

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

○大西祥太 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))

Retrofit Demonstration of ROV with MOS controlled AI into AUV System

*S. Oonishi, Y. Sunami, K. Nishimura, A. Yano,
S. Ishiyama, M. Minami (Okayama Univ.) and K. Fujimoto (Kowa Corp.)

Abstract— New Artificial Interagency MOS (Move on Sensing) based on visual servoing technology was developed and MOS on board ROV (Remotely Operated Vehicle) system has been developing to decontaminate radiation contaminated saline mud from contaminated dam lake, river, regulation pond, sea and storage reservoirs in FUKUSHIMA. In present study, accuracy validation tests of control stability, interdigitation and automatic following capability against moving target were performed under water by binocular MOS controlled ROV (MOS/ROV) and the following results were derived; (1) MOS/AUV demonstrated the same high level of fitting fitness value as that obtained at ground-based experiment and high-level in stability of posture control of MOS/ROV in underwater and restoration against disturbance were achieved, (2) The results of interdigitation test of socket/plug mock-up also demonstrated that MOS control guarantees within 5mm accuracy for all directions (3) MOS/ROV can schmeer under water target moving less than 10mm/sec.

Key Words: Move on Sensing, AUV, ROV, Contaminated soil, Visual servoing

1 はじめに

2011年3月11日の東北大震災以降、地震・津波・原子力発電事故が重なった福島県では、放射能汚染区域での除染作業が進む一方で汚染地域内に発生する大量の集積除染残土が放置され、最終的な保管管理施設・場所の準備を待っている状態にある。環境省ではそのための中間貯蔵施設の建設を福島県に打診している状態であるが、同施設の収容能力ならびに収容受入れ基準を満たさない汚染土壌の処分方法やその発生数量のみならず中間貯蔵後の最終処分等の大きな課題を依然として抱えている。

一方、汚染地区での除染作業が進む中で、河川、溜池等の水中底泥の放射能汚染問題が新たに惹起されてきており、福島県内の農業用のダムやため池の底にたまる土や泥中の放射性物質の濃度を農林水産省や福島県が調べたところ約2,000か所のうち600か所で指定廃棄物の基準である1kg当たり8,000Bqを超える値が検出された¹⁾。そのため環境省や農水省では、これら指定廃棄物(原発事故に伴って発生した放射性物質を含む廃棄物のうち、濃度が1キログラム当たり8,000Bqを超えるもの)について国が責任を持って処理することとしている。

しかしながら、これら水中底泥の除染回収においては、水の放射線遮蔽効果や水中での作業性の悪さなどから、その検出作業やダム池等100m以上の水深での除染回収作業は困難を極めるものと考えられる。そのため石山ら²⁾は、水中サーベイメータを搭載した遠隔操作型水中ロボット(ROV; Remotely Operated Vehicle)を試作することにより福島県下で8,000Bq以上の放射性物質を含む底泥の汚染分布計測を、深さ2m程度の調整池で実施し、

1. タッチダウン方式による底泥中の放射性物質の放射能計測
2. 調整池底部における汚染分布マッピング

3. 汚染動態調査

をそれぞれ行うことで水中サーベイメータ搭載型ROVの有効性を示すとともに、これらの成果を基にさらに多機能センシング環境対応型制御知能MOS(Move on Sensing)の開発³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾やMOS制御知能をROVに搭載してAUV(Autonomous Underwater Vehicle)化することより深水中の放射能汚染底泥の自動回収を目的としたFig. 1に示すMOS/AUV⁶⁾の開発を進めている。

