3次元マーカ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

陽*·米 森 健 太*·石 山 新太郎* 矢 納 護*·松 野 隆 見 浪 幸*

Control Characteristics of Visual-servo Type Underwater Vehicle System Using Three-dimensional Marker for Air Bubble Disturbance

Akira YANOU*, Kenta YONEMORI*, Shintaro ISHIYAMA*, Mamoru MINAMI* and Takayuki MATSUNO*

This paper studies a control characteristics of visual-servo type underwater vehicle system using threedimensional (3D) marker under air bubble disturbance on real-time pose tracking for visual servoing. The recognition of vehicle's pose through three-dimensional marker is executed by Genetic Algorithms (GA). The proposed system does not merely calculate the position and orientation information, but can recognize the target position and orientation information through GA while visual servoing, because the system utilizes a threedimensional marker shape and color to recognize the marker. In our previous research, a regulator performance of the system about the vehicle's pose to 3D marker is explored under the condition that there is no disturbance on images. Therefore this paper explores the control results the robustness of the proposed system for air bubble disturbance on the image, aiming at confirming the control characteristics of the proposed visual servoing system. The following results were derived; (1) The proposed system is robust to time-variant target position in x-axis (front-back direction of the vehicle). (2) Although the fitness value of GA is influenced by disturbance, the system can keep recognizing the position and orientation of 3D marker, and tracking by visual servoing could be maintained under the air bubble disturbances.

Key Words: AUV, ROV, visual servoing, genetic algorithm

1. はじめに

気中や宇宙で活用するためのロボットの研究開発の現状と 比較して、水中ロボットはその活用の可能性の大きさにもかか わらず、いまだ発展途上の段階である。特に作業対象物をいか に画像認識させるかが,活用の可能性を拡げるためのキーポイ ントであると考えられる.水中ロボットは ROV (Remotely Operated Vehicle) や AUV (Autonomous Utility Vehicle) に大別できる. ROV での作業は、ケーブルを介して送られて くるカメラ画像などの情報に基づき操作者が ROV の遠隔操 作を行なっているが、作業の水深が深くなるにつれ、作業領 域に到達するまでの時間や回収に時間がかかってしまう. さ らに、水深に応じてケーブル長も長くなるため、ケーブルを

(Received September 8, 2015) (Revised January 8, 2016)

含めたシステム全体も大きくなってしまう. そのため, 広範 囲かつ海底形状も未知な環境における海底資源の探索などに おいては、無索化・自律化された水中ロボットである AUV の開発が重要である.しかし、作業対象物をいかに画像認識 させるかという問題が残されている.具体的には、無索化に 伴って海底に施設した給電設備と AUV が画像認識によって 水中で嵌合し、自動充電が行なえるようにする必要がある. 本研究で想定している水中マーカを利用した自動充電の作業 シナリオでは、給電設備の嵌合穴とマーカとの相対的位置・ 姿勢が事前に規定されているものとし,水中マーカを利用し た画像認識に基づく位置・姿勢計測が、嵌合穴自体を認識す ることと等価な関係が構築されていることを想定している.

水中ロボットに関する代表的な画像認識手法として, 文 献1),2) では水中ロボットに対象物を認識させるため,距離情 報を単眼カメラで取得する方法が紹介されている、マリンス ノーなどが取得画像に映り込むと,対象物形状の特徴の一つ であるエッジの検出が困難になるが、カラー抽出処理によっ て外乱の除去と対象物の抽出を同時かつリアルタイムに行な う手法が提案されている. さらに, 水中ランドマークとして

