

### 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

見浪 護<sup>\*1</sup>, 西村 健太<sup>\*2</sup>, 須浪 唯介<sup>\*2</sup>, 矢納 陽<sup>\*1</sup>, 崔 禹<sup>\*2</sup>, 山下 学<sup>\*3</sup>, 石山 新太郎<sup>\*4</sup>

#### A proposal of decontamination robot using 3D hand-eye-dual-cameras solid recognition and accuracy validation

Mamoru MINAMI<sup>\*1</sup>, Kenta NISHIMURA<sup>\*2</sup>, Yusuke SUNAMI<sup>\*2</sup>, Akira YANO<sup>\*1</sup>, Cui YU<sup>\*2</sup>,  
Manabu YAMASHITA<sup>\*3</sup> and Shintaro ISHIYAMA<sup>\*4</sup>

<sup>\*1,\*2</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama 700-8530, Japan

<sup>\*3</sup> ISHIGAKI COMPANY, LTD., 1-1-1 Kyobashi, Chuo-ku, Tokyo 104-0031, Japan

<sup>\*4</sup> Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-Shirone, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

Received 18 September 2015

#### Abstract

New robotic system that uses three dimensional measurement with solid object recognition—3D-MoS (Three Dimensional Move on Sensing)—based on visual servoing technology was designed and the on-board hand-eye-dual-cameras robot system has been developed to reduce risks of radiation exposure during decontamination processes by filter press machine that solidifies and reduces the volume of irradiation contaminated soil. The feature of 3D-MoS includes; (1) the both hand-eye-dual-cameras take the images of target object near the intersection of both lenses' centerlines, (2) the observation at intersection enables both cameras can see target object almost at the center of both images, (3) then it brings benefits as reducing the effect of lens aberration and improving the detection accuracy of three dimensional position. In this study, accuracy validation test of interdigitation of the robot's hand into filter cloth rod of the filter press—the task is crucial for the robot to remove the contaminated cloth from the filter press machine automatically and for preventing workers from exposing to radiation—, was performed. Then the following results were derived; (1) the 3D-MoS controlled robot could recognize the rod at arbitrary position within designated space, and all of insertion test were carried out successfully and, (2) test results also demonstrated that the proposed control guarantees that interdigitation clearance between the rod and robot hand can be kept within 1.875[mm] with standard deviation being 0.6[mm] or less.

**Key words :** Interdigitation, Three dimensional move on sensing (3D-MoS), Manipulation, Filter press, Contaminated soil, Volume reduction

#### 1. ま え が き

2011年3月11日の東北大地震以降、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

No.15-00216 [DOI:10.1299/transjsme.15-00216], J-STAGE Advance Publication date : 20 October, 2015

<sup>\*1</sup> 正員, 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

<sup>\*2</sup> 岡山大学大学院自然科学研究科

<sup>\*3</sup> (株) 石垣 (〒104-0031 東京都中央区京橋 1-1-1)

<sup>\*4</sup> 正員, 日本原子力研究開発機構 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4)

E-mail of corresponding author: minami-m@cc.okayama-u.ac.jp

容化処理技術が多いに注目されつつある。そのため著者らは前報（石山他, 2013a, 2013b, 2013c; 石山, 山口, 2013）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・減容化を行うフィルタプレス装置のろ布には高濃度の放射性物質が濃縮固化されることから、定期的に行われるろ布交換作業では被爆の危険がありロボット化が不可欠である。さらにフィルタプレスは解砕溶液を高圧で圧縮し脱水を行うためろ板が変形し、ろ布芯棒の位置・姿勢は不確定となる。このためろ布交換を行うロボットはアンドアイカメラによりろ布芯棒の3次元位置・姿勢を計測する必要がある。

ハンドアイカメラロボットはカメラ視点を自由に選べる利便性から産業用ロボットとしてピンピッキングなどに広く用いられているが、単眼ハンドアイを用いている場合が多くカメラ視線奥行方向の位置・姿勢計測精度が良くないという問題がある。このためカメラとレーザーレンジファインダの組み合わせた認識方法(栗井他, 2011),(佐藤他, 2011)も研究されているが、カメラ画像内の認識対象物とレンジファインダで距離を検出した対象物が同一物体であるという前提「対象物体の同一性」があり、これが満たされていないとき誤認識しロボットの誤動作の原因となる。また、単眼カメラと光の干渉を利用した測距計の組み合わせも考えられるが、カメラ画像内の対象物と測距対象物が同一であるかという問題は残る。複数のセンサーを総合して計測するセンサフュージョン(石川, 1988),(高橋, 石川, 1990)は古くから研究されているが、上で述べた計測対象物の同一性という問題を内包していると考えられる。

複眼カメラ画像情報から対象物の3次元位置・姿勢を計測する情報処理においても似た問題が発生する。すなわち3次元空間内の物体上のある点が複眼カメラ画像の中のどの点に対応しているかという「対応点の同一性」の問題である。エピポラ幾何を用いて複眼カメラ画像内の対応点を探す方法が一般的(松山他, 1998),(徐, 辻, 2005)であるが、対応点の同一性が満たされない場合、対象物の3次元位置・姿勢情報は誤差を含む(中原他, 2001),(小野他, 2013)ことになる。

一方、ビジュアルサーボに基づくロボット制御(Luca et al., 2007)の研究では、物体の運動モデルと非線形オブザーバを利用した物体運動の予測手法(橋本, 木村, 1995)が提案されているが、認識誤差がゼロ近くまで減少するまでに時間がかかるという問題がある。また、単眼ではカメラの奥行き方向の対象物の位置・姿勢計測が困難であることが指摘され、Lucaらは既知のカメラの移動視に基づいてカメラと対象物までの距離を推定する方法を提案している(Luka, Oriolo and Giordano, 2007)。

本報では、フィルタプレス装置のろ布交換作業に対して Visual Servo (Hutchinson et al., 1996) が紹介している手法の一つである Model-based Visual Servo を適用し、指定する属性(対象物の形状と色)を持つ対象物の3次元位置・姿勢を複眼ハンドアイによって計測する。さらに計測した対象物の3次元位置・姿勢を用いてロボットを制御(ここではこの方法を Three Dimensional Move on Sensing, 3D-MoS と呼ぶ)し、ろ布芯棒にハンドを嵌めさせてろ布を取り外すことができる除染ロボットシステムを提案する。提案する 3D-MoS システムは、3次元形状知識をもとに認識を行うために、複眼カメラシステムの上記の「対応点の同一性」の問題は発生しない。この特徴は、従来の立体画像認識((徐, 辻, 2005),(松山他, 1998))に記載されているような2次元複眼画像から3次元情報を復元する方法ではなく、対象物の3次元モデルを2次元の複眼画像面へ射影(順方向射影)しその射影モデルと画像内の認識対象物の画像情報の相関を用いて3次元モデルの位置・姿勢を求める(宋他, 2010; 宋, 見浪, 2010)ことから得られる利点である。

## 2. フィルタープレスへの応用

ビジュアルサーボの研究は、対象物体の形状を既知情報として利用して画像認識を行い対象物の位置・姿勢を計測しロボットを制御する Model-based Visual Servo と、対象物の形状情報は用いず画像内に映る対象物上の複数の注目点の現在位置とロボットハンドが理想の位置・姿勢に移動したときに観測される画像内の目標位置との差のみを用いて制御する Image-based Visual Servo がある(Hutchinson et al., 1996)。Model-based Visual Servo は対象物の形状に基づいて制御しているため対象物の把持などの作業が可能である。これに対して Image-based Visual Servo は対象物の形状情報を用いない方法であるため、サーボに関して簡単な制御系を組むことができる反面把持作業は難しい。

提案する 3D-MoS では、まず認識対象物の 3 次元の既知形状モデルに属性を組み込んだ形状属性モデルを作成し、複眼に射影された複数のモデルと複眼に映っている実際の対象物との相関を意味するスカラー関数 (Minami et al., 2001) を定義する。3 次元モデルの位置・姿勢が対象物のそれらと重なっているとき最大値をとるようにモデル形状や光環境また相関関数を設定することができる。そのような状態では対象物の 3 次元位置・姿勢を求める問題は、相関関数を最大化する変数を求める最適化問題となる (宋他, 2010; 宋, 見浪, 2010)。さらに相関関数を遺伝的アルゴリズム (GA) の適合度として用い最適解探索を行うことにより、位置・姿勢に対する相関関数の分布がノイズにより多峰性関数となる場合でも有効に最適解を探索することができる。(Suzuki and Minami, 2005)。



Fig. 1 Robot system for removing filter clothes of filter press machine.

