# 水中ロボットの自動嵌合制御のための発光3次元マーカーを用いた 光環境適応特性を有する3次元空間認識手法

正 会 員 戸田 雄一郎\* 中村 翔\* 許 弘毅\* 見浪 護\*

Robustness verification of 3D pose estimation adaptive against lighting and turbid underwater varieties with active 3D marker and docking experiment in real sea

> by Yuichiro Toda, Member Sho Nakamura, Horng-Yi Hsu, 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 a optical docking system and conducted real sea experiments to verify the practicability of the proposed system composed of stereo-vision-based 3D pose (position and orientation) realtime measurement system. However, our proposed system sometimes failed the docking operation in the dusk and turbid environment since our recognition method lost the 3D marker in the natural lighting environment that changes every moment. In this paper, therefore, we proposed a new fitness function for improving the robustness against the lighting change. To improve the robustness, firstly, we propose a fitness function composed of color (HSV) and brightness evaluation for overcoming the difficulties to estimate in realtime 3D pose of the underwater vehicle in lighting and turbid varieties. Secondly, we modify the fitness function to improve sensitivity by adding a heuristic rule that increases the evaluation value when the all color balls of the model overlap real 3D marker in the camera images. This approach enables our docking system to apply to the natural lighting environment that changes every moment for increasing success rate of the docking operations. Thirdly, the effectiveness of the proposed fitness function adaptive to the changing lighting environment has been confirmed in the outdoor pool environment. Finally, our proposed docking system has been verified to be robust against lighting environment varieties, by successful repeated docking experiments in turbid environment with lighting condition changes from daytime to sunset in real sea.

# 1. 緒 言

近年,海底探査等のための様々な水中ロボットが研究・開発さ れており,海底設備の点検,水中生物の生態調査,地下資源の 採掘など研究の目的は多様である.これらの水中ロボットは長 時間活動することが必要とされるが,長時間にわたり水中ロ ボットを操縦者が手動で操作することは多大な労力を要する. この操縦者の負担を軽減するために,水中ロボットの自動制御 によって位置姿勢の安定化制御を行い,状況に応じた制御の目 標値を操縦者が与えるという半自動制御の実現が期待されてい る.このような,水中ロボットの自動制御システムにおいて, ロボットへの電力供給方法には有線とバッテリーの二つの方 法が主流であるが,いくつか問題点がある.例えば有線によ る電力供給を行う 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長は,数千 m の長さが必要となり, その張力の影響によって水中ロボットの制御は困難なものとな る.一方で,バッテリーによる電力供給を受ける Autonomous Underwater Vehicle(AUV)の場合,ケーブルによる張力を考 慮しなくてよいため,ROV と比較して正確な制御が可能であ るが,活動可能時間が充電されたエネルギー量によって制限さ れる.また,充電のたびに船舶と海底の作業場所を往復しなけ ればならないため効率的な運用ができないといった問題点が存 在する.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<sup>1),2),3</sup>.

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, 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

<sup>\*</sup> 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

ている.このような長距離に関する嵌合のための誘導制御の場 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<sup>4)</sup>.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推定手法が必要となる.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いる.このような中,ステレオカメラは 視差を利用することによって,カメラ視線方向の位置と鉛直軸 周りの姿勢計測精度を向上させることが可能な計測装置であ る.そのため著者らは,高精度な位置推定手法を行うために, ステレオカメラによる視覚情報を用いた実時間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<sup>5),6)</sup>.

提案した実時間遺伝的認識手法は,3つのカラー球からな る3次元マーカーを用い、その位置姿勢を遺伝的アルゴリズ ム (GeneticAlgorithm 以下 GA) によって実時間で計算させ, 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3次元マーカーのその時刻の位置姿勢として利用 する実時間計測方法である.他手法と異なる点は、(1)3次元 マーカーを複眼で認識している点<sup>7)</sup>と,(2)動画像中の画像 とモデルとの色相値の相関を 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 <sup>8)</sup>(Real-time Multi-step GA, RM-GA と呼んでいる) である. また,著者らは,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)<sup>9)</sup> と呼び研 究を続けている. 3D-MoS によって水中自動給電を想定した大 学内の簡易プールでの嵌合実験に成功している<sup>10,11)</sup>. さら に,和歌山県の港内において実海域での嵌合実験を行い,その 有効性を示した<sup>12)</sup>.また,夜間や深海底等の暗闇環境下でも 安定な認識を可能とするために、発光3次元マーカー<sup>13,14)</sup> と RM-GA の適合度に色相だけではなく明度による相関値を 取り入れた適合度関数を提案し<sup>15,16)</sup>,その有効性を検証し た. このように、本研究では、環境に依存しない適応的な認識 特性を有する計測系を構築することを目標としている. しかし ながら、現在までに提案してきた適合度関数では、(1)高濁度 環境下と(2) 夕暮れの光環境下における発光3次元マーカーの 認識が安定せず、嵌合が失敗してしまうといった問題点が存在 していた. そこで. 本稿では、これらの環境下においても発光 3次元マーカーを安定して認識することを目的とし、これまで の適合度関数を基に輝度に関する評価を加えた、新たな適合度 関数を提案する. さらに, 提案した新しい適合度関数を用いた 認識系を構築し、実海域で昼から夜にかけての連続ドッキング 実験を行った、これにより、実海域混濁環境下で、さらに照度 が時々刻々と変化する環境に対する提案手法の有効性を示す.







