

多機能センシング環境対応制御（MOS制御）による 嵌合精度検証試験

○西村健太 須浪唯介 矢納陽 松野隆幸（岡山大学）
山下学（（株）石垣） 石山新太郎 見浪護（岡山大学）

Accuracy Validation Test of Interdigitation by Move on Sensing Controlled Manipulation

*K. Nishimura, Y. Sunami, A. Yanou, T. Matsuno (Okayama Univ.),
M. Yamashita (ISHIGAKI Corp.), S. Ishiyama and M. Mamoru (Okayama Univ.)

Abstract— New Artificial Interagency MOS (Move on Sensing) based on visual servoing technology was designed and MOS on board filter press system has been developing to reduce the risk due to radiation exposure during solidification and volume reduction process operation of irradiation contaminated soil. In present study, accuracy validation test of interdigitation between periodic replacement circular rod for filter cloth in the filter press and MOS (Move on Sensing) controlled robot hand was performed and the following results were derived; (1) MOS controlled robot took cognizance of the circular rod end at arbitrary position within planary, 10mm×10mm with 3mm depth automatically and all of interdigitation test were carried out the mission successfully and (2) test result also demonstrated that MOS control guarantees interdigitation clearance between control rod end and robot hand of 1.875mm by the control accuracy within 0.5mm.

Key Words: Interdigitation, Move on Sensing, Manipulation, Filter press,
Contaminated soil, Volume reduction

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も勘案すると今後の大きな課題となる。そのため最近では汚染地区での除染作業が進む中で今後除染土壌の減容化処理技術が大いに注目されつつある。

そのため著者らは前報^{1, 2, 3, 4)}の洗浄再生化技術において放射能汚染土壌の洗浄用に開発した界面化学的分散制御高速せん断解砕洗浄処理技術（以下と解砕洗浄システムと称する）の実証試験を福島県下で実施し、極めて高い洗浄・減容化性能が達成できる見通しを得た。

しかしながら本処理工程の濃縮固形・減容化プロセスにおいては放射線量が極めて高くなくことから、作業員の被ばく低減化対策として本工程で使用を予定しているフィルタプレス装置作業、特に放射能汚染土壌との直接接触するろ布の交換作業においてロボット化による操作が不可欠である⁵⁾。

そこで著者らは、この濃縮固形・減容化プロセスに使用するフィルタプレス装置のろ布交換作業用の制御知能 MOS (Move on Sensing) ならびに Fig. 1 に示す MOS 搭載型フィルタプレスシステムの開発^{5, 6)}を進めている。

MOS 制御知能では、(1) 複数のセンシング情報から得られる作用対象物属性を基にロボット内部に対象モデルを自動形成後、(2) 対象モデルに対して特定指示作業を実行するとともに、(3) 作業結果をロボット内部で

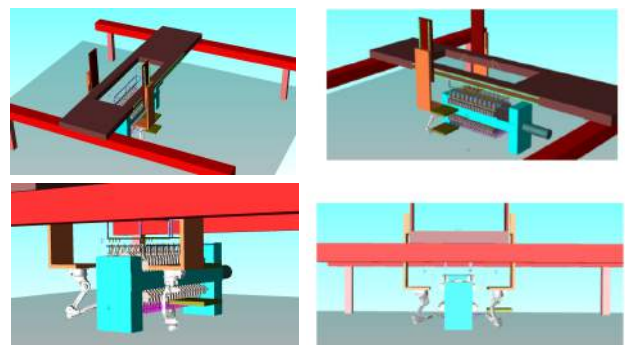


Fig. 1: Concept of MOS on board filter press system

自動反復することにより、実行性の検証を自動的に行うことを特徴としている。

そこで本研究では、作用対象の色と形状などの属性情報（多機能センシング）を基に、ロボット側に作用対象の自動認識させた後ロボット自身による異なる環境条件においてフィルタプレス装置のろ布芯棒をモデルケースとして、芯金-ロボットハンドとの対象物同士の嵌合制御操作（MOS 制御）を実施することにより達成可能な嵌合精度の技術的検証を行った。

