

日本機械学会論文集 Transactions of the JSME (in Japanese)

複眼立体認識を用いた水中嵌合実験 (AUV を用いた制御機能検証)

松野 隆幸^{*1}, 西田 祐也^{*2}, 米森 健太^{*3}, 李 想^{*3}, 向田 直樹^{*3}, 加藤 直輝^{*3} Myo MYINT^{*3}, 山田 大喜^{*3}, Nwe Lwin KHIN^{*3}, 見浪 護^{*1}

Docking experiment of underwater vehicle by dual-eye visual servoing (Control performance verification with autonomous underwater vehicle)

Takayuki MATSUNO^{*1}, Yuya NISHIDA^{*2}, Kenta YONEMORI^{*3}, Xiang LI^{*3}, Naoki MUKADA^{*3}, Naoki KATO^{*3}, Myo MYINT^{*3}, Daiki YAMADA^{*3}, Nwe Lwin KHIN^{*3} and Mamoru MINAMI^{*1}, ^{*1,*3}Graduate school of natural science and technology Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 760-8530, Japan ^{*2}Kyushu Institute of Technology, 2-4 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka 808-0196, Japan

Received: 30 May 2017; Revised: 4 September 2017; Accepted: 4 January 2018

Abstract

A variety of robots has been studied and developed for undersea exploration. One of the applications for undersea exploration is mining of undersea resources such as methane hydrate and rare metal by Autonomous Underwater Vehicle (AUV). To extend active duration time of the robot in the sea, a system through which the AUVs recharge autonomously batteries is a key technology. Our reseach group has confirmed in a pool environment the dual-eye visual servoing system made a pole attached to the vehicle dock into a hole. This experiment simulates situation where the vehicle approaches recharging station under deep sea. But previous studies were conducted with ROV (Remotely Operated Vehicle) that is controlled by remote computer instead of human operator. In those experiments, power cables affected performance of control accuracy. Therefore the performance of visual feedback with AUV named Tuna-Sand2 that is compeletely indepent from cables or wires and has a general structure of modernized AUV system, has been verified to confirm the practicability of dual-eye dockig system.

Keywords : Visual servoing, Genetic algorithm, AUV

1. 緒 言

日本が有する領海は広大であり,その海底資源を有効活用する機運が高まっている.海底資源としては,マンガンなどのレアアースや希少な海底生物が挙げられる.その海底資源を探索,収集するのに有人調査船では時間的, 費用的コストが莫大になるため,無人探査船 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)が有効である.現在 AUV は (1) 母船で目的地付近まで運搬して,(2)探索時には母船から切り離して潜水し,資源探索などの作業をおこない (3) バッテリーの電力がなくなるまでに再浮上し,これを母船が回収するとい手順で運用されている.この運用方 法の問題点は当然のことながらバッテリーの容量に制限があることである.バッテリーで供給される電力が海底 まで移動し,再び海上に浮上するために割かれるために,深海での作業時間が減少し作業効率が落ちることが問 題となる.これらの問題を解決する方法として,給電設備を海底に設置しAUV が自動で充電,資源探索を繰り返

No.17-00242 DOI:10.1299/transjsme.17-00242], J-STAGE Advance Publication date : 19 January, 2018

^{*1} 正員, 岡山大学(〒760-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

^{*2} 正員,九州工業大学(〒808-0196 福岡県北九州市若松区ひびきの2-4)

^{*3} 岡山大学

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

す自律型資源探索がある.そこで重要となるのが充電設備とAUV を接続するドッキング作業である.一般に舟が 岸に停泊する場合にはロープで陸から引っ張ることからわかるように,水上水中の移動体は定位置に自らを移動 し,固定するのが難しい.その理由は水流による移動体の位置精度の影響であったり,水中用スラスターの特性が 微小な移動には不向きであったりすることが挙げられる.それに対してAUVの固定,ドッキングステーションへ の接続方法として(1)AUV をファネル構造のドッキング装置に直進させ捕獲する方法(Hobson et al., 2007),(2) ホ バリングしている AUV をマニピュレータを用いてドッキングステーションまで移動させる方法(Palomeras et al., 2014a, Palomeras et al., 2014b),(3)AUV 自律航行機能を用いてドッキングステーションに接続する方法が提案され ている.本研究では(3)の方法を採用する,この方法が設備コストが最も抑制でき,他の(1)(2)の方法にも応用で きるためである.

本研究グループは,ステレオカメラにより取得した視覚情報を用いた3次元位置・姿勢認識によって,水中ロ ボットの制御を実現している(矢納他,2014,2016).提案した実時間遺伝的認識手法は,三つのカラー球からな る3Dマーカーを用意し,その位置・姿勢を遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm.以下GA)によってオン 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3Dマーカーの位 置・姿勢として利用する方法である.他手法と異なる点は,(1)3Dマーカーを複眼で認識している点(Song et al., 2010)と,(2)動画像中の画像とモデルとの相関をGAの進化における適合度として用いることで対象物の位置・ 姿勢を実時間で計測している点(Suzuki and Minami, 2005, Nishimura et al., 2013)である.さらに,動画像中の GAの収束性能に関する検証(Yu et al., 2013)も行っている.