Fig. 2 Design of docking hole



Fig. 3 ROV (Remotely operated vehicle)

## 2. 光環境適応特性を有する3次元空間認識手法

## 2.1 システム構成

ここでは、本研究のドッキングシステムに関して説明する. まず、本研究における嵌合実験のレイアウトを図1に示す.本 研究では、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 離とし、嵌合の成功条件は、図2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

Operating depth [m]	150		
Dimensions [mm]	450 (W) $\times$ 600 (L) $\times$ 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)		

Table 1 Specification of ROV

Table 2	Specification of camera
Resolution	$640 \text{ [pixel]} \times 480 \text{ [pixel]}$
	(0.00638[mm/pixel])
Angle of view	$80.4^{\circ} \times 64.9^{\circ}$
Focal length	$2.9 \; [mm]$
Frame rate	$30 \; [\mathrm{fps}]$
Distance of camer	cas 178 [mm]
Camera direction	Along to $x$ axis



Fig. 4 Active 3D marker made by SEC Corporation

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.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,図1に示すように取り付けた嵌 合棒の長さの関係から 350[mm] となっている.

次に,本研究では,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(図3)を用い る. ROV の仕様を表1に示す. ROV は,後方の2つのスラ スターで,図3に示す x 軸方向, z 軸回転の推力を生み出し 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



Fig. 5 Flowchart of the 3D pose estimation using RM-GA

るときに発生する 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 (表 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.また,本研究では,近距離での精度 の高い嵌合制御を実現するために,表2に示すように焦点距 離が2.9[mm]と短い焦点距離を持つカメラを用いて嵌合直前 の位置姿勢計測精度を高めている.

また, 嵌合ステーションと水中ロボットとの3次元の相対 位置姿勢を推定するためのマーカーとして,図4に示す発 光3次元マーカーを用いる.発光には,赤色 (Optoupply 製 O5CA5B61P) · 緑色 (Optoupply 製 OPG5161P) · 青色 (Optoupply 製 OB5161P) の LED をそれぞれ用いている. さら に LED は、ABS 樹脂を用い3 D プリンタで製作した 3 色に 着色した直径 40[mm] の球体の中に内蔵されている. なお図 4 に示す SEC 製発光 3 次元マーカーはジェラフィン樹脂を封 入した構造であり、高水圧化での使用が可能となっている. ま た,発光3次元マーカーは混濁環境下での使用も想定してい る.本研究のように、光学式センサを用いた位置姿勢計測は、 水の混濁の程度に依存して位置姿勢計測が困難となる.本研究 における嵌合開始距離は, 文献<sup>17)</sup>において水中の濁度環境と 発光3次元マーカーにおける視認性から精度の高い嵌合が可 能な距離を検証し、濁度環境においても発光3次元マーカー を認識可能であり、安定して嵌合ができる距離に設定したもの となっている.

#### 2.2 発光3次元マーカーの認識手法

次に、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<sup>18)</sup>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 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. これは、時々刻々 と変化する光環境下(浅い海での太陽光の射角変化と風雨や雲 の気象の変化による光環境自身の移り変わりと、水中ロボット の移動による空間的変化に起因する光環境変化を含む)では, 時間的認識応答能力を優先すべきとの判断に基づいている. こ れは、光学式誘導時の光変化による閉ループ系特性の不安定化 を防ぐ.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. 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5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が、図の右 側にあるように、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.

#### 2.3 先行研究における問題点

先行研究<sup>15,16)</sup>においては,発光3次元マーカーの認識の 安定性を向上させるために、3次元マーカーの明るさの度合い を評価する発光マーカー用の適合度を,図6に示す3次元モ デルに重なる実画像の色相値(Hue)と明度(Value)に関し て2次元画像内の球モデルの内部領域 (Sin) と外部領域 (Sout) の差を取ることによって計算していた.しかしながら、HSV 表色系において明るさの度合いを示す明度を用いた場合,濁 度が高い環境においては,適切な3次元モデルの評価ができ ない状況が存在した.これは、濁度環境下では、発光3次元 マーカーの光が周囲に拡散し、図7に示すように明度の分布 ではマーカ球の内部領域と外部領域の明度差がなく、それぞれ の区別がつかない状態となるためである. 画像上の RGB 値を HSV 値に変換する際,明度 V は  $V = max\{R, G, B\}$  で計算 されている. したがって V は RGB 値の最大値をそのまま用 いるため, その他の 2 つの RGB 値は V の値を決める際には 考慮されていない. 明度は RGB 値の最大値であるため明度差 がほぼなく、これらの色の判別をすることが困難という結果に なってしまう.

