

解説：特集

コンピューターショナル・インテリジェンスのこれまでとこれから
—SICEにおけるコンピューターショナル・インテリジェンスとは—

ロボティクスの中のコンピューターショナル インテリジェンス—環境適応型ビジュアルサーボロボット—

見 浪 護*・矢 納 陽**・石 山 新 太 郎***・松 野 隆 幸**

* ** 岡山大学大学院自然科学研究科 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1

*** (独) 日本原子力研究開発機構 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

* ** Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama, Japan

*** Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakatashirone, Tokai-mura, Naka-
gun, Ibaraki, Japan

* E-mail: minami-m@cc.okayama-u.ac.jp

キーワード: ビジュアルサーボ (visual servoing), 画像認識 (image recognition), 遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm), 3D-MoS (three dimensional move on sensing).

JL 0008/15/5408-0001 ©2015 SICE

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。中間貯蔵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は今後の大きな課題となる。また除染土壌の集積/搬送は被爆リスクを伴うものであり、できれば作業員による手作業を避けたいところではあるが、これを代替できる機能をもつ移動作業型ロボットは実現されていない状況である。

工場内で稼働するロボットはあらかじめ設計された既知環境下では目的の作業を行うことができる。このようなロボットはその形や大きさ、腕の長さ、ハンドの形状、作業対象物を認識するロボットのセンサーとその設置方法、さらにロボットの動作プログラムなどによってロボット周辺の既知環境モデルに整合するように設計されている。このため想定される正常動作とそれ以外の異常状態を区別することができ、これがロボットを用いた製造ラインの品質管理面で役に立っている側面がある。

しかし、このような固定環境を想定したロボットは動的に変化する環境では目的とする作業を達成できないことが多い^{1), 2)}。福島第一原子力発電所の事故に対応して用いられたロボットは自律型ではなく操作者へビデオ画像をフィードバックする遠隔操縦型ロボット³⁾であった。

2. 動的環境に適応するロボット

ロボットを移動型と固定型に分けて考えるとその作業範囲が広いという意味で移動型の方が固定型に対して有用なロボットであると考えられる。移動機能は屋外作業用ロボットには不可欠であり、移動の結果ロボットは想定していない状況すなわち未知環境下で作業を行う能力を求められる。その結果、工場内の既知環境下で動作している既存のロボットは屋外の未知環境の中で適切に動作することができない。未知環境に適応できるロボット

は、生物のように高いレベルの自律性とさまざまな環境に適応できる能力を求められる。そのようなロボットの動作計画や自律性はロボットの知能とも関連する課題であり、重点領域研究「知能ロボット」(1995~1997)⁴⁾が実施された。

しかし適応的行動型ロボットを構成する方法論は今だ確立されていない状況である。未知環境下では、まずロボットによる周辺環境の自律的な認識が重要であり、3次元画像認識などのセンシング技術と移動・誘導技術との融合が望まれる。

画像認識に基づくロボットの制御は、未知環境で動作するロボットにつながる研究分野として注目されている。ビジュアルフィードバックに基づく制御はビジュアルサーボ(以下VS)と呼ばれており、20年以上前から研究されている。画像から対象物の位置/姿勢を求めてロボットを制御する位置ベース法と位置/姿勢を求めることなく画像内の対象物上の特徴点の位置とロボットが望まれる位置/姿勢にある時に撮像される特徴点の位置との差のみを用いて制御する特徴ベース法がある⁴⁾⁻⁶⁾。さらにズーム機構と画像ヤコビ行列⁷⁾を用いてサーボ誤差を減少させる制御法⁸⁾や予見制御に基づく軌道追従制御法⁹⁾が提案されている。特徴ベース法も位置ベース法も、何らかの特徴量や特徴点の位置などの先見情報を必要としているため、未知環境を前提にしている方法論ではない。しかし対象物の位置/姿勢が未知な場合でも適応的に作業をすることができるためロボットの適用範囲を広げることができる。

VSの研究はサーボ性能そのものに重点が置かれ、サーボ性能が得られた後のつぎの作業を想定した研究は多くないように思われる。サーボタスクの完了後に把持などの作業を行う場合には、対象物の形状の定義が既知である必要がある。著者らは、対象物形状や属性をサーボ後の作業に用いるのであれば、VSでも対象物形状や属性を用いた方が効率が良いのではないかと考え、対象物の3次元形状や色などの属性を規定したモデルを用いてVSを行う位置ベース法を「3次元位置/姿勢情報に基づく動作(3D Move on Sensing, 3D-MoS)」と呼んで研究を進

めてきた¹⁰⁾。この中で、眼球視線方向制御とロボットハンドの二重 VS 制御系を構成することで、対象物をカメラ画像の中央付近で撮像できることからレンズ収差の影響を受けにくいなどのメリットがあるハンドアイ両眼転導 VS¹¹⁾ を 3 章で紹介する。

