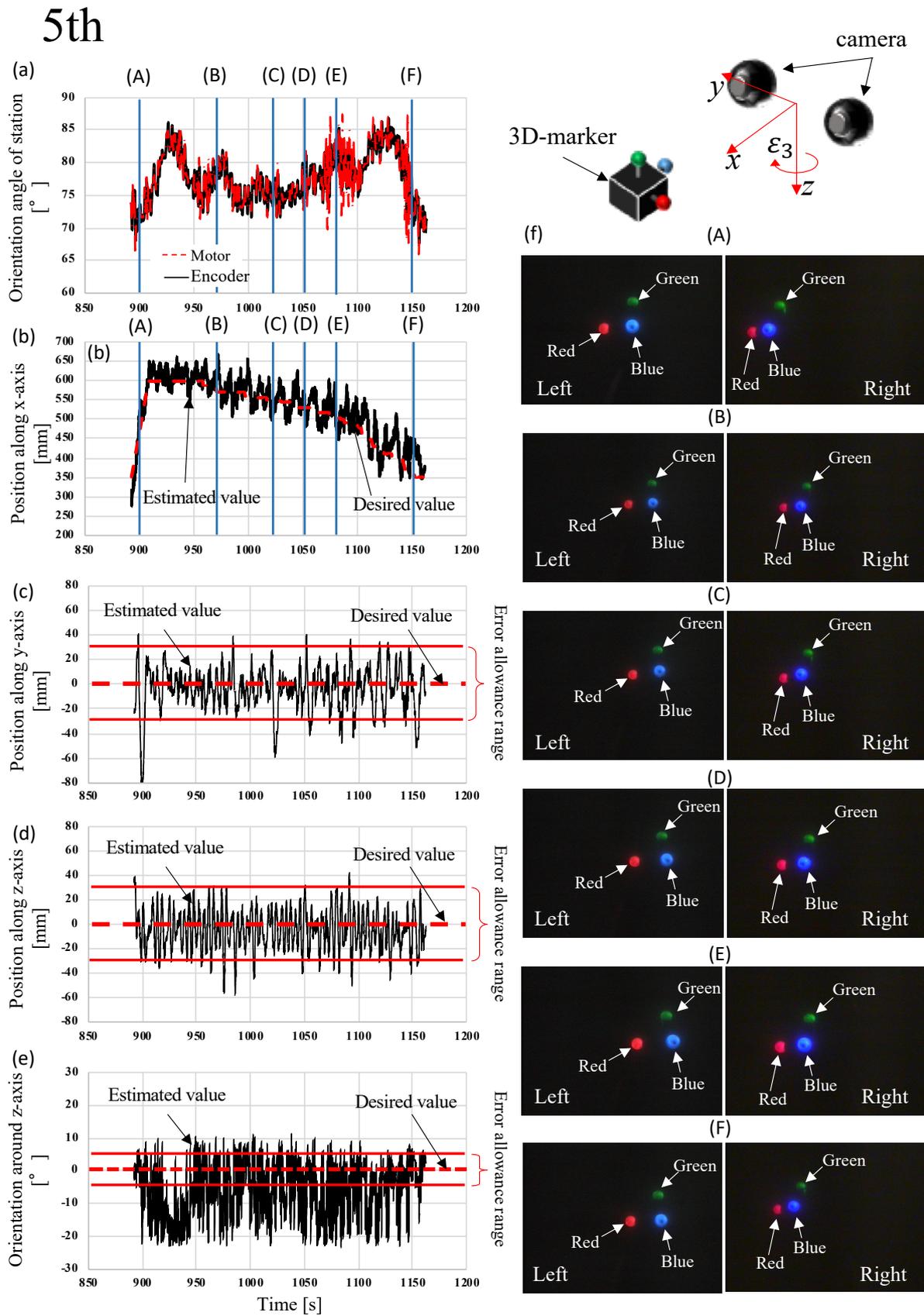


Fig. 11 Docking performance in the 5th docking. (a) Orientation angle of the station, (b) Position along x-axis, (c) Position along y-axis, (d) Position along z-axis, (e) Orientation around z-axis, (f) Left and right camera images taken from ROV's cameras