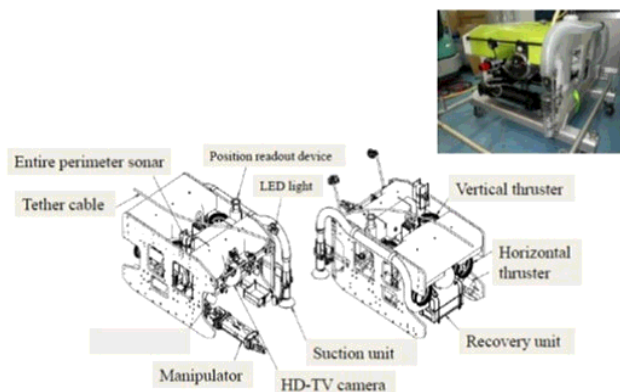


Fig. 1: The concept of MOS/AUV for decontamination of under water

このMOS/AUVで期待される性能は、

1. 対象物の自動認証
2. MOS制御知能ならびに無索化による自律航行(柳ら,2000, 近藤ら,2000)
3. 高線量下での長期間連続的な除染回収作業
4. 高精度な放射線濃度分布計測
5. 自動給電

6. 複数のセンサー情報による深水環境情報（温度、濃度、流速等）の取得・分析

などであり、著者らは地上における双眼 MOS 搭載ロボット性能検証試験において GA 法（Genetic Algorithm）を用いた 3D モデルベースマッチング方式⁷⁾⁸⁾⁹⁾により、モデル対象物へのロボットによる物理的働きかけを 0.5mm の精度で制御できることを示した³⁾。

そこで本研究では、MOS 制御知能を搭載した ROV による

1. 水中における GA 法による認識精度確認試験
2. MOS/ROV の水中制御安定性確認試験
3. 水中自動給電を想定した水中嵌合実験
4. 水中魚の観察・捕獲を模擬した動的ターゲット追従実験

を実施することにより AUV 化するための方策を探った。

2 実験方法

2.1 水中実験環境

2.1.1 水中ロボット系

水中実験で使用した遠隔操作型水中ロボット ROV（広和（株）社製 LUNA，最大水深 50m）を Fig.2 に示す。

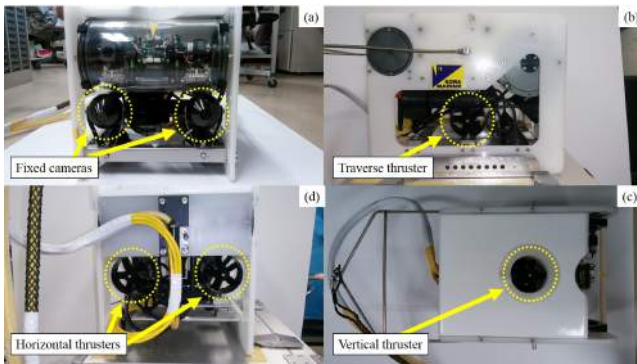


Fig. 2: ROV;LUNA

本 ROV は双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 1.5[lx]，ズーム光学 10 倍）と制御用として前方 2 台および下方 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 0.8[lx]，ズームなし）を搭載しており、MOS 制御で対象物の立体認識を行うため、前方 2 台を使用した。水中動力系では、水平スラスト 2 基（推力 9.8[N]），垂直スラスト 1 基（推力 4.9[N]），横スラスト 1 基（推力 4.9[N]）を搭載しており、前進時の最大推力は 9.8[N] である。また、照度確保のため LED ライト（5.8W）を 2 基搭載している。

2.1.2 水中実験系

水中実験では、水道水を満たした簡易プール（縦×横×高さ，2 m × 3 m × 0.75m）を実験槽として使用した。上記 ROV を実験槽に水入させ、テザーケーブル（200m）を介して ROV への給電ならびに実験槽脇に設置した PC（Intel Core i7）を介して水中ターゲット画像情報ならびに制御信号等の通信を行った。PC 側

では ROV 搭載の 2 台のカメラから送られる水中ターゲットの画像情報を基に、下記 GA 法による 3D モデルベースマッチングを行った。

2.2 水中実験条件

2.2.1 GA 法による 3D 対象物認識条件

水中ターゲットに対する双眼 GA 認証実験は、実験槽内水中任意位置に Fig.3 に示すボックス（100mm × 100mm × 100mm）周りに赤・青・緑の三原色球（φ40mm）を配置した水中ターゲットを固定設置することによって実施した。GA 認証による 3D モデルベースマッチングによる対象物情報の獲得は、同図内に示す ROV と水中ターゲット間で設定した GA 探索エリア内で得られる形状情報を基に、Table.1 に示す条件により実施した。