図 1 にフィルタプレス (以下 FP) 用ろ布交換用ロボットを示す。左上の写真は FP 全体を示し、下段左右の写真は 2 台のロボットがろ板を挟んで向かい合って設置されている様子を示す。下段の写真よりろ板に挟まれたろ布の下方にろ布芯棒があることがわかる。上段右側の写真は FP 横よりロボットのハンド部を撮影したものである。一枚のろ布を取り外すには 4 本の芯棒を抜き取る必要があり、2 台のロボットが 1 本の芯棒を協調して把持し抜き取る必要がある。最も接近した芯棒間の距離は、30[mm] 程度であり同一の芯棒を 2 台のロボットが把持するためには芯棒端部の色を変化させることで誤認識を防いでいる。芯棒に嵌合させる半円筒形状のロボットハンドの半径と芯棒半径との差は、1.875[mm] であり 3D-MoS による認識とその結果に基づくロボット位置決め精度は 1.875[mm] 以下に抑える必要がある。

以上の研究の経緯と FP 用ロボットに求められる状況を踏まえて、本報では複眼カメラの視線交点付近で対象物を撮像することでカメラ視線奥行き方向の対象物の位置計測精度を向上させる計測方法と、3 次元複眼立体認識に基づく制御と組み合わせたロボットシステムを提案する。視線交点付近に対象物を置いて撮像することは、カメラレンズの収差による誤差を防ぐことができるという特徴を持つ。提案した 3D-MoS による FP 装置のろ布芯棒認識精度検証実験を行った結果、カメラ視線方向に対する垂直平面内の認識精度は 99.8 % の確率で円筒ハンドとろ布芯棒のクリアランスである  $\pm 1.875$ [mm] 以下に抑えることができること、さらにカメラ視線奥行き方向の認識精度は、同じく 99.8 % の確率でクリアランス 3[mm] 以下に抑えることができることを確認した。これによりロボットによるろ布芯棒の抜き取り作業が可能となりろ布除去作業を自動化できることから、作業者の被ばくを避けることができる除染ロボットシステムの実現に目処をつけることができた。

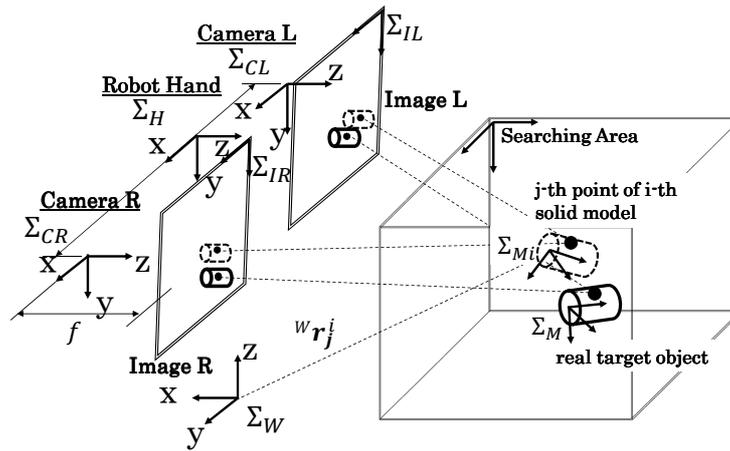


Fig. 2 3D solid model and real target object in space are projected into left and right images. Definitions of coordinate systems are depicted as world coordinates  $\Sigma_W$ , real target coordinates  $\Sigma_M$ ,  $i$ -th model coordinates  $\Sigma_{Mi}$ , robot hand coordinates  $\Sigma_H$ , camera coordinates  $\Sigma_{CL}$ ,  $\Sigma_{CR}$ , image coordinates  $\Sigma_{IL}$ ,  $\Sigma_{IR}$ .

### 3. 立体モデルの射影変換

#### 3.1 射影変換

中心射影の関係から、カメラの焦点距離を  $f$ 、画像中心座標を  $({}^l x_0, {}^l y_0)$ 、及び、カメラ座標系  $\Sigma_C$  における  $x$  軸、 $y$  軸の距離 [mm] と画像座標系  $\Sigma_I$  における  $x$  軸、 $y$  軸の距離 [pixel] の比を  $\eta_x, \eta_y$  [mm/pixel] とする。  $\Sigma_C$  における任意の点  $({}^c x_i, {}^c y_i, {}^c z_i)$  は、レンズを透過して、  $\Sigma_I$  の点  $({}^l x_i, {}^l y_i)$  に撮像される。このとき  $({}^c x_i, {}^c y_i, {}^c z_i)$  と  $({}^l x_i, {}^l y_i)$  の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} {}^l x_i \\ {}^l y_i \end{bmatrix} = \frac{1}{{}^c z_i} \begin{bmatrix} f/\eta_x & 0 & {}^l x_0 & 0 \\ 0 & f/\eta_y & {}^l y_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c x_i \\ {}^c y_i \\ {}^c z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} {}^c x_i \\ {}^c y_i \\ {}^c z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 3.2 左右カメラへの射影変換

ロボットハンドには2台のカメラが搭載されており、図2に示すように右カメラ座標系を  $\Sigma_{CR}$ 、画像座標系を  $\Sigma_{IR}$ 、左カメラ座標系を  $\Sigma_{CL}$ 、画像座標系を  $\Sigma_{IL}$  とする。図の右側に real target object と記した実線の円筒形で示した認識対象物体が認識空間内に存在する様子を示す。破線の円筒形は  $i$  番目のモデルであり、  $i$  番目のモデル上の  $j$  番目の座標を基準座標系  $\Sigma_W$  で表したベクトルを  ${}^W \mathbf{r}_j^i$  と表し、  $\Sigma_{CR}$  で表したベクトルを  ${}^{CR} \mathbf{r}_j^i$  と表す。さらにこれを  $i$  番目のモデルに固定した座標系  $\Sigma_{Mi}$  で表したベクトルを  ${}^{Mi} \mathbf{r}_j$  と表す。このベクトルは定数ベクトルとなるため対象物体の立体構造の定義に用いる。ロボットのハンド手先座標系  $\Sigma_H$  とモデル座標系  $\Sigma_{Mi}$  の関係を同次変換行列で表し  ${}^H \mathbf{T}_{Mi}$  と記し、  $\Sigma_{CR}$  と  $\Sigma_H$  の関係を同次変換行列で表し  ${}^{CR} \mathbf{T}_H$  と記す。このとき  ${}^{CR} \mathbf{r}_j^i$  は

$${}^{CR} \mathbf{r}_j^i = {}^{CR} \mathbf{T}_H {}^H \mathbf{T}_{Mi} {}^{Mi} \mathbf{r}_j \quad (2)$$

と表される。射影行列  $\mathbf{P}$  を使い、  ${}^{CR} \mathbf{r}_j^i$  を  $\Sigma_{IR}$  に対して射影することで、右画像座標系  $\Sigma_{IR}$  で表した画像面内の  $i$  番目のモデル上の  $j$  番目の点の座標  ${}^{IR} \mathbf{r}_j^i$  は、

$${}^{IR} \mathbf{r}_j^i = \mathbf{P} {}^{CR} \mathbf{T}_H {}^H \mathbf{T}_{Mi} {}^{Mi} \mathbf{r}_j \quad (3)$$

と求められる。同様にして  ${}^{IL} \mathbf{r}_j^i$  も同様にして計算される。

ここで  $\Sigma_W$  で表した  $i$  番目の立体モデルの位置・姿勢を  ${}^W \boldsymbol{\phi}^i = [t_x^i, t_y^i, t_z^i, e_1^i, e_2^i, e_3^i]^T$  とすると、  ${}^H \mathbf{T}_{Mi}$  は  ${}^W \boldsymbol{\phi}^i$  の関数になるため  ${}^H \mathbf{T}_{Mi}({}^W \boldsymbol{\phi}^i)$  と表すことができる。したがって式(2)、(3)の射影変換をベクトル関数  $\mathbf{f}_R, \mathbf{f}_L$  で表すと  ${}^{IR} \mathbf{r}_j^i$ 、

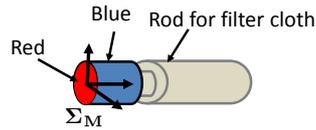


Fig. 3 Shape of the rod of filter cloth and the color put on end-surface(red) and side-surface(blue).

${}^L r_j^i$  は次のように書き直せる.

$$\begin{cases} {}^I R r_j^i = f_R({}^W \phi^i, {}^{M_i} r_j) \\ {}^I L r_j^i = f_L({}^W \phi^i, {}^{M_i} r_j) \end{cases} \quad (4)$$

ここで  $i = 1, 2, \dots, p$ ,  $j = 1, 2, \dots, q$ , であり  $p$  はモデルの総数で本報では  $p = 20$  と定めた. またモデル上の識別点数は円筒形端面上に  $q_E = 240$ , 側面上に  $q_S = 48$  であり,  $q = q_E + q_S$  である.

上式は, 未知である位置・姿勢  ${}^W \phi^i$  と立体モデル上の点  ${}^{M_i} r_i$  を変数とする関数であり, 左右の画像座標系における立体モデル上の任意の座標は, 式 (4) によって, 一意に決定される.

#### 4. 3次元複眼立体認識を用いた3次元対象物の位置・姿勢計測

##### 4.1 HSV 表色系

表色系の一つに, 色合い(色相, *Hue*), 鮮やかさ(彩度, *Saturation*), 明るさ(明度, *Value*) の3つの属性で表現する HSV 表色系がある. HSV 表色系の  $H[0 \sim 359]$  は色相を表し,  $S[0 \sim 1]$  は色彩を表し, 色相環の中心からの距離で表している.  $V[0 \sim 255]$  は明度であり, 色相環の円に直行する軸に取る.  $V$  の値が小さいほど色が暗くなる. ここでは対象物の色の認識に HSV 表色系の色相 ( $H$ ) の値を使用する. HSV 表色系の  $Hue$  を使用することで, 明るさに影響されない色相を強化することができ, 一般的に画像計測は光環境の変化に脆弱であるという欠点を補う効果を期待している.

ビデオカメラからの信号である RGB 値 (*Red, Green, Blue*) から HSV 値への変換式を以下に示す. RGB 表色系の  $R, G, B$  の値をそれぞれ  $r, g, b$  と定義し,  $V, v$  を

$$V = \max\{r, g, b\} \quad (5)$$

$$v = \min\{r, g, b\} \quad (6)$$

と定義すると,  $r=V$  のとき,

$$H^* = (g - b) / (V - v) \quad (7)$$

$g=V$  のとき,

$$H^* = 2 + (b - r) / (V - v) \quad (8)$$

$b=V$  のとき,

$$H^* = 4 + (r - g) / (V - v) \quad (9)$$

となる. ここで  $H$  の値を  $0 \sim 359$  の範囲にするために

$$H = 60H^* \quad (10)$$

とする.