柳¹²⁾ は多機能な大型 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) よりも単機能であるが、多数の AUV ロボットを作業に応じて結合パターンを変更し多様な機能を実現する自己組織化¹³⁾⁻¹⁵⁾ が有効であると指摘している。水中ロボットの VS 制御技術による AUV 側凸部と海底設備との嵌合は、海底充電ステーションを想定した充電端子との接続技術である¹⁶⁾。また嵌合は福田らが提案した結合による自己組織化群ロボット¹⁷⁾ の AUV 群ロボットへの応用に向けた課題でもあり、4 章で紹介する。

最後に福島第一原発の事故後の問題である土壌除染のためのロボット制御技術に 3D-MoS を応用した事例を紹介する。また VS で魚を捕獲するハンドアイロボットシステムを構築し、魚が回避行動のアイデアを創出する学習速度を計測することで間接的に魚の知能を評価した。その学習速度を減少させるカオス捕獲について紹介する。

3. 両眼転導ハンドアイビジュアルサーボ

3.1 1-step GA に基づく実時間認識法

対象物の位置/姿勢をリアルタイムで認識するために、本研究では遺伝的アルゴリズム (GA) を動画認識に用いた “1-step GA 法”^{18), 19)} を利用する。この方法はビデオレート (33 [ms]) ごとの画像入力が、33 [ms] 以下 (数ミリ秒で完了する画像入力ボードもある) で行われることを利用し、画像入力待ちの時間だけ GA の進化を進め、その時点で最も高い適合度を与える個体をその時刻における位置/姿勢として出力する方法である。この方法は GA のモデルベースマッチングによる最適化の収束速度が、対象物の運動速度以上に速い場合に対象物をリアルタイムに認識することができ、ビジュアルフィードバックの画像認識結果として利用できる。ハンドアイカメラの速度によって影響を受ける画像内の対象物の撮像位置を補償する認識法²⁰⁾ を用いているため、ハンドアイの運動に影響されない動画認識と安定なビジュアルサーボが実現できる²¹⁾。

3.2 両眼転導システム

両眼転導システムとは画像の中心で対象物を捉えるためにカメラ自身の姿勢を変化させるシステムのことであり、両眼転導システムは、カメラの姿勢を変えることが可能になるため図 1 に示す利点がある。さらに両眼転導はカメラの質量や慣性モーメントの小ささから視線方向に運動する対象物へ追従させる動特性にも優れている¹¹⁾。

図 2 に左右カメラのパン角によって視線が交差しているようすを示す。さらに図 3 にカメラ視線奥行き方向に 3D マーカーが周期運動しハンドアイカメラの視線交点

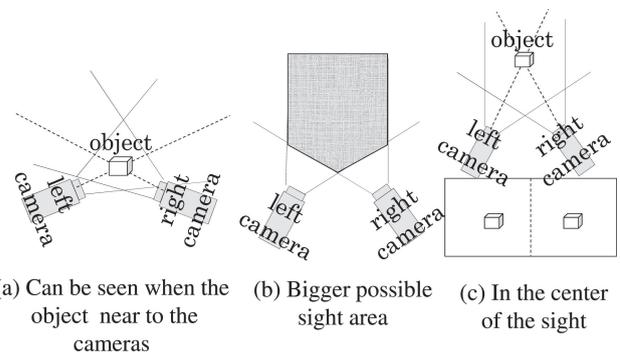


図 1 両眼転導ハンドアイシステムのメリット

(a) カメラ近くでも対象物を観測することができる、(b) 両眼可視領域を広くとれる、(c) レンズの中心で対象物を観測することによってレンズ収差により発生する入力画像ひずみの影響を避けることができる。固定ハンドアイは簡素なハンド構造となる反面上記の (a)~(c) の逆のデメリットをもつ。

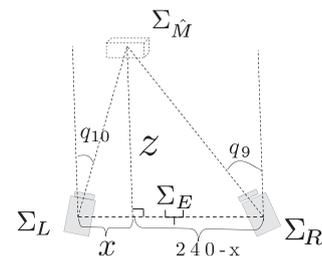


図 2 両眼転導における視線交点の定義

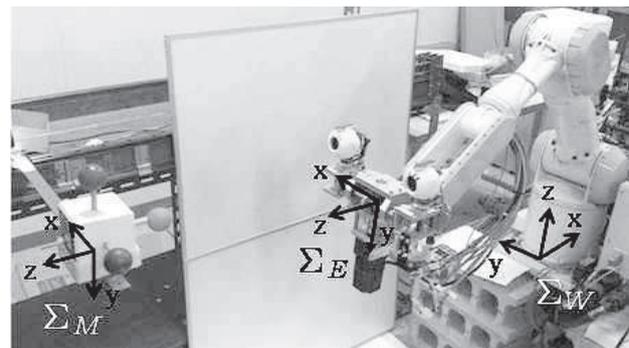


図 3 両眼転導ビジュアルサーボ周波数応答実験システム

とハンドが追従する実験システムを示し、図 4 に実験結果を示す。ハンド部は振幅が減衰し位相が遅れているが、視線交点は 3D マーカーに追従していることがわかり両眼転導の利点を確認できる。