^{*} 岡山大学大学院自然科学研究科 岡山市北区津島中 3-1-1

^{*} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okavama

位置標定物標が設計されており、その既知点にカラー球を使 用するとともに前述の手法と組み合わせて画像上で発見しや すい工夫を行なっている. なお, この手法では既知点が隠れ て発見できないときの水中ロボットの姿勢の計算方法につい ても述べられているが、単眼2次元画像をもとに水中ロボッ トの位置・姿勢の計算を行なっている.また、ステレオカメ ラを使った3次元計測はモーションキャプチャを含めこれま で非常に多くの方法が提案されているが、水中ロボットの位 置推定としては、いまだ報告されていない状況である. 光源 が組み込まれていない白色のマーカや点光源マーカを用いた モーションキャプチャシステムは、マーカ自体が何らかの物 体などにより視界が遮られる場合,完全に見えなくなり,位 置計測が難しい状況に陥る. すなわち外乱によりマーカが見 えにくくなる状況を想定した位置計測システムではない.こ れに対し、提案している立体マーカを用いた位置・姿勢計測 システムはマーカが大きさをもっているため一部が遮られた としても計測可能というメリットをもっている.以上より, モーションキャプチャシステムなどと本報の差異をまとめる と(1)本研究は計測だけでなく制御もしている(GA を利用 した位置・姿勢推定結果を実時間制御に組み入れている)こ と、および(2)計測に用いる画像に気泡外乱が映り込んだと しても実時間制御が実現できていること、にある.

著者らが提案している実時間遺伝的認識手法^{3),4)}は,三つ のカラー球からなる対象物の3次元モデルとして3次元マー カを水中ロボット内に定義し,3次元マーカの位置・姿勢を 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 子がもつ情報を水中ロボットが認識した3次元マーカの位置・ 姿勢として算出している.この適合度の分布は時変で多峰性 となるが,実時間の制御ループごとにオンラインで適合度の 最も高い遺伝子を認識結果として選ぶようにしているため, たとえ一時的に適合度が下がったとしても,制御ループが繰 り返されることで適合度を常に高く維持しようとする性質を もっている.ほかの手法と異なる点は3次元マーカを複眼で 認識している点であり,左右画像面に写影し,実画像との相 関をGA進化の適合度として用いることで3次元対象物の位 置・姿勢を実時間で計測している⁴⁾.

本研究ではこれまで水中ロボットの水中自動充電を目指し た自動嵌合制御実験を行なっているが^{5)~9)},認識画像に含ま れる外乱に関して対象物の位置・姿勢の認識精度の制御特性 の検討は行なっていなかった.実海域においては水中ロボッ トと認識対象物間にマリンスノーやチムニーから噴出する熱 水が存在する場合もあると考えられるが、これらが水中ロボッ トの取得画像の中で対象物を遮るように映り込むと、正確な 認識結果が得られず位置・姿勢制御が乱される可能性がある. すなわち実海域での使用を考えた場合、対象物を遮るように映 り込む外乱に対し、開発中の水中ロボットがどの程度レギュ レート性能を発揮できるか確認することが重要な問題である. そこで本研究では海中での画像認識に対するさまざまな外乱 を気泡によってシミュレートし、実時間遺伝的認識手法³⁾の ロバスト性を確認するとともに、気泡外乱中でもビジュアル サーボが可能であることを示す.

2. 実験方法

2.1 水中実験環境

文献 5)~9)と同じ水中実験環境を用意した.以下に概略を 述べる.まず遠隔操作型水中ロボット(広和(株)製 ROV, 最大水深 50 m)を Fig.1に示す.本ロボットは複眼視覚セ ンサーとして,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1.51x,光学ズーム10倍)と制御用として前方および下 方にそれぞれカメラ2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0.81x,ズームなし)を搭 載しており,対象物の3次元認識を行なうため,前方2台の カメラを同時使用した.水中動力系では,水平スラスタ2基 (最大推力9.8N.以下同様),垂直スラスタ1基(4.9N),横 スラスタ1基(4.9N)を搭載している.また,照度確保のた めLED ライト(5.8W)を2基搭載している.

つぎに、水道水を満たした簡易プール(縦×横×高さ, 2m×3m×0.75m)を実験槽として使用した.上記 ROV を 実験槽に入水させ、Fig. 2に示すように ROV のカメラ画像 の受信、PC からの制御信号の送信ならびに電力供給はテザー ケーブル(200m)を介して行なった.PC 側では ROV 搭載 の 2 台のカメラから送られる対象物の画像情報を基に GA に よるモデルベーストマッチングを行なった.