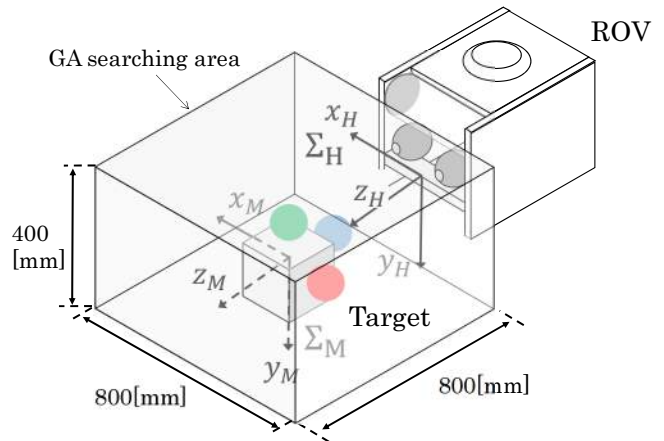


Fig. 3: GA research area

2.2.2 水中制御安定性実験

任意位置に水中固定設置した水中ターゲットを GA により認証後、MOS 制御知能により 4 基の ROV 搭載スラストへ制御信号を送ることで水中ターゲット間と下記 4 変数制御により特定距離を保つように水中停止制御させ、水中制御安定性の検証を行った。

$$\begin{aligned} x_d &= {}^H x_M = 0 \\ y_d &= {}^H y_M = -67 \\ z_d &= {}^H z_M = 500 \\ \epsilon_{2d} &= 0 \end{aligned}$$

ここで、 x, y, z, ϵ_{2d} は GA により認識した水中マーカーの位置及び姿勢である。

なお、水中停止での安定性を確保するため ROV 各スラストへの制御は下記制御式により行った。

$$\text{奥行き方向} : v_1 = k_{p1}(z_d - z) + 2.5 \quad (1)$$

$$\text{鉛直軸回転} : v_2 = k_{p2}(\epsilon_{2d} - \epsilon_2) + 2.5 \quad (2)$$

$$\text{鉛直方向} : v_3 = k_{p3}(y_d - y) + 2.5 \quad (3)$$

$$\text{右水平移動} : x_d - x < -5.0$$

$$\text{左水平移動} : 5.0 < x_d - x$$

さらに、GA 認証後水中ターゲットに対して MOS 自動制御により一定距離位置を維持している ROV に対して実験槽外部から物理力による外乱を加えた場合、ROV が元の位置へ復帰する復元性の検証も行った。

Table 1: Parameters of GA

Number of genes	60
Target variables calculated by GA	Positions($x[mm]$, $y[mm]$, $z[mm]$), Posture($\epsilon_2[deg]$)
Search area (as centering the target in this area) [mm]	$\{x, y, z\} = \{\pm 400, \pm 200, \pm 400\}$
Control period [ms]	33
Number of generation evolution in the control period	9

2.2.3 水中嵌合実験

水中自動給電作業を模擬するため水中ターゲット側に嵌合凹側である給電ソケット部（アクリル管，直径×長さ，70mm×100mm）を設けるとともに，給電ソケット嵌合凸部（アルミ円筒，直径×長さ，8mm×6mm）をROV側に取り付け，MOS制御による両部の嵌合実験を実施した．ROVは水中ターゲットから1.2m遠方に配置し，遠方からの双眼対象物認識後，ROVのターゲットへのアプローチ特性ならびに嵌合時の安定性ならびに嵌合精度に関する検証を行った．

2.2.4 水中移動ターゲット追従実験

水中を移動する水中ターゲットのMOS/ROVの追従性能を把握するため，上記水中ターゲットを実験槽内において任意方向・速度で移動させることにより，MOS/ROVの応答速度，姿勢制御性等に関する追従動特性の検証を行った．