##### 4.2 遺伝的認識法

本報で取り扱うろ布芯棒の形状と色を図3に示す. 図に示す  $\Sigma_M$  はろ布芯棒端面に図のように固定されており, その座標系の位置・姿勢はろ布芯棒のそれらを代表している. 図中のろ布芯棒の円筒部端面は赤色であり側面は青色に塗装されている. 他の色に塗装したろ布芯棒も用意しており, 形状は同じでも色の違いによって個性を付けることで近接するろ布芯棒を誤認することを防いでいる. ロボットシステムの構成は図4に示すように, 2台のロボットが正対している. これは同一のろ布芯棒端部を円筒形ハンドに嵌合させ, 協調して抜き取る作業を行う必要があるためである. 3cm 程度の間隔で近接する同一のろ布芯棒を正対する2台のロボットが確実に認識するため, 色による個性付けが必要であった.

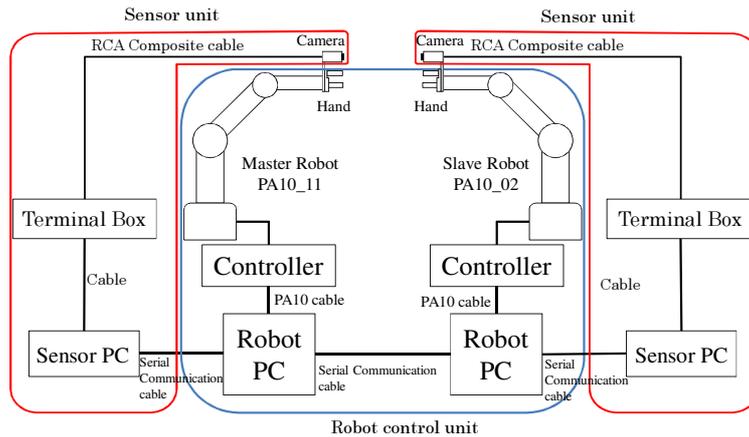


Fig. 4 Two robots system tasked with conducting coordinated operation to grasp a single rod and to remove it for changing filter cloth.

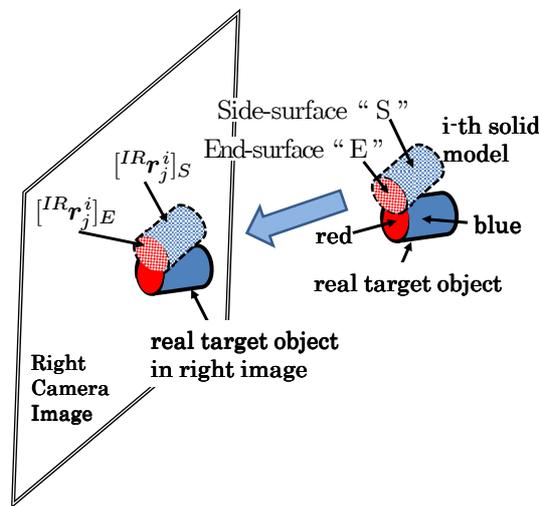


Fig. 5  $i$ -th object model projected to right image plane whose end-surface part denoted by "E" and side part denoted by "S." Projected points  ${}^iR\mathbf{r}_j^i$  on "E" are represented as  ${}^iR\mathbf{r}_j^i|_E$  and on "S" as  ${}^iR\mathbf{r}_j^i|_S$ .

このろ布芯棒の位置・姿勢を計測するために、同じ形状と色を持つ立体モデルを考える。この第  $i$  番目のモデルとろ布芯棒が 3 次元空間に存在している様子を図 5 の右側に示す。さらにこれらの立体モデルが右カメラ画像へ射影されている状態を図の左側に示す。  $\Sigma_W$  で表された第  $i$  番目の立体モデルの位置・姿勢は、  $W\phi^i = [t_x^i, t_y^i, t_z^i, \epsilon_1^i, \epsilon_2^i, \epsilon_3^i]$ 、 ( $\epsilon = [\epsilon_1^i, \epsilon_2^i, \epsilon_3^i]$  はクォータニオンの姿勢変数) と表され、  $W\phi^i$  の 6 つの要素をそれぞれ 12 ビットの 2 進数で表す。

左右カメラ画像面に射影された立体モデルと画像内の認識対象物の相関関数の分布 (Minami et al, 2001) の最大値を与える  $W\phi^i$  が 3 次元対象物の位置・姿勢を意味するように光環境、モデル形状、相関関数を調整することができる (Suzuki and Minami, 2005) ことから、対象物の認識問題は相関関数の最大値探索問題に変換できる。この最適化問題を GA で解くため相関関数を GA の適合度関数として用い、  $k$  世代の  $i$  番目のモデルの適合度を  $F(W\phi_k^i)$  と表す。

適合度関数の最大値を探索・発見する様々な方法が提案されているが、本研究では最適解探索に GA を適用し最大値探索とその最大値を与える変数を求める。GA を用いた最適解探索は、適合度関数が多峰性分布関数になる場合でも有効であり最急降下法などよく知られた数理的方法より適用できる範囲が広い (宋他, 2010; 宋, 見浪, 2010)。GA の遺伝子  $W\phi_k^i$  が  $F(W\phi_k^i)$  を最大化する最適解に収束した時、  $W\phi_k^i$  は認識対象物の位置・姿勢と一致していると考えられる。

### 4.3 形状と色を同時に評価する適合度関数

式 (4) で求められた  ${}^iL\mathbf{r}_j^i$ 、  ${}^iR\mathbf{r}_j^i$  は立体モデルの位置・姿勢  $W\phi_k^i$  と第  $i$  番目の立体モデル表面上の点群  ${}^{Mi}\mathbf{r}_j$  の関数である。図 5 に示すように  ${}^iR\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)|_E$  を立体モデル上の点群の中で端面 "E" に属する点群が右画像座標系へ射影

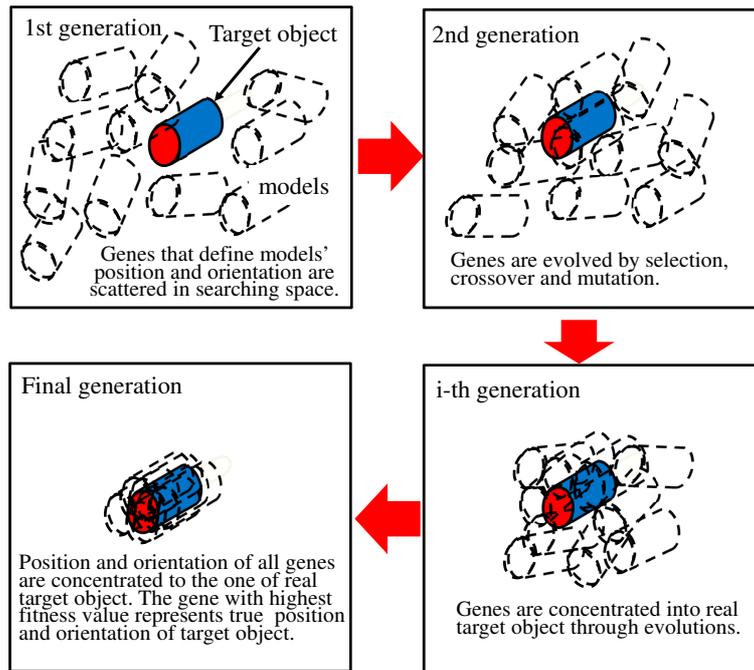


Fig. 6 Evolution process of models scattered in 3D space, representing that 3D models converge into real target object, by matching true target object projected into 2D image plane and 3D models projected into the same plane, through evaluations on fitness function defined by Eq.(11).

された点群と定義する。同様に円筒側面内の右画像座標系で表された点群は  $[{}^R\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_S$  と表される。

$F_R(\mathbf{r})$  を右カメラ画像平面内の座標  $\mathbf{r}$  の赤の色相値が指定範囲内に入っている場合に“1”を返し、それ以外の場合は“0”を返す関数と定める。ここでは図3に示されているように円筒形の認識対象物の端面は赤色で側面は青色に塗装されている状態を考える。したがって  $\sum_j F_R([{}^R\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_E)$  は右カメラ画像において円筒モデルの端面上の点が、円筒対象物の端面の赤色部分に重なっている点の総数を表す関数となる。同様に  $\sum_j F_B([{}^R\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_S)$  は右カメラ画像において円筒モデルの側面上の点が円筒対象物の側面の青色部分に重なっているときの点の総数である。塗装色は青、赤、緑であり端面、側面を3色で塗り分けると組み合わせの数は6となる。青、赤、緑を識別する色相範囲は、 $30 < \text{青} < 60$ ,  $150 < \text{赤} < 180$ ,  $300 < \text{緑} < 340$  と設定した。

以上より  $q_E$  を端面の識別点数,  $q_S$  を側面の識別点数とし、赤端面青側面円筒モデルの遺伝子  $W\phi_k^i$  に基づく正規化された適合度関数  $F_{RB}(W\phi_k^i)$  を、

$$F_{RB}(W\phi_k^i) = \frac{1}{2(q_E + q_S)} \left\{ \left( \sum_{j=1}^{q_E} F_R([{}^R\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_E) + \sum_{j=1}^{q_S} F_B([{}^R\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_S) \right) + \left( \sum_{j=1}^{q_E} F_R([{}^L\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_E) + \sum_{j=1}^{q_S} F_B([{}^L\mathbf{r}_j^i(W\phi_k^i)]_S) \right) \right\}$$

$$= F_{RB,R}(W\phi_k^i) + F_{RB,L}(W\phi_k^i) \quad (11)$$

と定義する。 $F_{RB,R}(W\phi_k^i)$  は右カメラの  $i$  番目の遺伝子で定義される位置・姿勢を持つモデルと実際の対象物の重なり具合を表す適合度であり、 $F_{RB,L}(W\phi_k^i)$  は左カメラのそれである。

赤端面青側面対象物に対して  $F_{RB}(W\phi_k^i)$  を用いて評価するとき、モデルと対象物が重なり合っている場合  $F_{RB}(W\phi_k^i)$  は高い値を取り得るが、赤端面青側面対象物以外の対象物に対しては低い値となるため、近接する対象物のご認識を防ぐことができる。

$F_{RB}(W\phi_k^i)$  は3次元形状と形状に付随する色を規定して評価しているため、カメラ画像に射影した時の左右カメラ画像の「対応点の同一性」はあらかじめ担保されており、同一性が満たされない場合に生じる誤差は発生しない。

Table 1 Parameters of genetic algorithm.

