

発光 3D マーカーによる混濁深海模擬環境下での認識性能評価

Evaluation of Recognition Performance Using Active 3D Marker under Simulated Turbid Deep Sea Environment

○岡田 優也 (岡山大) 山田 大喜 (岡山大)
 李 想 (岡山大) 許 弘毅 (岡山大)
 神田 佳希 (岡山大) 山下 耕平 (岡山大)
 中村 翔 (岡山大) 門田 拓也 (岡山大)
 正 戸田 雄一郎 (岡山大) 正 松野 隆幸 (岡山大)
 正 見浪 護 (岡山大)
 Yuya OKADA, Okayama University, phur9piu@s.okayama-u.ac.jp
 Daiki YAMADA, Okayama University
 Xiang LI, Okayama University
 Horng-Yi Hsu, Okayama University
 Yoshiki KANDA, Okayama University
 Kouhei YAMASHITA, Okayama University
 Sho NAKAMURA, Okayama University
 Takuya MONDEN, Okayama University
 Yuichiro TODA, Okayama University
 Takayuki MATSUNO, Okayama University
 Mamoru MINAMI, Okayama University

Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) have been developed for seabed resources exploration. For that purpose of AUVs, it is necessary that they are able to work for a long time to accomplish these works efficiently. Therefore, to extend active time of the AUV, researches have been conducted on autonomous returning and docking system of the AUV with a power supply station under the surface of the sea. We designed and constructed a dual-eye-based docking system for underwater battery recharging. In this system, the AUV recognizes the light-emission 3D target object installed in the station. However, a recognition performance of this system is affected by turbidity of seawater in the actual sea. To verify the influence of turbidity, evaluation experiments on recognition performance were conducted. In this thesis, we analyzed the recognition performance with different turbidities and recognition distances in dark and turbid environment.

Key Words: Dual-eyes, Fitness function, Turbidity

1 緒言

水中ロボットは、深海底における資源採掘などの活動の手段として国内外で研究が進められている。しかし、これらの作業の効率的な遂行には、ロボットの長期的な活動が可能であることが要求される。そこで、活動可能時間の延長にむけ、ロボットの給電方法として、海底に給電設備を設置し、自身に自動で帰還・充電を行わせるシステムの研究が進められている。現在、我々が研究を進めているビジュアルサーボによる自動嵌合システムは、ロボットに複眼カメラを搭載し、得られたステレオ画像情報から給電設備に設置されたランドマークを認識し自動で嵌合するものである。このシステムを用いて瀬戸内海実海域で自動嵌合を行うことに成功しているが、海水の濁りが認識性能に大きな影響を及ぼし、嵌合が出来ない場合がある。この濁度の影響を検証するため、深海模擬環境を再現し、異なる濁度条件における認識性能の評価を行った。本論文では、ランドマークとカメラ間の距離と濁度の変化させ、異なる条件下での認識性能について解析し、認識可能範囲を確認する。

2 ROV (Remotely Operated Vehicle)

本実験では QI 製 ROV (DELTA-150) を使用する。(図 1) 本ロボットには前面および底面にそれぞれ 2 基の固定カメラ (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) が搭載されており、Move on Sensing 制御

で対象物の立体認識を行うため、前方 2 台を同時使用している。また、前面に搭載されたチルトカメラの映像をもとに操縦者がコントローラを用いてマニュアルで操作を行うことができる。水中動力系では、水平スラスト 2 基 (最大推力 9.8 [N]。以下同様)、垂直スラスト 1 基 (4.9 [N])、横スラスト 1 基 (4.9 [N]) を搭載している。

3 3次元位置・姿勢認識

ロボット前方に搭載された 2 基の固定カメラから取得した画像情報をもとにランドマークの 3 次元位置・姿勢認識を行う。提案するシステムでは、両眼カメラから取得した画像を PC に転送し、Real-Time Multi-Step GA と Model-based Matching 法 [4] を組み合わせてランドマークとの相対的位置・姿勢を認識している。本報告における Real-Time Multi-Step GA と 1-Step GA [6] は、まったく同様の手法である。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、Real-Time Multi-Step GA を採用した。Real-Time Multi-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 3D マーカーの位置・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