2 実験方法

上述のフィルタプレス装置のろ布交換作業の自動化を行うためには Fig. 2 に示す MOS 制御ロボットの手先の嵌合用穴にろ布芯棒挿入を行った後、特殊なろ布取り付け治具からの取り外しを行わなければならない。そこで本研究では、任意位置にある芯棒に対する MOS 制御知能ロボットの認識精度を評価するため下記要領での嵌合実験を実施した。

2.1 嵌合実験系

ロボットによるろ布交換操作実験を行うため、Fig. 3 に示す移動機能付きハンドロボットを製作した。もと

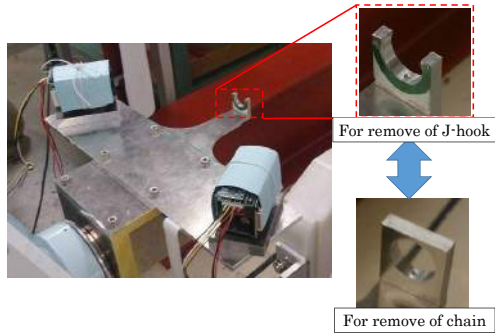


Fig. 2: MOS controlled robot hand and its attachment for interdigitation test

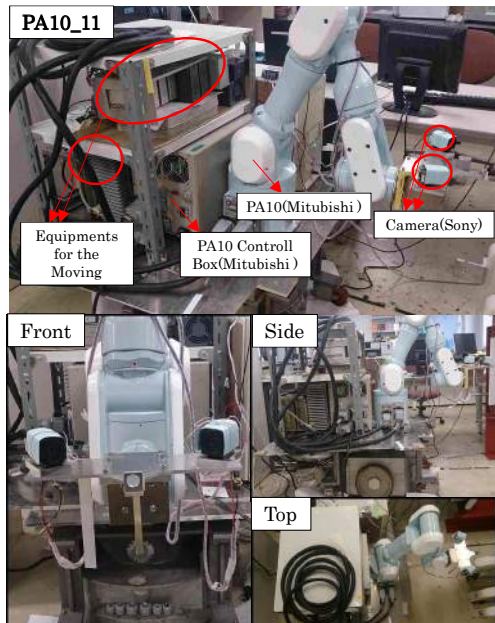


Fig. 3: Over view of MOS on board robot system

もとは移動部分のロボットとハンドロボットはそれぞれ別々にあったが、ハンドを乗せるための土台やカメラをハンドに取り付ける部品の加工を行うことで上記の機能を満たすロボットを作成した。使用したロボットは三菱重工製のアームロボット PA10 である。カメラは Sony 製のビデオレート 30fps のカメラ「FCB-IX11A」を用いた。

このロボットを用いた実験系の概要を Fig. 4 に示す。ハンド先端に設置したカメラ取り付け部のカメラは視線が交差した状態で固定したが、交差点の微調整が可能のようにカメラの回転に関して自由度を持たせねじで固定した。また芯棒の先端位置を認識し、かつ芯棒先端を穴に通して嵌合しかつ取り外し作業が行える治具をハンドの先端に取り付けた。

2.2 嵌合実験条件

2.2.1 実験系定義座標系

Fig. 4 の実験系においてカメラ画像からの対象物の認識結果に基づき手先が移動し手先先端部でろ布芯棒端の把持を行った。本実験ではカメラ画像を用いた GA の認識精度とハンド移動精度を検証するため、繰り返し認識・移動実験を行った。Fig. 5 にコンピュータの世界座標系 Σ_W とハンド座標系 Σ_H の関係を示す。また Fig. 4 にハンド座標系 Σ_H とエンドエ

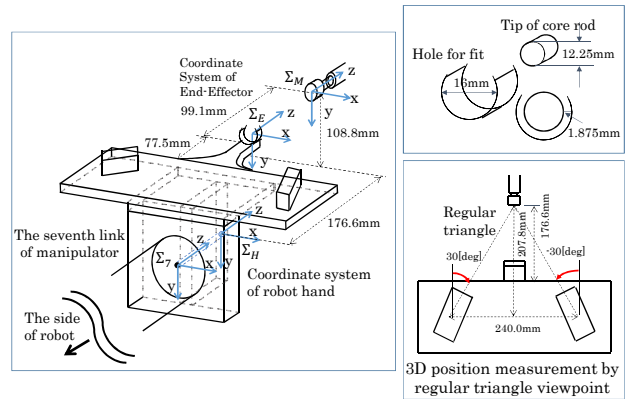


Fig. 4: Experimental test system composed of MOS controlled robot and control rod of filter press