3 実験結果

3.1 水中ターゲットのGA法による認識精度

3.1.1 スラスト出力制御

遠隔操作型ROVではコントローラジョイスティック指示による作動操作時において，人間の指の動きによる誤動作を防止するためスラスト推進制御信号発信時にある程度の冗長性（不感帯）を持たせている．Fig.4（黒色実践）に奥行き方向のスラスト出力-制御電圧（同図（a））ならびに鉛直方向回転スラスト出力-制御電圧（同図（b））の関係をそれぞれ示す．これに対して本研究での水中嵌合実験では，水中ターゲットへのスラスト推進による接近移動の際，mm単位での高い精度の移動ならびに姿勢制御性能が要求される．そこでここでは各スラスト動力への推力-制御電圧変化特性における従来の不感帯域制御電圧に対して一定推力が得られるように制御電圧の調整を行った．同図（赤色破線）に調整前後の制御電圧と推力ないしトルク出力との関係を示す．

調整前ではニュートラル状態（制御電圧2V）近傍の電圧変化に対して出力応答に不感帯があったものに対して，奥行き方向推力の制御電圧範囲（1.55～3.05V）ならびに鉛直回転推力の制御電圧範囲（1.9～3.0V）において推力-制御電圧間に線形性が保たれていることがわかる．

3.1.2 水中におけるGA認識精度

Fig. 5に水中ターゲット正面前方約600mmの位置に水中停止させたMOS/ROVのGA認識時の適合度の時間変化を示す．

これによると，認証開始から数秒以内で適合度が1以上となるとともに，30秒程度の適合度計測時間中に

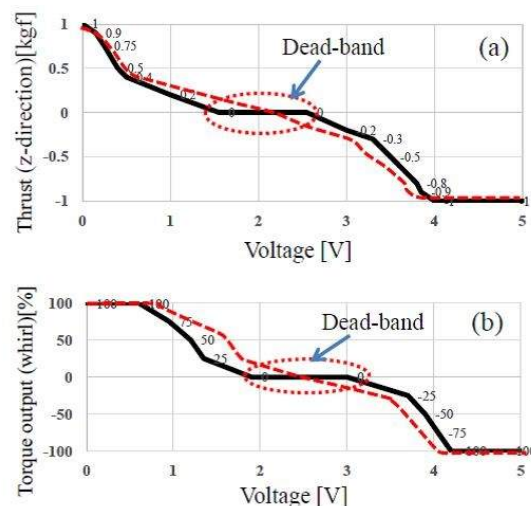


Fig. 4: Dead-band characteristics of (a)thrust-control voltage and (b)torque output control voltage;Dead-band(solid line) and adjusted characteristics (broken line)

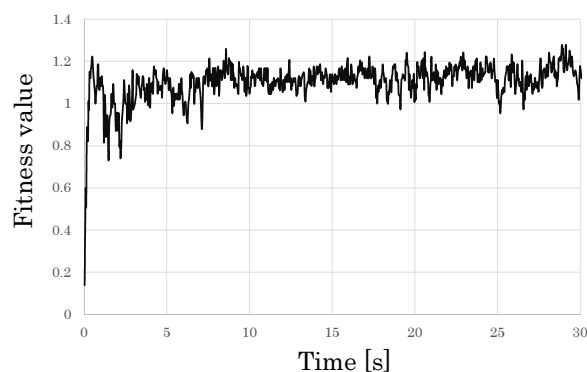


Fig. 5: Fitness value

において約1.0以上の高い適合値を維持していることがわかる．一般的にビジュアルサーボにより精度よく対象物への物理的作業を行う場合，GA認識精度は0.5以上必要であると考えられおり，宋薇らは⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾，本実験に使用した同一ターゲットを用いて室内における双眼認証精度の測定を行っている．これら双眼により陸上で得られた適合度値の結果と今回水中で得られた結果を比較しても両者において同程度の適合値が得られていることがわかる．

すなわちGAによる水中での対象物認証精度は，地上における場合との比較においてもほぼ同程度の適合度が得られることがわかった．

3.2 水中制御安定性

3.2.1 制御安定性

GA 認証後、MOS 制御状態で水中ターゲットから一定位置で水中停止している MOS/ROV に対して、水中ターゲット側を奥行き方向、水平方向、上下方向ならびに鉛直軸回転などの任意位置にそれぞれ移動させて場合の ROV 側の追随性ならびに安定停止状態を観察し、姿勢制御安定性能の評価を行った。その結果を Fig.6 に示す。