そこで、本研究では、RGB 値の加重平均により計算される 輝度値 B<sub>r</sub>(= 0.2990R+0.5864G+0.1146B) を取り入れるこ とによってこの問題の解決を行う.図7右下に輝度の分布を 示す.右下の輝度分布の方が,左下の明度分布よりもマーカー 球の内部・外部の領域の差が表れていることがわかる.これら により,適合度を計算するにあたって明度差ではなく輝度差を 用いる方がより認識の性能が向上すると考えられる.



(a) 3D marker made of 3-spheres with red, green and blue colors



- (b) Evaluation points defined in one sphere of the 3D model projected in camera image
- Fig. 6 Construction of solid 3D model to estimate pose of 3D marker



Fig. 7 Comparison of distribution between Value and Brightness in a camera image

# 2.4 HSV/Brightness の4成分を用いた適合度関数

従来の HSV 表色系に基づいた適合度関数に,輝度の評価を 加えた新たな適合度関数を提案する.ここで従来手法について 述べる.従来手法では,以下の式を定義し,明度差を用いた評 価を行ってきた.

$$p_{v}(^{i}\boldsymbol{r}) = \begin{cases} 1 & ,if \ |V(^{i}\boldsymbol{r}_{in}) - V(^{i}\boldsymbol{r}_{out})| \ge 10 \\ -1 & ,otherwise \end{cases}$$
(1)

ここで、 $V(\bullet)$ は、 $\bullet$ での明度値であり、 ${}^{i}r_{in}$ は、図 6 (b) に 示すように 3 次元マーカー点群モデルの画像座標系における i 番目の点 ${}^{i}r$ が、 ${}^{i}r \in S_{in}$ を満たす評価点座標である.iは、 球モデルの輝度に関する適合度を計算する際に使用するi 番目 のペアを表す. 同様に、 ${}^{i}r_{out}$ は、 ${}^{i}r \in S_{out}$ を満たす座標で ある.また閾値は、これまでの実験的に確認し、設定した値と なっている. 従来手法ではこのように明度差を用いた評価を 行ってきたが、明度差を用いた評価では上述のような問題点が 存在していた.そこで本研究では、従来手法の適合度関数にお ける明度差の評価に代わりに輝度差を用いた評価を行うため に、輝度の評価として、 $p_{b}({}^{i}r)$ を定義する.

$$p_b(^{i}\boldsymbol{r}) = \begin{cases} 1 & ,if \ |B_r(^{i}\boldsymbol{r}_{in}) - B_r(^{i}\boldsymbol{r}_{out})| \ge 10 \\ -1 & ,otherwise \end{cases}$$
(2)

ここで, $Br(\bullet)$ は、 $\bullet$  での輝度値を表す.次に、HSV 評価として、 $p_h(^i r)$ を定義する.

$$p_{h}(^{i}\boldsymbol{r}) = \begin{cases} 1 & ,if \ (h_{min} \leq H(^{i}\boldsymbol{r}) \leq h_{max}) \cap \\ & (s_{min} \leq S(^{i}\boldsymbol{r}) \leq s_{max}) \cap \\ & (v_{min} \leq V(^{i}\boldsymbol{r}) \leq v_{max}) \\ -1 & ,otherwise \end{cases}$$
(3)

ここで,  $H(\bullet)$  は,  $\bullet$  での Hue 値,  $S(\bullet)$ ,  $V(\bullet)$  は, Saturation, Value 値をそれぞれ表す. また,  $w_{min}, w_{max}(w = h, s, v), s, v$ は設定値である. さらに,  $f_b, f_h$ を以下のように定義する.

$$f_b = \frac{1}{N_{pair}} \sum_{i=1}^{N_{pair}} p_b(^i \boldsymbol{r}) \tag{4}$$

$$f_h = \frac{1}{N_{pair}} \{ \sum_{i \boldsymbol{r} \in S_{in}} p_h(^i \boldsymbol{r}) - \sum_{i \boldsymbol{r} \in S_{out}} p_h(^i \boldsymbol{r}) \}$$
(5)

ここで、 $N_{pair}$ は、1つの球モデルのペア数をそれぞれ表す. また、 $f_{b}, f_{h}$ は、負の値を取りうる関数となっているが、0~ 1の値をとる関数としてそれぞれ評価を行うため、負の値を関 数が取った場合には0を代入する.次に、総合評価として下記 の $F_{u}$ を定義する.

$$f_u = f_b + f_h - f_b \cdot f_h \tag{6}$$

ここで,上式右辺に " $f_{b\cdot h}$ "が含まれている理由について述べる.式 (4),(5)より  $f_b$ , $f_h$ は 0~1の値をとる関数であるが,式 (6)の  $f_u$ も同様に 0~1の範囲に留めるため,この形とし

ている.上式は、3 つのカラー球 (u = R, G, B) の内の1 つに ついての評価を示すが、RGB 球の総和として、

$$f = \frac{1}{3} \sum_{u=R,G,B} f_u \tag{7}$$

を定義し, さらに左カメラの f 値  $f_L$  と右カメラの f 値  $f_R$  の 平均値 F を

$$F = \frac{1}{2}(f_L + f_R) \tag{8}$$

と定義する.

