

知的画像処理とステレオビジョンによる

実時間空間認識を用いた水中ロボットの実海域ドッキング*

見浪 護**, 戸田 雄一郎**

1. はじめに

水中ロボットは、レアメタルやメタンハイドレードの資源調査及び開発や大規模な地震などによる放射能汚染が発生した場合の、水底の土壌調査など様々な用途においてその需要が高まってきている。

現在、水中ロボットを用いた探査・調査においては、(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、海底までの移動と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 Autonomous Underwater Vehicle (AUV) が自動で充電、資源探索を繰り返す自律型資源探索が求められている。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り、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。

AUV の固定、ステーションへのドッキング方法として AUV の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期待されている。本解説では、ドッキングシステムにおけるカメラ画像を用いた水中環境下での位置姿勢推定システムに関して解説し、著者らがこれまで行ってきたステレオビジョンを用いたリアルタイム 3 次元位置姿勢推定手法について説明を行っていく。最後に、実海域における実験結果を示し、有効性の検証を行う。

*原稿受付 令和 元年 9 月 5 日。

**岡山大学大学院 (岡山市北区津島中 3-1-1)。

2. 水中環境下におけるステレオビジョンを用いた位置姿勢推定手法

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^{2,3)}と、ステレオビジョン (以下、SV) を用いた方法^{4,6)}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²⁾。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、SV を用いた研究^{5,6)}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、SV 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。SV 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。

SV 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 SV 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 SV 画像内の対応点を探す方法が一般的^{7,8)}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⁹⁾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 Genetic Algorithm (RM-GA) という手法を用いて解くことを提案した¹⁰⁾。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、最近では計算機の性能の向上で12回程度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)¹¹⁾と呼び研究を続けている。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、SV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^{7,8)}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¹²⁾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、SVから3次元マーカーまでの3次元の相対的位置・姿勢を実時間で計測できる。以下の章では、著者らがこれまでに提案してきたビジュアルサーボを用いた水中ロボットのドッキングシステム^{10,13)}に関して紹介をしていく。

3. ステレオビジョンによるビジュアルサーボシステム

3.1 発光3次元マーカー

図1に、本研究で用いる水中ロボットと充電ステーションの相対位置推定のための3次元マーカー構造を示す。本研究では、深海におけるドッキングタスクを

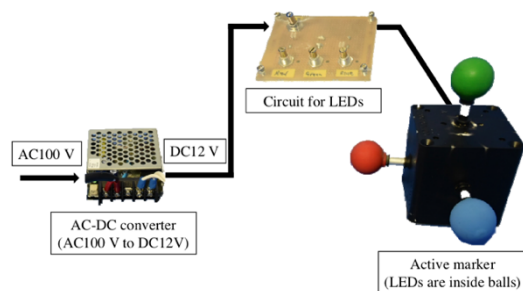


図1 発光3Dマーカー

想定し、漆黒混濁環境下においても3次元マーカーを認識可能にするために、3次元マーカーにLEDを内蔵し、点灯させることが可能となっている。また、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。

3.2 Real-time Multi-step GA

ここでは、前節において説明を行った発光3DマーカーのSVを用いた3次元位置姿勢認識手法に関して説明する。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¹⁴⁾。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。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であるRM-GAを用いる¹⁰⁾。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2にRM-GAによる3Dマーカーの認識フローチャートを示すが、図の右側にあるように、ビデオレート(33ms)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¹⁰⁾。図3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に、適合度が高くなるようにモデルと画像の相関値を取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2次元の画像面に射影された3Dマーカー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。

ここで、本手法を用いて3次元マーカーの認識を行った結果を図4に示す。本実験においては、提案手法の照度と濁度に対するロバスト性を検証するために、照度と濁度を変えた条件での実験を行った。図4にお