Population size	20 individuals
Selection rate	0.4
Mutation rate	0.3
Length of individual	12 bits
Crossover	Two-point
Elitist model	yes
Calculation time	1.7[ms]/generation

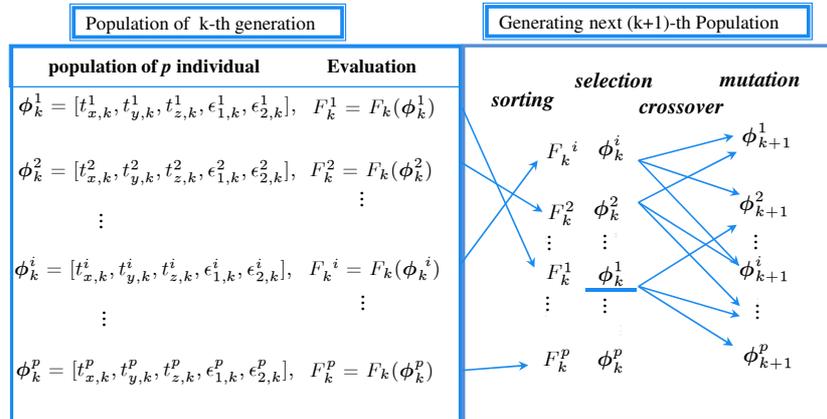


Fig. 7 Evolution Process of Genetic Algorithm.

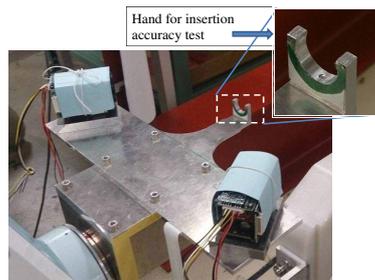


Fig. 8 Robot Hand and its attachment for accuracy measurement to interdigitate the hand into rod of filter press cloth.

#### 4.4 GA を用いた最適解探索

図 6 に GA によって複数の遺伝子で与えられるモデル群が 3 次元空間内で対象物に収束していく過程を示す。まず図左上の 1st generation で  $W\phi_1^i$  をランダムに与えることで GA 遺伝子の初期個体を 3 次元探索エリア内に配置する。各個体の適合度をすべて計算し、図 7 の Evaluation の縦列に示す。適合度関数値の高い順にそれぞれの遺伝子をソートしたものを selection の縦列に並べている。Table 1 に示しているように、selection rate は 0.4 と定めているので上位 4 割の遺伝子を残して他を消去する。その他の GA のパラメータを Table 1 に示している。その後交配、突然変異を経て次世代の遺伝子群を再構成する。1 世代あたりの計算時間は表にあるように 1.7[ms] である。進化するにつれて適合度関数値が上昇し図 6 の i-th generation ではある程度対象物付近にモデル群が集まる。Final generation では、ほぼ収束し  $F(W\phi_k^i)$  の最大値を与える  $W\phi_k^i$  は、対象物の位置・姿勢を示していると考えられる (Back, 1996), (Goldberg, 1989)。

### 5. 実験方法

#### 5.1 嵌合実験系

ロボットハンドとろ布芯棒嵌合精度実験を行うため、図 8 に示す半円状の嵌合ハンドを製作した。ロボットの第 7 リンクの座標系  $\Sigma_7$ , ハンド座標系  $\Sigma_H$ , 手先効果器座標系  $\Sigma_E$ , ろ布芯棒座標系  $\Sigma_M$ , また嵌合穴の寸法を図 9 に示す。カメラの配置は図に示すように一辺 240[mm] の正三角形状にカメラ視線方向をセットし、視線交点付近で対象物の

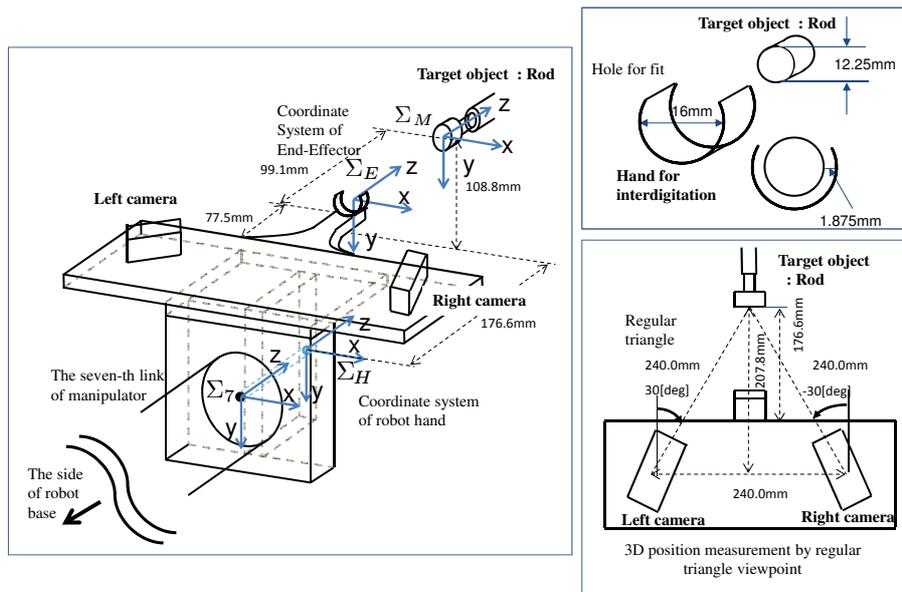


Fig. 9 Experimental system composed of dual cameras located to construct equilateral triangle and dimension of robot hand and rod.

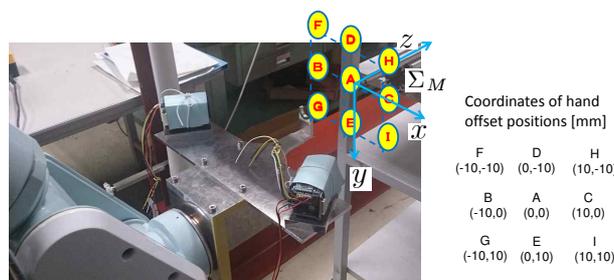


Fig. 10 Positions of rod with initial offset given as simulated deviations of rods that occur by deformations of high pressure to dehydrate water-mingled soil for decontamination. Hand positions from which the hand-eye system detects the positions of rod are given from A to I. After observing the relative position errors from A to I, the accuracy of interdigitation has been measured by micrometer caliper.

ろ布芯棒を撮像させる。ハンド先端に設置したカメラ取付け台座部は、カメラ光軸交点の微調整のため  $\Sigma_E$  の  $y$  軸方向のカメラの回転に関して自由度を持たせて、ねじで固定した。左右カメラは同一の部材の平面に取り付けたため、視線方向が空間的にねじれて交点がない状態は起こらない。嵌合穴の直径は 16.0[mm]、芯棒直径は 12.25[mm] であるため、嵌合穴と芯金とのクリアランスは半径方向に 1.875[mm] である。

FP 装置のろ布取り外し作業の自動化を行うためには、図 8 に示す半円形状の手先嵌合穴にろ布芯棒を挿入した後、ろ布取り付け治具から芯棒をの取り外さなければならない。本報で取り扱う FP は、ろ布が走行して圧縮土壌を自動的に完全に剥離させて下に落とし、ベルトコンベアで搬出することができる。この可動機構と圧縮によるろ板変形のため、ろ布芯棒は予定された位置から図 9 の  $\Sigma_E$  の  $x, y$  方向にズレて停止することが予想されるが、各方向に 10[mm] 以内に停止させることができることが保障されている。実験に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 製のカメラ「FCB-IX11A」を用いた。

## 5.2 精度実験手順

左右カメラ画像からろ布芯棒の 3 次元位置を計測し、計測結果に基づいてロボットハンドを移動させて、ろ布芯棒と円筒形ハンドとの相対的位置制御精度を測定する。カメラ画像を用いた GA の認識結果に基づくハンド移動の精度を検証するため、認識を行った後にハンドを移動させて精度を測定した。図 9 は、ろ布芯棒の正面に嵌合ハンドが位置している相対的位置関係を示しており、 $\Sigma_E$  の  $z$ -軸方向に 99.1[mm] の位置にろ布芯棒がある。

$\Sigma_E$  で記述されたろ布芯棒の  $x, y$  座標の位置を図 10 の A~I に示す。それぞれの位置の  $\Sigma_E$  で表した座標は、A:(0,