式(8)に示すように、提案する適合度関数は複合型の対象物 評価法となっている.また,式(2)は、球内外の差、つまり、 微分要素を含み,式(4)(5)は,積分を含んでおり,それぞれ の特性を利用している.本研究では、式(5)に示す色相の評価 による適合度を「色相適合度」,式(4)に示す輝度の評価によ る適合度を「輝度適合度」と呼ぶことにする.式(4)に示す輝 度適合度 fb は図 6 (a) に示す対象物のモデルの内部領域と外 部領域の輝度値の差分を取ることによって決定される.図6 (b) に示すように、各点 (輝度適合度の場合は点のペア) に対 して式(2),(3)を用いて得点の評価を行ない、平均を取る ことでそれぞれの適合度とする. そして, それらの適合度を式 (6)によって合成することによって、最終的な適合度とする. 式(6)は2つの適合度(色相適合度および輝度適合度)のど ちらかが高ければ最終的な適合度 F も高くなる関数として設 計している.このため、光環境や濁度の変化などに対して適応 的な認識性能が実現されると考えられる.

#### 2.5 光環境変化に適応する特性を持つ適合度関数

式(8)を用いた適合度関数では、発光3次元マーカーの各 球ごとに評価を行うため、すべての球が3次元モデルと一致 せず(つまり、2つの球のみ一致し、残り1つが一致していな い状態)とも適合度が高くなってしまう状況が存在することに より生じていると考えられる.そこで、本研究では、発光3次 元マーカーの3つのすべての球と3次元モデルが一致した時 のみに、評価を高くする方法を導入することによって、問題点 の解決を試みる.提案する適合度関数を以下に示す.まず、式 (4)に示す $f_b \in f_b'$ として、式(9)に示す3球一致条件を付加 する.

$$f'_b = f_b + \frac{1}{N_{pair}} \left( \sum_{i=1}^{N_{pair}} q_b({}^i \boldsymbol{r}) \right).$$
(9)

$$q_b({}^i\boldsymbol{r}) = \begin{cases} 2 & , if \prod_{u=R,G,B} {}^u p_b({}^i\boldsymbol{r}) = 1 \\ -1 & , otherwise \end{cases}$$
(10)

ここで、 ${}^{u}p_{b}({}^{i}r)$  (u = R, G, B) は、式 (1) を用いて定義され、  ${}^{i}r$  における赤、緑、青の輝度値の内外点の差が 10 以上存在す るとき、"1"と値をとる。同様に、式 (5) に示す  $f_{h}$  に代えて、  $f'_{h}$  を式 (11) に示す。

$$f_{h}' = f_{h} + \frac{1}{N_{pair}} \left( \sum_{i=1}^{N_{pair}} q_{h} \left( {}^{i} \boldsymbol{r} \right) \right)$$
(11)

$$q_h(^{i}\boldsymbol{r}) = \begin{cases} 2 & , if \prod_{u=R,G,B} {}^{u}p_h(^{i}\boldsymbol{r}) = 1 \\ -1 & , otherwise \end{cases}$$
(12)

次に,式(6),(7)と同様に, $f'_h$ , $f'_b$ を用いて $f'_u$ ,さらにf'を 定義する.

$$f'_{u} = f'_{b} + f'_{h} - f'_{b} \cdot f'_{h} \tag{13}$$

$$f' = \frac{1}{3} \sum_{u=R,G,B} f'_u \tag{14}$$

さらに, 左カメラの f' について  $f'_L$ , 右カメラについてを  $f'_R$ と定義し, 最終的な評価関数 F' を以下のように定義する.

$$F' = \frac{1}{2} \left( f'_L + f'_R \right)$$
 (15)

このように,新たに提案した適合度関数 F'では,各色のモデ ルと画像上の3次元マーカーが,全て一致することで加点し, 1 色でも外れると減点を行う関数となっている.これにより, 3 次元マーカーとモデルが少しでもずれている際に適合度を減 少させることが可能となり,認識精度をより高めることがで きる.

