

研究成果報告書

研 究 題 目		環境適応型ロボットによる高濃度汚染残土の自律除染システムの構築	実 施 年 度
			平成 26,27 年度
代 表 研 究 者	所 属	岡山大学・大学院自然科学研究科・機械システム工学専攻	
	氏 名	見 浪 護 印	

1. 研究の目的・背景

福島県では今後とも広域放射能汚染地域の除染作業、再汚染対策ならびに福島原発廃炉措置に対応していかなければならない。これらの作業は人間では対応できないほどの作業範囲あるいは高放射能環境下で行われることからロボット導入が不可欠である。しかしながら、現在までにさまざまなロボットが福島県に投入されてきたが、いずれも失敗に終わった。これは現行のロボットが人間の管理環境下において規定作業のみ対応可能な能力しか持ち合わせていないためであり、未知の環境への対応能力が備わっていないことに起因している。本提案では新しい制御理論に基づいて「自律的な作業環境の把握」と「変化に応じた柔軟かつ自律的な作業の遂行」の能力を合わせ持つロボットによる極限環境下での作業実証を行う。また中国電力のように事故対応を考える必要のない場合つまり通常稼働中の原子力発電所においては、上記提案する移動ロボットは放射能汚染場所の把握と放射能強度を計測する監視ロボットとして利用することができる。

【期待される研究成果】

本研究で期待される結果は、修理補修作業時の被ばく低減の観点から環境適応型ロボットが環境に働きかけを行った結果新たに生じる環境変化に対して自律的に環境情報を獲得し、そこから新たな拘束情報を得つつ目的を実行できるロボット技術を提供できる。変化する汚染物質環境の認識には任意不定形状物体を楕円体との相関関数を用い相関値の最適化により、不定形汚染物質の位置・姿勢を認識することができ、この能力により任意形状に拡散分布する汚染土壌の形状を認識できる。すなわち適応的作業で変化する状況に対応した除染作業を遂行する能力を持つロボットの創出が可能となる。なお汚染土壌は地表面近くを想定しており深部の除染は想定していない。

本研究の目的

【全体構想】

福島県では今後とも広域放射能汚染地域の除染作業、再汚染対策ならびに福島原発廃炉措置に対応していかなければならない。これらの作業は人間では対応できないほどの作業範囲あるいは高放射能環境下で行われることからロボット導入が不可欠である。本大学では JAEA で進めている放射能汚染土壌の解砕洗浄処理による再生土壌生産/高濃度残土の高減容化プラント建設のためのフィールド試験において後者の高放射能環境下作業をロボットで代替する研究開発を進め、通常の除染ロボット作業が起こす汚染拡大を自律的に認識・防護できる新しい制御理論“Move on Sensing”方式の実証模擬試験に成功した。そこで、今後の JAEA との連携協定を背景に人形峠施設内の試験環境を利用して、福島県内の汚染環境を模擬することにより新しい制御理論に基づく自律型ロボットによる除染作業の実証試験を行う。除染作業にはロボットが「自律的な作業環境の把握」と「変化に応じた柔軟かつ自律的な作業の遂行」の能力を合わせ持つ必要があり、前者性能を能動的計測：「Active Sensing」技術に、そして後者を適応的作業：「Adaptive Manipulation」技術に求め、これらを融合化させた新しいマニピュレーション技術が“Move on Sensing”方式である。本研究は移動作業型ロボットが自律的に汚染土壌を探索し 100%回収することを目的としている。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

