

# 水中自動給電を想定した水中ロボットの自動嵌合制御

○米森健太(岡山大学) 大西祥太(岡山大学) 見浪護(岡山大学)  
矢納陽(岡山大学) 阪幸宏(広和株式会社) 藤本勝樹(広和株式会社)

## 1. 緒言

今日、海底探索等様々な水中作業のために多くのロボットが研究・開発されている。さらに自律型水中ロボットの研究は今なお発展途上の段階にあるとともに、今後重要であることが言える[1]。海底探索の目的はメタンハイドレードなどの海底資源の発見である。海底資源は海底火山など地形の特異点に存在しているためロボットを用いて海底の地形をマッピングし埋蔵地の特定を行っている。マッピングを効率的に行うためにはロボットが水中で長時間活動できることが必要不可欠である。

現在、水中ロボットの電力供給方法には有線での供給とバッテリー方式が存在するがそれぞれ問題点が存在する。有線の場合ケーブルが波などで消耗しやすく、また深海に潜るためケーブル自体がかなりの長さになり取り回しに苦労する。一方バッテリーの場合、海中の活動時間が制限され、充電のため船舶と海底を往復しなければならない。さらに、作業場所と母船の往復により作業効率が大幅に減少することも十分に有り得る。

これらの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バッテリー容量が少なくなるとロボットが自動で帰還・充電するといったシステムの研究が行われている。これを実現するためには離れた作業場所から給電設備へ自動で帰還するシステム、さらに水中の給電設備への嵌合が要求される。石井ら(九州工業大学)[2]は超音波および単眼カメラによる、水中給電へ向けたドッキング制御を $\pm 100[\text{mm}]$ の距離誤差で実現している。本研究の目的はロボットに搭載された複眼カメラによって給電設備を認識し自動で嵌合を行うロボットシステムの構築である。本報では、赤・青・緑の三原色球(直径 $40[\text{mm}]$ )から構成される物体に対してビジュアルサーボをおこなうことで、水中給電を仮定した嵌合実験を行った。

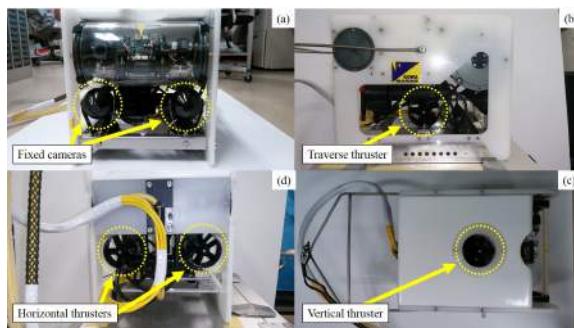


図 1 ROV(Remotely Operated Vehicle)

## 2. 水中 TV カメラロボット ROV

水中実験で使用した遠隔操作型水中ロボット ROV(Remotely Operated Vehicle)(広和(株)製、最大水深 50m)を図 1 に示す。本 ROV は、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 1.5[lx]、ズーム光学 10 倍)と、制御用双眼視覚センサとして前方 2 台および下方 2 台にカメラ(撮像素子 CCD、画素数 38 万画素、信号方式 NTSC、最低被写体照度 0.8[lx]、ズームなし)を搭載している。本実験では対象物の立体認識を行うため、前方 2 台のカメラを使用した。水中動力系では、水平スラスター 2 基(推力 9.8[N])、垂直スラスター 1 基(推力 4.9[N])、横スラスター 1 基(推力 4.9[N])を搭載しており、前進時の最大推力は 9.8[N]である。また、照度確保のため LED ライト(5.8W)を 2 基搭載している。

## 3. 3 次元位置・姿勢認識

実験には、視覚センサとしてロボット前方に搭載された 2 基の固定カメラを用いる。両眼カメラから取得した画像を PC に転送し、1-Step GA[3]と Model-based Matching 法[4]を組み合わせて対象物との相対的位置・姿勢を認識している。一般的に、GA(遺伝的アルゴリズム)を用いた最適解探索では、GA が最適解を決定する際ある程度の時間を要するため、最適解が得られた時には周囲の環境が大きく変化している可能性が高い。そこで本研究では 1-Step GA を採用した。1-Step GA とは、入力された画像に対し、ビデオレート(33[ms])で次の画像が入力されるまでの間だけ GA 遺伝子の進化を進め、その時点で最大適合度を与える遺伝子情報を最新の対象物の位置・姿勢として出力する方法で、これにより実時間での認識を可能としている。また、このとき評価に使用する適合度とは、Model-based Matching