## 2.6 予備実験

#### **2.6.1** 画像を用いた適合度分布の評価

ここでは、輝度値に基づく適合度関数である式(8)の有効 性を検証するために, 従来手法である明度を用いた適合度関数 と提案手法である輝度を用いた適合度関数の比較実験を行う. 色相適合度の計算時に使用する色相範囲を表3に示す. ここ で,本研究で用いている水中カメラは,カメラごとに個体差 があり、同一の発光3次元マーカーを撮像し得られた画像に おける色相分布が異なるため、異なる色相範囲を用いている. 本実験において、濁度が高い環境下での認識性に関する評価を 行うため,図8に示す照度,濁度がそれぞれ,0[lx],15[FTU] である画像を用い,3次元空間中を全探索することにより,適 合度関数の分布を生成し比較を行う.マーカーと水中カメラ間 の距離は 400[mm] と設定した.本研究では、マーカーの姿勢 をユニットクオータニオン ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ) で表現している. また. ε1, ε2, ε3 の単位 []は, 無次元であることを示し, それぞれ, x 軸, y 軸, z 軸の回転量を表す. 図 9 に図 8 の左右カメラ画 像より作成した y 軸回り ( $\varepsilon_2$ ) と z 軸回り ( $\varepsilon_3$ ) に関する適合度 分布を生成した結果を示す. 図 9 の分布は, y 軸回り ( $\varepsilon_2$ ) と z軸回り ( $\epsilon_3$ ) を除く他の位置姿勢に関して, 真値を設定して 分布を生成した.空間内のマーカーの位置 (x, y, z) に関する 分布については、(ε1,ε2,ε3)に比べて最大ピークが明確に出や すいので、ここでは、 $\varepsilon$ に関する分布で評価することとした. 図 9(a), (b) に示す適合度分布をそれぞれ比較すると、どちら もほぼ単峰性の分布となっており、最大値を探索しやすい分布 となっていることがわかる.また,図 9(a) に示す従来手法の 適合度関数の最大値は 0.80 となっており、(b) に示す提案手 法の最大値は 1.00 となった. 図 9 に示す従来手法による分布 の最大値が低い原因としては、上述のように高い濁度環境下 で明度を用いた場合、水中に含まれる粒子が光を拡散し、実 際の3次元マーカーの球よりも大きい領域が3次元モデルの 内部領域として識別されてしまったため、3次元モデルとの一 致度が低下したと考えられる.一方で、(b)に示す輝度を用い た提案手法の分布では、最大値が1.00となっており、実際の マーカーとモデルがほぼ一致していることがわかり、より精度 の高い姿勢の認識をしていると考えられる.

Table 3 Hue ranges of left and right cameras that are detected and calculated as red, green and blue in fitness function

		Red	Green	Blue
Right Camera	$h_{min}$	160	260	0
	$h_{max}$	200	320	60
Left Camera	$h_{min}$	160	250	20
	$h_{max}$	200	340	70



Fig. 8 Left and right camera images of active 3D marker taken from our stereo-vision system of ROV at night in water with turbidity of 15 [FTU]

## 2.6.2 夕暮れの認識時における問題点

上述のように,提案手法は従来手法よりも濁度環境下にお いて安定した認識を可能にする適合度関数だと考えられる.し かしながら,照度が時々刻々と変化する実海域での嵌合実験 において,認識が失敗してしまう状況が存在した.ここでは, その嵌合実験に関する報告を行う.また,昼間の時間帯と夜間 の時間帯における連続嵌合には成功しているが,その詳細に関 しては,文献<sup>19)</sup>に記載されているため本稿では扱わないこと とする.

本研究において嵌合は,  $x, y, z \ge \varepsilon_3$  (z 軸回り)に対して P 制御を用い制御を行っている.水中ロボットには,進行方向に x 軸,進行方向右側の水平方向に y 軸を持つロボット座標系が 固定されている.各軸方向の目標値を  $x_d, y_d, z_d, \varepsilon_{3d}$  (姿勢の 表現法にはユニットクォータニオンを用いている),計測値を  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\varepsilon}_3$  と表す.この時, $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\varepsilon}_3$  が,  $|y_d - \hat{y}| < 30$  [mm] かつ  $|z_d - \hat{z}| < 30$  [mm] かつ  $|\varepsilon_{3d} - \hat{\varepsilon}_3| < 0.0436$  []の嵌合可 能範囲を満たすとき,奥行き方向の目標値を  $x_d = 600 - 30t$ [mm] と時変で減少させることで x 軸方向に ROV が,前進し 嵌合穴に嵌合する手順をとっている.また,外乱によって偏差



(a) Conventional method. The distribution of conventional fitness function defined by Eq.(8) in conditions that the



- (b) Proposed method. The distribution of proposed fitness function defined by Eq.(8) based on the derivation described through Eq.(2) to Eq.(8).
- Fig. 9 Experimental results of the fitness distribution, through which characters of conventional and proposed fitness functions are compared.

が嵌合可能範囲外に出ると水中ロボットとマーカー間の目標距 離 x<sub>d</sub> 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<sub>d</sub> を減少させるような制御システムを用いて実 験を行った.

本実験は、2018年1月16日岡山大学牛窓臨海実験海域に おいて 16 時 56 分から 17 時 35 分に行い, この日の日没時間 は17時19分となっているため、照度が時々刻々と変化する タ暮れの時間帯における嵌合実験となっている. 嵌合実験の データを図 10 に示す. 図 10 の上部に実験時の適合度関数と ROV の左右カメラ画像,下部に x 軸方向の目標位置 x<sub>d</sub> を示 す. また, グラフ中に示している 1 から 23 までの数字は連続 嵌合回数を示している. ROV からの取得画像から分かるよう に照度が徐々に下がり始め、日中環境から夕暮れ環境に変化し ていることが確認できる.ここで、夕暮れ前の 170[s]~1700[s] のカメラ画像のマーカーは光っていないように撮像され、肉眼 でも同様に見えるが、実際には LED は点灯している.太陽光 が照らしている状況では、このようにマーカーは光っていない ように見える.16回目の嵌合から適合度が低い値を示してい るため、その時間帯から夕暮れ環境に変化したと考えられる. 約40分で23回の連続嵌合に成功したが、その後、対象物の

認識が困難になったため実験を終了した.