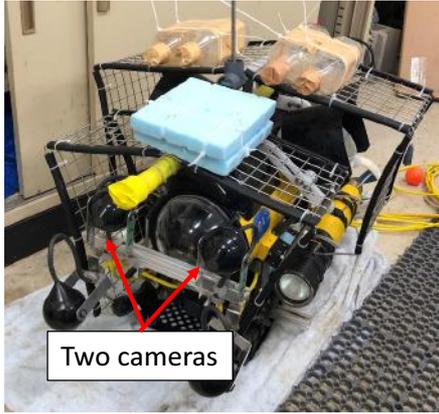


Fig.1 Overview of ROV (DELTA-150)

いる. また, このとき評価に使用する適合度とは, Model-based Matching 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. 一致度合は色相, 彩度, 明度, 輝度差を用いて判断している. これにより, 提案システムではランドマークの3次元位置・姿勢の実時間認識を可能としているまた, 提案システムによる対象物の位置・姿勢の認識情報は, 任意のGA探索空間内で獲得される.

4 発光 3D マーカー

図2に今回ランドマークとして用いた発光 3D マーカーを示す. 主に本体部分, LED を点灯させるための回路部分, 電源部分から構成されている.

発光 3D マーカーでは, 赤, 青, 緑の3色のLEDを使用し, 可変抵抗器を用いて抵抗値の調整をすることができる. また時間経過によるLEDの光量を一定に保つために電池は用いず, AC100V電源から変換器によって直流に変換したものを電源とした.



Fig.2 Active/Lighting 3D Marker

5 適合度関数

対象物を評価する2次元の射影モデルは全 N 個の点群によって構成され, 図3に示すように対象物体自身の評価とその周囲の色相変化を評価するために, 内部領域と外部領域によって区別される. 本研究で用いられている射影モデルは, 各色の球ごとに内部領域 36 個, 外部領域 24 個の点で構成される. 射影モデルとランドマークとの相関度を評価する際に適合度関数を用いる. この適合度関数を定義するにあたり, 色適合度と発光適合度を新たに定義する. 色適合度は彩度や明度が低い範囲を認識させないため, 式 (5.1) に示す通り, 対象物の色相, 彩度, 明度が設定した範囲にある場合, 評価値として "+1" を, 範囲にない場合 "-1" を与える. この評価を射影モデルの N 個の点すべてで行い式 (5.2) に示すように平均を算出する. また, 発光適合度は式 (5.3) に示す通り, 対象物の内部領域と外部領域の輝度差が我々が設定した一定値以上なら評価値として "+1", 一定値以下なら "-1" を与える. そして左右画像それぞれにおいて適合度を計算し, 射影モデ

ルと対象物の相関度を評価する [5].

$$p_{HSV}({}^I\mathbf{r}_j(\phi_i)) = \begin{cases} 1 & \{H_u({}^I\mathbf{r}_j(\phi_i)) \in [h_u - 40, h_u + 40] \\ & u = R, G, B, \\ & S(\phi_i) > 0.10, V(\phi_i) > 30\} \\ -1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.1)$$

$$F_{HSV}(\phi_i) = \frac{1}{N} \left(\sum_{{}^I\mathbf{r}_j(\phi_i) \in S_{in}(\phi_i)} p_{Hue}({}^I\mathbf{r}_j(\phi_i)) - \sum_{{}^I\mathbf{r}_j(\phi_i) \in S_{out}(\phi_i)} p_{HSV}({}^I\mathbf{r}_j(\phi_i)) \right) \quad (5.2)$$

$$p_{Br}({}^I\mathbf{r}_{in}^{(m)}, {}^I\mathbf{r}_{out}^{(m)}) = \begin{cases} 1 & (|B_r({}^I\mathbf{r}_{in}^{(m)}) - B_r({}^I\mathbf{r}_{out}^{(m)})| \geq 10) \\ -1 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5.3)$$

$$F_{union} = F_{HSV} + F_{Bd} - F_{HSV} \cdot F_{Bd} \quad (5.4)$$

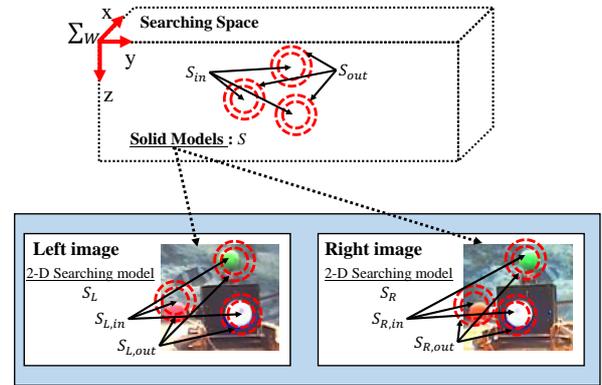


Fig.3 Real Target and Projected 3D Model in 2D Images Obtained by the Right and Left Camera