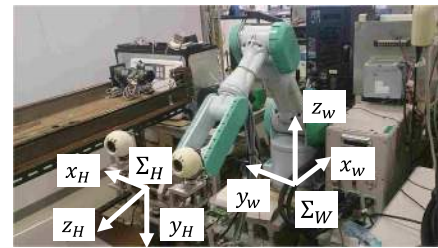


Fig. 5: Coordinate systems in MOS controlled robot system

フェクタ座標系 Σ_E を定義する。貫通棒中心であるエンドエフェクタ座標系 Σ_E はハンド座標系からみて $(x, y, z) = (0, -108.8, 77.5)$ にある。左カメラは Σ_H 座標の y 軸方向に時計回りに $30[\text{deg}]$ 、右カメラは反時計回りに $30[\text{deg}]$ 傾けた。

2.2.2 アルゴリズム

Fig. 6 に進化計算 (GA) によって複数の遺伝子で与えられるモデルが対象物に収束していく過程を示す。まず GA 遺伝子初期個体を探索エリア内にばら撒くことにより各個体の適合度を計算し、選択・交配・突然変異を通して遺伝子が進化していく。進化するにつれて対象物付近を探索し、最終世代では対象物の位置を発見する。

2.2.3 嵌合実験手順

繰り返し精度実験を各設定条件のもとで x, y, z 方向それぞれ 10 回ずつ行った。エンドエフェクタ座標系 Σ_E からみて対象物の位置が、

$$\begin{aligned} (x, y) &= \{A, B, C, D, E, F, G, H, I\} \\ &= \{(0, 0), (-10, 0), (10, 0), (0, -10), (0, 10), \\ &\quad (-10, -10), (-10, 10), (10, -10), (10, 10)\} \end{aligned}$$

の 9 通りの実験を行った (芯棒端面の奥行方向位置は常に同じ)。各芯棒端面の設定位置を Fig. 7 に示す。

ハンドの移動距離の実測値の測定はノギスを用いて実施した。ノギスでの x, y および z 各方向での測定方法を下記に示す。ここでは x 方向のノギスでの測定方法について述べる。

1. A-I の初期位置までマニピュレータを移動させたのち、ノギスをハンド右側にあて a を計測する。

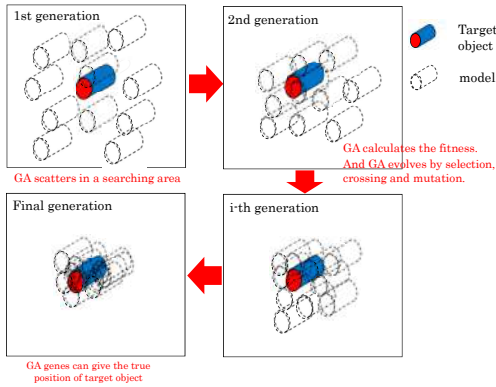


Fig. 6: GA recognition process for the targeting object

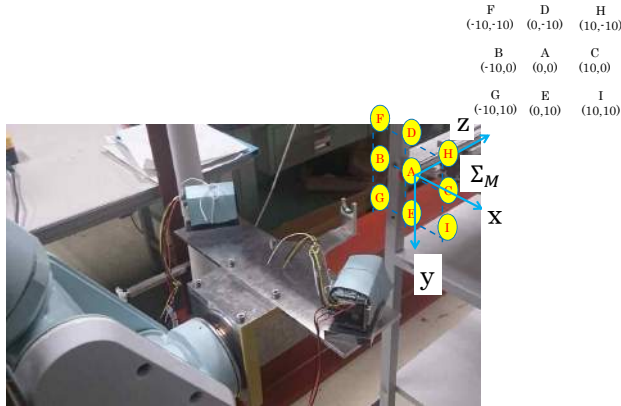


Fig. 7: Circular rod positions in the present experiment

- GA(遺伝的アルゴリズム)を用いて芯棒認識を行い、移動量 l_x を導出する。
- l_x をもとにハンドを移動させる。
- 移動後にノギスをハンド右側にあて b を計測する。式 (1) より l_x を導出する。