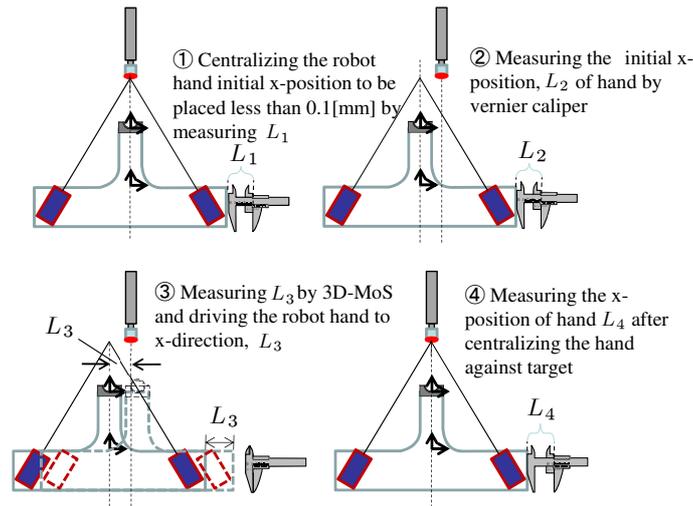


Fig. 11 Measurement procedure of control error when robot hand being placed at “B” point in Fig.10

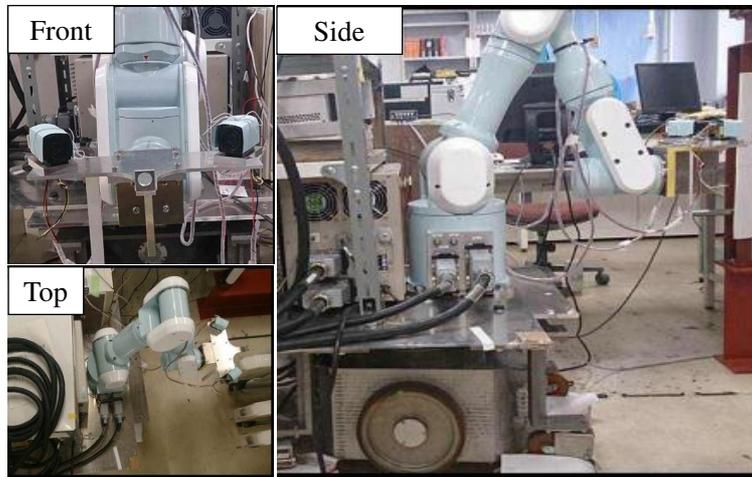


Fig. 12 Photographs of PA10 used for interdigitation experiments.

0), B:(-10, 0), C:(10, 0), D:(0,-10), E:(0, 10), F:(-10,-10), G:(-10, 10), H:(10,-10), I:(10, 10)[mm] である.  $\Sigma_E$  の z-軸方向, つまり 芯棒端面の奥行方向位置は常に同じであり, 99.1[mm] である.

$\Sigma_E$  の x 軸方向にハンドの位置のオフセットを与えてろ布芯棒の 3 次元位置を測定し, 測定値に基づいてハンド位置を移動させるビジュアルサーボ実験の手順を図 11 に示す. 図 11 の左上では, (1) ロボットのハンド位置をろ布芯棒正面に移動させる. 布芯棒正面に位置していることの確認は, ロボットハンドを  $\Sigma_E$  の z 軸方向に前進させてハンドとろ布芯棒を嵌合させてろ布芯棒の中心にハンドが位置していることを確認した後に, ハンドを  $\Sigma_E$  の z 軸方向の逆方向に移動させることで正面位置を決定した. 次に, (2)  $\Sigma_E$  を基準にロボットの手先座標系に基づく移動命令で A~I の位置に移動させて  $L_2$  をノギスで測定する. ノギスは万力で 3 次元位置に固定し, ロボットハンドの停止位置を測定する. (3) ろ布芯棒の 3 次元位置を測定する. 最後に, (4) 計測結果に基づいてハンドをろ布芯棒正面に移動させて,  $L_4$  を測定する. ろ布芯棒の 3 次元位置測定とその結果に基づくロボットの位置制御精度は,  $L_4 - L_2$  で算出される. 図 11 は x 方向のみの測定方法を示しているが, y, z 方向も同様な方法で測定した. なおろ布芯棒の姿勢変化は, ろ布芯棒の嵌合に影響を与えない 0.01[rad] 程度であるためここでは位置のみの精度実験とした.

位置精度実験で, x, y, z 方向のノギスによる精度測定を同時に行うことはできない. したがって実験を A~I のそれぞれに 10 回ずつ行ったため, x 方向について  $10 \times 9 = 90$  回実験を行い, y, z 方向を含めると合計 270 回測定した.

GA の終了条件は, 赤端面青側面モデルの場合, (1)  $\max_{i \in p} F_{RB,R}(W\phi_k^i) > 0.6$  かつ  $\max_{i \in p} F_{RB,L}(W\phi_k^i) > 0.6$  (左右の最大適合度関数値がいずれも 0.6 以上であること, つまり左右両カメラともろ布芯棒をバランスよく認識していること), かつ  $\max_{i \in p} F_{RB}(W\phi_k^i) - \max_{i \in p} F_{RB}^i(W\phi_{k-100}^i) < 0.005$  (GA の進化が 100 世代進まず停滞していること) である.

**A**

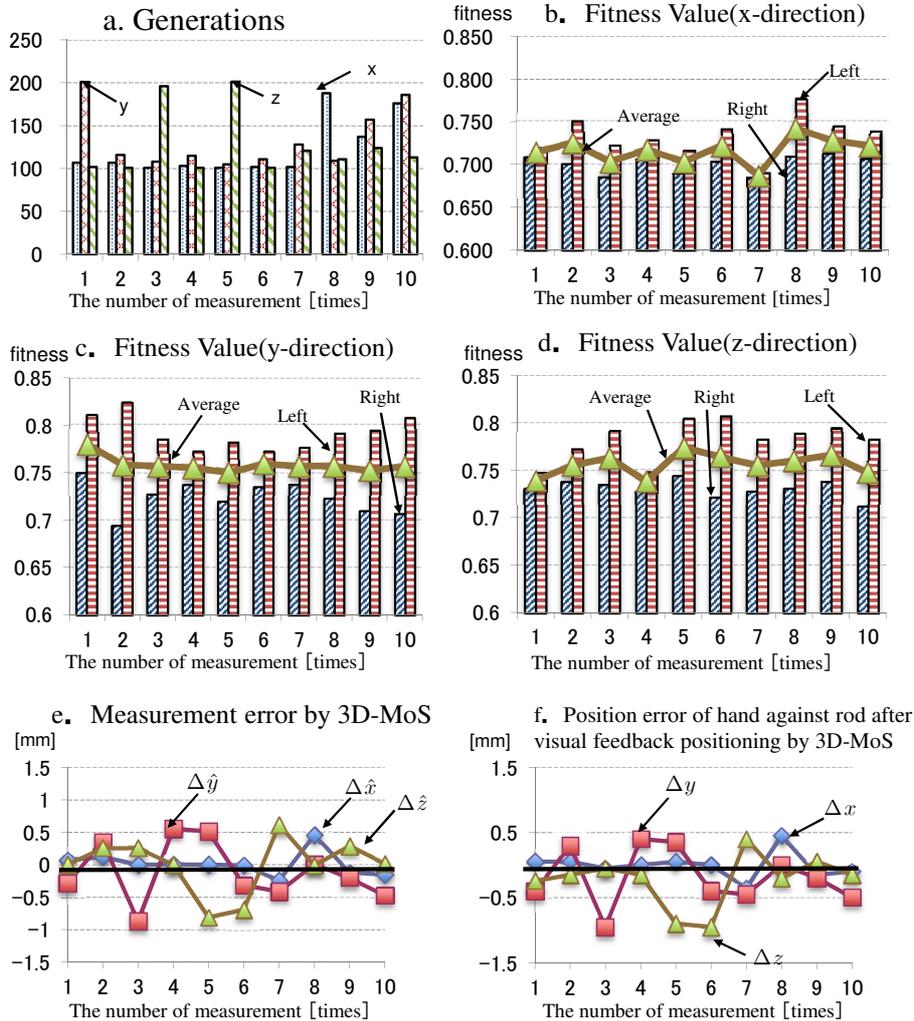
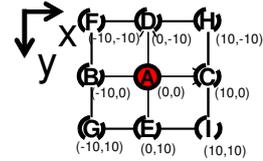


Fig. 13 Digeneis process and accuracy of the object recognition by GA; Circular rod position defined at the position A,  $(x,y)=(0,0)$ [mm].