6 認識性能確認実験

6.1 実験目的

濁度による認識性能への影響を検証するため, 先行研究において, 異なる濁度条件においてランドマークとロボットのカメラの距離を 400, 600, 800, 1000 mm と変化した際の各条件下での認識性能の評価が行なわれた. しかし, 実海域での水中ロボットの動作を想定すると, 1000 mm 以遠からの認識性能も要求される. そこで, 今回の実験はランドマークとカメラとの距離を拡張し, より遠距離での認識性能の確認を目的として行った.

6.2 実験環境

実験環境を図4に示す. 器具を用いて, 複眼カメラをとランドマークを固定しプール内に設置した. ROV と 3D マーカーの座標系は図5に示す. ROV の座標系は Σ_H , 3D マーカーの座標系は Σ_M で表す. ランドマークは, x 方向のみ自由度を持っており, 1200 mm から 2000 mm まで 200 mm ずつ変化させた. また, 3D マーカーの各 LED の値はカメラ画像からマーカーを見たときに各色の色が大きさがマーカーの大きさと同じ程度に見えるという基準のもと, 各球の電流値を赤 LED を 15.0 mA, 緑 LED を 4.0 mA, 青 LED を 4.0 mA と設定した. また, 牛乳を以下に示すように定量ずつ加えることで濁度を変化させた. ここで,

濁度 (Formazine Turbidity Unit, FTU) は水の濁りの程度を表している。濁度はポータブル濁度センサ (OPTEX, TD-M500) を、電流値 (milli Ampere, mA) はデジタルマルチメータ (株式会社マザーツール, MT-2060) を用いて計測した。

濁度環境 最大牛乳投入量: $9.46 \times 10^1 \text{ ml/m}^3$

- 0 ~ $3.64 \times 10 \text{ ml/m}^3$ 間は牛乳を 2.435 ml/m^3 (2 g) ずつ増加
- $3.64 \times 10 \sim 9.46 \times 10^1 \text{ ml/m}^3$ 間は牛乳を 4.870 ml/m^3 (4 g) ずつ増加

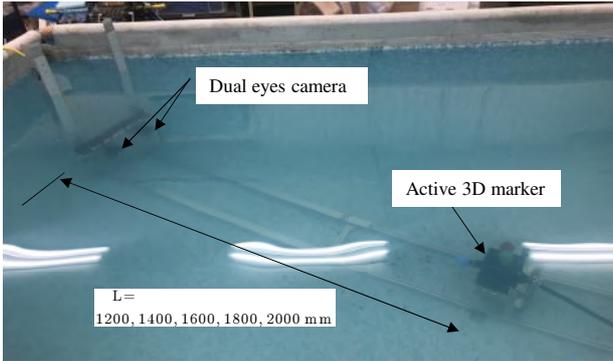


Fig.4 Experiment Environment

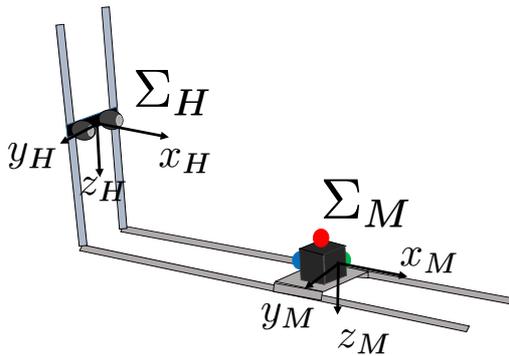


Fig.5 Structure of Jig and Coordinate System Provided in the Experiments

6.3 実験内容

プールの水の濁度は $0 \sim 9.46 \times 10^1 \text{ ml/m}^3$ を 28 分割し、またランドマークとカメラ間の距離は $1200 \sim 2000 \text{ mm}$ を 5 分割し、パラメータとして変化させる。各条件下において 60 [s] 認識を行ない、適合度の平均値を算出する。ROV とランドマークの距離が 1200 mm の際に、ランドマークを完全に認識できなくなった時の濁度を最大濁度とした。また、適合度の平均値を基準に、ドッキング可能範囲 (AREA I), 認識可能範囲 (AREA I I), 認識不可能範囲 (AREA III) を定義し、その範囲を用いて考察を行なう。