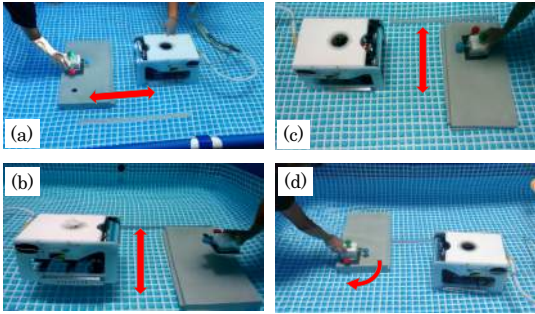


Fig. 6: Stability of posture control of MOS/ROV in under water

これによると、奥行き方向 (Fig.6(a)) で水中ターゲットを 100mm/sec 以上の高速で ROV 正面に対して前・後方に移動させた場合、ROV は水平スラスト (2基) による 1 秒以内の高速初動に続き 10 数秒以内での微調整動作に移行後、所定の水中ターゲット間停止位置で安定停止後その状態を維持した。

上下方向の移動の場合 (Fig.6(b))、主に垂直スラストを稼働させて上記前後移動と同程度の追随性を示すとともに上下方向で安定停止状態を維持した。

横方向の移動の場合 (Fig.6(c))、主に 1 基の横スラストを駆動させることにより数 10sec のゆっくりした平行移動を行うことで所定位置での安定停止ならびにその状態を維持した。この動作の緩慢さは、ROV 側面に設置されているシュタビライザー板の抵抗による横スラストの推進力不足にその主要因がある。

鉛直軸回転の場合 (Fig.6(d))、主に水平スラストと横スラストを同時駆動することによって ROV 船体正面を水中ターゲット側に対向させるように回転及び並行移動により所定位置での安定停止ならびに停止状態を維持した。

通常 ROV 移動時に生じるテザーケーブルからの反力や移動時に発生する水压変化による実験槽側面からの反射波を受け、船体内に搭載された姿勢制御装置による姿勢制御の場合、その維持が難しくなる。これに対して、対象物に対する相対的位置を維持する MOS 制御方式では 4 基のスラストを常時同時稼働させることでこれら外乱要素をキャンセルさせることにより水中停止位置の確保ならびにその位置での船体姿勢を安定的に維持できることがわかった。

3.2.2 外乱に対する復元性

ここでは水中ターゲットを認証後安定停止状態にある MOS/ROV に対して、障害物との衝突や海流等の外乱が加わった場合の自己制御による復元性を検証するため、実験槽外から棒 (木製全長 1.2m) を介して人力

により MOS/ROV の認証位置を恣意的にずらすような外力を前後、上下、横ならびに鉛直軸回転方向からそれぞれ加えることにより、水中ターゲット間での所定位置を維持する際の ROV の挙動観察を行った。

まず、押棒により ROV を正面後方へ後退させようとしたが、その直後水平スラスト 2 基が全推力モードになり、その結果約 9.8[N] の力による押し戻された。そこでこの押棒にさらにこのスラスト力以上の力を加えることで、強制的に水中ターゲットから距離を離れた。その結果、乖離距離が 0.8m 以上になっても上記 3.2.1 の制御安定性実験と同様に数秒のうちに現状位置に復帰した。

上下方向への外乱に対しては、垂直スラストからの反発力を感じるとともに変位を大幅に加えた場合であっても前後の場合と同様の復元性能を示した。

鉛直軸回転方向の場合においては水平スラストと横スラストの推進力の併用により上述の前後同様の復元特性を示した。

これらに対して横方向への外乱の場合での現状位置への復帰は、上述 3.2.1 の水中ターゲット側の横方向移動と同様に数 10 秒程度の時間を要した。しかしながら、水中ターゲット中心線から 1m 以上離れた場合、現状復帰できないケースが観察された。これは双眼認識形式において水中ターゲットが両眼視野から外れたことが原因であるものと考えられる。