Fig. 1 Overview of ROV (a) front view (b) side view (c) top view (d) back view



Fig. 2 Layout of under water experimental devices



Fig. 3 Coordinate system provided in under water experiment

2.2 水中実験条件

2.2.1 水中における位置・姿勢制御実験

水中に設置した3次元マーカ(ボックス(100 mm×100 mm× 100 mm) 周りに赤・青・緑 (水中ロボットから見て, 左・中央・ 上部の球の色) のカラー球 (直径 40 mm) を配置した対象物) を GA により認識させ, 水中ロボットに搭載した4基のスラ スタへ指令電圧値を送ることで, 水中ロボットと3次元マー カの間で以下の相対的目標位置・姿勢 (x_d [mm], y_d [mm], z_d [mm], ϵ_{2d} [deg]) を保つようにレギュレートさせた制御結 果の検証を行なった. なお, GA によるモデルベーストマッ チングから算出された対象物の位置・姿勢の認識情報は, 水 中ロボットと対象物間で設定した GA 探索領域内 (Σ_H を中 心として x_H 軸方向に +800 mm, y_H 軸方向に ±400 mm, z_H 軸方向に ±200 mm の領域) で獲得されると仮定してい る. Fig.3 に本研究の実験における座標系を示す. ここで

 $x_d = {}^H x_M = 600, \quad y_d = {}^H y_M = 0,$ $z_d = {}^H z_M = -67, \quad \epsilon_{2d} = 0$

である.また, x [mm], y [mm], z [mm], ϵ_2 [deg] を GA で 認識した水中マーカーの位置・姿勢とおき,相対的目標位置・ 姿勢に水中ロボットをレギュレートさせるため,以下の P 制 御から計算される指令電圧値 $v_1 \sim v_4$ を各スラスタへ与えた. なお ϵ_2 は Fig. 3 に示す Σ_H の z 軸回りの角度である. x 軸 および y 軸回りの角度は水中ロボットの構造に起因(浮心が 重心の上に位置していること)する復元トルクにより,時定 数 1s 程度で自律的に安定状態に復元する.そのため本研究 では x 軸および y 軸回りの角度の制御は行なわない.

奥行き方向:
$$v_1 = k_{p1}(x_d - x) + 2.5$$

 $(v_1 = 0 \vee \mathcal{O} \geq \Sigma_H \mathcal{O} x_H 軸方向に$
推力 9.8 N, $v_1 = 5 \vee \mathcal{O} \geq \delta - 9.8 \operatorname{N}$)
 $\left\{\begin{array}{c} 5.0 \quad (y_d - y < -5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H 軸方向に推力 \\ -4.9 \operatorname{N} \end{array}\right\}$
3.1 $(v_2 = \begin{cases} 5.0 \quad (y_d - y > 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} y_H = 5 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} \geq \delta \\ \Sigma_H \mathcal{O} = 0 \operatorname{mm} \mathcal{O} =$

鉛直軸回転 :
$$v_4 = k_{P4}(\epsilon_{2d} - \epsilon_2) + 2.5$$

($v_4 = 0$ V のとき Σ_H の z_H 軸回りに
旋回トルク 0.88 Nm, $v_4 = 5$ V のとき
-0.88 Nm)

さらに本報では,認識画像に映り込む外乱に対するロバスト 性を検証するため,レギュレート中の水中ロボットに対して, チムニーから噴出する気泡を模擬した環境を Fig.3 に示す 3 次元マーカの前方に配置し,噴出する気泡の有無によって目 標位置・姿勢への復元能力がどのように変化するかの確認を 行なう.なお,本実験環境では穴の空いた器具(各器具は一 方が径 5 mm の穴 3 個と 8 mm の穴 7 個,他方が径 5 mm の 穴 6 個と 8 mm の穴 9 個が空けられている)を先端に取り付 けた空気入れ 2 台 (一押しあたりの空気排出容量はそれぞれ 4.86×10⁻⁴ m³, 1.85×10⁻⁴ m³)を手動で動かすことで, 水中で間欠的に気泡を発生させた.気泡が間欠的に発生する (空気入れを押して戻す)周期はおよそ 2 s で,この周期のう ち気泡の発生時間は空気入れを押している時間に相当し,お よそ 1.5 s である.