3.2 沈下回転型嵌合ステーション

3.2.1 回転型嵌合ステーションの防水化

予備実験により、海流方向の変化に対して回転型嵌合ステーションは、有効に機能することが確認された。しかしながら、開発したプロトタイプは、モーターやエンコーダなどの電子部品は海上に配置され、それらのデータ通信は、陸上の PC によって行われるシステムとなっていたため、実際の海底での運用を考慮した際に、防水性に関する問題点が存在した。そこで、本研究では、開発したプロトタイプの回転型嵌合ステーションの防水化を行うことによって、実際の海底でも運用可能な沈下回転型嵌合ステーションを開発した。開発した回転型嵌合ステーションのレイアウト及び実際の写真を Fig.12 に示す。基本的な構造は、プロトタイプと同様で、海流方向の変化を検知するフィンと嵌合穴と発光 3 次元マーカーを取り付けた回転盤から成り立っている。プロトタイプにおいて、海上に配置されていたエンコーダやモータなどの電子部品は、2つの防水ボックスに内蔵することによって、回転型嵌合ステーションの防水化を図っている。エンコーダやモータとシャフト部の軸受としては、防水化を考慮し、マグネットカップリングを用いた構成となっている。また、Fig.13 に、防水ボックスの概要を示すが、(a) に示すボックスは、3次元マーカーを回転盤を回転させるためのモータに関するボックスとなっている。(b) は、海流方向を検知するためのエンコーダが内蔵されたボックスである。プロトタイプにおいてセンサ入力や制御などは陸上に設置された PC によって行われていたが、開発を行った回転型嵌合ステーションにおいては、エンコーダが設置されているボックス内部に、マイコン (Arduino Uno) を組み込むことで、エンコーダ値の入力やモータの制御値の指令などを行うシステムとなっている。また、ボックス間の通信は、ケーブルによって行われており、ケーブルグランドによってボックス間を接続することで防水化がなされている。

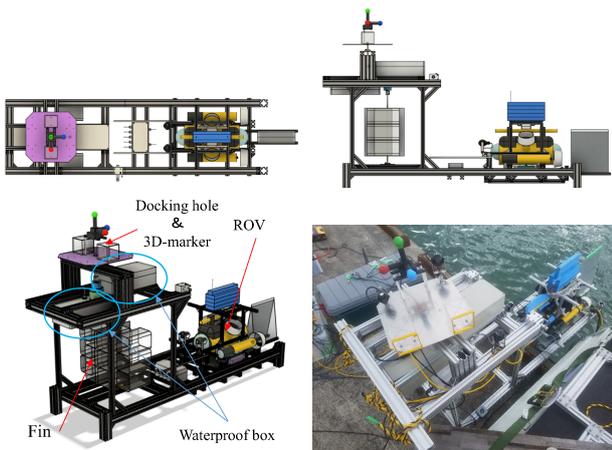
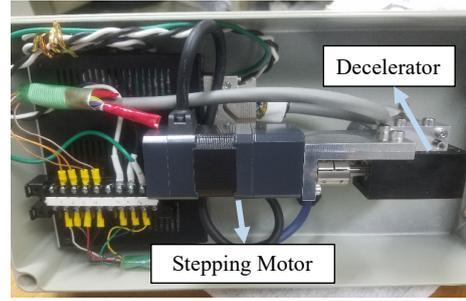
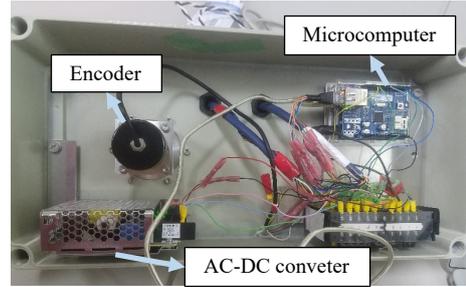


Fig. 12 Waterproofed Current-adaptive docking station



(a) Actuator



(b) Encoder and microcomputer

Fig. 13 Layout in the waterproof boxes

3.2.2 嵌合条件の緩和

予備実験において、1回の嵌合に要する時間の平均値は約 255[s] となっており、嵌合はできていたもののスムーズな動作での嵌合は実現できていなかった。本研究における嵌合システムにおいては、上述の通り嵌合条件を満たした場合に、 x 軸方向に対する目標値を減少させる。Fig.5 に示す y, z 方向と ϵ_3 の回転の嵌合条件範囲には、ROV とマーカーの距離に関係なく固定値のパラメータが用いられていた。そのため、ROV とマーカーの距離が遠い状況においても、同一の厳しい条件範囲を用いているため、海流方向の変化が頻繁なときは、ROV の x 軸方向への移動に伴い嵌合条件範囲から外れてしまい、それを修正するため時間を要しスムーズな嵌合動作ができなかったものと考えられる。そこで、本研究では、ROV とマーカー間の距離に応じて、嵌合条件範囲を変化させる関数を用いることによって、よりスムーズな嵌合を行える嵌合制御を目指した。具体的な、嵌合条件範囲に関する式を以下に記す。

$$r_i = \frac{r_s - r_f}{d_s - d_f} x - \frac{r_s d_f - r_f d_s}{d_s - d_f} \quad (7)$$