AUV を用いたドッキング制御に関する研究は広く行われており,視覚情報を用いたアプローチも多く存在する. その中で,単眼カメラを用いた方法(Park et al., 2009,石井他, 2015)と,ステレオカメラを用いた方法(Ura et al., 2005, Palomeras et al., 2014a, 2014b)に大別される.石井らは,超音波および単眼カメラを用いて水中給電へ向けたドッキングを制御誤差±100 mm の精度で実現している(石井他, 2015).単眼カメラのメリットは構成が単純であること,計算時間が短いなど,デメリットはカメラの視線方向の距離計測精度がよくないことである.また,ステレオカメラを用いた研究(Palomeras et al., 2014a, 2014b)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,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,ステレオカメラが搭載されているものの,そのうちの一つがパネルの位置・姿勢を推定するために用いられており,二つ目のカメラは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に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.複眼カメラのメリットは空間認識が単眼より優れていること,デメリットは単眼より構成が複雑になり,画像処理時間が長くなることである.

複眼カメラの2次元画像情報から対象物の3次元位置・姿勢を計測する情報処理では、困難な問題が発生する. すなわち3次元空間内の物体上のある点が複眼カメラ画像の中のどの点に対応しているかという「対応点の同一 性」の問題である.エピポーラ幾何を用いて複眼カメラ画像内の対応点を探す方法が一般的(松山他,1998),(徐, 辻,1998)であるが、対応点の同一性が満たされない場合、対象物の3次元位置・姿勢情報は誤差を含む(中原他, 2001),(小野他,2013)ことになる.しかしながら複眼を用いた3次元画像認識は、左右両眼の視差を空間認識に利用 できる単眼には無いメリットを持っている.複眼の視差を利用するメリットを持ちつつ、対応点問題を回避する方 法を考える必要がある.

この点について著者は、3次元立体モデルを空間内に設定し、そのモデルの左右カメラ画像への写像と実際の対象物の左右カメラへの写像の相関を最大化する3次元対象物の位置・姿勢を求める問題を時変多峰性分布関数の最適化問題として取り扱い、Real-time Multi-step GA (RM-GA) という手法を用いて解くことを提案した (Lwin et al., 2016). 研究の初期はビデオレートの 33ms の間に1回ないし数回の GA の進化計算を行うことができなかったが、最近は計算機の性能の向上で9回進化させることができるようになった. さらに実時間3次元空間認識を用いた制御手法をThree Dimensional Move on Sensing(3D-MoS)(見浪他, 2015) と呼び研究を続けている. 提案する 3D-MoS システムは、3次元形状マーカーモデル上に点群を配置しこの3次元点群を左右カメラ画像面に射影し、画面上に射影されている実際の3次元マーカーとの相関に基づき対象物の認識を行うために、複眼カメラシステムの上記の「対応点の同一性」の問題は発生しない. この特徴は、従来の立体画像認識((徐, 辻, 2005)、(松山他, 1998))に記載されているような2次元複眼画像から3次元情報を復元する方法ではなく、対象物の3次元モデルを2次元の複眼画



Fig. 1 AUV named Tuna-Sand2 that equips dual-eye camera, docking pole, and a computer called "GA-PC" used for position estimation, is shown, which has 6 thrusters and IMU sensors.

像面へ射影(順方向射影) しその射影モデルと画像内の認識対象物の画像情報の相関を用いて3次元モデルの位置・ 姿勢を求める(宋他,2010; 宋,見浪,2010) ことから得られる利点である.RM-GA 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2つの動画像を利用することで,3DマーカーとROV との相対的位置・姿勢を実 時間で計測できる.さらにRM-GA を組み込んだ3D-MoS によって水中自動給電を想定した嵌合実験に大学内の 簡易プールで成功し(矢納他,2015, Myo et al., 2015),海中による実験(米森他,2017)にも成功した.しかしこれ らに用いた水中ロボットは ROV であり,嵌合直前まで人間操作による介在があった.AUV は母船と接続するた めのケーブルがないため潮力などの外乱の影響を ROV より受けにくい.一方で AUV は自律移動をおこなうので, 地上操作者の意思決定や操縦を受けることができない.このため,マルチタスクを同時にしかも同調して行う必 要があり,分散制御系を構成する必要がある.このとき分散された CPU はそれぞれの通信をイーサネットを介し て行う.今回の実験装置では通信周期がT=100ms と設定されている.この条件は既報の(Yanou 2015, Yonemori 2017)の T=33ms より遅いため,安定化可能かどうかについて検証する必要がある.そこで,本嵌合システムの 完全自律型 AUV での有効性を確認するため,AUV (Tuna-Sand2:東京大学保有)を用いた嵌合棒を嵌合させる実 験を行った.本報では,この実験の結果を水中ロボットの実時間3次元位置・姿勢認識の時系列データを基に報 告する.