6.4 実験結果・考察

各濁度、距離条件下における適合度の平均値を表 1 に示す。1 列目が牛乳投入量と濁度、2 ~ 9 列目は ROV が $400 \sim 2000 \text{ mm}$ の時の各条件下における適合度の平均値を示している。先行実験との比較のため、先行実験の結果 (ランドマークとカメラ間の距離が $x = 400 \sim 1000 \text{ mm}$) を並べている。また、表 1 中の実線で

囲まれた AREA I は適合度値が 0.6 以上のドッキング可能範囲である。実験から適合度の平均値が 0.6 以上の場合、ROV の安定的なドッキングが可能であることが確認されている。表 1 中の点線で囲まれた AREA II は適合度値が 0.22 以上 0.6 未満の認識可能範囲であり、実験からこの範囲では、ドッキングは可能であるが失敗する場合もある。しかし、安定的な認識が可能であることが確認されている。適合度値が 0.22 未満の AREA III space-1emI の場合、RM-GA によって探索モデルが実際のランドマークに収束しな状態となる認識不可能範囲である。濁度の上昇とともに、AREA I space-1emI の濁度に対する幅が大きくなっていることが見てとれる。また、図 6 の (A),(B),(C) はそれぞれ表 1 中の (A),(B),(C) を付記した適合度の、左右カメラ画像と 60 [s] 間での適合度推移を示している。左右カメラ画像内の点線は探索モデルの位置・姿勢を示している。(A),(B) では探索モデルがマーカーに収束していることが分かる。しかし、(C) では探索モデルがマーカーに収束していないことから RM-GA による位置・姿勢の計測結果が正しくないと言える。また、マーカーの光も濁度の上昇により捉えづらくなり、それに伴い、適合度の平均値も低くなっていることが分かる。これらから、認識においては距離の増加に伴い濁度の影響が大きくなるということが言える。

7 結言

本報告では、認識に対する濁度の影響の検証のため、混濁深海模擬環境での認識性能の評価を行なった。この実験により、ランドマークの距離が増加するにつれ、認識性能への濁度の影響が大きくなることが確認できた。今後、海においても適していることを確認し、様々な環境に対応できるシステムの構築を目指す。

References

- [1] Myint, M., Yonemori, K., Yanou, A., Ishiyama, S., Minami, M., "Robustness of visual-servo against air bubble disturbance of underwater vehicle system using three-dimensional marker and dual-eye cameras", In OCEANS 2015-MTS/IEEE, Washington DC, USA (2015), pp. 1-8.
- [2] Myint, M., Yonemori, K., Yanou, A., Lwin, K N., Minami, M., Ishiyama, S., "Visual-based deep sea docking simulation of underwater vehicle using dual-eyes cameras with lighting adaptation", Proceedings of OCEAN 2016-Shanghai, (2016), pp. 1-8.
- [3] Xiang Li, Yuya Nishida, Myo Myint, Kenta Yonemori, Naoki Mukada, Khin Nwe Lwin, Matsuno Takayuki, Mamoru Minami, "Dual-eyes Vision-based Docking Experiment of AUV for Sea Bottom Battery Recharging," MTS / IEEE OCEANS '17, Aberdeen Scotland, June 19-22, 2017.
- [4] 大西洋太, 須浪唯介, 西村健太, 矢納陽, 石山新太郎, 見浪護 (岡山大), 藤本勝樹 (広和 (株)) "MOS 制御知能を搭載した遠隔操作型水中ロボット (ROV) の自律制御化 (AUV) 技術", 第 57 回自動制御連合講演会, 1B08-2, 2014.
- [5] Daiki Yamada, Naoki Mukada, Myo Myint, Khin Nwe Lwin, Takayuki Matsuno and Mamoru Minami Improvement of 3D-Pose Real-time Estimation by Active Marker and HSV-evaluated Function ", 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, B-Con Plaza Beppu, January 18-20, 2018
- [6] 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.