4. 水中ロボットのビジュアルサーボ

4.1 水中ロボットの現状

現在実用化されている水中ロボットは ROV (Remotely Operated Vehicle) と呼ばれている。海中のようすを単眼または複眼のビジュアルフィードバックとして操作者へ提供する遠隔操縦型のロボットであり、ROV から母船までのケーブルを引きながら移動している。数千メートルの海底へ達する ROV は海流の状況によってはその深度の倍以上の長さのケーブル (電源用、通信用、制御

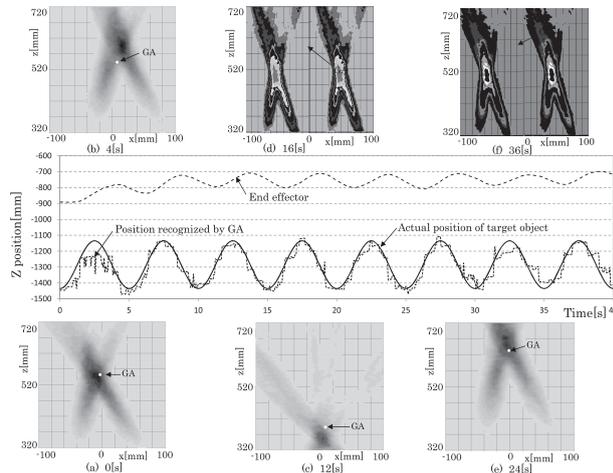


図4 両眼転導ビジュアルサーボ実験結果

上段と下段：(a)～(f)はそれぞれ記入された時刻における入力画像と画像面に射影された3Dマーカーの相関関数分布。濃い部分が関数値が高く最も高いところは3Dマーカーの位置を表す。白点は1-step GAによって実時間最適化により認識されたマーカー位置。中段の中の上段グラフ：3Dマーカーの周期運動(周期5[s]、振幅150[mm])に対するハンド追従性能を表わしている。ハンドの追従結果は、振幅は減衰し位相は遅れている。中段の中の下段グラフ：3Dマーカー目標位置と視線交点の追従結果を表わしている。視線交点は3Dマーカーに追従している。

用など)を引き回している。このケーブルが海底の岩などの障害物に接触することでケーブルが切断され、ROVを失う事故も発生している。また、実験の度にROVを母船から下ろし海底まで潜航させ作業後に引き上げる繰り返しは、ROVによる海底の作業性を非常に非効率にしている。このため母船とROV間のケーブルが不要であり自律的に海中を移動し作業するAUVの研究が、すでに始まっている²²⁾。

一方、放射能汚染地区での除染作業が進む中で、河川、溜池など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²³⁾。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1kg当たり8,000Bqを超えるもの)について国が責任をもって処理することとしている。しかしながら、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など100m以上の水深での除染回収作業は困難をきわめるものと考えられ、自律的な作業が可能なAUVの開発が求められている²⁴⁾。

そこで著者らは、3D-MoSによるROVの一部自動化のための基礎実験として図5に示すROV(以後3D-MoS/ROVと呼ぶ)を開発しつぎの項目について研究を行った。

1. 水中における1-step GAによる3Dマーカーの実時

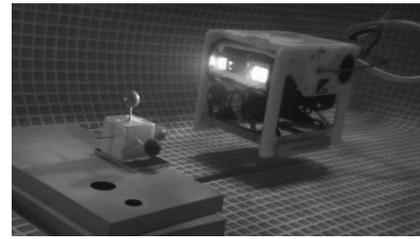


図5 「ももたろう岡大1号」、複眼立体視可能なROV

複眼立体視によって3Dマーカーを実時間で認識しマーカーと水中ロボットの相対的位置/姿勢を計測できる。計測した情報をもとに制御することでROVのビジュアルサーボを実現した。

間位置/姿勢計測実験

2. 水中制御安定性確認実験
 3. 水中自動給電を想定した水中嵌合実験
 4. 海底の熱水鉱床から噴出する熱水による画像の歪みを模擬した気泡環境下のVS
- を実施することによりROVを一部自動化するための方策を探った。

4.2 実験方法

(1) 1-step GAによる3Dマーカー認識条件

水中における3DマーカーのGAによる認識実験は、実験槽内水中任意位置に図6に示すボックス(100×100×100[mm])周りに赤/青/緑の三原色球(φ40[mm])を配置した水中3Dマーカーを固定設置することによって実施した。1-step GAによる3Dマーカー認識とその位置/姿勢の情報の獲得は、もちろん実時間(1秒間に30枚の画像列に遅れないこと)で算出しなければならない。同図内に示すROVの前方の空間に設定したGA探索空間内の3Dマーカーと3Dモデルとの相関関数を最大化させる位置/姿勢をGAの進化計算で求め最大値を与えるモデルの位置/姿勢を実際の3Dマーカーの位置/姿勢として算出する方法は、3章のビジュアルサーボの方法と同じである。