2. AUV 嵌合実験

2·1 実験環境

実験に用いた AUV を図1に示す.本 AUV は Tuna-Sand2 という船名であり IMU センサーと6個のスラスター またそれらを統合制御するコンピュータ, バッテリーを有しており実海域での自律航行が可能である.本実験のた めにこの Tuna-Sand2 に LED 付きカメラを2 台取り付けた.また,カメラ信号を処理し Tuna-Sand2 に動作指令を 送る PC を容器に入れて取り付けた,この PC を本論文では GA-PC 呼ぶ.図2にカメラと GA-PC が入った容器を 示す.本論文の自動嵌合実験は東京大学生産技術研究所のプールにて行った.プールに図3に示す給電装置を模 したドッキングステーションを設置した.ドッキングステーションは図4にあるように3D マーカーとドッキング ホールを有する.また,実験記録用と実験モニタリング用に水中カメラが取り付けられている.ドッキングホール に Tuna-Sand2 のドッキングポールを嵌合できれば給電装置と AUV が機械的に結合可能な状態であるので,自動給 電可能な状態になる.図5 にドッキングステーションの 3D マーカーとドッキングホール, Tuna-Sand2 のドッキン グポールの相対位置を示す.また,図6 に Tuna-Sand2 の座標系を示す,ここで Σ_H は Tuna-Sand2 が有する座標系 で原点は2 つのカメラの中央にあり, Σ_M は 3D マーカーが有する座標系である.嵌合開始となる Visual Servo 時の 制御目標位置は Σ_H と Σ_M の各軸方向が一致した状態で Σ_H から見た Σ_M の原点が x_H =600mm, y_H =-75mm, z_H =0mm の位置である.これらを x_H^*, y_H^*, z_H^* とする.



Fig. 2 Tuna-Sand2 and container for personal computer which captures image of both camera, estimates pose of maker and commands movement of AUV.



Fig. 3 Appearance of docking station



Fig. 4 Docking station structure which includes 3D maker, a docking hole, cameras to observe experimental conditions.

2.2 Real-time Multi-step GA

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(Suzuki and Minami, 2005).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 [DOI: 10.1299/transjsme.17-00242] © 2018 The Japan Society of Mechanical Engineers 4



Fig. 5 Layout of docking experiment (top view).



Fig. 6 Coordinate system of Tuna-Sand2



Fig. 7 Target and model object in 2D image: solid three spheres are ones of real target and dotted spheres are of model

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.以前の研究では,ビデオレートであ る 33 ms 毎に入力される動画像を,次の画像が入力されるまでの時間でGAによる Model-based Matching を行っ ていた.さらに動画像列の中でGAの遺伝子を進化させて画像列に写っている対象物に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を用いていた.この認識法を「Real-time Multi-step GA」(以下,



RM-GA と表記)と呼んでいる (Lwin et al., 2016). RM-GA では遺伝子に与えている6つの情報(位置・姿勢)を, それぞれ12bit で定義している.図8右側のフローチャートに示すように,ビデオレート(33 ms)で画像入力を 繰り返し,新たな入力画像に対する認識の際,直前の優秀な遺伝子(適合度が高い値を示す遺伝子)が引き継がれ るエリート保存戦略を採用している.このため,動画像列の中で3D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.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)の値を算出しこれをもとに適合度関数を計算している (Lwin et al., 2016).

表色系 Hue を基にした評価関数 F を式 (1) から (4) に示す.また,図7に赤緑青の球体マーカーでのモデルと実際の球体の関係を示す.

$$F_R(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^3 \left[\sum_{IR_{ri} \in S_{R, in, k}} \delta\{h(IR_{ri}), b_k, \Delta h\} - \sum_{IR_{ri} \in S_{R, out, k}} \delta\{h(IR_{ri}), b_k, \Delta h\} \right]$$
(1)

$$F_L(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{3} \left[\sum_{IL_{ri} \in S_{L,in,k}} \delta\{h(IL_{ri}), b_k, \Delta h\} - \sum_{IL_{ri} \in S_{L,out,k}} \delta\{h(IL_{ri}), b_k, \Delta h\} \right]$$
(2)

$$F(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = \{F_R(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) + F_L(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)\}/2$$
(3)

$$\delta(h_t, h_b, \Delta h) = \begin{cases} 1 & if \quad |h_t - h_b| < \Delta h \\ 0 & else \end{cases}$$
(4)