屋外自動除染ロボットの研究

申請者らは、遺伝的アルゴリズム(以下 GA)を動画画像処理(ビデオレートで連続的に入力される画像に遅れることなく画像内から対象物の位置・姿勢を認識する方法)に適用した「1-step GA」と名付けたユニークで実用的な実時間動画画像認識方法を提案した。この方法は GA のモデルベースト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画像認識と安定なビジュアルサーボが実現できる。これをビジュアルサーボに用いた独自の方法を確立し研究を進めてきた。このビジュアルサーボ技術を複眼カメラによる3次元立体対象物に応用し Fig. 1 に示す。これは「3D Move on Sensing (3D-MoS と呼ぶ)」という新しい「動的環境下」で除染作業を遂行できる環境適応型除染作業ロボットシステムで、Fig. 2 に示すロボットは Fig. 1 のシステムを組み込んだ除染ロボットである。複眼画像より(1)形状、色、放射能強度などの属性を認識し、(2)除染対象物を発見し、(3)自動的に近づき、(4)模擬除染を実施する能力を持つ。この結果ロボット自ら汚染土壌を探索し汚染土壌を収集できることが確かめられた。参考文献[1, 9, 21]

土壌除染フィルタープレス用ロボットの開発

平成 26, 27 年度は、3次元空間の実時間動画画像認識方法(上記 3D-MoS)を固定型のロボットに適用した「ろ布自動交換システム」を構築した。Fig. 3 に示すロボットは、Fig. 4 に示す土壌を除染する能力を持つフィルタープレス装置のろ布の自動交換用ロボットである。フィルタープレス装置は土壌中の放射能物質を自動的に濾し取ることができるが、濃縮された放射能物質をろ布内に蓄積するためろ布交換作業によって作

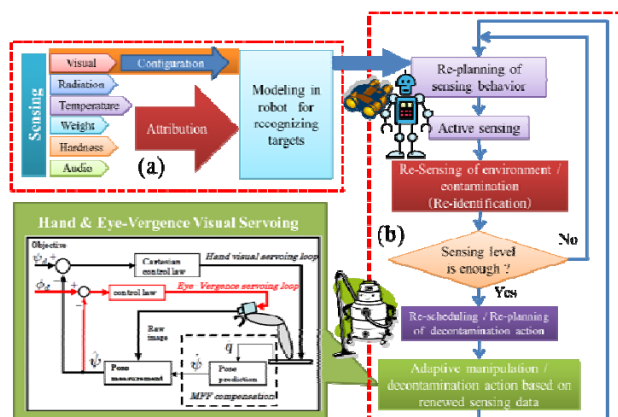


Fig.1 Concept of Moving on Sensing algorithm with
(a) active sensing and (b) adaptive manipulation

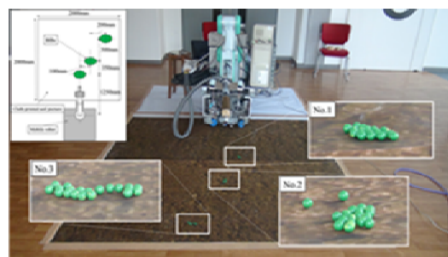


Fig.2 自動土壌除染シミュレーションを行う走行型除染ロボット



Fig.3 自動土壌除染を行うフィルタープレス装置のろ布自動交換ロボット

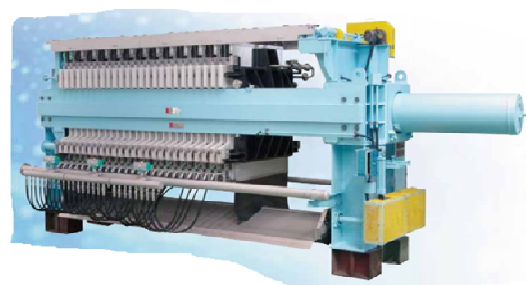


Fig.4 フィルタープレス除染装置

業者は被爆する。このため長期継続的な自動除染を達成するためには自動、ろ布交換作業可能なロボットを研究開発し自動交換が可能であることを実証する必要がある。このため Fig. 3 のロボットシステムについてを環境省の予算も加えて研究を行った。

研究成果の最大のポイントは、ろ布交換作業の完全自動化にはろ布一枚当たり四本のろ布芯棒を2台のロボットが把持し協調動作によって抜き取る作業を自動化することができたことである。このとき圧搾圧力によってろ板が長期的に大きく変形することが問題となりろ布芯棒の位置は不確定となる。このためこのロボットには、複眼3次元位置計測装置が必要になり、当研究室はこの装置を開発した。1000 回の認識実験によって標準偏差は3次元の3方向に 0.5[mm] 以下であることが確認された。参考文献[1, 4-7, 9, 10, 13, 21]