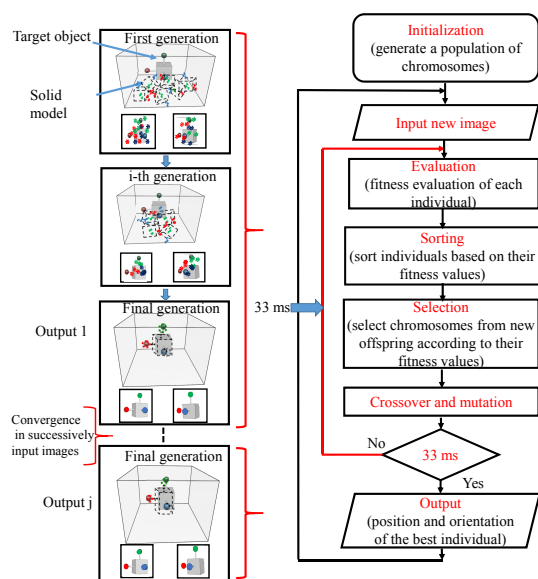


図2 RM-GAのフローチャート

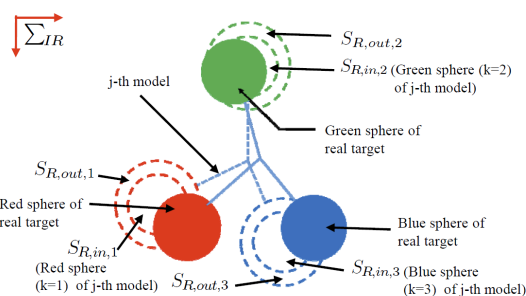
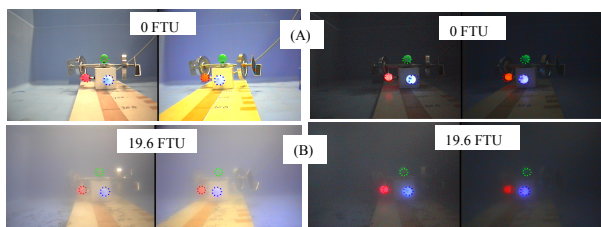


図3 3D マーカーの認識モデル


 図4 各濁度環境下における認識結果
(昼環境と夜環境の照度は、それぞれ 1280[lx], 80[lx]となっている)

いて赤青緑の点線はRM-GAによる3Dマーカーの認識結果を表している。図4において、どの環境下でも3Dマーカーと認識結果のプロットがほぼ一致しており、3次元位置推定がほぼ正しいことを表している。特に、(B)では、19.6 [FTU]といった高混濁環境において認識できていることから、著者らが提案しているRM-GAを用いた3次元位置姿勢推定手法は、3Dマーカーと水中ロボットの相対位置姿勢リアルタイム推定を時変多峰性分布関数の実時間最適化問題に落とし込むことで、照度や濁度といった時々刻々と変化する外乱を含む光環境においても十分な空間認識性能を備えていることが確認できた。

4. 実海域におけるドッキング実験

4.1 嵌合制御シーケンス

本章では、著者らの手法を用いた実海域における実験について紹介する。ここでは、まずビジュアルサーボを用いた図5、6に水中ロボットが嵌合を行なう条件について示す。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は、ロボットを手動操作で対象物に接近させる。3次元3Dマーカーモデルと入力された左右ステレオビジョンカメラ画像との相関関数をRM-GAの適合度関数として用いる。ロボットを対象物にある程度接近させ、適合度が制御可能な値以上に上昇したことが確認された後、手動操作から自動制御へ切り替えることで(a)Visual Servoing Step状態へ移行させる。

(a)Visual Servoing Step

水中ロボットが3Dマーカーを発見し、目標とする相対位置 $[x_d, y_d, z_d] = [600, 20, 0]$ [mm]、姿勢 $\epsilon_d = [\epsilon_1, \epsilon_2,$