評価関数 F は対象物体の位置 (x,y,z) とクォータニオン (Horn, 1987) で表現された姿勢角 ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) を与えた場合に左右カメラにおける評価関数 F_R, F_L の平均値から算出される.ここでは右カメラの評価関数 F_R を基に説明をおこなう.式(1)の右辺大かっこ内の第1項の総和 Σ の条件 $IR_{ri} \in S_{R,in,k}$ は「点 IR_{ri} が球体表面の領域 $S_{R,in,k}$ の要素である場合」という意味を表している.一方,第2項の条件は $IR_{ri} \in S_{R,out,k}$ 「点 IR_{ri} が球体の外側の領域 $S_{R,out,k}$ の要素である場合」という意味を表している.式(1)の右辺大かっこ内の第1項について考える.対象物体の3次元空間において与える上記の位置姿勢6変数に対して3次元空間から写像から得られる球体モデル上の各点 IR_{ri} の Hue 値: b_k , $\{k = 1(\pi), 2(k), 3(\pi)\}$ と,画像上のピクセル値から算出される Hue 値: $h(IR_{ri})$ の差の絶対値が Δh 内に収まっている場合は,式(4)にあるように δ に1が与えられ,そうでない場合は0を与える.一方球体モデルの外側では式(1)の右辺第2項にあるように,Hue 値の差の絶対値が Δh 内に収まっている場合はペナルティとしてマイナスになる.これは点の情報を利用したエッジ検出の一手法で,モデルの球体の外側と画像上の球体の部分が重なった場合にペナルティを与えることで,画面上での円の重なりある状態に高い評価値を与えるものである.この δ を右カメラの画像フレームで総和することで評価関数 F_R が得られる.ここでNは対象となるモデル上の点の個数であり, Δh は30を用いた.左カメラの評価関数 F_L も同様である.図7に上記で説明したモデルと画像の関係を示す.図7のようにモデルと実際の球体がずれている場合より,モデルと実際の球体が一致している場合は評価関数が高くなる.

本研究で用いる手法では画像の変換を行うフィルター処理を行っていない. 画像入力ボード (インターフェイス社 製 PCI-5523)の左右2枚の画像をメモリー空間に転送するのに要する時間は9ms である. したがって 24ms(=33-9) の間に7回の進化を行うことができるので、1世代約3.4ms で進化している. 本実験では図4、図6に示す3Dマー カーを用いる. 赤青緑の球を立体的に構成したマーカーであり、マーカーと適合度関数の計算方法は(Lwin et al., 2016)に示されている. 遺伝子の評価は、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 次元画像に射影されたモデルと同様に2次元の画像面に射影された3Dマーカーとの相関(適合度関数として定 義)を評価することで行われる. さらに左右画像での3Dマーカーとモデルとの相関値の平均を複眼カメラでの 相関値と定義し(Song et al., 2010, Nishimura et al., 2013), 適合度関数として用いることで左右カメラの視差を考 慮した立体認識を構成している. 遺伝子は初期状態では、図8の左側の1st generationに示すようにランダムに散



Fig. 8 Flowchart of Real-time Multi-step GA to track pose

りばめられる.それらの遺伝子に対して適合度関数を用いてモデルの位置・姿勢の評価を行い,その後選択,交 叉,突然変異を行う.本実験で使用したコンピュータ(Processor: Intel(R) Core(TM) i7-3517UE CPU @ 1.70GHz, RAM:4.00 GB)の場合,33ms内のRM-GAの進化回数は7回であった.

2.3 嵌合制御

GA-PCとTuna-Sand2はイーサネットワークで接続されており,互いの情報を共有できる.GA-PCからはTuna-Sand2へ位置指令をおこない,Tuna-Sand2からは現在の状態(移動命令受付可能か否か)が返ってくる.図9にはGA-PCの命令発行のフローチャートを示す.Tuna-Sand2が命令受け入れ可能になった後はVisual Servoによって嵌合開始位置までTuna-Sandを誘導し,到達後は嵌合開始命令を実行する.Tuna-Sand2は自律航行型AUVであり,外部からの位置指令の命令は100ms周期以上で受信する.GA-PC内では上記の33msの画像入力の更新が行われるがTuna-Sand2に与える位置制御命令は100ms毎に制限している.

位置指令における指令値について述べる. Tuna-Sand2 側は Σ_H 座標系における位置指令を受け取り, GA-PC 側 は目標位置との誤差を基に位置指令の値を算出する. Σ_H 座標系の各方向のフィードバック則を式 (5) から式 (8) に 示す.

$x_H^O = -K_{px}(x_H^* - x_H)$	(5)
$y_H^O = -K_{py}(y_H^* - y_H)$	(6)
$z_H^O = -K_{pz}(z_H^* - z_H)$	(7)
$\varepsilon_{3H}^O = -K_{p\varepsilon 3}(\varepsilon_{3H}^* - \varepsilon_{3H})$	(8)

ここで x_H^* などは前述の嵌合開始目標位置, \mathcal{E}_{3H}^* は嵌合開始目標位置で値は 0[-](無次元) である.次に x_H^O などは AUV に送信する位置の指令値である.AUV はこの値を受信するたびに更新して Σ_H 座標系から見た指令値の位置 情報を AUV 内部で変換し世界座標系での位置姿勢保持制御をおこなう.また, K_{px} =0.5[-], K_{py} =0.4[-], K_{pz} =1.0[-], $K_{p\epsilon3}$ =0.4[-] はフィードバックゲインであり, x_H などは 3 次元マーカーの認識位置である.図 5 にあるように,3 次元マーカーが y_H のマイナス方向に見えた場合,AUV は位置修正のために y_H マイナス方向に移動するのが正し いので,式 (5) から式 (8) にはマイナスの符号がフィードバックゲインとは別につけられている.