(2) 水中制御安定性実験

位置/姿勢の目標値は、図6の Σ_H のx,y,z軸方向に対して(0, 67, 500[mm])、y軸周りの目標姿勢角は0[rad]

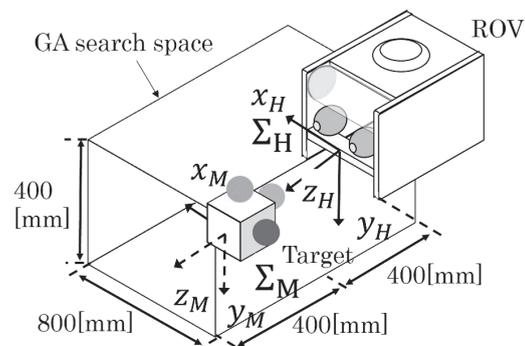


図6 水中ロボット前方の3Dマーカー認識空間の定義

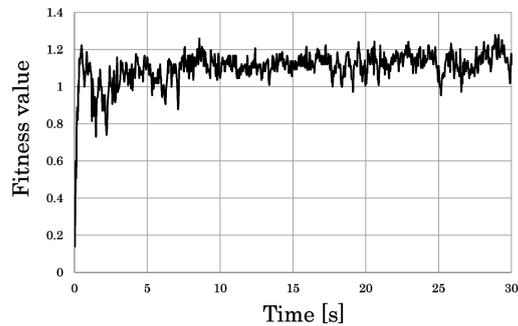


図7 ビジュアルサーボ中の適合度関数値の時間変化

である。ほかの回転軸である x , z 軸周りの姿勢角は水中ロボットの浮心を重心より上部に位置させていることにより時定数 1 [s] 程度で自然にゼロに収束するので制御を行っていない。3D-MoS 制御により 4 基の ROV 搭載スラスタ (前後進スラスタ 2 台 (差動により Σ_H の y 軸回転可能), 上昇沈降用スラスタ 1 台 (y 軸方向), 並進用スラスタ 1 台 (x 軸方向) を駆動させて, 3D-MoS/ROV を 3D マーカーの正面に常に保つように制御させ, それぞれの位置/姿勢偏差に対し比例制御で VS 実験を行った。

4.3 水中における GA 認識精度

図 7 に水中マーカー正面前方約 500 [mm] の位置に水中停止させた 3D-MoS/ROV の 1-step GA 認識時の適合度の時間変化を示す。これによると, 認識開始から数秒以内で適合度が 1.0 以上になるとともに, その後 30 秒までの適合度計測時間中において高い値を維持していることがわかる。今までの実験から VS 可能な GA の適合度は 0.5 以上であり, 宋薇らは^{20), 21), 25), 26)} 本実験に使用した同一マーカーを用いて室内における認識精度の測定を行っている。これらにより気中で得られた適合度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度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識精度は, 気中における場合との比較においてもほぼ同程度得られることがわかった。

4.4 水中制御安定性

1-step GA 認識後, 3D-MoS 制御状態で水中における 3D マーカーから一定位置で停止している ROV に対して, 3D マーカー側を奥行き方向, 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た場合の ROV 側の追従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。そのようなことを図 8 に示す。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圧変化による実験槽側面からの反射波により姿勢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 3D-MoS 制御方式では 4 基のスラスタを常時同時駆動させることで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。