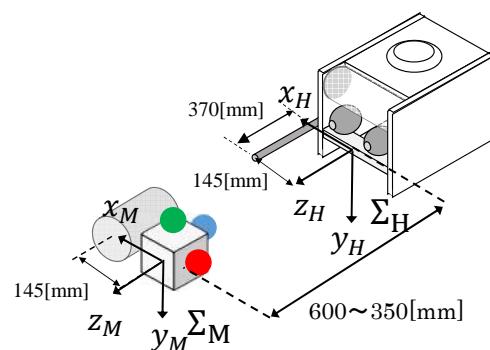


図 2 実験座標系

法で定義される対象物とモデルとの一致度合いを示す適合度関数から得られる値である。これにより、本実験で採用する認識システムは、対象物の3次元位置・姿勢の実時間認識を可能としている。

#### 4. 制御コントローラ

3章の認識手法に基づいた認識結果から、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( $x_d[\text{mm}]$ ,  $y_d[\text{mm}]$ ,  $z_d[\text{mm}]$ ,  $\epsilon_{2d}[\text{deg}]$ )を満たすようにビジュアルサーボを行う。図2に本研究の実験における座標系を示す。また、 $x[\text{mm}]$ ,  $y[\text{mm}]$ ,  $z[\text{mm}]$ ,  $\epsilon_2[\text{deg}]$ をGAで認識した水中マーカーの位置・姿勢とおり、相対的目標位置・姿勢に水中ロボットを制御するため、以下のP制御から計算される指令電圧値を各スラスターへ与える。

$$\text{奥行き方向: } v_1 = k_{p1}(z_d - z) + 2.5 \quad (1)$$

$$\text{鉛直軸回転: } v_2 = k_{p2}(\epsilon_{2d} - \epsilon_2) + 2.5 \quad (2)$$

$$\text{鉛直方向: } v_3 = k_{p3}(y_d - y) + 2.5 \quad (3)$$

右水平方向:  $x_d - x < -5$  (オン/オフ制御の条件式)

左水平方向:  $5 < x_d - x$  (オン/オフ制御の条件式)

ただし、x軸方向はON/OFF制御を採用しており、上ではその条件式を記述している。またx軸およびz軸まわりの姿勢に関しては、ロボットの移動によらず微小であるため、制御の対象として扱わない。

#### 5. 水中嵌合実験

Fig.2に示すように、ロボット右側面に取り付けた水中電用嵌合装置と見立てたアルミ棒(8[mm] × 6[mm])をマーカーの左に設置された給電設備に見立てた嵌合穴(直径70[mm], アクリル円筒)に嵌合させる実験を行った。ロボットと対象物は一定の位置・姿勢を保つつつ徐々に距離を縮めることによって嵌合を果たす。以下にロボットの目標位置・姿勢を示す。式(4)は実験開始時の目標値であり、式(5)は嵌合完了時の目標値である。

$$\begin{cases} x_d =^H x_M = 0 \\ y_d =^H y_M = -67 \\ z_d =^H z_M = 600 \\ \epsilon_{2d} =^H \epsilon_{2M} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

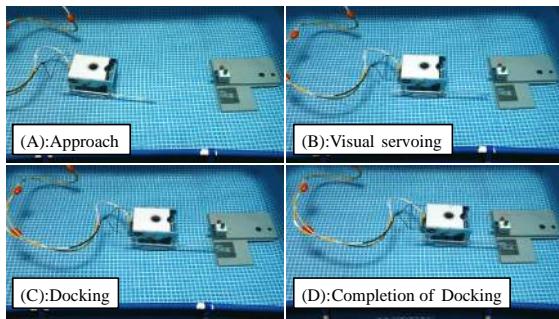


図3 嵌合実験時の状態遷移

$$\begin{cases} x_d =^H x_M = 0 \\ y_d =^H y_M = -67 \\ z_d =^H z_M = 350 \\ \epsilon_{2d} =^H \epsilon_{2M} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