湖底・海底土壤除染ロボットのための基礎技術の開発

放射能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。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持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、自律的な作業が可能な自律水中ロボット(AUV)の開発が求められている。

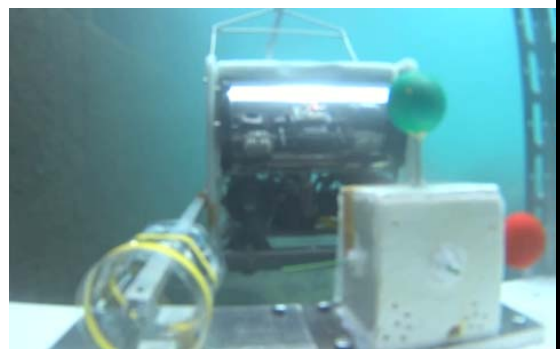
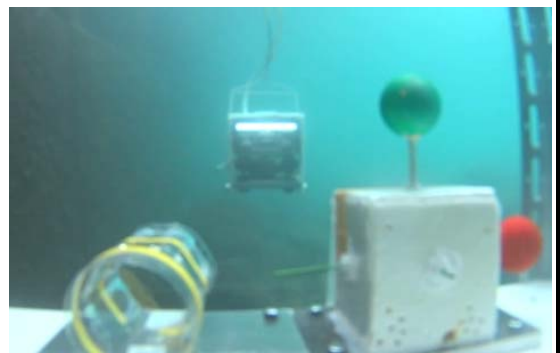
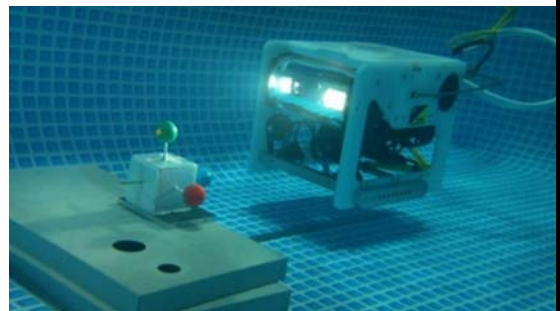
右上の写真は AUV の基礎技術である 3 次元対象物(赤青緑のマーカ)に対するビジュアルサーボ実験を行っている写真である。従来型の遠隔操作型水中ロボット ROV (Remotely Operated Vehicle) に複眼カメラ付き 3D-MoS 制御知能を搭載し、和歌山県の実海域での嵌合実験(12/16, 2015)に成功した。複眼構成のビジュアルサーボを用いた実海域での嵌合実験成功は、世界初である。右中、右下の写真は実海域自動嵌合の様子を示す。

海底自動嵌合を可能にした 3D-MoS 制御は、複眼動画像に対する実時間認識が可能であり、

- ① 水中対象物の 3 次元位置・姿勢自動認識可能
- ② 海底での自動充電可能
- ③ 長時間潜航/作業を継続可能な水中ロボット
- ④ 移動対象物の追尾制御可能

という特徴を持ち、自律制御 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 化を実現。深海における長時間潜航/作業が可能であることを実証した。参考文献 [12, 24-32]

制御系設計に関する研究は、参考文献 [15-19, 23, 24] に、ビジュアルサーボ制御に関する研究成果は、参考文献 [2, 3, 8, 11, 14, 20, 22] にまとめている。



3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

費目	申請時	使用状況
設備備品費	0 円	95,040 円
資料費	0 円	279,720 円
謝礼金	20 万円	0 円
旅費	90 万円	716,614 円
消耗品費	50 万円	508,626 円
その他	0 円	0 円

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

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。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っている。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、作業者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持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予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屋外作業での動的に変化する環境（除染作業はロボット自身が環境を変更するという意味で動的環境となる）では目的とする作業を達成できない。