そこで,図 11 に 23 回目の嵌合データを示す. (a) に適合 度,(b)に x 軸方向の推定値と目標値,(c)に y 軸方向の推定 値と目標値と嵌合可能範囲,(d)にz軸方向の推定値と目標値 と嵌合可能範囲, (e) に z 軸周りの回転 ɛ3 と推定値と目標値 と嵌合可能範囲を示している.図10の23回目の嵌合実験で は,目標値 x<sub>d</sub> が,嵌合終了距離の 350[mm] に到達している ことから、嵌合が行えていると判断できる.しかしながら、図 11 のグラフ (c),(d) より y,z の認識値は嵌合可能範囲を中心に 振動しており, 嵌合可能状態となる時間帯が存在することを確 認できる. グラフ (e) より  $\varepsilon_3$  の認識値は大きく振動しており, 嵌合可能範囲から外れることが多かった.そのため、図10の 23 回目の嵌合が示すように、23 回目の嵌合では約 200[s] と他 の嵌合時に比べて長くなったと考えられる.23回目までは嵌 合に成功したが24回目は嵌合を成功することができなかった ため,連続嵌合実験を終了した.しかしながら,先行研究<sup>19)</sup> でも示した通り, 完全に照度がゼロ付近になる日没後におい ては、認識が安定し、再度嵌合実験に成功することができた. このことから、提案した適合度関数は、夕暮れ時に適合度が下 がり、z軸回りの姿勢  $\varepsilon_3$ の認識が安定しないといった問題点 が存在した.

#### 2.7 比較実験

ここでは、光環境変化に適応する特性を持つ適合度関数 F' である式 (15) の有効性を検証するため,図 10 の夕暮時に撮 影した 2140[s] の画像を用いて ε<sub>2</sub> と ε<sub>3</sub> の適合度分布の式 (8) の適合度関数 F に対する比較を行った.本実験では、嵌合時 の画像を用いているので,位置姿勢の正確な真値が分からない ため、 $\varepsilon_2$ と $\varepsilon_3$ 以外のその他の位置姿勢情報に関しては、嵌合 実験時における RM-GA の推定値である  $(x, y, z, \varepsilon_3) = (531.0)$ [mm], -2.6 [mm], -32.5[mm], 0.0438 []) を用いた. 図 12 と図 13 に式 (8) の適合度関数 F と提案手法である式 (15) による 適合度分布 F'をそれぞれ示す. 図 12 は、多峰性の分布であ ることが確認できる.このように、適合度分布のピークが多峰 性になっており、さらにこの分布が時変で変化し RM-GA で 求められた最適解が一定値にならないことが,認識値が図11 のグラフ (e) のように ε3 の認識値が振動的となり収束しない 原因だと考えられる.また,図12と図13を比較すると,図 13 の方がピークが鋭く、単峰性に近いグラフになっているこ とが分かる.これは,式(9),(11)の3球一致条件の効果であ る. そのため,提案手法を用いることによって認識精度が向上 するとともに時間応答特性を改善すると考えられる.

#### 3. プール環境における昼夜連続認識実験

提案手法が夕暮れの時間帯の時々刻々と変化する光環境に おいて適応的に認識可能であるかを検証するために,屋外の プールを用いた昼夜連続認識実験を行った.以降の節では,実 験の詳細に関して説明していく.



Fig. 10 Docking experimental results at Ushimado in dusk time



Fig. 11 Results of the pose estimation in the 23rd docking experiment. (a) Fitness value, (b) Position along x-axis, (c) Position along y-axis, (d) Position along z-axis, (e) Orientation around z-axis

#### 3.1 実験環境

図 14 に実験環境を示す.本実験では,屋外に設置している プールにて発光3次元マーカーを水中カメラから 600[mm]の 位置に設置し,日中から日没までの時間帯である 2019 年 12 月 10 日の 15 時 40 分から 17 時 40 分までの認識実験を行った.



Fig. 12 Fitness distribution of  $\varepsilon_2$  and  $\varepsilon_3$  calculated by the fitness function F that is defined by

今回の実験では発光 3 次元マーカーの電流値を赤:0.98[mA], 緑:1.96[mA],青:1.90[mA] に設定している.

### 3.2 実験結果

Eq.(8)

図 15 にプールでの位置姿勢固定状態でのマーカー認識位置 姿勢連続計測実験の結果を示す.図 15 の上部のグラフは提案 手法である式 (15) の適合度 F',式 (9) で示される輝度適合度  $f'_b$ ,式 (11) で示される色相適合度  $f'_h$  と水中カメラからの画 像を示し、下部のグラフでは照度と実験環境の画像を示して おり、照度は 2721[Lx] から 0[Lx] まで推移している.ここで、 照度は Milwaukee 社製 LX-1010B の照度計を用い、プールに



Fig. 13 Fitness distribution of  $\varepsilon_2$  and  $\varepsilon_3$  calculated by the proposed fitness function F' that is defined by Eq.(15)



Fig. 14 Appearance of recognition experiment

設置したステーション上で計測を行った.図 15 の上部のグラ フより色相適合度  $f'_h$  は実験開始から 4800[s] まで約 0.6 と高 い値を示しており,4800[s] から 6000[s] の間に徐々に低下し ていき,6000[s] 以降は約 0.2 付近を推移していることが分か る.一方で,輝度適合度  $f'_b$  は実験開始から 4800[s] まで約 0.2 程度を示しており,4800[s] から 6000[s] の間に徐々に上昇し ていき,6000[s] 以降は約 0.6 付近を推移していることが分か る. 色相と輝度の適合度からなる提案手法の適合度は実験開始 から終了まで常に 0.5 以上の値を示していることが分かった.