Table 1 The Average Fitness Value Measured with Different Turbidity Levels and Distances between Camera and Active 3D Marker. The Area I Represents the Docking Available Area ($F \geq 0.60$). The Area II Represents the Recognizable Area ($0.22 \leq F < 0.60$). The Remaining Area, the Area III, Represents that the Active 3D Marker cannot be Area by the RM-GA ($F < 0.22$).

Turbidity [FTU]	Distance [mm]	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000
0 FTU (0[ml/m ³])		0.961	0.991	0.983	0.986	0.875	0.849	0.795	0.756	0.748
0 FTU (2.43[ml/m ³])		0.967	0.977	0.985	0.979	0.865	0.840	0.783	0.751	0.757
0.56 FTU (4.85[ml/m ³])		0.962	0.974	0.976	0.972	0.863	0.847	0.782	0.749	0.737
0.76 FTU (7.28[ml/m ³])		0.955	0.975	0.974	0.970	0.856	0.829	0.774	0.720	0.713
1.03 FTU (9.70[ml/m ³])		0.955	0.965	0.963	0.972	0.846	0.806	0.749	0.631	0.619
1.2 FTU (1.21 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.963	0.972	0.959	0.957	0.838	0.787	0.730	0.605	0.574
1.6 FTU (1.46 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.950	0.971	0.962	0.955	0.818	0.780	0.692	0.587	0.481
1.76 FTU (1.70 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.948	0.963	0.949	0.954	0.811	0.765	0.674	0.566	0.458
1.7 FTU (1.94 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.944	0.965	0.948	0.946	0.800	0.754	0.630	0.472	0.427
2.46 FTU (2.18 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.954	0.961	0.955	0.943	0.795	0.708	0.595	0.484	0.384
2.6 FTU (2.43 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.956	0.959	0.950	0.928	0.764	0.660	0.501	0.436	0.339
3.03 FTU (2.67 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.933	0.954	0.956	0.927	0.737	0.625	0.432	0.396	0.229
3.5 FTU (2.91 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.939	0.941	0.947	0.906	0.735	0.538	0.388	0.334	0.214
3.56 FTU (3.15 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.955	0.937	0.947	0.893	0.690	0.518	0.373	0.229	0.196
3.9 FTU (3.40 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.939	0.949	0.943	0.884	0.652	0.464	0.262	0.220	0.205
4.06 FTU (3.64 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.943	0.952	0.936	0.860	0.652	0.440	0.245	0.210	0.188
4.66 FTU (4.12 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.943	0.940	0.917	0.805	0.465	0.255	0.220	0.193	0.171
5.16 FTU (4.61 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.941	0.935	0.895	0.720	0.383	0.243	0.211	0.172	0.157
6.86 FTU (5.09 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.937	0.906	0.853	0.672	0.338	0.232	0.200	0.169	0.116
7.46 FTU (5.58 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.928	0.901	0.815	0.597	0.224	0.219	0.172	0.151	0.076
8.03 FTU (6.06 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.923	0.872	0.763	0.450	0.218	0.191	0.164	0.100	0.039
8.66 FTU (6.55 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.926	0.858	0.700	0.322	0.219	0.173	0.153	0.045	0.036
9.16 FTU (7.03 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.917	0.842	0.651	0.246	0.213	0.168	0.102	0.035	0.037
9.8 FTU (7.52 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.911	0.803	0.581	0.075	0.206	0.148	0.054	0.034	0.037
10.56 FTU (8.00 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.894	0.764	0.509	0.111	0.177	0.132	0.034	0.035	0.037
11.33 FTU (8.49 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.877	0.745	0.418	0.086	0.160	0.074	0.033	0.036	0.037
11.93 FTU (8.97 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.845	0.685	0.307	0.064	0.149	0.035	0.035	0.038	0.039
12.23 FTU (9.46 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.833	0.657	0.150	0.022	0.153	0.049	0.035	0.038	0.039
12.73 FTU (9.94 × 10 ¹ [ml/m ³])		0.817	0.626	0.143	0.023	—	—	—	—	—
13.13 FTU (1.04 × 10 ² [ml/m ³])		0.814	0.578	0.126	0.018	—	—	—	—	—
14.06 FTU (1.09 × 10 ² [ml/m ³])		0.768	0.483	0.102	0.019	—	—	—	—	—
14.6 FTU (1.14 × 10 ² [ml/m ³])		0.760	0.420	0.096	0.017	—	—	—	—	—
15.03 FTU (1.19 × 10 ² [ml/m ³])		0.742	0.402	0.068	0.028	—	—	—	—	—
18.33 FTU (1.29 × 10 ² [ml/m ³])		0.710	0.273	0.046	0.019	—	—	—	—	—
18.5 FTU (1.38 × 10 ² [ml/m ³])		0.631	0.175	0.021	0.021	—	—	—	—	—
19.06 FTU (1.48 × 10 ² [ml/m ³])		0.609	0.084	0.020	0.022	—	—	—	—	—
20.33 FTU (1.58 × 10 ² [ml/m ³])		0.568	0.101	0.019	0.022	—	—	—	—	—
20.93 FTU (1.67 × 10 ² [ml/m ³])		0.548	0.054	0.021	0.020	—	—	—	—	—
22.8 FTU (1.77 × 10 ² [ml/m ³])		0.480	0.063	0.040	0.020	—	—	—	—	—
23.66 FTU (1.87 × 10 ² [ml/m ³])		0.408	0.056	0.021	0.021	—	—	—	—	—
24.96 FTU (1.96 × 10 ² [ml/m ³])		0.387	0.055	0.019	0.019	—	—	—	—	—
25.76 FTU (2.06 × 10 ² [ml/m ³])		0.234	0.035	0.018	0.019	—	—	—	—	—
27.73 FTU (2.16 × 10 ² [ml/m ³])		0.185	0.038	0.021	0.020	—	—	—	—	—
28.5 FTU (2.26 × 10 ² [ml/m ³])		0.211	0.020	0.019	0.021	—	—	—	—	—
29.46 FTU (2.35 × 10 ² [ml/m ³])		0.143	0.023	0.021	0.020	—	—	—	—	—
30.63 FTU (2.45 × 10 ² [ml/m ³])		0.146	0.021	0.019	0.024	—	—	—	—	—