3. 結果と考察

3.1 GAによる 3次元マーカの認識性能

本節では、提案システムで用いた GA による 3 次元マーカの 位置・姿勢の認識実験結果について示し、提案手法のロバスト 性について考察する.本実験では GA の条件として遺伝子数 を 60, 表現型を 3 次元マーカの位置と姿勢 (x[mm], y[mm], z[mm], ε₂ [deg]),制御周期(1回の入力画像に対して遺伝子 を進化させる時間)を33ms,制御周期ごとの世代の更新回 数を9回としている.また、3次元マーカは水中で固定し、 水中ロボットとの相対的位置・姿勢の真値が $x_d = 341 \, \text{mm}$, $y_d = 0 \,\mathrm{mm}, \ z_d = -67 \,\mathrm{mm}, \ \epsilon_{2d} = 0 \,\mathrm{deg}$ となるように設置 した. また,水中ロボットのカメラ画像に映し出された3次 元マーカ前方に、実験開始30s後から気泡外乱が映り込むよ うな状況を発生させた.その上で、3次元マーカの背景とし て実験水槽がそのまま映り込む、すなわち背景なしの場合と 実環境を模擬した海中の写真を貼り付けた(背景ありの)場 合について、適合度の高い順に上位 36 個の遺伝子がもつ認 識結果(認識した3次元マーカの位置・姿勢)を調べた.

3 次元マーカに対して背景なしの場合の結果を **Fig. 4**, **Fig. 5** に示し,背景ありの場合の結果を **Fig. 6**, **Fig. 7** に示 す. Fig. 4, Fig. 6 はそれぞれ (a) 認識した *x* 軸方向の 3 次 元マーカの位置 (b) *y* 軸方向の位置 (c) *z* 軸方向の位置 (d) *z* 軸周りの角度 (e) 実験開始 10s 後(気泡外乱なし)の 3 次 元マーカの認識結果 (f) 実験開始 40s 後(気泡外乱あり)の 3 次元マーカの認識結果を表わしている. ここで 3 次元マー カの認識結果とは, Fig. 4, Fig. 6 の (e) や (f) において 3 次

286



Fig. 4 Distribution of top 36 genes in case of plain background: (a) position in x-axis direction, (b) position in y-axis direction, (c) position in z-axis direction, (d) angle around z-axis, (e) left and right camera images at 10s and (f) left and right camera images at 40s

元マーカに設置された赤・青・緑(水中ロボットから見て, 左・中央・上部の球の色)の球付近の各色の点線の円で表わ されており、本システムではこの認識を実時間(33ms)で繰 り返し行なっている.カメラ画像上において,各色の点線の 円がマーカに設置された各球の外周と完全に一致している場 合,遺伝子の適合度が最も高く,マーカとの相対的位置・姿 勢が正しく認識されていることを意味している. Fig. 4(a)~ (d) より、位置・姿勢の認識結果が実験開始後に収束してい くが、気泡外乱発生後は発生前に比べて遺伝子の認識結果が ばらつくことを確認できる.これはカメラ画像に映り込んだ 気泡外乱によって、3次元マーカの位置と姿勢の認識が難し くなったことを意味している. さらに実環境を模擬した背景 ありの場合の結果(Fig.6(a)~(d))は,背景なしの場合と比 較して認識結果がばらつくものの,背景なしの場合と同様に マーカとの相対的位置・姿勢を認識し続けられることが確認 できる.なお、気泡外乱なしの状態(実験開始直後~30sま で) でも Fig. 4(a) は (b) および (c) と比べて認識結果がばら ついている.これはカメラ画像の上下左右 (y および z 軸) 方 向と比べて,奥行き(x軸)方向の位置の認識が難しいこと を表わしている.