以上の結果、MOS/ROV ではこれら全ての外乱に対して数秒~10 数秒以内に元の位置に復元復帰できることがわかった。ただし、両複眼視野から水中ターゲットが完全に外れるような大きな変位を加えられた場合、MOS/ROV の安定停止状態を維持することが難しくなる場合があった。

3.3 水中嵌合性能

3.3.1 遠方からの水中アプローチ特性

水中給電施設を模擬した水中ターゲット後方約 1.2m の位置から MOS/ROV を接近させ、水中ターゲット嵌合部との嵌合実験を行った。

ここでは遠方から水中ターゲット認証後の ROV のアプローチ特性について、ターゲットと ROV との相関位置を様々に変えて観察を行った。Fig.7 に (1) 水中ターゲット正面から 1.2m 後方に ROV を置いた場合、(2)1.2m 後方で Off-set を設けた場合、(3)Off-set に鉛直軸回転を加えた場合ならびに (4) 鉛直軸回転に加えて高さ方向を加えた場合の 4 パターンの相関位置を示す。

(1) ターゲット正面の場合

水中ターゲット正面位置で後方 1.2m に ROV を待機させた状態から、対象物認証作業を開始させ GA 認証工程を経て MOS 制御状態に移行して移動中の ROV の嵌合部直前までの状態観察を行った。その結果、双眼による遠方水中ターゲットを認証した瞬間、水中ターゲットから約 0.8m 距離内まで 2 基の水平スラストを全推力駆動させることにより水中ターゲット正面約 0.6m の距離まで高速接近し、その後 GA 認証ならびに MOS 制御プロセスに移行させるため接近速度が急激に減少した。推定速度としては前半の高速接近の場合 1m/sec 程度であり、後者の場合数 10 秒/mm 程度であった。後者の場合、GA 認証によるモデルベースマッチングに主に時間を要することから、認証中は ROV を水中で

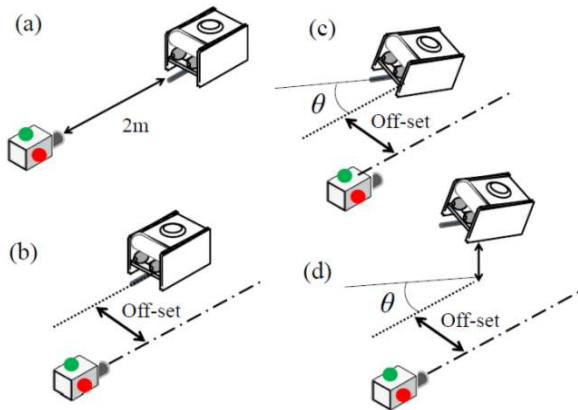


Fig. 7: Interdigitation experiment between ROV and target

安定制御停止させるようにしている。

(2) Off-set を設けた場合

水中ターゲットから後方 1.2 m の位置で Off-set を最大で 1m まで設けた。その結果、Off-set 量は 0.5m 程度までであれば、上記 (1) と同様のアプローチ特性を示すが、それ以上の値になると対象物認証が困難になるため、ROV はアプローチができなくなった。

(3) Off-set に鉛直軸回転を加えた場合

上記 Off-set 量 0.5m 以内で回転角度 30° までであればアプローチできることを確認した。しかしながら、それ以上の高角でのアプローチは困難であった。

(4) Off-set に鉛直軸回転を加えた場合

上記 (3) の条件範囲であって、高さ方向へ 0 最大 0.7m 程度まで移動した場合においても上記 (1) 同様のアプローチ特性を示した。以上の結果から、遠方からの双眼 ROV アプローチにおいてどちらかの単眼による認識域を越えた場合にアプローチが困難となるが、その効果は鉛直方向回転が加わる場合において最も顕著であることがわかった。