図 12 に実験に用いたハンドアイロボットを示す。左上の写真はハンド前方からの写真であり、カメラ視線が交差するように取り付けられていることが分かる。左下は上方からの写真、右は側面の写真である。

## 6. 実験結果

以下では複眼カメラ視点交点に対するろ布芯棒の相対的位置を図 10 の A~I と設定した時の 3 次元位置の計測精度を測定し、自動除染 FP 装置からの要求仕様である嵌合クリアランス ( $x,y$  方向  $\pm 1.875$ [mm] 以下,  $z$  方向 3[mm] 以下) を確率 99.8 % で満足するか否かについて確認実験を行う。

図 10 に示した A~I の各点の中で, A, B, C, D の点における精度実験結果を図 13-16 に示す。各図において, “a.” は GA が収束するまでに要した世代数 (200 世代で 0.34 秒), “b.”~“d.” はそれぞれ  $x,y,z$  の左右カメラ画像の適合度およびそれらの平均値, “e.” は 10 回の試行それぞれの GA による認識位置と真値との誤差  $\Delta\hat{x}, \Delta\hat{y}, \Delta\hat{z}$  である。 “f.” に示す  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  は “e.” による計測終了後, 計測値を目標値としてロボットハンドを移動させた際に発生したろ布芯棒の位置誤差 (図 11 では  $L_1 - L_4$  によって算出される) である。

図 13 を見ると, “a.” では X 方向における 10 回までの繰返しにおいて収束までの進化に要した世代交代数は  $x,y,z$

各方向で約 200 世代までにはほぼ収束飽和し, 200 世代の進化に要する時間は 0.34 秒程度であった. さらに GA の進化終了後の左右カメラによる適合度は両者とも 0.70 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 程度の値となった. これらの傾向は y および z 方向の精度実験においても観察されたが, y および z 方向の精度実験での平均的適合度は 0.75 程度の値となった. また, “e.”の認識誤差および“f.”の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, 繰返し数の増加にとともないこれらの誤差は徐々に修正されていくことがわかった. “e.”の誤差範囲と“f.”の誤差範囲が同程度であることから, ロボットの移動に伴う誤差は小さく, GA による認識誤差が支配的であることが分かる. 以上の測定の後ロボットハンドを  $\Sigma_E$  の z 軸方向に前進させて嵌合実験を行った結果, x,y,z 方向それぞれ 10 回のすべての場合について嵌合に成功した.

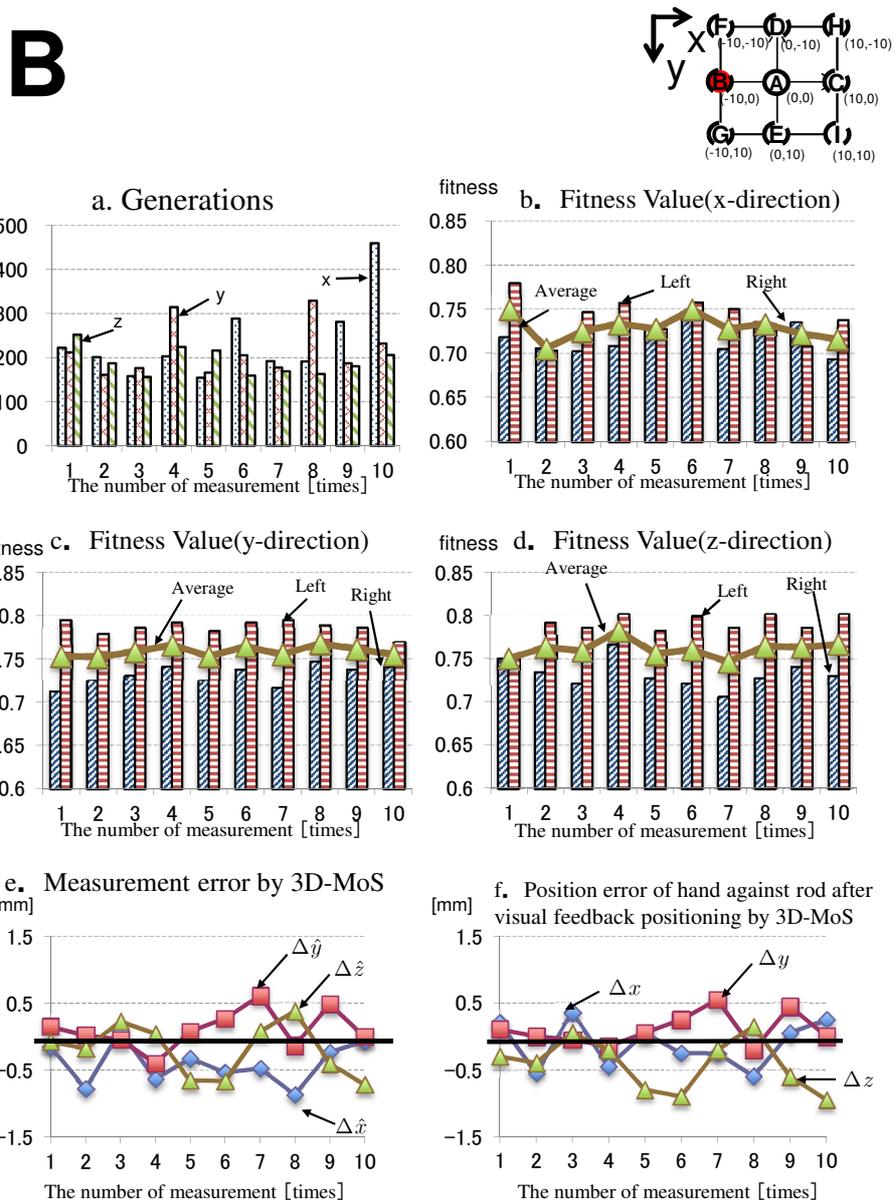


Fig. 14 Digeneis process and accuracy of the object recognition by GA; Circular rod position defined at the position B,  $(x,y)=(-10,0)[\text{mm}]$ .

図 10 の B 点における結果を図 14 に示す. 世代交代数は 300 世代を超えている場合もあり, A 点の場合より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, 図 13 と同様に  $\pm 1[\text{mm}]$  以内に収

C

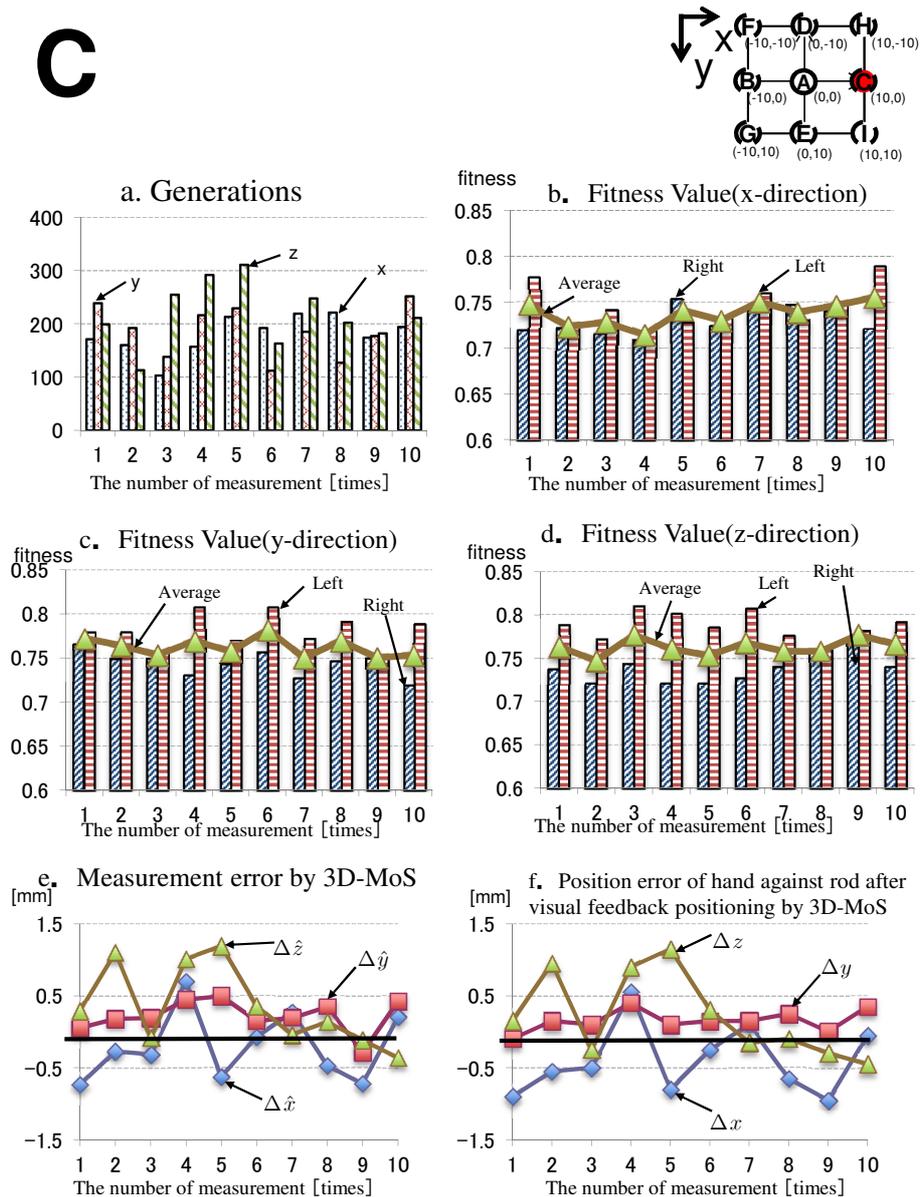


Fig. 15 Digensis process and accuracy of the object recognition by GA; Circular rod position defined at the position C,  $(x,y)=(10,0)$ [mm].

Table 2 Error and its S.D.detected by 3D-MoS Dual-Hand-eye image recognition.