次に,図 16 に図 15 に示す実験時の位置姿勢などの計測結 果を示す.それぞれの $y,z,\varepsilon_3$ における嵌合条件は図 10 の嵌 合条件と同じであり,それぞれ-30~30,-30~30,-0.0436~ 0.0436 に設定している.位置姿勢の推定結果は一定のオフセッ ト誤差が存在しているものの全ての時間帯において嵌合条件 の中に入っていることが分かる.また,x軸方向の距離の推定 値も 560[mm] 付近を推移している.このことから,提案手法 における適合度関数は,昼から夜にかけても安定した認識を



- Fig. 15 Results of recognition experiment. The graph at upper part: Fitness function of F' given by Eq.(15), Brightness value  $f'_b$  given by Eq.(9) and HSV value  $f'_h$  given by Eq.(11) and left and right camera images of dual-eye cameras. The graph at lower part: Illuminance and appearance of recognition experiment
- 行えており,光環境が変化する状況においても適応的に発光3 次元マーカーを認識可能な手法であると考えられる.

Table 4Experimental condition		
Place	Ushimad	
Date	07/02/2020	
Time	$16:13 \sim 18:38$	
Turbidity	$1.7 \sim 3.2 \; [FTU]$	
Wave hight	$10{\sim}15~[{\rm cm}]$	
Depth	$1.7 \sim 2.3 \ [m]$	

## 4. 実海域における昼夜連続篏合実験

本研究では、前章の認識性能実験によって確認された結果の 有効性を検証するために実海域での嵌合制御実験を行った.実 験条件について,表4に示す.本実験は、表4に示すとおり、 16時13分から18時38分までの連続嵌合実験を行い、148回 の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 境変化での性能を比較するために、日中、夕暮れ、夜間の時間



Fig. 16 Results of continuous recognition experiment of fixed marker from daytime to nighttime at the outdoor pool. (a)Fitness function,(b)Illuminance,(c) Position in xdirection,(d) Position in z-direction,(e) Position in y-direction,(d) Orientation around zaxis

を含む 90 回目から 113 回目までの連続嵌合の結果を図 17 に 示す.図17(b)より、予備実験における適合度関数の推移と は異なり,適合度の値が振動していることがわかる.これは, 認識実験では、発光3次元マーカーとカメラ間の距離は固定 されていたが、本実験では、嵌合動作を行っているため、マー カーとカメラ間距離が水中ロボットの動揺とともに変化してい るためである.そこで、約1分間ごとの適合度の移動平均を 取った結果を図 17 (c) に示すが,日中は式 (11) で示される色 相適合度 f'h が支配的に, 夜間は式 (9) で示される輝度適合度 fi が支配的に作用していることがわかる. さらに、プール環 境での認識実験と同様に、夕暮れの時間帯において、色相適合 度から輝度適合度へ支配が変化する光環境においても提案手法 の式 (15) で示される適合度関数 F'を用いることで、適合度 は減少せず概ね 0.5 以上の高い値を推移していることがわか る. また,図 17 (a) において,夕暮れの時間帯における嵌合 時間の間隔はほぼ一定であることから、光環境が変化する夕暮 れの時間帯においても発光3次元マーカーを見失わず認識で きていると考えられる.これらのことから、夕暮れ時のよう な時事刻々と変化していく光環境においても提案手法は発光3 次元マーカーを認識可能であり、光環境の変化に対して適応特 性を持つ適合度関数となっている.

次に、日中の時間帯である 92 回目,夕暮れの時間帯である 104 回目と夜間の時間帯である 110 回目の嵌合制御に関する結 果を図 18-20 に示す.本実験では、上述の嵌合実験と異なり、 嵌合可能範囲が、x 軸方向の目標値である x<sub>d</sub>の大きさによっ て変化する関数を用いているため、各図の (b),(c) における嵌 合可能範囲が変化している.具体的には、y,z 方向の嵌合可能 範囲を x の 1 次関数で減少させている.しかしながら,目標 値 x<sub>d</sub> に応じて変化する関数となっているため,時間の関数と しては,1 次関数にならない.夕暮れと夜間の時間帯における 図 19,20 では,適合度が概ね 0.7 を超えており,安定して 3 次 元位置姿勢の推定が行えていることがわかる.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,ほとんど嵌合可能範囲に収まっており,振動の幅 も少ないことがわかる.図 15,16 に示した予備実験において は夕暮れの時間帯では姿勢の推定が振動してしまい安定しな かったが,提案手法である 3 球が一致条件を付加した手法を 用いることによって,姿勢の推定精度が向上したことにより, スムーズな嵌合動作が可能になったと考えられる.