ここで、 r_i は、 i 軸における嵌合条件範囲を表し y, z 方向に関して r_y, r_z を意味する。 r_s, r_f は、それぞれ嵌合開始、終了距離における嵌合条件範囲の大きさを表している。また、 d_s と d_f は、嵌合開始、終了距離をそれぞれ表す。このように、ROV とマーカーとの距離 x に応じて嵌合範囲が決定されるものとなっており、 $|y_d - \hat{y}| < r_y$ [mm] かつ $|z_d - \hat{z}| < r_z$ [mm] かつ $|\epsilon_{3d} - \hat{\epsilon}_3| < 0.0436$ [] を満たすとき、奥行き方向の目標値を $x_d = 600 - 30t$ [mm] と時変で減少させる嵌合条件を用

いることによって、マーカー遠方では、ゆるい条件とし、近くでは正確な嵌合を行うために狭くしている。

4. 実験結果

本研究では、開発した回転型嵌合ステーションと提案した嵌合条件の緩和手法に関する有効性を検証するために、常設やぐらを設置した実海域において実験を行った。実験条件について、Table 4 に示す。Table 4 における濁度計測は、予備実験と同様の方法により行った。また、嵌合条件範囲におけるパラメータは、 $r_s = 100[\text{mm}]$, $r_f = 30[\text{mm}]$, $d_s = 600[\text{mm}]$, $d_f = 350[\text{mm}]$ とした。本実験は、Table 4 に示すとおり、16時13分から18時38分までの繰り返し連続嵌合実験を行い、148回の繰り返し連続嵌合に成功した。本稿では、予備実験とほぼ同様の光環境での性能を比較するために、日没後の光環境が0[lx]となった後の約1時間の繰り返し連続嵌合の結果をFig.14に示す。Fig.14のx軸方向の距離の推定結果より、ROVは38回嵌合終了距離に到達しており、38回の繰り返し連続嵌合に成功している。予備実験における検証では、約1時間での嵌合回数は11回であったため、よりスムーズな嵌合動作を行えていることがわかる。また、Fig.14(c)に示す嵌合ステーションの回転角度において、時間が推移していくにつれてモータ角度が遷移していることから、時事刻々と変化していく海流方向を検知して、嵌合穴を海流方向に対して適応させていることがわかる。

次に、嵌合動作がスムーズに行えたデータ (Fig.14(1)) と最も時間を要したデータ (Fig.14(2)) に関して、Fig.15 と 16 に示す。Fig.15 では、約 87 秒の間に 2 回の嵌合動作に成功しており、スムーズな嵌合動作が行えている。この間、y 軸、z 軸方向の位置に関する推定値と z 軸方向の回転角度に関する推定値は、常に嵌合条件範囲に収まっていることからスムーズな動作を行えているといえる。この理由としては、Fig.15 (a) に示すとおり、回転型嵌合ステーションは、大きくとも $5[^\circ]$ 程度しか回転しておらず、急激な海流方向の変化があまり生じていなかったため、このようなスムーズな嵌合動作が実現できていたと考えられる。

次に、Fig. 14 (2) に示す嵌合に時間を要した場合について、Fig.16 に示す。7500[s] から 7700[s] までの間に約 $40[^\circ]$ 近く回転型嵌合ステーションが回転しており、海流方向の変化が生じていることがわかる。この海流方向の変化に伴い、z 軸回転 ϵ_3 に対する誤差が生じてしまったため、誤差の修正のための制御に時間を要していることが Fig.16(e) から、確認することができる。しかしながら、この誤差を徐々に減少させていき、z 軸回転に対する誤差が嵌合条件範囲に収まって後 (7930[s] ごろ) は、目標値 x_d を減少させていき、最終的には嵌合に成功していることがわかる。また、この間、 ϵ_3 の修正に伴い、y 軸方向に対する距離に対する大きな誤差が生じているが、嵌合条件の緩和手法によって、遠方に水中ロボットが位置している際に、発光 3 次元マーカーを見失わないように嵌合条件範囲を緩和することによって、適切に目標値 x_d を減少させること