$$l_x = a - b \quad (1)$$

Fig. 8 に本実験における上記提案したアルゴリズムを用いて実装したフローチャートを示す。

3 実験結果

各設定位置の中で A 点において実験で得られた認識精度と把持位置精度を Fig. 9 に示す。図内のグラフは、a. が GA が収束するまでに要した世代数 (150 世代で 5 秒)、b.~d. はそれぞれ x,y,z の左右適合度およびそれらの平均値、e. は GA による認識位置と真値との誤差 $\Delta\hat{x}, \Delta\hat{y}, \Delta\hat{z}$ 、f. e. による認識終了後、認識結果 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ を目標値としてハンドを移動させた際に発生する x,y,z 座標の誤差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ をそれぞれ示す。

これによると、中心 A 点では X 方向における 10 回までの繰返しにおいて世代交代数は x, y, z 各方向で約 200 世代においてほぼ収束飽和し、その所要時間は 10 秒以下であった。さらにその際の左右カメラによる適合度は両者とも 0.5 以上の高い数値を示しているが傾向的には左カメラのほうの適合度が相対的に高い値を示した。また、繰返しによる平均的な適合度は x 方向では 0.7 の値となった。これらの傾向は y および z 方向においても観察されたが、y および z 方向での平均的

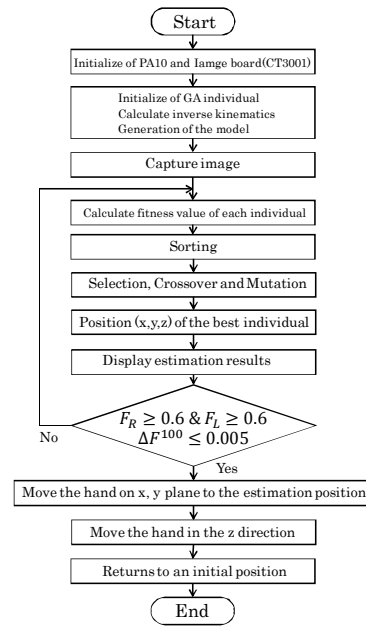


Fig. 8: Flowchart of recognition algorithm by MOS

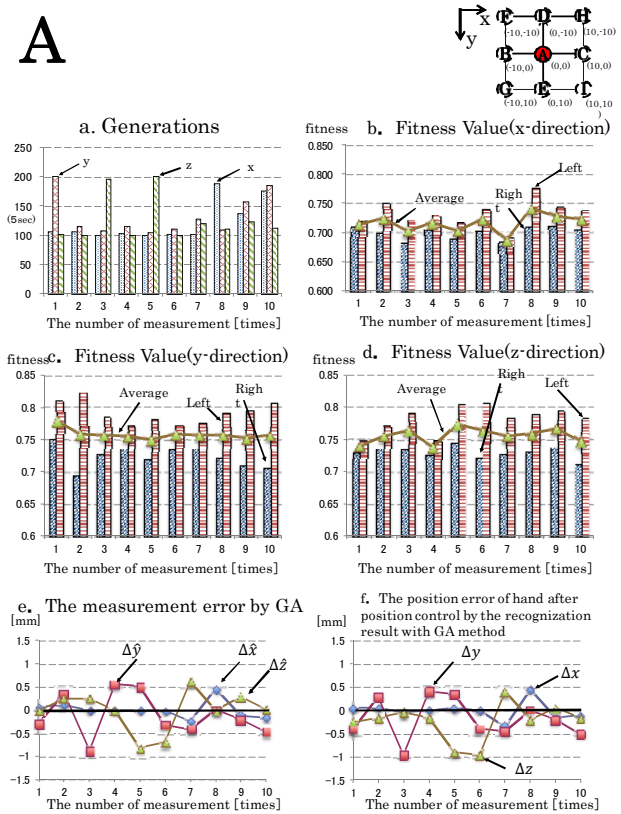


Fig. 9: Digeneis process and accuracy of the object recognition by GA; Circular rod position defined the position A, (x,y)=(0,0)