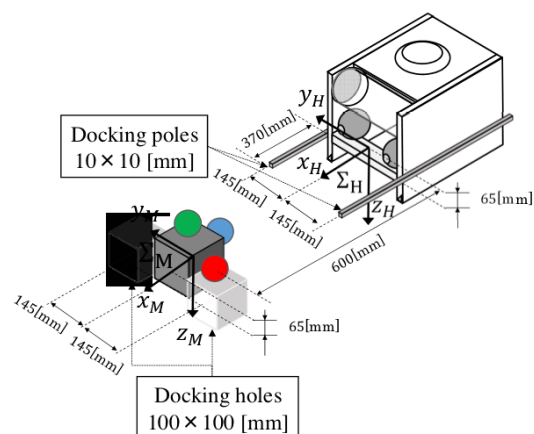


図5 ドッキング座標系

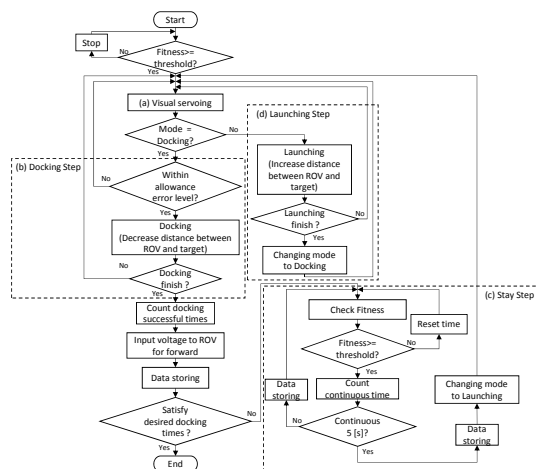


図6 ドッキングフローチャート

$\varepsilon_3=[0, 0, 0]$ となっており、水中ロボット 3D マーカーの正面に移動するように制御するステップを表す。ある一定時間、Visual Servoing の誤差範囲内にとどまると(b)Docking Step を経て水中ロボットは仮想給電設備への嵌合を実行する。

(b) Docking Step

水中ロボットが前進して嵌合動作を行なっている状態である。Sway 方向 $|y_d|<30$ [mm]かつ Heave 方向 $|z_d-z|<30$ [mm]を満たすとき、奥行き方向の目標値を $x_d=600-30t$ [mm] (t :嵌合を始めたときを $t=0$ [s]とする) と時変で減少させることで水中ロボットが 30[mm/s]の速度で x 軸方向に前進し嵌合穴に嵌合する。 x_d が最終値 350[mm]となることで嵌合を完了する位置に水中ロボットが移動する。ただし途中で嵌合の条件を満たさなくなった場合、その時点での Surge 方向の時変目標値を固定して再び(a)Visual Servoing Stepに戻る。この機能は、うねりなどによる水中ロボットの動揺の減衰を待つことを意味し、外乱抑制制御とドッキングを両立させている。

(c) Docking Completion Step

嵌合棒をステーションに押しつける状態である。主に二つの役割があり、1 つはデータの保存時に外乱の影響を受けないようにするためである。もう 1 つの役割としては、制御可能であるかの判断である。このステップにおいても対象物の認識を行なっているが、何らかの理由で適合度が低下してロボットが制御不能になった場合にこのステップを維持しステーションにとどまることで、ロボットが流されることを防いでいる。制御可能な適合度を維持した場合は(d)Launching Stepに移行する。