ができています。また、Fig.14(2) の嵌合終了後は、海流方向の変化が落ち着いたため、再びスムーズな嵌合動作に移行している。これらのことから、本研究において開発を行った回転型嵌合ステーションは、海流方向の変化に対して適応的な嵌合を実現できるシステムとなっていることがわかる。

Table 4 Experimental condition

Date	07/02/2020
Time	16:13 ~ 18:38
Turbidity	1.7~3.2 [FTU]
Wave height	10~15 [cm]
Depth	1.7~2.3 [m]

5. 結言

本稿では、水中ロボットの充電ステーションへの嵌合時における、海流方向の変化に対して適応的な嵌合システムとして、海流方向の下手側に嵌合穴を向ける回転型嵌合ステーションの開発を行った。具体的には、まず、回転型嵌合ステーションの基本性能を検証するために、海流方向を検知するエンコーダや嵌合穴を回転させるモータといった、電子部品が、海上に配置されたプロトタイプを開発し、実海域による実験を行い、海流外乱適応型嵌合システムの有効性を示した。次に、上述のプロトタイプの防水化を行い、実際の海底での運用を考慮した沈下型回転型嵌合ステーションを開発した。さらに、よりスムーズな嵌合動作を実現するために、嵌合条件範囲の緩和手法に関して提案した。また、実際に使える水中ロボット技術を構築するための実海域での試行と改良を行う実験場として、岡山県瀬戸内市牛窓町の岡山大学牛窓臨海実験所の専用海域に常設やぐらの建設を行った。実海域における長時間の繰り返し連続嵌合実験においては、建設した常設やぐらから回転型嵌合ステーションの投入を行い海流外乱適応型嵌合システムの有効性を示した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19H04190 の助成を受けたものです。また、本研究は日本財団「海底探査技術開発プロジェクト」の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Park, J-Y., Jun, B-H., Lee, P-M., and Oh, J.: Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera, Ocean Engineering, Vol. 36, No. 1, pp.48-61, 2009.
- 2) 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

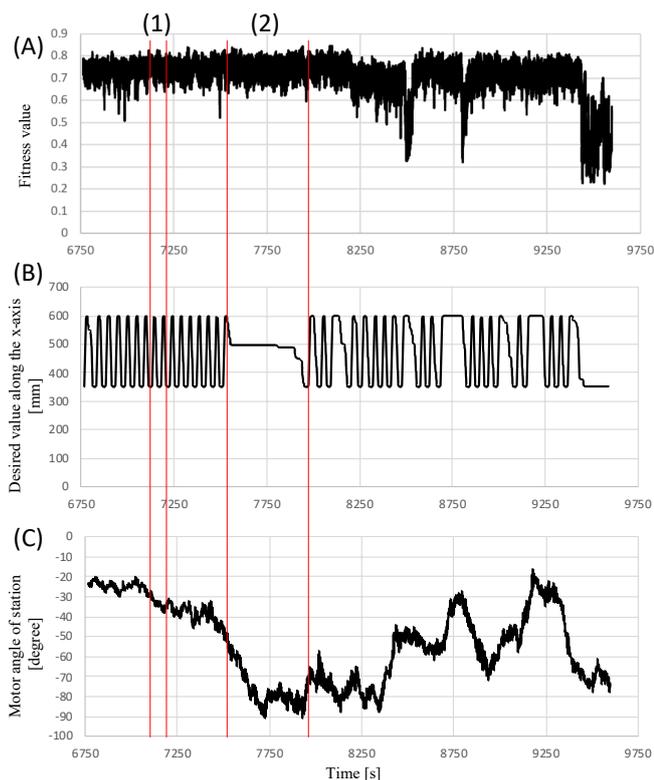


Fig. 14 Experimental result of successful repeated docking experiments using the waterproofed current-adaptive docking station. (A) Fitness value, (B) Desired position along x-axis direction, (C) Orientation angle of the rotational docking station

docking and intervention in a subsea panel, Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2279–2285, 2014.