嵌合を行う上で,3つの動作段階を定義する.それぞれ(a)Approaching step(自動制御による仮想給電設備への 接近),(b)Visual servoing step(嵌合開始位置への誘導),(c)Docking step(嵌合)である.これらの関係を図10に 示す,また以下に詳細を述べる.

(a) Approaching step

ロボット前方に搭載された複眼カメラに対象物が映し出されるまで,ロボットを自動制御であらかじめ決め



Fig. 9 Flowchart of GA-PC command behavior in which TS2 means Tuna-Sand2

られた軌道で接近させる.

(b) Visual servoing step

Tuna-Sand2 が 3D マーカーを発見し,目標とする相対的位置・姿勢に追従する.嵌合穴の中心から x_H 軸, y_H 軸 および z_H 軸方向の誤差が ± 30 mm 以下, z_H 軸回りの角度誤差が ± 3deg 以下に留まる状態になるまで GA-PC による RM-GA を用いた認識と Tuna-Sand2 への操作指令を繰り返す.Tuna-Sand2 は図 6 に示す Σ_H 座 標系における z 軸方向のみの移動指令と xy 平面内での移動指令と z 軸回りの回転動作指令を別々に受け付け る仕様になっているので,図 10 に示すように GA-PC は認識結果に基づいて,それぞれの位置,姿勢が基準 以内に留まっているかを基準に指令を発生する.

(c) Docking step

RM-GA によって嵌合開始位置に到達した後, 嵌合移動命令が GA-PC から Tuna-Sand2 へ指令される.この後 Tuna-Sand2 が x_H 方向に自動的に移動し嵌合終了となる.

上記の移動指令は軸ごとになされており,指令対象となっていない軸は現在の位置を維持するように AUV 側が制 御をおこなっている.また,z軸回り姿勢修正のために回転動作が発生した場合,z軸回りの回転動作によって xy 方向の誤差が発生する.このとき図 10 のフローチャートに従えば,xy 方向の位置修正はz軸回りの修正よりも優 先されるため,xy 方向の制御モードに移行する.その後,xy 方向が許容範囲内に入ると再びz軸回りの修正動作 が行なわれ,xy 方向の誤差が発生する.このような行為を繰り返して徐々にz軸回りの誤差とy軸方向の誤差は 修正されていくが,非常に時間がかかることが予測される.また,式(8)の制御則に従えば大きな角度誤差には対 応できないことが予測されるが,現状では大きな角度誤差を想定していないことと,AUV の動作がゆっくりであ るため問題になることはなかった.z軸回りの大きな角度誤差に対応する手段の構築は今後の課題である.

3. 実験結果

3.1 概要

嵌合実験の環境を図 11 に示す. 嵌合実験の移動経路とそのときの Tuna-Sand2 の様子を図 12 に示す. 図 12 中 央の(i)内に示されている(a)から(f)までの軌道ははあらかじめ記憶された軌道を移動している. これらは海底探 査を模擬した移動であり,探査移動の後にドッキングを行うことを想定している.(g)では Visual servoing step に あり,画像認識に基づく位置制御をおこなっている.また,(h)は嵌合終了時であり,嵌合に成功した.これらの 軌道に対応した Tuna-Sand2 の画像が図 12 の両側の(a)から(h)までに示されている.次に,表1に図 12(i)の各



Fig. 10 Flowchart of three steps in docking experiment: Error in z axis is compensated in Mode 51. Then, errors in xy plane are compensated in Mode 52. Finally angular error around z axis is compensated in Mode 53.



Fig. 11 Appearance of experimental environment to conduct automatic docking using AUV Tuna-Sand2 in water pool established in University of Tokyo.

軌道における目標位置を示している.このときの座標系は図 12(i) に示す Σ_W である.

3·2 制御機能検証

次に実験中の Visual servoing step における認識機能を検証する.GA-PC によって認識された Tuna-Sand2 の位置 を図 13 に示す.図 13(a) は適合度関数値であり,この値が高いほど認識の確信度が高い.図 13(b) は Tuna-Sand2



Fig. 12 Desired trajectry of Tuna-Sand2 in experiment and appearance of Tuna-Sand2: From (a) to (h), appearance of experiments are shown during movement of trajectry which is illustrated in (i). Terminal positions of those trajectry are described in Table 1.

symbol in Fig.12	<i>x</i> [m]	y[m]	<i>z</i> [m]
start point	0.0	0.0	0.0
initial position of path (a)	0.0	0.0	-4.0
initial position of path (b)	0.0	2.0	-4.0
initial position of path (c)	-2.0	2.0	-4.0
initial position of path (d)	-2.0	0.0	-4.0
initial position of path (e)	-1.2	0.0	-4.0
initial position of path (f)	-1.2	1.6	-4.0
initial position of path (g)	-1.2	2.1	-1.8

Table 1 Points for desired trajectry of Tuna-Sand2 in Fig.12. Coordinate system of these position is Σ_W that is drawn in Fig.12