4.5 認識画像に気泡が映り込む場合

3次元マーカー前方に気泡を出現させた場合についての

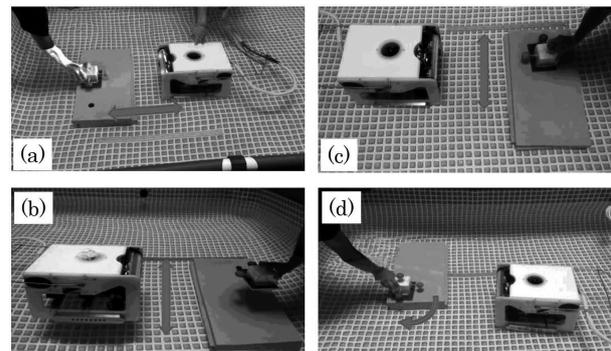


図8 3D-MoS/ROV を用いた 3次元位置/姿勢追従実験 (a)ROV の奥行き方向, (b)上下方向, (c)水平方向, (d)上下軸周りの回転

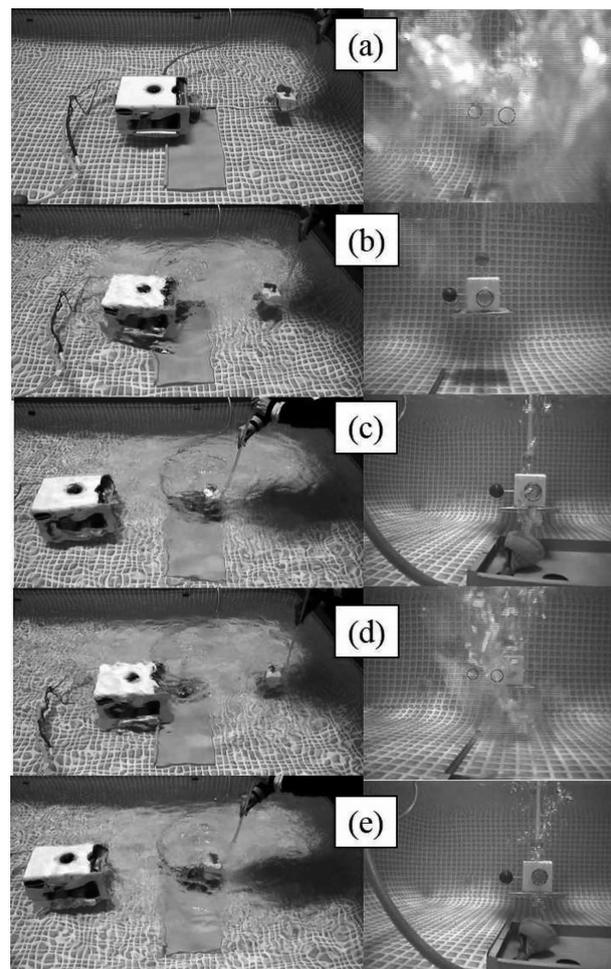


図9 水中気泡外乱下の奥行き方向ビジュアルサーボ実験

(a) 10 秒後 ~ (e) 50 秒後, 10 秒ごとに撮影。左側縦列の写真: 水面上から撮影した移動する 3D マーカーに追従する 3D-MoS/ROV, 右側縦列の写真: 3D-MoS 用複眼カメラの右カメラ画像。図中に気泡と実時間認識結果である赤青緑の破線の円の表示が見られる。

実験結果を図 9 に示す。図 9 は水中ロボットと 3次元マーカーの位置関係 (左列), 水中ロボットから見た 3次元マーカーの位置 (右列) を 10 秒ごとに取得した画像を示している。図 9 (a)~(e) の右側写真中には, GA が実時間で認識した 3次元マーカーの位置/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。さらに(a)~(e)の右列の各画像に描画された赤、緑、青の円の位置(実時間位置/姿勢計測結果、それぞれの色は3Dマーカー左側の赤の球、上部の緑の球、正面の青の球と対応)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。言い換えれば、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に認識させ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/姿勢へレギュレートされていることがわかる。

5. 土壤除染ロボットシステムの開発

土壤除染ロボットについて紹介する。土壤除染は基準値以下の除染済みの土壌と濃縮高放射能土壌を分離することである^{27)~29)}。このためろ布は高放射化し、ろ布の劣化のために定期的に交換する必要がある。高放射化するろ布の交換は作業者の被曝を伴うためロボットによる作業が求められている。このため、前章までに述べた3D-MoSをろ布芯棒にハンドを嵌合させてろ布を取り外す除染ロボットシステムに応用した^{30), 31)}。

図10にフィルタプレス(以下FP)用ろ布交換ロボットを示す。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ようすを示す。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

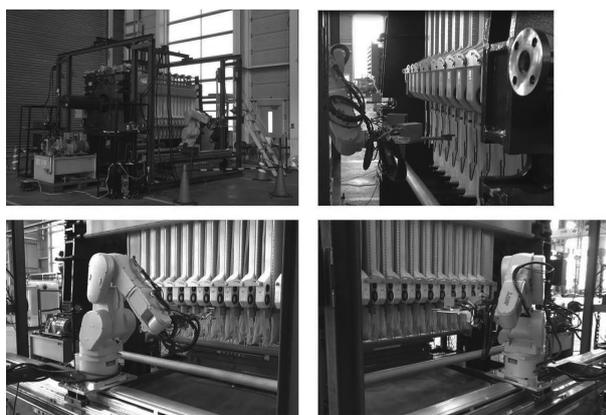


図10 土壤除染システムとろ布交換用ロボット

フィルタプレス装置はろ布間の空間に土壌を密閉し高圧でろ過して再利用可能な土壌と高放射能除染残土を分離する装置。ろ布を走行させてろ布上に張り付く高放射能除染残土を完全に自動で剥離させ分離可能。ろ布は高放射化するため被曝の危険があり自動ろ布交換が必須。そのためろ布端部の筒部に挿入されているろ布芯棒の3次元位置を3D-MoSで認識後2台のロボットで協調して引き抜くとともに、装置上部からろ布を釣り上げてハンガーに装着し放射線抑止のためプールに搬送し水中で保管する必要がある。高圧により長期的にはろ板が変形するため数十から数百本のろ布芯棒の3次元位置は不確定となり、3D-MoSにより個別に3次元位置の認識を行って把持引き抜き作業を行う必要がある。