- 3) Ishii, K., Sonoda, T., Nakanishi, R., Kawashima, S. and Hidaka, S.: Research on docking control of autonomous underwater vehicle, ROBOMECH2015 in Kyoto, 2A2-D06, 2015 (in Japanese). 石井和男, 園田隆, 中西亮汰, 河島晋, 日高翔太, 自律型水中ロボットのドッキング制御に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015(2015), 2A2-D06.
- 4) Maki, T., Sato, Y., Matsuda, T., Masuda, K., and Sakamaki, T.: Docking Method for Hovering-Type AUVs Based on Acoustic and Optical Landmarks, J. Robot. Mechatron., Vol.30, No.1, pp. 55-64, 2018.
- 5) Yazdani, A. M., Sammut, K., Yakimenko, O., and Lammas, A.: A survey of underwater docking guidance systems. Robotics and Autonomous Systems, Vol. 124, pp. 1-21, 2020.
- 6) Minami, M., Nishimura, K., Sunami, Y., Yanou, A., Cui, Y., Yamashita, M. and Ishiyama, S.: A pro-

posal of decontamination robot using 3D hand-eye-dual-cameras solid recognition and accuracy validation, Transactions of the JSME, Vol. 81, No. 831, DOI:10.1299/transjsme.15-00391, 2015 (in Japanese). 見浪護, 西村健太, 須浪唯介, 矢納陽, 崔禹, 山下学, 石山新太郎: 3次元複眼立体認識を用いた除染ロボットの提案と精度検証実験, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 831, DOI:10.1299/transjsme.15-00216, 2015.

- 7) Yanou, A., Yonemori, K., Ishiyama, S., Minami, M. and Matsuno, T.: Control characteristics of visual-servo type underwater vehicle system using three-dimensional marker for air bubble disturbance, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 52, No. 5, pp.284-291, 2016 (in Japanese). 矢納陽, 米森健太, 石山新太郎, 見浪護, 松野隆幸: 3次元マーカーを用いたビジュアルサーボ型水中ロボットの気泡外乱に対する制御特性, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 5 (2016), pp.284-291.
- 8) Myo, M., Kenta Y., Khin N. L., Akira Y. and Mamoru M.: Dual-eyes Vision-based Docking System for Autonomous Underwater Vehicle: an Approach and Experiments, Journal of Intelligent and Robotic Systems, DOI:10.1007/s10846-017-0703-6, 2017.
- 9) Lwin, K. N., Yonemori, K., Myint, M., Mukada, N., Minami, M., Yanou, A. and Matsuno, T.: Performance analyses and optimization of real-time multi-step GA for visual-servoing based underwater vehicle, IEEE/OES/MTS Int. Conference Techno-Ocean 2016, pp.519–526, 2016.
- 10) Yonemori, K., Yanou, A., Myo, M., Khin, N. L. and Minami, M.: Docking experiment of underwater vehicle by dual-eye visual servoing in sea, Transactions of the JSME, Vol. 83, No. 848, DOI:10.1299/transjsme.16-00410, 2017 (in Japanese). 米森 健太, 矢納 陽, Myo MYINT, Khin Nwe LWIN, 見浪 護: 複眼ビジュアルサーボによる水中ロボットの実海域統合実験, 日本機械学会論文集 Vol. 83, No. 848, DOI:10.1299/transjsme.16-00410, 2017.
- 11) Lwin, K. N., Mukada, M., Myint, M., Yamada, D., Yanou, A., Matsuno, T., Saitou, T., Godou, W., Sakamoto, T., and Minami, M.: Visual Docking against Bubble Noise with Three-dimensional Perception Using Dual-eye Cameras, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 45, No. 1, pp. 247-270, 2020.
- 12) Myint, M., Lwin, K.N., Mukada, N., Yamada, D., Matsuno, T., Toda, Y., Kazuhiro, S. and Minami, M.: Experimental verification of turbidity tolerance of stereo-