のモードである,モード 50 は Tuna-Sand2 の待機状態,モード 51 は図 6 の Σ_H の z_H 軸方向制御状態,モード 52 は x_H, y_H ,軸方向同時制御状態,モード 53 は z_H 軸回りの姿勢制御状態である.図 13(c),(d),(e) はそれぞれ x_H, y_H, z_H 軸方向の位置であり,(f) は z_H 軸回りの姿勢角度である.ここで,横軸に平行な破線は嵌合開始位置に対する許容範囲(上記 2.3 節 (b) に記述)であり,上記の 4 つパラメータがこの範囲に入った 83 秒付近で嵌合が開始され, 嵌合が成功している.これらの図を比較するとまず z 軸回りの角度は常に許容範囲内であった.従って図 13(b) に示すようにモード 53 になることはなかった.次に (e) に示すように z 軸方向の位置が制御されて許容範囲内に収束したのち,xy 方向の位置が許容範囲内に収束している.これらの優先順位が図 10 にあるように,z 軸方向が許容範囲内であることを最優先にしているためである.その後 xy 方向が制御されている.また,今回は z 軸回りの角度に関する修正指令がでなかったが z 軸回りの角度は最も低い優先順位である.次に,図 14 は Visual servoing step での GA-PC によって認識された Tuna-Sand2 の 3 次元軌道である."Visual Servo Start"の位置から画像に基づく制御が開始して,"Docking End"の位置が嵌合終了地点となる.Visual Servo Start 点では Tuna-Sand2 はドッキ



Fig. 13 Measured trajectry of Tuna-Sand2 by GA-PC with RM-GA: Fitness value is plotted in (a). When fitness value is low, reliability for measured position is lower. Control mode explained in subsection 2.3 is plotted in (b). AUV positions in x,y and z axes are plotted in (c), (d) and (e) respectively. Also, rotation angle around z axis is plotted in (f). When those control variables were converged in acceptable range on visual servo state at about 83 second, docking behavoir are excuted.



Fig. 14 Measured trajectry in three dimension. Starting point of visual servo and docking end are connected with cloud of dot which indicates trajectry of AUV.

ングステーションに非常に近い位置に存在していたことがわかる.

認識に用いたカメラと記録用にドッキングステーションに取り付けたカメラ画像を図 15 に示す.図 15 の中央の グラフは Σ_H 座標系における x_H 方向つまり挿入軸方向の Tuna-Sand2 の位置の時間による変化を示しており, (A) から (E) までの 5 つの時点のそれぞれのカメラの画像をグラフの上下に示している. (A) から (D) のカメラ画像に は Tuna-Sand2 搭載の左右カメラ (Left camera, Right camera), AUV の状態記録用カメラ (Appearance of AUV), ドッ キングホール監視用カメラ (Front of docking hole, Side view of docking hole) がある. (A) 時点は嵌合開始であり,





Fig. 15 Images captured by camera on Tuna-Sand2 and recording camera: Images both camera of outside and onboard of AUV are capured during experiments. Esspecially, it can be confirmed from image that end of pole exists in docking hole at time (E).



Fig. 16 Recording position data in Tuna-Sand2: (a) position in x axis, (b) position in y axis, (c) position in z axis and (d) angle around z axis are illustrated.

(B),(C),(D) と進むにつれて徐々に嵌合開始位置に近づいている.特に, "Front of docking hole"を見るとTuna-Sand2 とドッキングホールの位置が正面に近づいていく様子が確認できる.また,図15の(E)時点は嵌合終了時であり,

Matsuno, Nishida, Yonemori, Li, Mukada, Kato, Myint, Yamada, Khin and Minami, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.84, No.858 (2018)



Fig. 17 Intersection of distribution map of fitness value for each situation: Upper graph indicates fitness value with respect to time during docking scheme. (i), (ii) and (iii) in this graph mean instants which are picked up for drawing figures in lower side. Pose relations between AUV and 3D maker in those instants (B,C,D) are illustrated in middle. Distribution map with Y-X axes and a pose estimated by proposed GA algorithms are drawn in next row, And that with Y-Z axes and estimated pose are also drawn in final row.

ドッキングホール監視用カメラ (Front of docking hole, Side view of docking hole)のみを示しており,破線で囲まれた部分がドッキングポール先端であり,ドッキングポールがドッキングホール内の正しい位置に嵌合ができていることが確認できる.

最後に Tuna-Sand2 に搭載している IMU 装置,ドップラー速度計などを統合した位置情報を図 16 に示す.図 16(a),(b) はそれぞれ x_H 方向,y_H 方向の位置情報であり,(c) は z_H 方向の位置情報であるがこれまでに示したデー



Fig. 18 Quotanion (a) ε_1 around x_H , (b) ε_2 around y_H , (c) ε_3 around z_H are illustrated. It can be confirmed that rotation angle around x_H and y_H are stable that are out of control targets.



Fig. 19 Fitness value of all GA genes. Some genes concentrate in higher fitness range. On the other hands, other genes distribute in lower range. That is required for tracking ability against sudden change of target position.