(d) Launching Step

初期位置に確実に戻るようにするために、嵌合動作と同じく目標値を徐々に変更し、初期位置へと戻る。

4.2 実験結果

本説では、2017 年 11 月 17 日の午後 6 時半ごろ、岡山大学牛窓臨海実験場において行った嵌合実験について紹介する。実験環境及び水中ロボットと 3D マーカーとの位置関係 (ドッキング座標系) を図 5, 7 に示す。本実験は合計で 10 回連続して嵌合を行うことができた (図 8)。本実験では図 8 に示すとおり、10 回の嵌合の中で 6 回目の嵌合が一番時間を要していることが分かる。そこで、最も時間を要した 6 回目の嵌合⑥について考察を行っていく。図 9 に 6 回目の嵌合⑥の結果を示す。(a)に適合度、(b)に x 軸方向の位置、(c)に y 軸方向の位置、(d)に z 軸方向の位置、(e)に z 軸回りの回転(ε_3)、を示している。目標位置姿勢 ($[x_d, y_d, z_d]=[350, 0, 0]$ [mm], $\varepsilon_{3d}=0$) に対しビジュアルサーボを行っている。水中ロボットがビジュアルサーボに

よって制御可能かどうかの判断は、適合度を基準に行っている。本実験では、適合度が 0.2 以上の場合、水中ロボットが制御可能と設定した。図 9 内の時刻 A~F における水中ロボットの左右カメラ画像、嵌合ステーションのカメラ画像を図 10(a)に示す。各段の左端から、嵌合穴の上面からの画像、嵌合穴の側面からの画像、水中ロボットの左、右カメラ画像である。各段の左上のアルファベット(A~F)は図 9 内の時刻 A~F に対応している。時刻 A~B は Visual Servoing 状態、時刻 B~E は Docking 状態、時刻 E~F は Docking Completion 状態の際の時刻である。それぞれのカメラ画像から、暗闇の中で発光 3D マーカーが光っていることが確認できる。実験結果より、 z 軸方向の位置はおおよそ嵌合条件を常に満たしている。6 回目の嵌合⑥では、時刻 D~E の区間で嵌合動作がスムーズに行えていない。なぜなら、 y 軸方向の位置および z 軸周りの回転(ε_3)が嵌合条件を満たしていないためである。時刻 E 付近で、 y 軸方向の位置および z 軸周りの回転ともに嵌合条件を満たし、 x 軸目標値が減少し嵌合動作を完了した。最終的に、 x 軸方向の目標位置が 350[mm]まで減少し約 130[s]で嵌合動作が完了した。図 10(a)の A~F の画像内の発光 3D マーカーの大きさを見比べると、徐々に大きくなっておりこれは水中ロボットが前進していることに起因している。