つぎに Fig.5, Fig.7 はそれぞれ適合度の分布を表わして いる. 図中の黒色の点が各遺伝子の認識結果(適合度とその ときの認識位置)である. 具体的には各図において (a) 実験 開始後 10s (気泡外乱なし)における適合度とそれに対応す る y および z 座標の認識位置, (b) 実験開始後 40s (気泡外 乱あり)における y および z 座標の認識位置, (c) 実験開始 後 10s における y および x 座標の認識位置, (d) 実験開始後 40s における y および x 座標の認識位置であり, (e)~(h) は



Fig. 5 Fitness distribution generated by each gene in case of plain background: (a) fitness distribution between y and z positions at 10 s, (b) fitness distribution between y and z positions at 40 s, (c) fitness distribution between y and x positions at 10 s, (d) fitness distribution between y and x positions at 40 s, (e) enlarged view of (a), (f) enlarged view of (b), (g) enlarged view of (c) and (h) enlarged view of (d)

(a)~(d)の図において適合度の分布の山の頂点付近の領域を 拡大した図である.それぞれの図より,背景の有無にかかわ らず,気泡外乱なしの場合と比較して気泡外乱が存在する場 合は適合度が低くなる.しかし,適合度が最も高い遺伝子の 認識位置は気泡外乱や実環境を模擬した背景の有無にかかわ らずほとんど変化がないことがわかった.以上より,提案シ ステムの GA は3次元マーカの位置・姿勢を実時間で認識で きるロバスト性を有していることが確認できる.このロバス ト性は,システム内に定義した立体形状と色の情報をもつ3 次元マーカのモデルと,カメラ画像内に映った対象物(3次 元マーカの実物)の2次元情報をモデルベーストマッチング 法に適用したことで実現されている(Fig.8).具体的には, 対象物の位置・姿勢情報をもたせた遺伝子を GA の探索領域 内にばらまき,適合度の値が最も高かった遺伝子がもつ位置・ 姿勢情報をその時点で認識した対象物の位置・姿勢(計測結



Fig. 6 Distribution of top 36 genes in case of simulated ocean background: (a) position in x-axis direction, (b) position in y-axis direction, (c) position in z-axis direction, (d) angle around z-axis, (e) left and right camera images at 10s and (f) left and right camera images at 40s

果)とし、この手続きを 33 ms ごとに入力される画像で繰り 返し行なうことで、実時間計測とロバスト性を維持している. 提案システムの特徴として(1)このアルゴリズムでは、対象 物と似た形状・色の物体が画像上の外乱として映り込んだと しても、形または色が異なっていれば本物のマーカに比べて 適合度の値が低くなる.この場合、多峰性関数の最適化に優 れた手法で最適解探索(GA法を含む)を行なうことで本物の マーカを認識することができる.いい換えれば、システム内 に定義している3次元マーカのモデルとほぼ同一の形状と色 の物体が映り込まない限り, 無視する特性をもっている. な お、このような場合では人間も誤認する場合があると考えら れる. つぎに (2) Fig. 5, Fig. 7 に示すように 3 次元マーカ の位置・姿勢を計測する問題は、適合度関数の最大値を与え る変数を求める最適化問題に変換することができる^{3),4)}.こ のため,気泡の発生している Fig.5 の (b), (d) と気泡のな い (a), (c) を比較すると、気泡がある場合の (b), (d) では 適合度の最大値が低くなるものの最大値を与える位置・姿勢 は変化していない. このためいずれの場合においても GA に よる最適解探索により位置・姿勢の計測が可能であるといえ る. したがって画像に映り込んだ気泡外乱は三つの球の形状 をわかりにくくするが、色は泡を通して視認できるため、形 と色の認識が維持され、ロバストになっているものと考えら れる.気泡外乱や背景画像の有無にかかわらず,最適解探索 による認識結果(計測結果)がほとんど変化しなかったこと からも、位置・姿勢をロバストに認識し続ける性質を有して いるといえる.