タとは,原点が異なるため単純な比較はできない.また,(c)は2,000m用深度計センサーを用いたデータであるため最小分解能が大きく,離散化されていることが分かる.(d)は*z*_H軸回りの姿勢角度であるが,前述のように角度変更命令が一度も発行されなかったたことと,プールの中の水の流れの無い環境であったため,安定している.

3.3 認識機能検証

次にGAによる最適解探索能力について述べる.図17にはGAの適合度関数値と(i)から(iii)までの時点における適合度関数値の分散マップを示す.図17の2段目に示されいるように,左側の(i)時点では目標位置よりも y軸マイナス側にTuna-Sand2は存在している,一方(ii)では目標位置よりもy軸プラス側にTuna-Sand2は存在しており,(iii)の時にy軸方向の認識された現在位置と目標位置はほぼ一致している.GAに要求されることは分散マップの中で最も高い適合度関数値を与える位置・姿勢 x_H, y_H, z_H , $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ の組み合わせを見つけることである.本実験では回転角度の修正はなされなかったため,ここでは x_H, y_H, z_H に着目した.図17の3段目にはxy平面に対する適合度関数値の分布を示す.2段目に示すようにxy平面では2台のカメラがy軸方向に並べて取り付けら れて, x 軸方向がカメラから見て奥行方向に当たるため, 左右カメラの視差によって適合度間数値分布は2つの線 からなる"X"型の交差形状を描き, この交点に分布のピークが現れている.また,図17の4段目に示されている yz 平面の分布では切り出した面内には交差形状が現れない,これは左右の視差はz 軸方向に影響を与えないこと を示しており, x 軸方向に延びる交差線に対して交差点中心付近のx 軸断面を切り出したことによるものである. また,(i) では AUV から見て右手(y_H 軸正方向) にピークがあるため 3D マーカーが y_H 軸正方向に位置している ことを表している.この位置を修正するためには AUV は右手に移動する必要がある.同様に(ii) では AUV から 見て左手(y_H 軸負方向)に 3D マーカーが見え,この位置を修正するためには AUV は左手に移動する必要がある. どの分布においても分布のピークと GA が探索による得たピークはほぼ同じ位置を示しており,リアルタイム制 御に要求される 33ms 以内の計算であることを考えても十分な精度が得られていると考える.

また,今回の実験では Tuna-Sand2 が浮力のバランスによって *x_H* 軸方向や *y_H* 軸方向に傾斜することはなかった. 一方で 3D-MoS は 3D マーカーに 3 つのカラーボールを用いることで対象物体の姿勢角も検出できる.図 18 には クォータニオンで示された対象物体の 3 軸方向の姿勢角を示す.上記のように浮力バランスで *x_H* 軸方向や *y_H* 軸 方向に傾斜しなかったので,計測された図 18(a),(b)の *x_H* 軸回りの回転,*y_H* 軸回りの回転は常にほぼゼロを保っ ている.このことからも位置姿勢認識が正しく行われていたと考えることができる.

最後に GA の個体がどのような振る舞いをしていたかを考える.図 19 に GA の各遺伝子の適合度関数値を示す. この図からフィットネス値の最大値に付近が濃く,多くの遺伝子が分散していることがわかる.このことから最適 解付近を探索する GA の遺伝子が多く存在することがわかる,一方で適合度関数値が低い遺伝子も存在し,大域 的探索と最適解を精度よく探索する2つのバランスがとれていることがわかる.これにより位置に急激な変更が あった場合にもトラッキングが対応できる.

4. 結 言

海底での水中ロボットの長時間活動を目的として仮想給電装置との嵌合に関する研究を進めている.本報では, Real-time Multi-step GA (RM-GA)を用いた複眼カメラによる 3D マーカーとの相対的位置・姿勢の実時間 3 次元 認識に基づいて Visual Servoing を行い, AUV を用いたの完全自律嵌合実験について報告した.実験の結果, 複眼 による 3D-MoS 制御法によって, AUV を自動給電装置を模擬したドッキングステーションに接続可能であること を示した.

謝 辞

本研究は,東京大学生産技術研究所 巻俊宏准教授の協力を得て行われました.ここに謝意を表します.

文 献

徐剛, 辻三郎, 3次元ビジョン (1998), 共立出版.

- Horn, B.K.P., Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 4, Issue 4 (1987), pp.629-642.
- Hobson, B.W., McEwen, R.S., Ericson, J., Hoover, T., McBride, L., Shane, F. and Bellingham, J.G., The Development and Ocean Testing of an AUV Docking Station for a 21" AUV, Proceedings of MTS/IEEE Oceans Conference (2007), pp.1-6.

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.

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 (2016), pp.519-526.

松山隆司, 久野義徳, 井宮淳, コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望 (1998), 新技術コミュニケーションズ.

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 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00216.