適合度は 0.75 程度の値となった。また、移動誤差については全繰返しにおいて x 方向は $\pm 0.5\text{mm}$ 以下であったが、y 及び z 方向では繰返し初期において最大 1mm の誤差を生じるものの、繰返し数の増加とともにこれらの誤差は徐々に修正されていくことがわかった。

左横 B 点における世帯交代数は 300 世代となり A 点の場合よりいささか大きな値となったが、適合度については A 点と同様の傾向を示した。誤差については、

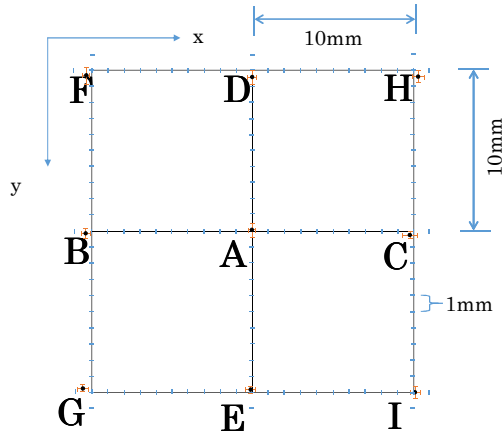


Fig. 10: Position recognition error and its standard deviation in X-Y plain

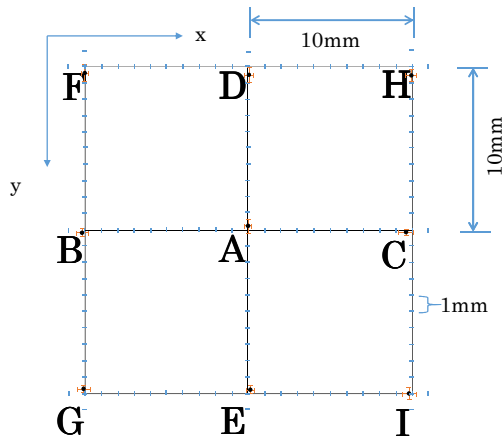


Fig. 11: Position error and its standard deviation in X-Y plain

繰返し数とともに誤差拡大の傾向が全方向において観察された。

Fig. 10 に GA による認識位置と真値との誤差の平均値の位置と各 x, y 方向の標準偏差を x, y 平面にて図示した。ここで各 A-I 点から誤差 $\Delta\hat{x}, \Delta\hat{y}$ だけ移動した場所に点をプロットし、それを中心として標準偏差 $\sigma_{\hat{x}}, \sigma_{\hat{y}}$ を記述した。これによると、 $x-y$ 平面における GA による認識位置と真値との誤差は左側面の F, B および G 点において $-x$ 方向側に、さらに上段側 F, D 及び H においては $-y$ 方向側に生じやすいことがわかる。

Fig. 11 には手先座標における真値との誤差の平均値の位置に各 x, y 方向の標準偏差を x, y 平面にて図示した。ここで各 A-I 点から誤差 $\Delta x, \Delta y$ だけ移動した場所に黒い点を記述し、そこを中心として標準偏差 σ_x, σ_y を記述した。ただし、ノギスの最小読取り値は 0.05mm であるため有効数字は 2 桁とした。これによると、上段側 F, D および H 点において $-y$ 方向に誤差生じる傾向はあるものの、他の点においてはほぼ真値に近い値となっていることがわかる。

4 考察

4.1 GA による認識誤差と作動制御誤差

GA における 3 方向における認識と真値との誤差の平均値を Fig. 12 に示す。

これによると GA による認識精度は x 方向の場合、平均誤差 $\Delta\hat{x}$ が最も高いのは左側面側 G, B 及び F 点

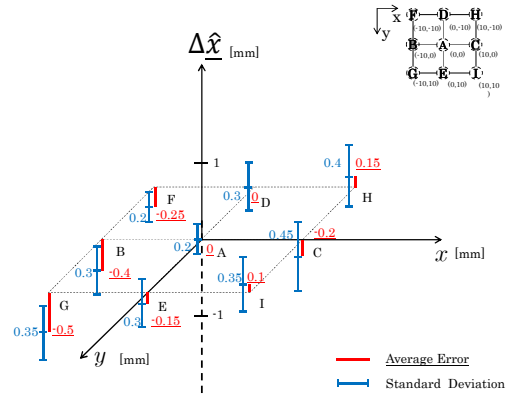


Fig. 12: True position of circular rod end and recognition error by GA ($\Delta\hat{x}$)