3.3.2 水中嵌合特性

水中給電施設を模擬した水中ターゲット後方約 1.2m に MOS/ROV を配置させた上記 3.1.1 の各状態から水中ターゲット嵌合部への嵌合実験を行った。これによると上記 3.1.1(1)~(4) の各条件で嵌合至近距離まで接近した場合において、双眼 ROV は遠方から水中ターゲット目指して約 0.6m 距離内まで高速走行後 GA 認証のため数 10 秒/mm 程度まで減速して水中ターゲット嵌合部直前まで接近した。そして嵌合中はこの減速速度を維持し、嵌合凹部の最大奥行きで停止し、その後安定停止状態を維持した。これらの結果から、嵌合凸部と凹部との嵌合クリアランスは約 5mm 以内であることなどから、MOS/ROV による水中ターゲット嵌合部 x, y, z 各軸方向に対する位置制御精度は約 5mm 以内であると結論される。一方、見浪らは (日本経済新聞, 2014) 双眼 MOS 制御による地上嵌合実験において、x, y, z 各方向での制御精度 0.5mm を達成していることから水中においても同程度の制御精度が期待される。

3.4 水中移動ターゲット追従性能

ここでは、遊魚の水中移動パターンを模擬するため水中ターゲットの移動方向・深さを任意に移動させた

場合の MOS/ROV の追従性評価を行った。その結果、水中ターゲットの移動速度を約 10cm/sec 程度で調整した場合、MOS/ROV は 4 基のスラスタを制御駆動することで水中姿勢制御を自動的に行い、水中ターゲット間との距離を一定 (40cm) に保ちながら左右、上下方向の移動追従移動できることがわかった。また、水中ターゲットを一方向移動だけでなく、途中から移動方向を 180° に変更してもその追従性能の低下は生じなかった。

4 まとめ

深水汚染底泥の水中ロボットによる自動回収を目的に、MOS 制御知能を ROV に搭載して AUV 化するための研究開発を進めている。そのため本研究では双眼 MOS/ROV の水中制御安定性、水中嵌合ならびに水中追従性に関する性能検証を行い、その結果、下記結論を得た。

- (1) 水中固定ターゲットを用いた双眼 GA 認証法による精度実験を行った結果、地上実験と同程度の適合度を達成した。
- (2) 水平、垂直、横 4 基のスラスタ動力を MOS 制御により同時制御することで水中固定型ターゲットに対して安定した水中停止状態を維持することができた。またこの制御方式により、物理的外乱に対して高い復元性能を有することがわかった。
- (3) 直径 70mm × 長さ 100mm の嵌合凹部に対して MOS/ROV に搭載した嵌合凸部 (直径 10mm × 長さ 150mm) の水中嵌合実験を行った結果、x, y, z 各方向で 5mm 以下の精度で水中嵌合できることがわかった。
- (4) 約 10mm/sec 程度で水中移動する水中ターゲットを自動追従できることがわかった。

参考文献

- 1) <http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/tyukan.pdf>
- 2) 石山新太郎, 山口克巳, 日本機械学会論文集 C 編 79 巻 799 号, pp.718-725 (2013-3c)
- 3) 日本経済新聞, Science and Tech フラッシュ, (2014 年 7 月 8 日発刊)
- 4) 石山新太郎, 山下学, 「検査技術」(日本工業出版), Vol.19, No.4, 4 月号, pp.45-49 (2014a)
- 5) 石山新太郎ら, 「検査技術」(日本工業出版) Vol.19, No.5, 5 月号, pp.57-69, (2014b)
- 6) 石山新太郎, 「検査技術」(日本工業出版), Vol.19, No.3, pp.46-53, (2014d)
- 7) 宋薇, 見浪護, 青柳誠司, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1, pp.55-64, (2010a)
- 8) 宋薇, 見浪護, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5, pp.591-598, (2010b)
- 9) Yu, Fujii., Mamoru Minami, Wei Song, Jianing Zhu, Akira Yanou, Journal of Computer and Information Technology, Vol.2, No.1, pp.43-54, (2012)
- 10) Luca, A., Oriolo, G. and Giordano, P. R., Proceedings of 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA2007), pp.2823-2828, (2007)