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る。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の両端を間違いなく2台のロボットが把持するために、芯棒端部を着色す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、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方向の対象物の位置計測精度を向上させる計測方法と、これを3次元複眼立体視認識に基づく制御と組み合わせたロボットシステムを構成した。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もつ。提案した制御法によるロボットハンドとFPのろ布芯棒の嵌合実験を行い嵌合精度の検証を行った結果、FPの自動ろ布取り外し作業が可能であることを明らかにするとともに、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³²⁾。

6. ロボットによる魚の学習速度の低減

6.1 学習速度と動作性知能

Wechslerは“知能とは、目的的に行動し、合理的に思考し、環境を効果的に処理する個人の総合的、または全体的能力”と考え³³⁾言語性知能と動作性知能に分けて調べるWechsler式知能検査方法を提案した。言語性知能は学習や記憶に基づき後天的要因によって規定される部分が多いとされ、動作性知能は状況に対応する流動性知能を測定する尺度であり、生得的要因に影響を受け、後天的な学習には関係しないとされる。動作性知能は、絵画完成、積み木模様、組み合わせなどの生得的な学習速度を評価基準として測定される³⁴⁾。

最近のロボット工学の分野でも、「ロボットの知能」と「生物の知能」を比較・検証することで「知」をより理解しようとする試みがあり、その研究過程で生物に関する新たな知見が数多く報告されている^{35)~38)}。

著者らはロボットによる魚の捕獲実験を通して、魚の学習速度を計測する試みを行ってきた。実験方法は、図11に示すカメラと網を取り付けたロボットアームで魚の捕獲/解放を繰り返すものである。認識にはハンドアイによるVSを用いた¹⁸⁾。過去の実験ではVSにより魚の捕獲に成功したが、捕獲/解放を繰り返すと魚がプールの隅に逃げ込み、プールの中央へ移動しなくなるなどの回避行動をとるようになり、単位時間あたりの捕獲数が減少することを確認した¹⁹⁾。これは魚がロボットの動きを学

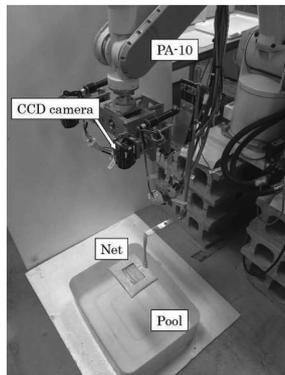


図 11 魚捕獲ロボットシステム

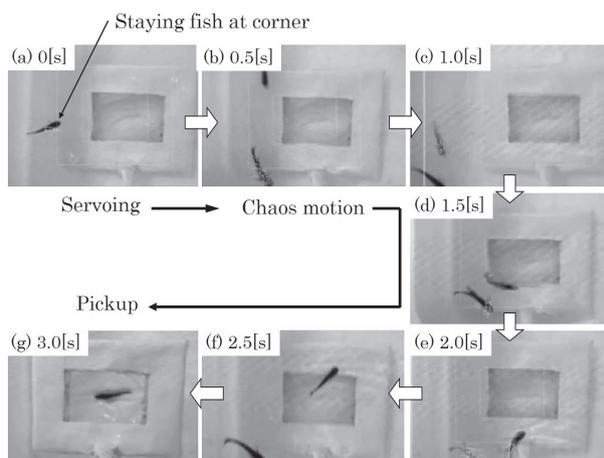


図 12 ロボットによる魚捕獲連続写真

(a) 魚がプールの隅で停止しており、魚と網は停止したまま動かない状態に陥っている。(b) ロボットは、魚が制限区域内で停止していることを認識したため、網の運動パターンを追従制御からカオス軌道へと切り替えた。(c)~(e) はカオス軌道で動く網が不規則に振動しているようすを示している。(f) で魚を網の中央部で認識し、(g) で捕獲に成功した。

習し、自ら回避戦略を考え出した結果であった³⁹⁾。著者らはこの学習速度の程度は動作性知能に分類されると考えている。この魚の回避戦略を打ち破るための対策として、ハンドにカオスおよび乱数軌道を組み込み捕獲直後にプールに戻す連続捕獲/解放実験を行い報告した⁴⁰⁾。カオスはニューラルネットワーク(以下 NN)カオス生成システム⁴¹⁾により生成されたものを使用した。

6.2 ビジュアルサーボ・カオス・乱数による捕獲

図 12 にカオスによる捕獲のようすを 0.5 秒ごとの連続写真で示す。さらに図 13 に被捕捉経験のない魚に対する VS, 乱数, カオスを用いた連続捕獲/解放実験結果を示す。グラフは平均値および標準偏差を記述している。実験序盤は PD 制御による VS のみの捕獲が効果的であること、また VS (FLS=-0.30) を基準とすると、乱数 (-0.15) およびカオス (-0.08) は魚の学習速度を低減させたことがわかる。またカオスは乱数よりも魚の学習速度を大きく低減させたことで、魚の学習抑止効果が最も高いことがわかる。