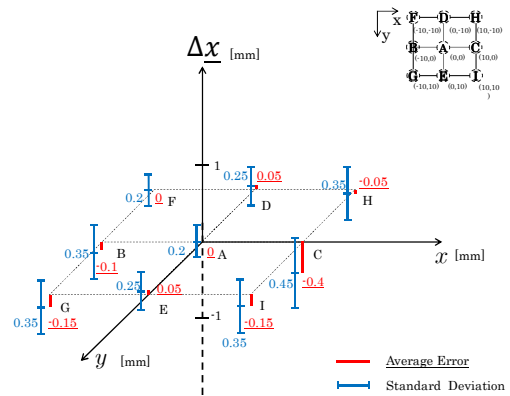


Fig. 13: True position of circular rod end and error by GA (Δx)

で $-0.25 \sim 0.5 \text{mm}$ であり、その際の標準偏差 $\sigma_{\hat{x}}$ は $0.2 \sim 0.35$ となった。一方、 $\Delta\hat{y}$ 値で最も高いものは上段側 F, I 及び H 点において $+0.35 \sim 0.45 \text{mm}$ の認識誤差が $0.35 \sim 0.5 \text{mm}$ の偏差で生じた。 $\Delta\hat{z}$ 値で最も高い値を示したのが左側面及び中央の G, B, F 及び E, A, D 点において $-0.25 \sim 0.4 \text{mm}$ であり標準偏差が $0.3 \sim 0.4$ であった。

これに対して 3 方向における手先座標系における真値との誤差の平均値を Fig. 13 にそれぞれ示す。これによると、全設定点において平均誤差 Δx は C 点を除き全般的にほぼ改善され、 -0.15 以下になっていることがわかる。一方、 Δy 値においては上段部側の F, D, H 点において最大 $+0.55 \text{mm}$ の値を示した。これに対して Δz 値では、左側面側の F, B, G 点において -0.4mm の値を示した。

4.2 確率的認識精度の評価

Fig. 4 の実験系で示すように芯棒の半径は 6.125mm で穴の半径は 8.0mm であるため、各上下左右方向 (x, y 方向) に 1.875mm のクリアランスがある。そのため、この嵌合対象に対して MOS 制御知能は 1.8mm 以下の制御精度で嵌合精度を保証しなければならない。そこで、ここでは MOS 制御による認識精度の評価を行った。

Table 1 には設定位置 A-I 点における GA による認識位置と真値との誤差の平均値とその標準偏差を、また Table 2 には手先座標における真値との誤差の平均値とその標準偏差をそれぞれ示す。 $\Delta\hat{x}, \Delta\hat{y}, \Delta\hat{z}$ は真値と GA の測定値の平均誤差、 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ は真値とノギスでの測定値との平均誤差である。また $\sigma_{\hat{x}}, \sigma_{\hat{y}}, \sigma_{\hat{z}}$ は

- 4) 石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 比氣明典、高温加熱処理による高濃縮汚染残土の高減容化に関する研究、日本機械学会論文誌、Vol.79,No.805,pp.1504-1517 (2013) .
- 5) 石山新太郎、(連載) 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術□ 放射能汚染土壌の洗浄再生科技術 (第2報)、「検査技術」(日本工業出版)、Vol.19,No.4、4月号 (2014) pp.45-49
- 6) 石山新太郎ら、(連載) 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術□、Move on Sensing 技術開発の現状 (第3報)、「検査技術」(日本工業出版) Vol.19,No.5,5月号 (2014) pp.57-69
- 7) 石山新太郎、山口克巳、サーベイメータ搭載遠隔操作無人海中探査機による調整池汚泥の動態調査、日本機械学会論文集 C 編 79 卷 799 号,718-725 (2013-3)
- 8) 石山新太郎、(連載) 最新のセンシング/マニピュレーション融合化技術□ 水中サーベイメータ搭載遠隔操作無人海中探査機による水中汚泥の動態調査技術 (第1報)、「検査技術」(日本工業出版)、Vol.19,No.3(2014),pp.46-53.