- Myo, M., Yonemori, K., Yanou, A., Minami, M. and Ishiyama, S., Visual-servo-based autonomous docking system for underwater vehicle using dual-eyes camera 3D-pose tracking, IEEE/SICE International Symposium on System Integration(2015), pp.989-994.
- 中原智治, 顧海松, 荒木秀和, 藤井裕之, 廣田雅之, 3次元認識によるビンピッキングシステムの実用化, システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.4 (2001), pp.226-232.
- Nishimura, K., Hou, S., Maeda, K., Minami,M. and Yanou, A., Analyses on on-line evolutionary optimization performance for pose tracking while eye-vergence visual servoing, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)(2013), pp.698-703.
- 小野桂太郎,小川卓哉,前田雄介,中谷茂樹,永安剛,清水領,大内規嵩,ステレオビジョンを用いた巻ばねの認識とビンピッキング,日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.804 (2013), pp.2769-2779.
- 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-based manipulation, Preprints of the International Federation of Automatic Control(2014b), pp.12160-12165.
- 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(2009), pp.48-61.
- 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.
- 宋薇, 見浪護, 青柳誠司, クォ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.
- 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, No.3(2005), pp.352-357.
- 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, Vol.3(2005), pp.2686-2691.
- 矢納陽,大西翔太,石山新太郎,見浪護,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, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.832(2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00391.
- 矢納陽,大西祥太,米森健太,石山新太郎,藤本勝樹,見浪護,ビジュアルサーボによる水中ロボットの位置・姿勢制御,第6回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会 (2014).
- 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.
- 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 域嵌合実験, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.848(2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00410.
- Yu, F., Minami, M., Song, W. and Yanou, A., Eye-vergence visual servoing enhancing Lyapunov-stable trackability, Artificial Life and Robotics, Vol.18, No.1-2(2013), pp.27-35.

References

- Gang, X., Tsuji, S., Three-Dimensional Vision (1998), Kyoritsu Shuppan (in Japanese).
- Horn, B.K.P., Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions, Journal of the Optical Society of America A, Vol. 4, Issue 4 (1987), pp.629-642.
- Hobson, B.W., McEwen, R.S., Ericson, J., Hoover, T., McBride, L., Shane, F. and Bellingham, J.G., The Development and Ocean Testing of an AUV Docking Station for a 21" AUV, Proceedings of MTS/IEEE Oceans Conference (2007), pp.1-6.
- Ishii, K., Sonoda, T., Nakanishi, R., Kawashima, S. and Hidaka, S., Research on docking control of autonomous underwater vehicle, ROBOMECH2015 in Kyoto(2015), 2A2-D06 (in Japanese).

- 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 (2016), pp.519-526.
- Matsuyama, T., Kuno, Y. and Imiya, A., Computer vision:technical review and future view (1998), New Technology Communications (in Japanese).
- Minami, M., Nishimura, K., Sunami, Y., Yanou, A., Cui, Y., Yamashita, M. and Ishiyama, S., A proposal of decontamination robot using 3D hand-eye-dual-cameras solid recognition and accuracy validation, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.831 (2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00391.
- Myo, M., Yonemori, K., Yanou, A., Minami, M. and Ishiyama, S., Visual-servo-based autonomous docking system for underwater vehicle using dual-eyes camera 3D-pose tracking, IEEE/SICE International Symposium on System Integration(2015), pp.989-994.
- Nakahara, T., Gu, H., Araki, H., Fujii, H. and Hirota, M., A practical bin-picking system using 3D object recognition, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers, Vol.14, No.4 (2001), pp.226-232 (in Japanese).
- Nishimura, K., Hou, S., Maeda, K., Minami, M. and Yanou, A., Analyses on on-line evolutionary optimization performance for pose tracking while eye-vergence visual servoing, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)(2013), pp.698-703.
- Ono, K., Ogawa, T., Maeda, Y., Nakatani, S., Nagayasu, G., Shimizu, R. and Ouchi, N., Recognition and bin-picking of coil springs by stereo vision, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.804 (2013), pp.2769-2779 (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-based manipulation, Preprints of the International Federation of Automatic Control(2014b), pp.12160-12165.
- 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(2009), pp.48-61.
- 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., 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., 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, No.3(2005), pp.352-357.
- 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, Vol.3(2005), pp.2686-2691.
- Yanou, A., Ohnishi, S., Ishiyama, S. and Minami, M., Autonomous docking control of visual-servo type underwater vehicle system aiming at underwater automatic charging, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.81, No.832(2015), DOI: 10.1299/transjsme.15-00391.
- Yanou, A., Ohnishi, S., Yonemori, K., Ishiyama, S., Fujimoto, K. and Minami, M., Position and orientation control of underwater vehicle system by visual servoing, Sixth SICE Symposium on Computational Intelligence (2014) (in Japanese).
- 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(2016), pp.284-291 (in Japanese).
- Yonemori, K., Yanou, A., Myo, M., Lwin, K.N. and Minami, M., Docking experiment of underwater vehicle by dual-eye

visual servoing in sea, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.83, No.834(2017), DOI: 10.1299/transjsme.16-00410.

Yu, F., Minami, M., Song, W. and Yanou, A., Eye-vergence visual servoing enhancing Lyapunov-stable trackability, Artificial Life and Robotics, Vol.18, No.1-2(2013), pp.27-35.