嵌合を行う上で、ロボットに図3に示す4つの動作状態を定義する。(A)Approach: 給電設備への接近、(B)Visual Servoing: 対象物への正対、(C)Interdigitating: 嵌合、(D)Completion Interdigitating: 嵌合完了である。

##### (A) Approach: 給電設備への接近

適合度が低く(Fitness Value:0.2~0.6)ロボットが対象物体を発見していない状態である。この動作では対象物を発見するまで緩やかな速度で水中ロボットを前進させている。対象物を発見するとVisual Servoing状態に移行する。

##### (B) Visual Servoing: 対象物への正対

ロボットが対象物を発見し、目標とする位置・姿勢にレギュレートすることで対象物に対して正対を試みる状態である。ロボットが対象物の正面に移動し、 $x$ ,  $y$ の誤差が目標値より±20[mm]以内の状態が165[ms]連続するとInterdigitating状態に移行する。

##### (C) Docking: 嵌合

ロボットが嵌合穴に対して嵌合動作を行っている状態である。奥行きの目標値 $z_d$ が変化することでロボットが30[mm/s]で $z$ 方向に前進し( $z_d$ が毎秒30[mm]で減少し)嵌合対象に対して嵌合させる。 $z_d$ が最終値:350となることで嵌合を完了する位置にロボットが移動する。ただしこの条件を満たさなくなったら場合再び(B)Visual Servoing状態に戻る。

##### (D) Completion of Docking: 嵌合完了

嵌合が完了した状態である。この状態でもVisual Servoing状態と同様に対象物に対して一定の位置・姿勢を保つように制御がなされる。

#### 6. 実験結果

水中嵌合実験結果を図4および図5に示す。図4は対象物の認識度合いを表現する適合度の時間変化を表す。図5は嵌合実験時の水中ロボットの対象物に対する相対的位置・姿勢と推力を表す。図5(a)(b)は、 $x$ 軸方向の認識位置および推力、(c)(d)は、 $y$ 軸方向の認識位置および推力、(e)(f)は、 $z$ 軸方向の認識位置および推力、(g)(h)は、 $y$ 軸周りの認識姿勢およびトルクのグラフである。さらに、図6では、位置・姿勢の目標値と認識値の誤差を表すグラフである。

図4から見て取れるように実験開始から約10秒間、適合度は0.2程度を示している。このとき水中ロボットは対象物を発見できていないと判断し、(A)Approaching状態を維持している。その後適合度は上昇し、0.6以上の値を示すと(B)Visual Servoing状態へ移行する。適

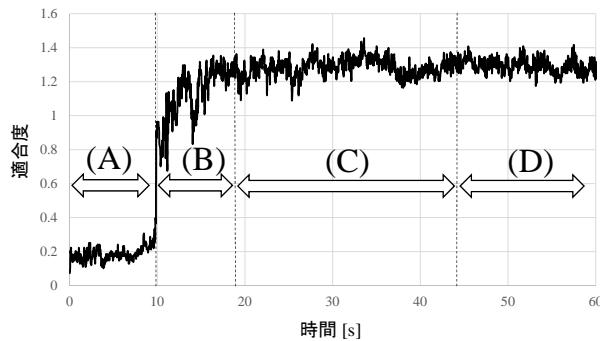


図 4 適合度の時間変化

合度は (B) 状態から実験終了まで 1.2 付近で安定している。続いて位置・姿勢の制御結果について述べる(図 5)。(B)Visual Servoing 状態に移行した直後は、目標値と認識位置・姿勢の誤差が大きくなっていることが確認できる。しかし、認識時間が経過すると位置・姿勢の誤差はある程度小さくなつた。実験開始から約 10[s] で (B)Visual Servoing 状態へ移行し、対象物との相対的目標位置・姿勢に追従を行う。さらに 10[s] 程度経過した時点で (C)Docking 状態へ移行し、奥行き (z 軸) 方向の目標値が時変で与えられる。これはロボットが対象物の正面へ移動したことを意味する。奥行き方向の時変目標が与えられた際にも、目標値に対してロボットが追従を続けていることが確認できる。最終的に、実験開始から約 45[s] で (D)Completion of Docking 状態へ移行し、嵌合が完了した。(D)Completion of Docking 状態では各軸方向の誤差は図 6 からわかるように  $\pm 25[\text{mm}]$  以内、y 軸周り姿勢については誤差  $\pm 10[\text{deg}]$  以内で制御を実現した。