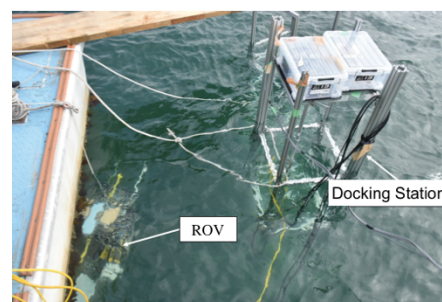


図 7 実験環境

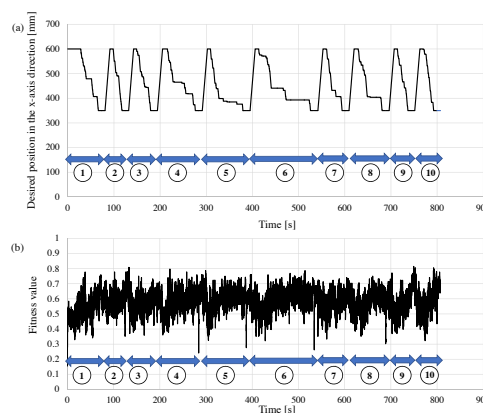


図 8 10 回連続嵌合時における水中ロボットとマーカーとの距離及び RM-GA の適合度の推移結果

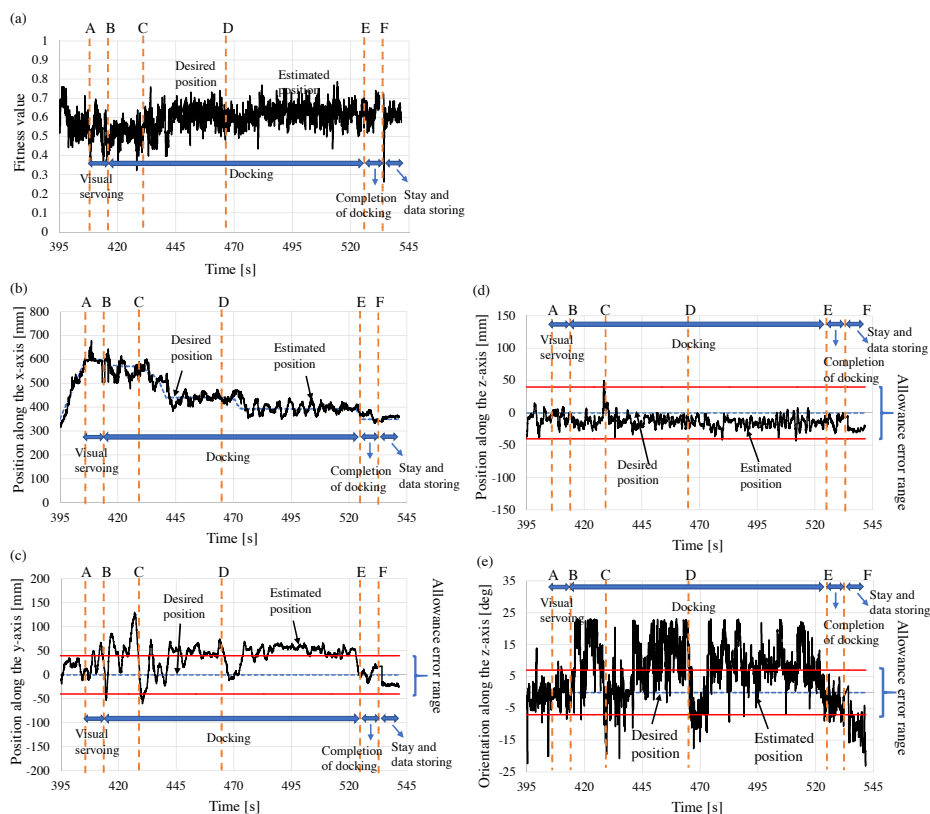
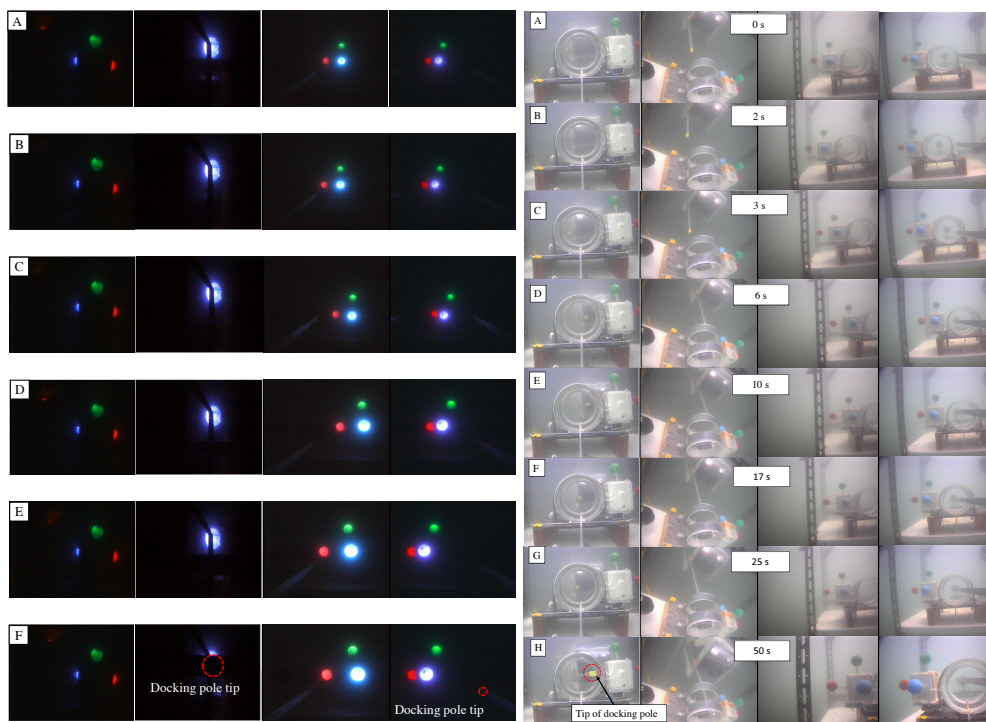