一方で,昼間の時間帯における図 18 では,5690[s] から 5710[s] 付近において, z 軸の回転方向に振動が生じているこ とがわかる. ここで,図18(f)に示すカメラ画像を確認する と, 5695[s] と 5698[s] の画像において, 嵌合棒の角度と嵌合 穴の方向を見比べると、ROV に対して嵌合穴が正面を向いて いないことがわかる.このことから、この振動は、発光3次元 マーカーの誤認識において生じたものではなく、潮流方向が変 化したため ROV が回転し, 生じたものだと考えられる. また この時, y 軸方向に対する誤差も生じており, その誤差を修正 する過程において、z軸の回転方向に誤差が出たことも原因の 1つであると考えられる.この潮流方向の変化に伴い, z 軸回 転 ε3 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図 18(e) から,確認すること ができる.しかしながら、嵌合中、発光3次元マーカーの認 識は適切に行われており、この誤差を徐々に減少させていくこ とによって、z軸回転に対する誤差が嵌合可能範囲に収まった 後は, 目標値 x<sub>d</sub> を減少させていき, 最終的には嵌合に成功し ている.このように、本研究において提案した適合度関数は、 昼夜連続で使用可能であり、光環境の変化に対して適応特性を 持つ3次元位置姿勢の認識が実現可能な手法となっている.

# 5. 結言

本稿では、混濁環境と光環境の変化に対して適応特性を有 する認識を可能とする適合度関数によりロバスト性の向上を試 みた.まず、混濁環境下における認識を可能とするために、従 来用いられていた HSV 表色系に基づく適合度関数に輝度値に よる評価を取り入れた適合度関数を提案した.さらに、夕暮れ 時における、姿勢認識の精度を向上させるための手法として、 3次元マーカーの3球が一致したときに適合度が高くなる評価 を行う適合度関数を提案した.実験では、まず屋外のプール環 境において、昼夜連続の認識実験を行い、夕暮れの時間帯にお いても発光3次元マーカーの認識が可能であることを示した. 次に、実海域における昼から夜にかけての嵌合の実証実験を行 い、提案手法を用いることで混濁水中での光環境の変化に対す る適応特性を有することを示し、さらに、昼夜連続での水中ロ ボットの嵌合が可能であることを示した.



Fig. 17 Experimental result of successful repeated docking experiments using the waterproofed current-adaptive docking station. (a) Desired position along x-axis direction, (b) Fitness value with photos of ROV dual-ere cameras, (c) Moving average of fitness value, (d) Illuminance

# 謝辞

本研究は,三井 E&S 造船株式会社の協力を得ました.ここに 謝意を表します.また本研究は,JSPS 科研費 JP 19H04190 の助成を受けたものです.

#### 参考文献

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

- 3) 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.
- 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.
- 5) 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).
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- (10) 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.
- 11) Myint, 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 Intergaration (2015), pp.989–994.
- 12) 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.
- 13) Kanda, Y., Mukada, N., Yamada, D., Lwin, K.N., Myint, M., Yamashita, K., Nakamura, S., Matsuno, T., Minami, M., Development and Evaluation of Active/Lighting Marker in Turbidity and Illumination Variation Environments, Proceedings of

2011 年 9 月

IEEE/MTS Techno-Ocean Conference 2018 (2018), Paper No.171129-095.

- 14) Lwin, K. N., Myint, M., Mukada, N., Yamada, D., Matsuno, T., Minami, M., Robustness of 3D Pose Estimation against Turbidity Using Dual-eye Cameras and Active/Lighting 3D Marker for Visual-servoing Based AUV, Proceedings of IEEE/MTS Techno-Ocean Conference 2018 (2018a), Paper No.171129-081.
- 15) Yamada, D., Mukada, N., Myint, M., Lwin, K.N., Matsuno, T., Minami, M., Docking Experiment in Dark Environment Using Active/Lighting Marker and HSV Correlation, Proceedings of IEEE/MTS Techno-Ocean Conference 2018 (2018a), Paper No.171129-098.
- 16) Yamada, D., Mukada, N., Myint, M., Lwin, K.N., Matsuno, T., Minami, M., Improvement of 3D-Pose Realtime Estimation by Active Marker and HSV-evaluated Function, 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, (2018b).
- 17) 戸田 雄一郎,向田 直樹,許 弘毅,見浪 護,発光型3
   次元マーカーの濁度耐性の検証とその有効性確認のための
   実海域ドッキング実験,日本船舶海洋工学会論文集,Vol. 31, No. 13 (2020), pp. 145–162.
- 18) Khin, N. L., Myint, M., Mukada, M., 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.
- 19) 中村 翔,山田 大喜,神田 佳希,山下 耕平,向田 直樹,松野 隆幸,見浪 護,"複眼カメラを搭載した DELTA-150 のビジュアルサーボ系構築",JSME ロボ ティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH 2018), 2P1-A10, 2018.6.2-5



Fig. 18 The 92nd Docking performance. (a) Fitness value, (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. 19 The 104th Docking performance. (a) Fitness value, (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. 20 The 110th Docking performance. (a) Fitness value, (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