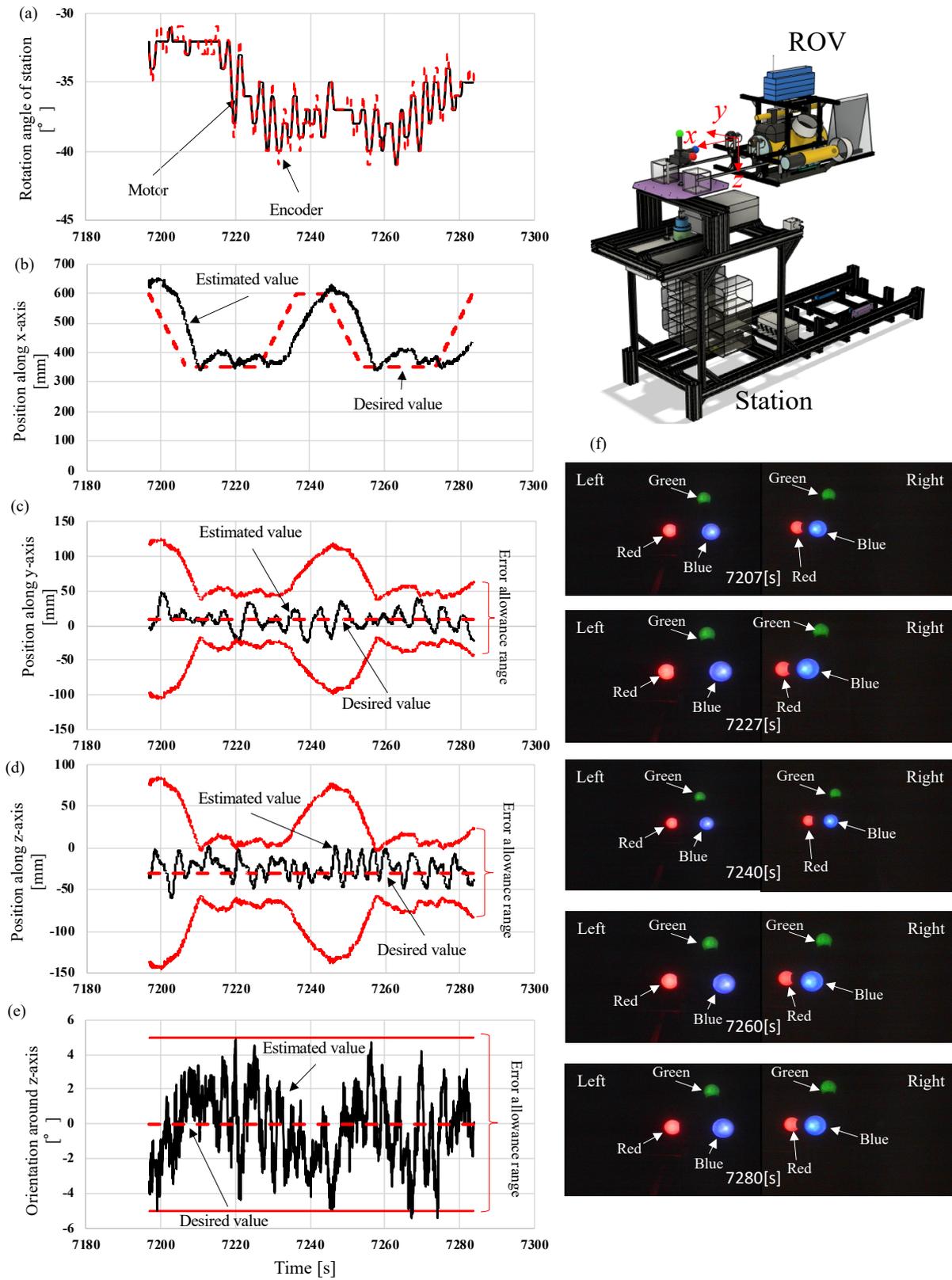


Fig. 15 Docking performance shown in Fig.14 (1). (a) Orientation angle of the station, (b) Position along x-axis, (c) Position along y-axis, (d) Position along z-axis, (e) Orientation around z-axis, (f) Left and right camera images taken from ROV's cameras