3.2 水中における GA 認識精度とレギュレート性能

Fig. 9(a) は 3 次元マーカ前に気泡を出現 (Fig. 3 に示す)



Fig. 7 Fitness distribution generated by each gene in case of simulated ocean background: (a) fitness distribution between y and z positions at 10 s, (b) fitness distribution between y and z positions at 40 s, (c) fitness distribution between y and x positions at 10 s, (d) fitness distribution between y and x positions at 40 s, (e) enlarged view of (a), (f) enlarged view of (b), (g) enlarged view of (c) and (h) enlarged view of (d)



Fig. 8 Model-based matching system with double eye camera

させ、認識画像に外乱を映り込ませた状態で相対的目標位置・ 姿勢 $x_d = 600, y_d = 0, z_d = -67, \epsilon_{2d} = 0$ にレギュレー トさせた水中ロボットの GA 認識時の適合度の時間変化を示



Fig. 9 Regulator performance with additional disturbance made by air bubbles against dual-eye image recognition: (a) fitness value, (b) error in x-axis direction, (c) error in y-axis direction, (d) error in z-axis direction, (e) error around z-axis, (f) 3D trajectory of underwater vehicle, (g) thrust in x-axis direction, (h) thrust in y-axis direction, (i) thrust in z-axis direction and (j) torque around z-axis

す. この図の (a) によると, 認識開始から数秒以内で適合度 が 0.4~1の間を推移し, 平均して実験中は 0.7 前後の適合度 を維持していることがわかる. Fig.9(b)~(e), (g)~(j) は相 対的目標位置・姿勢と GA で認識した水中マーカの位置・姿 勢との誤差, およびそれらを復元する力・トルクを表わして いる. また, (f) はレギュレート中の水中ロボットの位置を Fig.3 中の Σ_H を基準に表わしている. GA の認識誤差, ロ ボット移動時に生じるテザーケーブルからの反力, さらに移 動時に発生する水圧変化による実験槽側面からの反射波を受 け, 相対的目標位置・姿勢からの誤差が定常的に現れるもの の, 4 基のスラスタを制御することで外乱要素をキャンセル し, 相対的目標位置・姿勢近傍にレギュレートできることが 確認できる.

3.3 3次元マーカが周期運動する場合

相対的目標位置・姿勢を3.1節と同じ値として3次元マー カ前方に気泡を出現させつつ3次元マーカを周期運動させた 場合の水中ロボットのレギュレート性能について確認を行な



Fig. 10 Actual snapshot of underwater vehicle (left column) and its camera images (right column) with disturbance on images after starting experiment: (a) 10 seconds have passed, (b) 20 seconds have passed, (c) 30 seconds have passed, (d) 40 seconds have passed and (e) 50 seconds have passed

う.3次元マーカ前方に気泡を出現させた場合についての実 験結果を Fig. 10 と Fig. 11 に示す. Fig. 10 は 3 次元マー カを Fig.3 に示す Σ_H の x 軸方向に周期 20 s, 振幅 280 mm で運動させたときの水中ロボットと3次元マーカの位置関係 (左列),水中ロボットから見た3次元マーカの位置(右列) を 10s ごとに取得した画像を示している. Fig. 10(a)~(e) の 右列の各画像において、3次元マーカの各球とほぼ同じ位置 に描画されている赤・青・緑(水中ロボットから見て、左・ 中央・上部の球の色)の円は GA が実時間で認識した 3 次元 マーカの位置・姿勢を表わしている。これらの描画された円 と3次元マーカの各球の大きさがすべて一致している場合, 本システムは3次元マーカの位置・姿勢を誤差なく認識して いる(適合度が最も高い)ことを表わしている.これらの図 (a)~(e)の右列の各画像に描画された赤・青・緑(水中ロボッ トから見て, 左・中央・上部の球の色)の円の位置からわかる ように、認識画像に外乱(気泡)が映り込んでいるにもかかわ