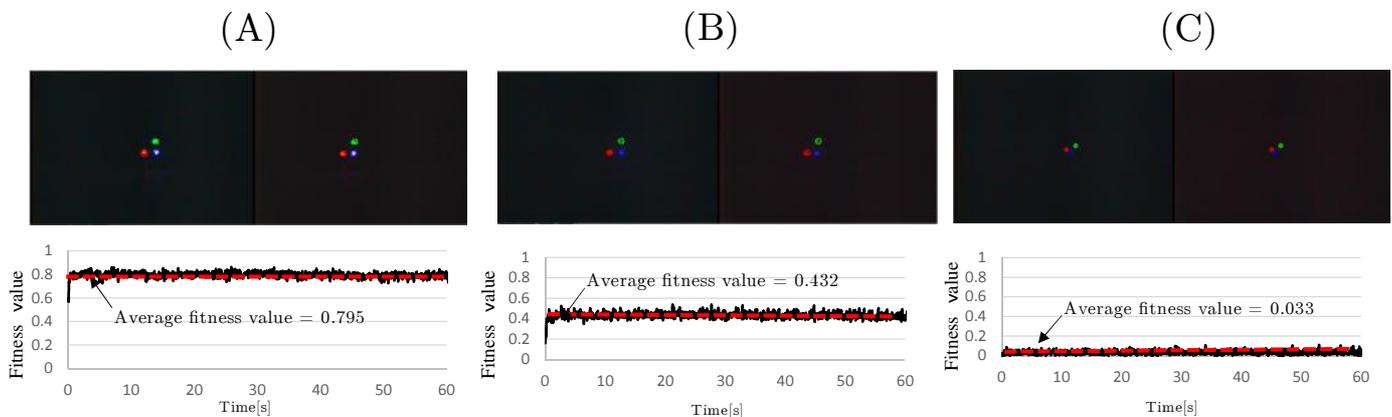


Fig.6 Left and Right Camera Images and Fitness Value of Turbidity are 0[FTU](A), 3.03[FTU](B) and 11.33[FTU](C).