Position	Average[mm]			Standard deviation[mm]		
	$\Delta \hat{x}$	$\Delta \hat{y}$	$\Delta \hat{z}$	$\sigma_{\hat{x}}$	$\sigma_{\hat{y}}$	$\sigma_{\hat{z}}$
A(0,0)	0	-0.1	0	0.2	0.45	0.4
B(-10,0)	-0.4	0.1	-0.2	0.3	0.3	0.35
C(10,0)	-0.2	0.2	0.35	0.45	0.2	0.55
D(0,-10)	0	0.45	-0.35	0.3	0.45	0.3
E(0,10)	-0.15	-0.15	-0.2	0.3	0.2	0.35
F(-10,-10)	-0.25	0.35	-0.2	0.2	0.5	0.4
G(-10,10)	-0.5	-0.2	-0.25	0.35	0.2	0.3
H(10,-10)	0.15	0.4	0.05	0.4	0.35	0.55
I(10,10)	0.1	0	0.05	0.35	0.3	0.4

まっている. 図 15 に示す C 点の結果は, 世代交代数は A 点とほぼ同様ではあるが, GA の進化終了後の適合度においては A 点と比較して特に x 方向においてやや改善されている. 誤差については, x および z 方向で繰返し初期に

D

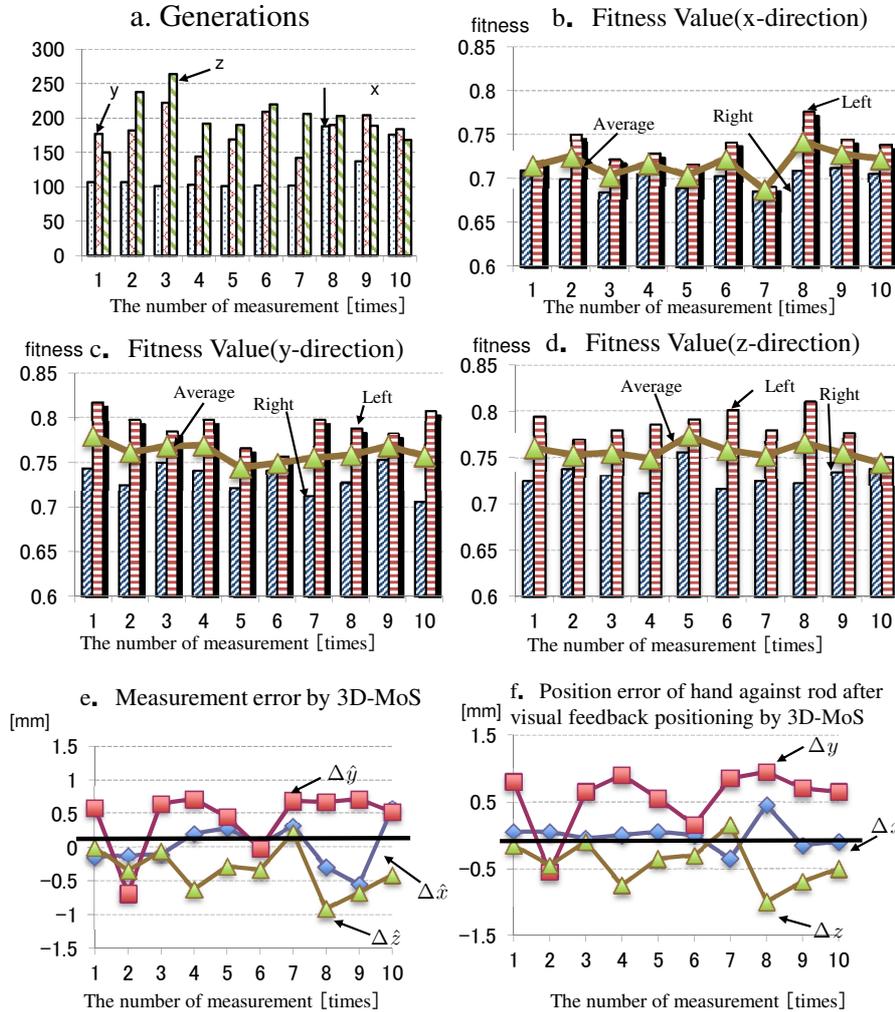
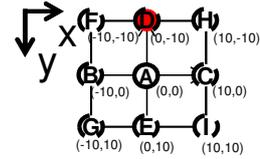


Fig. 16 Digeneis process and accuracy of the object recognition by GA; Circular rod position defined at the position D,  $(x,y)=(0,-10)$ [mm].

Table 3 Error and its S.D. after centralizing the robot's interdigitation hand against the filter press rod.

Position	Average[mm]			Standard deviation[mm]		
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
A(0,0)	0	-0.2	-0.25	0.2	0.4	0.4
B(-10,0)	-0.1	0.1	-0.4	0.35	0.25	0.35
C(10,0)	-0.4	0.15	0.2	0.45	0.15	0.55
D(0,-10)	0.05	0.55	-0.4	0.25	0.45	0.3
E(0,10)	0.05	-0.25	-0.25	0.25	0.25	0.35
F(-10,-10)	0	0.4	-0.35	0.2	0.5	0.4
G(-10,10)	-0.15	-0.3	-0.3	0.35	0.2	0.35
H(10,-10)	-0.05	0.55	0.05	0.35	0.35	0.55
I(10,10)	-0.15	0	-0.15	0.35	0.35	0.4

において最大誤差が生じており、繰返し数とともに z 方向は改善されるものの、x 方向における改善傾向は見られなかった。図 16 に示す結果は、中央上段 D 点のデータである。収束までの進化に要した世代交代数はほぼ 250 世代以下であったが適合度、特に x 方向で改善が見られた。しかしながら、誤差については x 方向では小さいものの、y お

よび z 方向において 1[mm] 程度の誤差が繰返しによる改善のないまま生じている。また精度測定後の嵌合実験では、B~I も A 同様にすべての嵌合試行に成功した。E~I の各点での精度測定を行ったが、紙面の都合で図の表記を省略し次に述べる平均誤差、標準偏差で評価することにする。

図 9 の実験系で示すように芯棒の半径は 6.125[mm] で穴の半径は 8.0[mm] であるため、半径方向に 1.875[mm] のクリアランスがある。そのため、この嵌合対象に対して 1.875[mm] 以下の制御精度で嵌合精度を保証しなければならない。そこでここでは提案した計測手法による認識精度の評価を行った。表 2 には設定位置 A-I 点における GA による認識位置 (図 11 で  $L_2$  で与えられる位置を GA を用いて計測したときの測定値) と真値との誤差の平均値  $\Delta_{\hat{x}}, \Delta_{\hat{y}}, \Delta_{\hat{z}}$  とその標準偏差  $\sigma_{\hat{x}}, \sigma_{\hat{y}}, \sigma_{\hat{z}}$  を示す。また表 3 には図 11 で示す  $L_1-L_4$  で求められる嵌合位置でのハンドの位置誤差の平均値  $\Delta_{\underline{x}}, \Delta_{\underline{y}}, \Delta_{\underline{z}}$  とその標準偏差  $\sigma_{\underline{x}}, \sigma_{\underline{y}}, \sigma_{\underline{z}}$  をそれぞれ示す。

これによると表 2 の GA の認識位置と真値との誤差が大きく生じた設定点は、左横 B 点の x 方向および中央上段 D 点における y および z 方向ならびに左下段 G 点の x 方向であった。 $\Delta_{\hat{x}}, \Delta_{\hat{y}}, \Delta_{\hat{z}}$  の最大値は、それぞれ -0.5, 0.45, -0.35[mm] であり、 $\sigma_{\hat{x}}, \sigma_{\hat{y}}, \sigma_{\hat{z}}$  の最大値は、0.45, 0.45, 0.55[mm] であった。

これに対して表 3 に示す手先座標における真値との誤差は右横 C 点の x 方向、中央上段 D 点の y 方向、中央下段 E 点の z 方向ならびに右上段 H 点 y 方向でそれぞれ観察され、 $\Delta_{\underline{x}}, \Delta_{\underline{y}}, \Delta_{\underline{z}}$  の最大値は、それぞれ -0.5, 0.55, -0.35[mm] であり、 $\sigma_{\underline{x}}, \sigma_{\underline{y}}, \sigma_{\underline{z}}$  の最大値は、0.45, 0.45, 0.55[mm] であった。

以上の結果から、GA による認識位置と真値との誤差の平均値  $\Delta_{\hat{x}}, \Delta_{\hat{y}}$  について表 2 の結果から、A-I どの点においても 1.875mm のクリアランスを下回っていること、ならびに表 3 より手先座標における真値との誤差の平均値  $\Delta_{\underline{x}}, \Delta_{\underline{y}}$  も A-I のどの点においても 1.875[mm] のクリアランスを下回っていることが結論される。

また、計測の結果に基づいたハンドの嵌合位置への位置決め精度について考えると、A~I のすべての計測点において  $\Delta_{\underline{k}} \pm 3\sigma_{\underline{k}}$  ( $k=x, y$ ) は x, y 方向のクリアランス  $\pm 1.875$  以下であり、z 方向の  $\Delta_{\underline{z}} \pm 3\sigma_{\underline{z}}$  は嵌合深さのクリアランスの 3[mm] 以下である。以上から、本実験においては 99.8% の確率で芯棒挿入が成功すると結論することができる。

## 7. 結 言

工学技術において「嵌合」とは形状合成や多機能化において最も基本的で代表的な枢要技術であり、宇宙・航空工学、原子力工学、建築工学、土木工業などあらゆる分野に精通するにおいて共通した一種の加工技術である。従来、嵌合技術は人間の手による高精度加工技術として発展してきたが、近年新たに放射線や水中など極限環境下における嵌合技術が注目されている。例えば、2011 年に生じた福島第 1 原発事故後の放射能汚染土壌処理において著者らが提案している解砕洗浄再生処理システムにおける濃縮・減容化工程で使用する FP 装置操作時の作業員被ばく低減化対策として同実用機の完全自動化を図るため、本報では“3D-MoS”と名付けた 3 次元形状対象物の認識とともに作用対象の色と形状などの属性情報も考慮した位置・姿勢計測方法を提案した。

本報では FP 装置のろ布芯棒をモデルケースとして、ろ布芯棒とロボットハンドの嵌合制御を実施し、達成可能な嵌合精度の技術的検証を行った。ろ布交換用芯棒嵌合部を嵌合部中心軸に対向する平面範囲 20mm × 20mm 四方以内に設定した合計 9 箇所任意に設置した芯棒の嵌合位置へのビジュアルフィードバック制御実験を行った結果、(1) すべての設置点においてロボットの嵌合ハンドはろ布芯棒と嵌合可能な位置に制御され、その後実際に嵌合を行った結果ロボット先端の嵌合部との嵌合実験に成功した。(2) 芯棒嵌合部とロボットに取り付けた嵌合部とのクリアランスが 1.875mm であった嵌合実験に対して、提案手法による x, y, z 軸全方向における制御精度を標準偏差 0.6mm 以内に制御できることがわかった。

## 謝 辞

本研究の一部は「環境省平成 26 年度除染技術実証事業」および「平成 26 年度株式会社石垣-岡山大学との共同研究」によるものであることを記し、謝意を表す。

## 文 献

栗井真志, 清水隆史, 山下淳, 金子透, 単眼カメラとレーザレンジファインダ搭載移動ロボットによる人物追跡と自律帰還, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (2011), 2A1-H10.  
Back, T., Evolutionary algorithms in theory and practice (1996), OXFORD UNIVERSITY PRESS.