Fig. 11 Tracking performance with additional disturbance made by air bubbles against dual-eye image recognition in the case that (A) 3D marker is moving on x-axis with amplitude 280 mm and period 20 s after 20 s and (B) disturbance is added after 10 s: (a) fitness value, (b) position of underwater vehicle in xaxis direction, (c) tracking error in x-axis direction, and (d) thrust in x-axis direction



Fig. 12 Tracking performance with additional disturbance made by air bubbles against dual-eye image recognition in the case that (A) 3D marker is moving on x-axis with amplitude 280 mm and period 15 s after 20 s and (B) disturbance is added after 10 s: (a) fitness value, (b) position of underwater vehicle in xaxis direction, (c) tracking error in x-axis direction, and (d) thrust in x-axis direction

らず、マーカと水中ロボットの相対的位置は一定に保たれて いることがわかる.さらに (a)~(e)の右側写真中には、GA が実時間で認識した3次元マーカの位置・姿勢が、認識画像 中の実際の3次元マーカの位置・姿勢とおおよそ一致して示 されており、実時間3次元認識が維持されていることがわか る.いい換えれば、本システムは認識画像中に気泡による外 乱が映り込んだとしても、実時間で連続的に3次元マーカの 位置・姿勢をGAが認識し続けることが可能であるため、そ の結果として相対的目標位置・姿勢へのレギュレート性能も 高いことを示唆している.また、この実験結果をFig.11に示 す.Fig.11(a)~(d)は、それぞれ適合度、x軸方向の水中ロ ボットの位置、相対的目標位置との誤差、誤差を復元する力の グラフを示している.また、(a)(b)中に記載した(A)および (B)とそれぞれの右の矢印は、実験開始 20s後から前述の周 期と振幅で3次元マーカを運動させた期間、実験開始 10s後



Fig. 13 Tracking performance with additional disturbance made by air bubbles against dual-eye image recognition in the case that (A) 3D marker is moving on x-axis with amplitude 280 mm and period 10s after 20 s and (B) disturbance is added after 10s: (a) fitness value, (b) position of underwater vehicle in xaxis direction, (c) tracking error in x-axis direction, and (d) thrust in x-axis direction

から認識画像中に気泡を出現させた期間を表わしている(なお,(b)の図の一点鎖線は水中ロボットの目標軌道を表わしている). Fig. 11(a)が示すように気泡の出現によって適合度が低下するが,Fig. 11(b)(c)より,相対的目標位置にレギュレートしているようすが確認できる.すなわち,提案するシステムは認識画像中に外乱が映り込んだとしても,相対的目標位置にレギュレートできる能力を有することが示された.

さらに、気泡を出現させた状態で3次元マーカの運動周期 を周期15s、振幅280mmにしたときの結果をFig.12に示 し、3次元マーカの運動周期を周期10s、振幅280mmにし たときの結果をFig.13に示す.いずれの条件でも、認識画 像中に気泡が映り込むと適合度の値が低くなるが、相対的目 標位置にレギュレートできることを確認できる.すなわち、 気泡外乱に対して提案するシステムは相対的目標位置へのレ ギュレート性能がロバストであることがわかった.

4. まとめ

ROV を AUV 化するための研究開発を進めるため、本研 究では 3 次元マーカ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位置・姿勢制御の検証実験を行ない、 下記結論を得た.(1)提案システムは x 軸方向の時変目標値 に対してロバストに追従できる.(2)気泡外乱が映り込む環 境下では GA の適合度が低下するが、提案システムは 3 次元 マーカとの相対的位置・姿勢をロバストに認識し続けること ができる.さらに、気泡外乱下においてもビジュアルサーボ による時変目標値への追従制御をロバストに行なうことがで きる.今後は水中自動充電に向けたビジュアルサーボ型水中 ロボットの軌道追従制御法の検討を行なう.

謝辞 本研究では広和株式会社マリンシステム部の協力を 得ました.ここに謝意を表します.