このような状況の中で、提案した 3D-MoS による屋外作業ロボットは新しい概念であり未知環境で除染作業ができる方法論を提示している。除染が完了するまで放射能物質の発見と除染を繰り返すシステムを提案しており、今後実際の除染ロボットに応用されることを願っている。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

- (1) 須浪唯介, 見浪護, 矢納陽, 松野隆幸, 前田耕市, 西村健太, 石山新太郎: "Move on Sensing を用いた高濃度放射残土模擬回収実験" ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 (2014.5)
- (2) 崔禹, 前田耕市, 西村健太, 須浪唯介, 見浪護, 矢納陽, 松野, 隆幸: "カメラ奥行方向 Hand-eye-vergence ビジュアルサーボ", 第 5 回 コンピュータショナル・インテリジェンス研究会 (2014.7)
- (3) 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" 第 32 回日本ロボット学会 (2014.9)
- (4) 須浪唯介, 西村健太, 松野隆幸, 矢納陽, 見浪護, 石山新太郎, 山下学: "画像認識による濾布芯棒認識精度の確認" 第 32 回日本ロボット学会 (2014.9)
- (5) 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 (2014.11)
- (6) 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 (2014.11)
- (7) 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 制御を用いたろ布芯棒認識における嵌合精度の検証" 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014 (2014.11)
- (8) 榊原俊, 西村健太, 前田耕市, 須浪唯介, 矢納陽, 見浪護: "奥行方向に移動する対象物の実時間ポーズトラッキング性能の解析" 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2014 (2014.11)
- (9) 須浪唯介, 西村健太, 見浪護, 矢納陽, 松野隆幸, 石山新太郎, "環境が駆動する Move on Sensing 放射能残土模擬回収" 第 15 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2014.12)
- (10) Robot for Decontamination with 3D Move on Sensing, Cui Yu, Li Xiang, Minami Mamoru, Yanou Akira, Yamashita Manabu and Ishiyama Shintaro, International Nuclear Safety Journal (INSJ), Vol.6, Number 2, June 2015
- (11) Analyses about Trackability of Hand-eye-vergence Visual Servoing in Lateral Direction, CUI Yu, NISHIMURA Kenta, SUNAMI Yusuke, MINAMI Mamoru, MATSUNO Takayuki and YANOU Akira, Applied Mechanics and Materials, Vol.772, pp 512-517, 2015
- (12) ロボティクスの中のコンピュータショナル・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, 計測と制御 Vol.54, No.8, pp.586-593 2015
- (13) 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, 西村健太, 須浪唯介, 矢納陽, 崔禹, 山下学, 石山新太郎, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.831, pp.1-18, 2015
- (14) Modeling of Arbitrary-Shaped Objects by Evolving-Ellipsoids Approximation for Visual Servoing, Kenta Nishimura, Yusuke Sunami, Takayuki, Matsuno, Akira Yanou, Mamoru Minami, The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics, OS2-9, pp.575 - 580, 2015
- (15) Energy-efficient and precise trajectory-tracking with bracing manipulator, Daisuke Kondo, Xiang Li, Akira Yanou, Mamoru Minami, The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics, OS2-7, pp.563 - 568, 2015
- (16) Temperature Control of a Mold Model using Multiple-input Multiple-output Two Degree-of-freedom Generalized Predictive Control, Naoki Hosoya, Akira Yanou, Mamoru Minami, Takayuki Matsuno, IEEE 10th Asian Control Conference, 2015
- (17) A Design Method of On-Demand Type Feedback Controller Using Coprime Factorization, Akira

Yanou, Mamoru Minami, Takayuki Matsuno, IEEE 10th Asian Control Conference, 2015

(18) Switching PID Control for an Underactuated Flying Object Through Model-Based Prediction, Akira Yanou, Kohei Yoshikawa, Syouya Mizokami, Mamoru Minami, Takayuki Matsuno, IEEE 10th Asian Control Conference, 2015