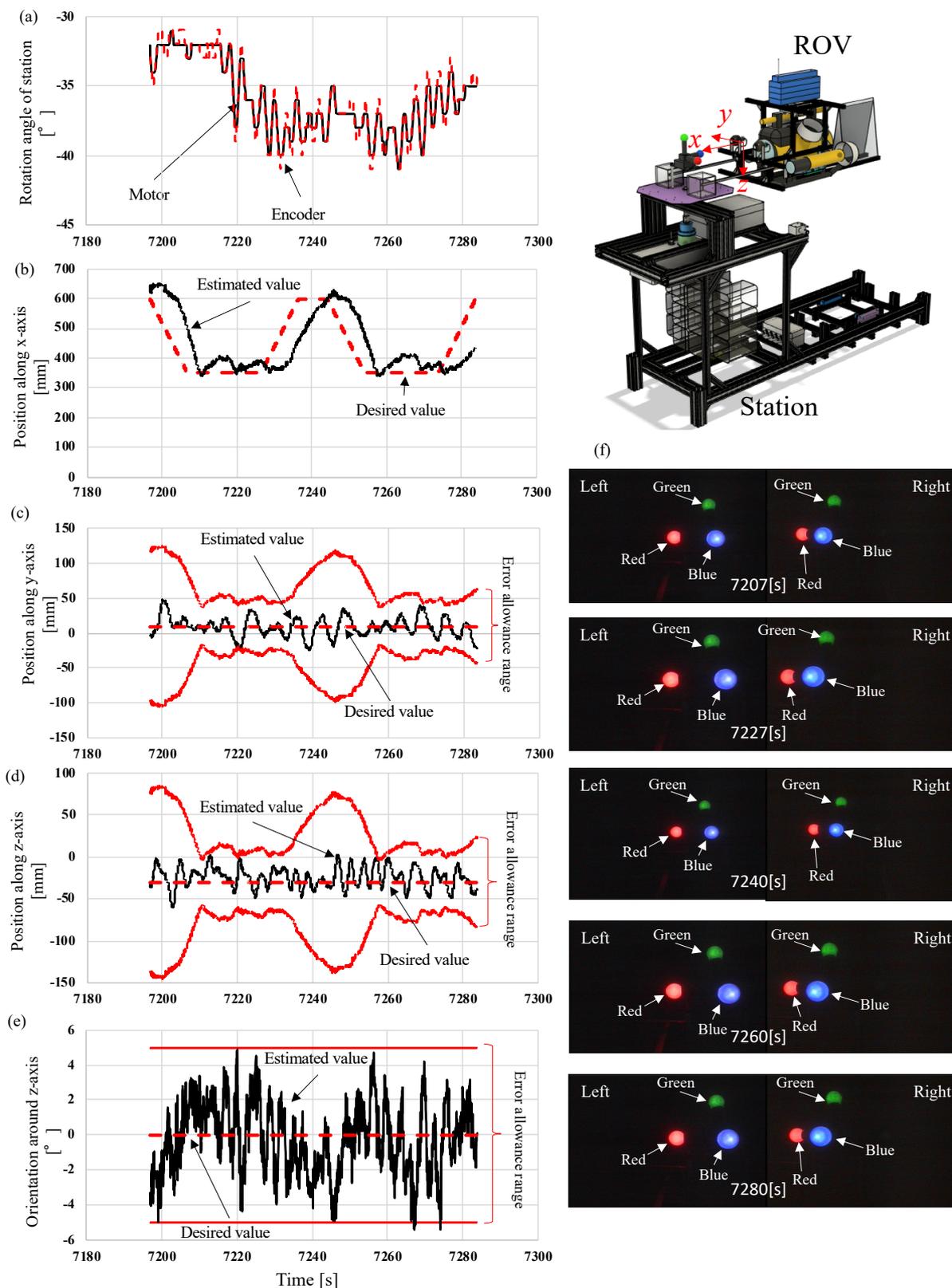


Fig. 16 Docking performance shown in Fig.14 (2). (a) Orientation angle of the station, (b) Position along x-axis, (c) Position along y-axis, (d) Position along z-axis, (e) Orientation around z-axis, (f) Left and right camera images taken from ROV's cameras

- vision-based 3D pose estimation system. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 24, pp. 756-779, 2019.
- 13) Yamashita, K., Yi, H. H., Yamada, D., Mukada, N., Lwin, K. N., Myint, M., Matsuno, T., Toda, and Y., Minami, M.: Improvement of 3D Pose Estimation Abilities by Light-Emitting-3D Marker for AUV Docking, *Proceedings of OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604867, 2018.
- 14) Lwin, K. N., Myint, M., Mukada, M., Yamada, D., Matsuno, T., Saitou, K., Godou, W., Sakamoto, and T., Minami, M.: Sea Docking by Dual-eye Pose Estimation with Optimized Genetic Algorithm Parameters, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Vol.92, Issue 1, pp.159-186, 2018.
- 15) Nakamura, S., Yamada, D., Mukada, N., Myint, M., Lwin, K. N., Matsuno, T., Toda, Y., and Minami, M.: Development of Dual-eyes Docking System for AUV with Lighting 3D Marker, *Proceedings of OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*, DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604527, 2018.