参考文献

- 1) 柳,浦,藤井:水中ランドマークを利用した水中ロボットの航 法制御,生産研究,52-5,247/250 (2000)
- 2) 柳,浦,藤井,近藤:人工水中ランドマークと推測航法を利用した自律型水中ロボットの航法,日本ロボット学会誌,20-3,290/298 (2002)
- H. Suzuki and M. Minami: Visual Servoing to catch fish Using Global/local GA Search, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 10-3, 352-357 (2005)
- 4) K. Nishimura, S. Hou, K. Maeda, M. Minami and A. Yanou: Analyses on on-line evolutionary optimization performance for pose tracking while eye-vergence visual servoing, 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 698/703 (2013)
- 5) 大西,須浪,西村,矢納,石山,見浪,藤本: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,659/663 (2014)
- 6)米森,大西,石山,見浪,藤本:ビジュアルサーボを用いた3 次元位置姿勢認識による水中ロボットの自動制御,計測自動制 御学会システム・情報部門学術講演会,579/584 (2014)
- 7)米森,大西,見浪,矢納,阪,藤本:水中自動給電を想定した 水中ロボットの自動嵌合制御,第33回日本ロボット学会学術 講演会,RSJ2015AC3K3-07 (2015)
- M. Myint, 見浪, 米森, 阪, 矢納: Visual Servoing Experiments of Underwater Vehicle under Air Bubble Disturbances, 第 33回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2015AC2G2-03 (2015)
- 9) M. Myint, K. Yonemori, A. Yanou, Y. Saka, S. Ishiyama and M. Minami: Robustness of Visual-Servo Against Air Bubble Disturbance of Underwater Vehicle System Using Three-Dimensional Marker and Dual-Eye Camera, International Conference OCEANS 2015 – MTS/IEEE Washington, 150521-002 (2015)

[著者紹介]

矢納 陽(正会員)

1996年岡山大学工学部情報工学科卒業.98年 岡山大学大学院工学研究科修士課程修了.2001年 同大学大学院自然科学研究科博士課程修了.同大 学大学院研究生を経て,2002年近畿大学工学部助 手.2004年同講師を経て,2009年岡山大学大学 院自然科学研究科助教.2016年川崎医療短期大学 放射線技術科准教授.現在に至る.予測制御に関 する研究に従事.博士(工学).システム制御情報 学会,日本機械学会などの会員.

米森健太



2014年岡山大学工学部システム工学科卒業.同年,岡山大学大学院自然科学研究科機械システム 工学専攻入学,現在に至る.

石 山 新太郎



1981年東京工業大学大学院総合理工学研究科 エネルギー科学専攻修士課程修了,90年に東京工 業大学より学位を取得,(工学博士).81年日本原 子力研究所東海研究所高温工学部入所,93~95年 ユーリッヒ研究所(ドイツ)にて原子炉用新素材 開発に従事,オークリッジ国立研究所(米)にて, 高温ガス炉用黒鉛材料の重照射研究に従事.日本 原子力学会フェロー,2010年~東工大原子炉工学 研究所非常勤講師,2012年~現在福井大学遠赤外 領域研究センター客員教授,2013~2015年岡山大 学自然科学研究科産業創成工学専攻知能機械シス テム学客員教授.

見 浪 護(正会員)



1979年大阪府立大学工学部航空工学科卒業,81 年大阪府立大学工学研究科航空工学専攻修士課程 修了.93年金沢大学大学院自然科学研究科博士課 程修了.博士(工学).94年福井大学工学部機械 工学科助教授,2002年同学部知能システム工学 科教授,2010年岡山大学大学院自然科学研究科教 授,現在に至る.ロボットの力学,拘束運動,力 制御,移動マニピュレータの制御,画像認識,ビ ジュアルサーボイングなどの研究に従事.日本機 械学会,IEEEなどの会員.

野隆幸(正会員)



2004年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシ ステム工学専攻博士課程後期課程満期退学,2004 年名古屋大学大学院工学研究科助手.2005年に学 位を取得,博士(工学).以降2006年より富山県 立大学工学部助手,助教,講師.2011年より岡山 大学大学院自然科学研究科講師に着任.ロボット による柔軟物体のマニピュレーション,組立作業 の自動化に関する研究に従事.