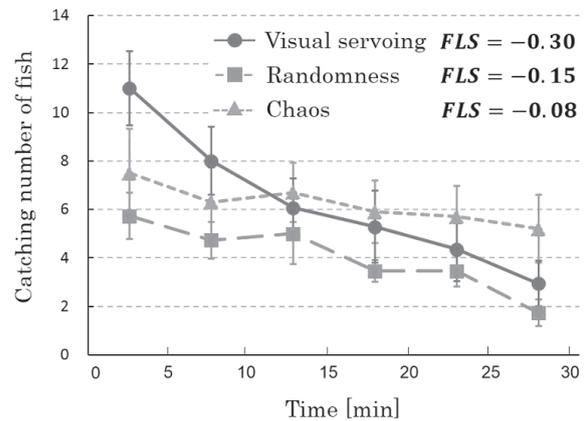


図 13 ロボットによる魚連続捕獲/解放実験結果

VS, 乱数, カオスによる魚捕獲/解放数の平均値と標準偏差の推移と FLS (Fish Learning Speed, 1 分あたりの魚捕獲数の平均減少率 [匹/min]). FLS は絶対値が大きいほどプールの隅に停滞するなどの回避戦略を魚が発案する速度が高いことを示す。

7. 今後の期待・展望

これまで以上にロボットが動的環境に適応するためには、3次元画像認識の技術だけでなく、対象物そのものを認識させる技術の開発が必要不可欠である。動的環境に適応する能力は未知環境下で作業する能力と等価であり、このような未定義の対象物体に対する自律的作業をロボット自ら行うインテリジェンスを実現する可能性をもった器機は、コンピュータのみであろう。この意味でコンピューショナルインテリジェンスをいかにロボットで具現化するかを追求することは、ロボットとコンピュータ双方の有効性を相乗効果的に高め合うことにつながる。今後は、ロボティクスとコンピューショナルインテリジェンスの各分野が密接に結びつき、輸送やサービス関連業など人間社会により広く深く影響を与えるようになると思われる。

謝辞 水中ロボットの研究は、「広和株式会社 マリンシステム部」の研究支援による助成に基づく研究であることを記し、謝意を表す。また、土壤除染ロボットの研究は「環境省平成 26 年度除染技術実証事業」および「平成 26 年度株式会社石垣との共同研究」による助成に基づく研究であることを記し、謝意を表す。

(2015 年 5 月 15 日受付)

参考文献

- 1) 井上博充: 重点領域研究「知能ロボット」, 日本ロボット学会誌, **16-5**, 578/585 (1998)
- 2) 細田 耕: 環境との相互作用を通して獲得される適応的のマニピュレーション, 日本ロボット学会誌, **20-2**, 126/127 (2002)
- 3) 小柳英次, 吉田智章, 西村健志: 福島第一原子力発電所建屋内検査用ロボットシステム, 日本ロボット学会誌, **31-1**, 47/48 (2013)
- 4) F. Chaumette and S. Hutchinson: Visual Servo Control, Part 1: Basic Approaches, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, **13-4**, 82/90 (2006)