## 7. 結言

水中ロボットの海底での長時間運用を目的として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水中自動給電を想定した水中嵌合実験を行い、誤差  $\pm 25[\text{mm}]$  以内での制御を実現した。

今後は、制御性能の向上をはかるとともに、給電方法の検討を行っていく。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 石井和男, 園田隆, 中西亮汰, 河島晋, 日高翔太, 自立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.
- [3] W. Song, M. Minami, S. Aoyagi, "On-line Stable Evolutionary Recognition Based on Unit Quaternion Representation by Motion-Feedforward Compensation", International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences and Image Processing (IC-MED) Vol. 2, No. 2, pp 127-139, 2007.
- [4] W.Sng, M.Minami, Y.Mae and S.Aoyagi, " On-line Evolutionary Head Pose Measurement by Feedforward Stereo Model Matching", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA), pp.4394-4400, 2007.

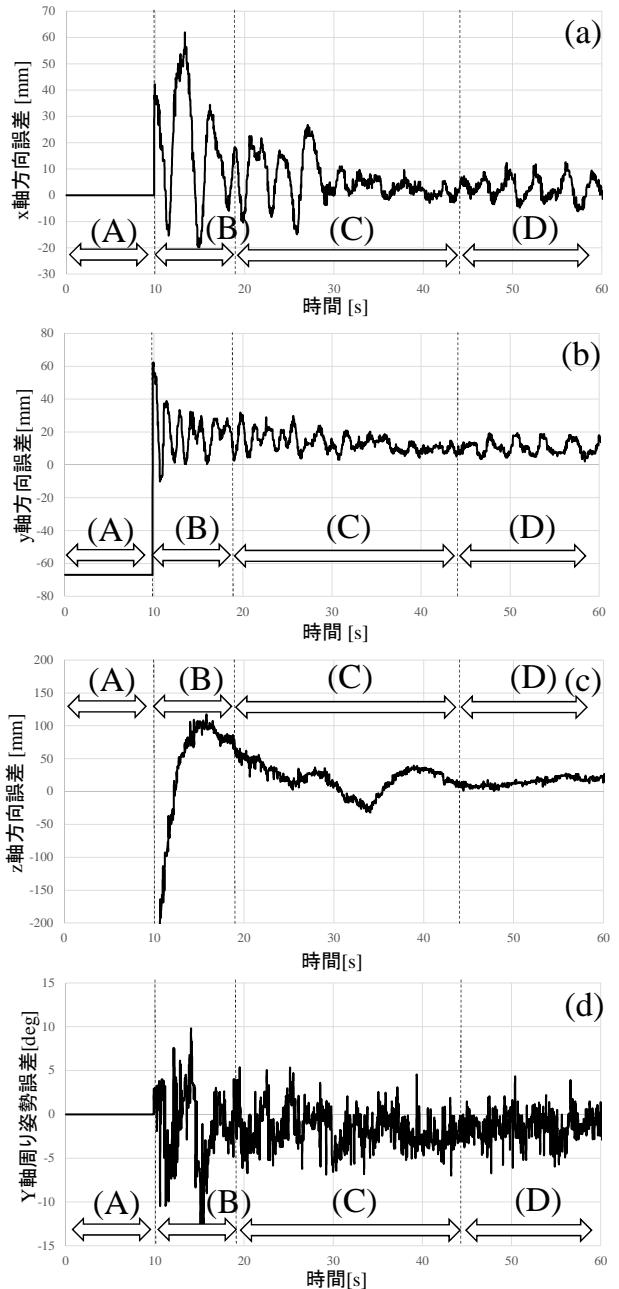


図 6 水中嵌合実験における目標値と認識値の位置・姿勢誤差

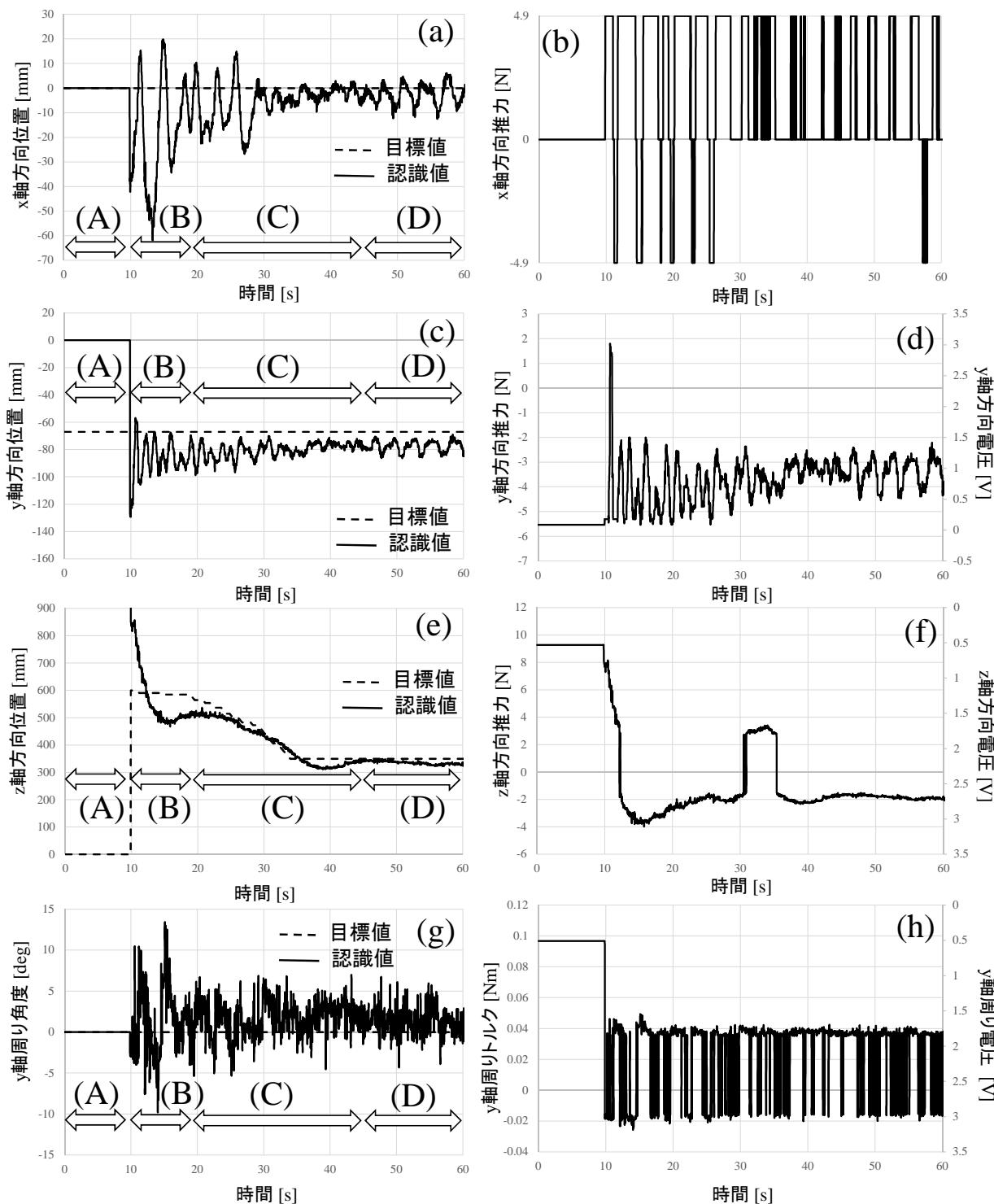


図 5 水中嵌合実験における位置姿勢制御結果