(19) Shape Modeling of A String And Recognition Using Distance Sensor, Keisuke Mukai, Takayuki Matsuno, Akira Yanou, Mamoru Minami, IEEE 24th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Aug 31 - Sept 4 , 2015

(20) Analyses about Trackability of Hand-eye-vergence Visual Servoing in Lateral Direction, Cui Yu, Kenta Nishimura, Yusuke Sunami, Mamoru Minami, Takayuki Matsuno, Akira Yanou, Applied Mechanics and Materials, Vol.772, pp.512 - 517, 2015 [PDF]

(21) Simulated Decontamination Experiments by Mobile Manipulator with Visual Recognition—Autonomous Behavior Driven by Environment Programming—, Ryohei ARAKI, Yusuke SUNAMI, Mamoru MINAMI, Shinntaro ISHIYAMA and Akira YANOU, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2P2-D-4, 2015

(22) 6-dof Eye-Vergence Visual Servoing by 1-step GA Pose Tracking, Yu CUI, Kenta NISHIMURA, Yusuke SUNAMI, Mamoru MINAMI and Akira YANOU, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2P1-D-2, 2015

(23) Application of Self-tuning Generalized Predictive Control to Temperature Control Experimental Device of Aluminum Plate, Naoki HOSOYA, Syohei OKAMOTO, Akira YANOU, Mamoru MINAMI and Takayuki MATSUNO, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2P1-D-3, 2015 [PDF]

(24) Validity Analysis of Chaos Generated with Neural-Network-Differential-Equation for Robot to Reduce Fish's Learning Speed, Haruhiro INUKAI, Keita MORI, Mamoru MINAMI and Akira YANOU, The 17th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2P1-D-4, 2015

(25) Robustness of Visual-Servo against Air Bubble Disturbance of Underwater Vehicle System Using Three-Dimensional Marker and Dual-Eye Cameras, Myo Myint, Kenta YONEMORI, Akira YANOU, Shintaro ISHIYAMA and Mamoru MINAMI, MTS/IEEE OCEANS, Whashington, 18.Oct - 22.Oct, 2015 [PDF]

(26) Visual-servo-based Autonomous Docking System for Underwater Vehicle Using Dual-eyes Camera 3D-Pose Tracking, Myo Myint, Kenta YONEMORI, Akira YANOU, Mamoru MINAMI, Shintaro ISHIYAMA, IEEE/SICE International Symposium on System Intergration, SuE5.4, Meijo University Nagoya, December 11 -13, 2015 [PDF]

(27) Real-time 3D Pose Estimation and Tracking 3D Marker using Dual-eye Cameras for Under Water Vehicle, M. Mint, K. Yonemori, S. Ishiyama, A. Yanou, M. Minami, 第 24 回計測自動制御学会中国支部講演会論文集, pp.62-63, 2015.11.28

(28) 水中自動給電を想定した水中ロボットの自動嵌合制御, 米森健太, 大西祥太, 見浪護, 矢納陽, 阪幸宏, 藤本勝樹, RSJ 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 2015.9.3~5

(29) 時変肘付き位置最適化による消費エネルギー最小化制御, 李想, 近藤大介, 見浪護, 矢納 陽, RSJ 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 2015.9.3~5

(30) Visual Servoing Experiments of Underwater Vehicle under Air Bubble Disturbances, Myo Mint, 見浪護, 米森健太, 阪幸宏, 矢納陽, RSJ 第 33 回日本ロボット学会学術講演会, 2015.9.3~5

(31) ビジュアルサーボを搭載した水中ロボットの 3 次元位置・姿勢制御, 米森健太, 大西祥太, 藤本勝樹, 見浪護, 矢納陽, 石山新太郎, JSME ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A2-E08, 2015.5.17-19

(32) 水中自動充電を目指したビジュアルサーボ型水中ロボットの自動嵌合制御, 矢納 陽, 大西 祥太, 石山 新太郎, 見浪 護, 日本機械学会論文集, Vol.81 (2015), No.832, 15-00391