- 5) F. Chaumette and S. Hutchinson: Visual Servo Control, Part 1: Advanced Approaches, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, **14**-1, 109/118 (2007)
- 6) 橋本浩一: ビジュアルフィードバック制御と今後, *日本ロボット学会誌*, **27**-4, 400/404 (2009)
- 7) K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura: Manipulator Control with Image-based Visual Servo, *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2267/2272 (1991)
- 8) 細田 耕, 森山 斉, 浅田 稔: ズーム機構を利用した視覚サーボ系の構築, *日本ロボット学会誌*, **16**-6, 845/850 (1998)
- 9) 遠藤公誉, 田中弘一, 荒川賢一, 武川直樹: 予見制御による視覚軌道追従制御法, *日本ロボット学会誌*, **15**-4, 565/572 (1997)
- 10) 西村健太, 候 森, 前田耕市, 見浪 護, 矢納 陽: ビジュアルサーボ中の実時間ポーズトラッキング性能の解析, *日本機械学会, ロボメカ講演会*, 2A2-J04 (2013)
- 11) 西村健太, 須浪唯介, 前田耕市, 見浪 護, 矢納 陽, 松野隆幸: カメラ奥行方向に移動する 3D 対象物の実時間ポーズトラッキング解析とビジュアルサーボ性能, *日本ロボット学会学術講演会, RSJ2014AC1J3-05* (2014)
- 12) 柳 善鉄, 自律型水中群ロボットシステム, *日本ロボット学会誌*, **22**-6, 718/722 (2004)
- 13) 浅間 一: 複数の移動ロボットによる協調行動と群知能, *計測と制御*, **31**-11, 1155/1161 (1992)
- 14) 太田 順, 新井民夫: 単機能モジュール群ロボットシステム, *日本ロボット学会誌*, **21**-8, 877/871 (2003)
- 15) 太田 順, 新井民夫: 群知能ロボットシステム, *日本ロボット学会誌*, **20**-5, 487/490 (2002)
- 16) 大西洋太, 須浪唯介, 西村健太, 矢納 陽, 石山新太郎, 見浪 護, 藤本勝樹: 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 (2014)
- 17) 福田敏男, 中川誠也: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 (第 1 報, セル間の自動接近・結合・分離制御実験), *日本機械学会論文誌 (C 編)*, **55**-509, 114/118 (1989)
- 18) W. Song, Y. Mae, and M. Minami: Evolutionary Pose Measurement by Stereo Model Matching, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics (JACIII)*, **9**-2, 150/158 (2005)
- 19) Hidekazu Suzuki and Mamoru Minami: Visual Servoing to catch fish Using Global/local GA Search, *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, **10**-3, 352/357 (2005)
- 20) 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*, **28**-1, 55/64 (2010a)
- 21) 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*, **28**-5, 591/598 (2010)
- 22) 吉野晴美: 水中ロボットについての世界の最新情報, MEMS ロボット特集, NEDO 海外レポート, No1057 (2009)
- 23) 農林水産省農村振興局資料 (平成 25 年 4 月),
- 24) 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**-799, 718/725 (2013)
- 25) 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)
- 26) M. Minami and W. Song: Hand-eye-motion Invariant Pose Estimation with On-line 1-step GA -3D Pose Tracking Accuracy Evaluation in Dynamic Hand-eye Oscillation-, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **21**-6, 709/719 (2009)
- 27) 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)*, **79**-802, 1106/1121 (2013)
- 28) 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能汚染土壌洗浄用装置の汚染防止効果, *化学工学論文集*, **39**-4, 1/6 (2013)
- 29) 石山新太郎, 神谷昌岳, 近藤充記, 比氣明典: 高濃度汚染残土の固化処理用フィルタプレス装置の性能評価, *日本機械学会論文集*, **39**-4, 1/6 (2013)
- 30) 西村健太, 須浪唯介, 矢納 陽, 松野隆幸, 山下 学, 石山新太郎, 見浪 護: MOS 制御知能を搭載した放射能汚染土壌固化・減容化仕様フィルタプレス装置のろ布取外検証試験, 第 57 回自動制御連合講演会 (2014)
- 31) 西村健太, 須浪唯介, 矢納 陽, 松野隆幸, 山下 学, 石山新太郎, 見浪 護: 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, 第 57 回自動制御連合講演会 (2014)
- 32) 日本経済新聞, Science and Tech フラッシュ (2014 年 7 月 8 日 発刊)
- 33) D. Wechsler: THE MEASUREMENT OF ADULT INTELLIGENCE; *THE WILLIAMS & WILKINS COMPANY, THIRD EDITION* (1944)
- 34) 下山晴彦 編: よくわかる臨床心理学, ミネルヴァ書房 (2008)
- 35) 日本ロボット学会: [特集] ロボティクスのための生命理解—行動と運動生理から—; *日本ロボット学会誌*, **23**-1 (2005)
- 36) 計測自動制御学会: [ミニ特集] 生物に学ぶ機械と制御, *計測と制御*, **42**-9 (2003)
- 37) M. Bohlen: A robot in a cage-exploring interactions between animals and robots, *Proceedings 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 214/219 (1999)
- 38) 浅田 稔, 石黒 浩, 國吉康夫: 認知発達ロボティクス, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1H23, 249/250 (2001)
- 39) 見浪 護, 矢納 陽: ロボットと魚の敵対的關係を用いた魚の学習速度の計測; *日本機械学会論文集 (C 編)*, **79**-801, 503/510 (2013)
- 40) Mamoru Minami, Akira Yanou, and Jun Hirao: Intelligence Comparison between Fish and Robot Using Chaos and Random, *Journal of Communication and Computer*, **9**-9, 1025/1037 (2012)
- 41) Takashi Tomono, Yuya Ito, Mamoru Minami, and Akira Yanou: Analyses of Chaos Generated by Neural-Network-Differential-Equation for Intelligence Fish-Catching, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1023/1029 (2012)

[著者紹介]

み なみ まもる
見 浪 護 君 (正会員)



み なみ まもる
見 浪 護 君 (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, 10 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テグレーションなどの研究に従事, 日本機械学会, IEEE などの会員.

や のう あきら
矢 納 陽 君 (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, 02 年近畿大学工学部助手, 04 年同講師を経て, 09 年岡山大学大学院自然科学研究科助教. 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.

いしやま しんたろう 君 (正会員)
石山 新太郎 君 (正会員)



1981年3月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6月に東京工業大学より学位を取得, (工学博士). 81年4月日本原子力研究所東海研究所高温工学部入所, 93年~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, オークジッリ国立研究所(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4月~東工大原子炉工学研究所非常勤講師, 12年4月~現在福井大学遠赤外領域研究センター客員教授, 13年2月~15年3月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.

まつの たかゆき 君 (正会員)
松野 隆幸 君 (正会員)



2004年9月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, 04年10月名古屋大学大学院工学研究科助手. 05年3月に学位を取得, 博士(工学). 以降06年4月より富山県立大学工学部助手, 助教, 講師. 2011年10月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.