図9 図8中⑥のドッキングに関する各位置座標の実験結果 (a)適合度, (b)x 軸方向の位置, (c)y 軸方向の位置, (d)z 軸方向の位置, (e) z 軸の回転角の推移をそれぞれ表す.)



(a) 夜環境 (図8における6回目のドッキング時)

(b) 昼環境

図10 図8中の⑥のドッキングにおける実験画像 (第1,2列の画像はステーションに取り付けた画像, 第3,4列の画像は水中ロボットがステレオビジョンによって取得した画像を表す.)

また、図 10(a)の嵌合が完了した時刻 F に対応する写真を確認すると、赤丸で示した嵌合棒先端が嵌合穴に入っていることから嵌合が成功したことが分かる。また、図 10(b)に昼環境におけるドッキング時の画像も示すが、昼夜問わず提案手法を用いることによってドッキングが可能である。このように、RM-GA を用いることによって、実時間で 3D マーカーの 3 次元位置姿勢を推定し、ビジュアルサーボを行うことで、実海域における精密な制御が可能であることがわかる。またこれは、SV によるビジュアルサーボによって水中ロボットの安定化が可能であることが確認された。

5. おわりに

本稿では、ステレオビジョンによるビジュアルサーボを用いた水中ロボットの知的画像処理を通して、RM-GA による実時間 3 次元位置姿勢推定手法及び実海域におけるドッキングの研究に関して紹介した。また、現在著者らは、今後の展開として、水中ロボットにより魚を捕獲する知能ロボットを実現することによって、より高度な自律型水中ロボットのビジュアルサーボシステムに関して取り組んでいる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 石井, 他 4 名, 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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(2014), pp.2279-2285.

- 6) 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(2014), pp.12160-12165.
- 7) 松山, 他 2 名, 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.
- 8) 徐, 辻, 3 次元ビジョン (1998), 共立出版.
- 9) 小野, 他 6 名, ステレオビジョンを用いた巻ばねの認識とピンピッキング, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.804 (2013), pp.2769-2779.
- 10) Lwin, K. N., Myint, M., Mukada, N., Yamada, D., Matsuno, T., Saitou, K., Godou, W., Sakamoto, T., Minami, M., Sea Docking by Dual-eye Pose Estimation with Optimized Genetic Algorithm Parameters, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol.92, Issue 1, (2018), pp.159-186.
- 11) 見浪, 他 6 名, 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).
- 12) 宋, 見浪, 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.
- 13) Lwin, K. N., Mukada, N., Myint, M., Yamada, D., Yanou, A., Matsuno, T., Saitou, K., Godou, W., Sakamoto, T., Minami, M., Visual Docking against Bubble Noise with Three-dimensional Perception Using Dual-eye Cameras, IEEE Journal of Oceanic Engineering (DOI: 10.1109/JOE.2018.2871651).
- 14) 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.

著者紹介



見浪 護

- ・ 1956 年生.
- ・ 岡山大学大学院自然科学研究科.
- ・ 金沢大学. 実時間 3D 空間認識, ビジュアルサーボ.



戸田 雄一郎

- ・ 1987 年生.
- ・ 岡山大学大学院自然科学研究科.
- ・ 首都大学東京. 計算知能.