- De Luca, A., Oriolo, G. and Giordano, P. R., On-line estimation of feature depth for image-based visual servoing schemes, Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007) (2007), pp.2823-2828.
- Goldberg, D. E., Genetic algorithms in search, optimization and machine learning (1989), Addison-Wesley.
- 橋本浩一, 木村英紀, ビジュアルサーボイング-非線形オブザーバアプローチ-, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.7 (1995), pp.986-993.
- Hutchinson, S., Hager, G. D. and Corke, P. I., A tutorial on visual servo control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.12, Issue 5 (1996), pp.651-670.
- 石川正俊, センサフュージョンシステム-感覚情報の統合メカニズム-, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.3 (1988), pp.251-255.
- 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 (1), 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.
- 石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 界面化学的分散制御高せん断解砕洗浄による放射能汚染土壌洗浄 (福島県における汚染土壌洗浄処理フィールド試験 (第1報)), 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.802 (2013a), pp.1106-1121.
- 石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 比氣明典, 高放射能汚染土壌の界面化学的分散制御高せん断流解砕洗浄による再生化, 化学工学論文集, Vol.39, No.6 (2013b), pp.545-552.
- 石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 比氣明典, イオンコーティング技術による高放射線汚染土壌洗浄装置の汚染防止効果, 化学工学論文集, Vol.39, No.3 (2013c), pp.405-410.
- 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, Vol.79, No.799 (2013), pp.718-725.
- 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳, コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望 (1998), 新技術コミュニケーションズ.
- Minami, M., Agbanhan, J. and Asakura, T., Robust scene recognition using a GA and real-world raw-image, Measurement, Vol.29, Issue 4 (2001), pp.249-267.
- 中原智治, 顧海松, 荒木秀和, 藤井裕之, 廣田雅之, 3次元認識によるビンピッキングシステムの実用化, システム制御情報学会論文誌, Vol.14, No.4 (2001), pp.226-232.
- 小野桂太郎, 小川卓哉, 前田雄介, 中谷茂樹, 永安剛, 清水領, 大内規嵩, ステレオビジョンを用いた巻ばねの認識とビンピッキング, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.804 (2013), pp.2769-2779.
- 佐藤芳紀, 神酒勤, 岡本茂樹, 藤井祥平, 移動ロボットに実装したレーザレンジファインダと単眼カメラによる物体検出・追跡, 電子情報通信学会, 信学技法, PRMU2011-137 (2011), pp.71-76.
- 宋薇, 見浪護, 青柳誠司, クォータニオンを用いたフィードフォワードオンラインポーズ遺伝的認識法, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.1 (2010), pp.55-64.
- 宋薇, 見浪護, フィードフォワード遺伝的認識法を用いた 3-D ビジュアルサーボ, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5 (2010), pp.591-598.
- Suzuki, H. and Minami, M., Visual servoing to catch fish using global/local GA search, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.10, Issue 3 (2005), pp.352-357.
- 高橋昭彦, 石川正俊, 物理ネットワークによる内部表現を用いたセンサフュージョンシステム, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.7 (1990), pp.803-810.
- 徐剛, 辻三郎, 3次元ビジョン (2005), 共立出版.
- Yu, F., Minami, M., Song, W., Zhu, J. and Yanou, A., On-line head pose estimation with binocular hand-eye robot based on evolutionary model-based matching, Journal of Computer and Information Technology, Vol.2, No.1 (2012), pp.43-54.

## References

- Awai, M., Shimizu, T., Yamashita, A. and Kaneko, T., Person following and autonomous returning by mobile robot equipped with monocular camera and laser range finder, Proceedings of the 2011 JSME Conference on Robotics and Mechatronics (2011), 2A1-H10 (in Japanese).

- Back, T., *Evolutionary algorithms in theory and practice* (1996), OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- De Luca, A., Oriolo, G. and Giordano, P. R., On-line estimation of feature depth for image-based visual servoing schemes, *Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2007)* (2007), pp.2823-2828.
- Goldberg, D. E., *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning* (1989), Addison-Wesley.
- Hashimoto, K. and Kimura, H., Visual servoing -nonlinear observer approach-, *Journal of the Robot Society of Japan*, Vol.13, No.7 (1995), pp.986-993 (in Japanese).
- Hutchinson, S., Hager, G. D. and Corke, P. I., A tutorial on visual servo control, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.12, Issue 5 (1996), pp.651-670.
- Ishikawa, M., Sensor fusion system -mechanism for integration of sensory information, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.6, No.3 (1988), pp.251-255 (in Japanese).
- Ishiyama, S., (Serial)Current sensing/manipulation coalesced technology 1, investigation of actual condition of contaminated soil in regulation pond conducted by underwater radiation measuring instrument installed in remotely-operated vehicle, *Inspection engineering(NIHON KOGYO SHUPAN)*, Vol.19, No.3 (2014), pp.46-53 (in Japanese).
- Ishiyama, S., Kamitani, M. and Kondo, M., New combination washing approach of chemical interface controlled dispersion and high-speed shearing washing techniques for radioactive contaminated soil (first report of field test in Fukushima), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.79, No.802 (2013a), pp.1106-1121 (in Japanese).
- Ishiyama, S., Kamitani, M., Kondo, M. and Hiki, N., Reclamation of highly radioactive contaminated soil by a combination of chemical interface controlled dispersion and high-speed shearing washing, *Journal of the Society of Chemical Engineers, Japan*, Vol.39, No.6 (2013b), pp.545-552 (in Japanese).
- Ishiyama, S., Kamitani, M., Kondo, M. and Hiki, N., Decontamination of soil washing machines in high level radioactive contaminated soil processing by ceramic thin coating with ion plating technique, *Journal of the Society of Chemical Engineers, Japan*, Vol.39, No.3 (2013c), pp.405-410 (in Japanese).
- Ishiyama, S. and Yamaguchi, K., Investigation of actual condition of contaminated soil in regulation pond conducted by underwater radiation measuring instrument installed in remotely-operated vehicle (second field test in Fukushima), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.79, No.799 (2013), pp.718-725 (in Japanese).
- Matsuyama, T., Kuno, Y. and Imiya, A., *Computer vision:technical review and future view* (1998), *New Technology Communications* (in Japanese).
- Minami, M., Agbanhan, J. and Asakura, T., Robust scene recognition using a GA and real-world raw-image, *Measurement*, Vol.29, Issue 4 (2001), pp.249-267.
- Nakahara, T., Gu, H., Araki, H., Fujii, H. and Hirota, M., A practical bin-picking system using 3D object recognition, *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, Vol.14, No.4 (2001), pp.226-232 (in Japanese).
- Ono, K., Ogawa, T., Maeda, Y., Nakatani, S., Nagayasu, G., Shimizu, R. and Ouchi, N., Recognition and bin-picking of coil springs by stereo vision, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.79, No.804 (2013), pp.2769-2779 (in Japanese).
- Sato, Y., Miki, T., Okamoto, S. and Fujii, S., Object detection and tracking by using single laser range finder and monocular camera mounted on an autonomous mobile robot, *Technical report of IEICE. PRMU2011-137* (2011), pp.71-76 (in Japanese).
- Song, W., Minami, M. and Aoyagi, S., Feedforward on-line pose evolutionary recognition based on quaternion, *Journal of the Robot Society of Japan*, Vol.28, No.1 (2010), pp.55-64 (in Japanese).
- Song, W. and Minami, M., 3-D visual servoing using feedforward evolutionary recognition, *Journal of the Robot Society of Japan*, Vol.28, No.5 (2010), pp.591-598 (in Japanese).
- Suzuki, H. and Minami, M., Visual servoing to catch fish using global/local GA search, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.10, Issue 3 (2005), pp.352-357.

- Takahashi, A. and Ishikawa, M., A sensor fusion system using physical network as internal models, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol.26, No.7 (1990), pp.803-810 (in Japanese).
- Xu, G. and Tsuji, S., Three-dimensional vision (2005), Kyoritsu Shuppan (in Japanese).
- Yu, F., Minami, M., Song, W., Zhu, J. and Yanou, A., On-line head pose estimation with binocular hand-eye robot based on evolutionary model-based matching, Journal of Computer and Information Technology, Vol.2, No.1 (2012), pp.43-54.