Move on Sensing を用いた高濃度放射残土模擬回収実験

Mimic-Recovery Experiments of Left Soil Containing a Highly Radioactive Substance by Using Move on Sensing

前田 耕市(岡山大) 須浪 唯介(岡山大) 西村 健太(岡山大) 正 見浪 護(岡山大) 正 松野 隆幸(岡山大) 正 矢納 陽(岡山大) 石山 新太郎(日本原子力開発機構)

Koichi MAEDA, Okayama University Yusuke SUNAMI, Okayama University, en421842@s.okayama-u.ac.jp Kenta NISHIMURA, Okayama University Mamoru MINAMI, Okayama University Takayuki MATUNO, Okayama University Akira YANOU, Okayama University Shintaro ISHIYAMA, Japan Atomic Energy Agency

Risk of exposed dose from the filter pressing with an infill of consolidated cake is in excess of radiation protection guide level in the radiated contaminated soil washing process and radiologic protection equipments are requested for its on-site trouble shooting. New control scheme, " Move on Sensing " technology was proposed and demonstrated its great potential as autonomous control system to be able to respond to interaction with environment in present paper. Simulation of decontamination work for typical machine trouble cases in filter pressing was conducted using the visual servoing robot system and the following results were obtained:

(1)Autonomic Move on Sensing robot with model reconstruction system by GA method behaves the same motion of human with contamination risk in decontamination procedures.

(2)Complete removal of residual contaminated soil model in filter press was achieved with infinite shape of residual contamination model by Move on Sensing method proposed in present paper

(3) Move on Sensing function composed of an integrated combination of passive sensing and adaptive manipulation was installed in hand and eye-vergence visual servo system and the smart decontamination robot model was demonstrated with both functionality and compactness.

Key Words: Recgnition Objects by Using Model Based, Visual Feedback Control

1. 緒 言

2011年3月11日の東北大震災以降,福島第一原子力発電所 事故により放射能汚染された区域では市町村単位で除染作業が 進む一方で,汚染地域内で大量に発生する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[1] にある.環境省^[2]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 [3][4][5] やその発生数量 を勘案すると今後の大きな課題となるため汚染地区での除染作 業が進む中で今後汚染土壌の減容化技術が希求されている.現 在石山らは^{[6][7]}大型固定型ならびに可搬型フィルタプレス(FP) 装置を用いて汚染土の減容化(固形化)を行おうとしている.し かし作業中の FP 装置周りの線量評価を行い,洗浄作業を安全 に行うための作業者の作業時被ばく線量評価や被ばく低減化対 策に関する検討を行った結果^[8], 大型固定型 FP において厚生 労働省の処理従業者に関するガイドライン値を超える作業被ば くが想定された.特に,図.1のように大型固定型 FP 装置の修 理・補修作業においてスクレーパーによる自動ケークかき落と し時のろ板盤上での汚染土壌かき残しが発生し、汚染土壌の放 射性物質は非常に高濃度なため人間による回収の作業を困難と させている.そのかき残しを回収するために本研究では被ばく 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 ト技術として、"Move on Sensing "という新しい方式のマニュ ピュレーション技術開発を行い,高濃度の放射性物質を模した 物質の回収模擬試験を通じてその実効性に関する検討を行った. また本報で提案する"Move on Sensing"システムは,任意不定 形状物体を認識する放射能測定カメラがロボットハンドに取り 付けられていることを想定し計測された汚染物体の位置・姿勢 に基づいてロボットが除染行動をとるよう実験を行った.



Fig. 1 Filter press machine conditions during soil consolidation

2.

不定形物体の認識方法

2.1 モデルベーストマッチングと遺伝的認識法を用いた不定形物体の形状認識と位置/姿勢検出方法

不定形物体の認識は遺伝的認識法 (Genetic Algorithm:以下 GA と呼ぶ)を用いる.遺伝的アルゴリズムは最適解を与える解 の候補を遺伝子で表現した個体を複数用意し,適合度(ここで は F(①))の高い個体を優先的に選択して交叉(組み換え)・突 然変異などの操作を繰り返しながら解を探索する^[11].この手法 の利点は、評価関数の可微分性や単峰性などの条件が満たされ ない場合であっても適用可能なことである.

遺伝子として $\underline{\Phi}_i$ (i=1,2,...,s) を与えて高い $F(\underline{\Phi}_i)$ の値を与える $\underline{\Phi}_i$ を遺伝的に優れた個体として保存しつつ進化させる.最も高い $F(\underline{\Phi}_i)$ の値を与える $\underline{\Phi}_i$ は優先的に次世代の遺伝子の形成に影響を与えるとともに,その遺伝子自身も維持されるエリート保存戦略を採用している.これによって真の解近くに次世代の遺伝子を再生産させることで $\underline{\Phi}_i$ は,次第に $F(\underline{\Phi}_i)$ の最大値を与える最適解 $F(\underline{\Phi}_{max})$ に近づく.さらに「1-step GA」 (11)[12][13] を用いることで,時変分布関数 $F(\underline{\Phi}(t))$ の大域的最適解 $\underline{\Phi}(t)$ を得ることができる.

3.1 除染模擬装置の構成

実験で認識を行う残留ケークのモデルは FP 装置のろ板盤に 固着残留したケークの疑似形状モデルとして,図.2 に示すよう に土壌粒子を模擬した赤色 BB 弾(ダイソー社製,直径:6[mm], 重量:0.12[g])を複数個集め,(a)楕円,(b)四角形,(c)三角形, (d)星形,(e)不定形状を図中に記入した寸法で用意した.これ らの残留ケークモデルが模擬除染手続で転がるなどして移動す る場合と移動しない場合に分けて実験を行うことで,除染作業 中の放射性物質の拡散を想定する場合と想定しない場合を模擬 することとした.拡散しない場合では,開口のある紙に幅の広 いテープを粘着面を上面にして開口部に設置し,BB 弾が粘着 面上で軽く接着されている状態として実験を行った.また拡散 を想定する場合は粘着テープを使用せず単に BB 弾を紙面上に 置いて任意形状のケークモデルを作成した.また図.2 中の(e) では楕円モデルによる対象物認識を GA の進化計算で得られた 第一回目の認識結果を白線の楕円で示している.

認識と回収作業を行うビジュアルサーボ装置は図.3 に示す. ハンドアイカメラは鉛直下方に向けて設置されており,同図(a) の認識対象物を撮像している.図の(b)と(c)にはハンドアイカ メラを装着したロボット(三菱重工業社製,7リンクロボット, PA-10A-ARM,型式 PA10A-300-0045)が写っている.本報での 除染シナリオでは,2次元平面内に広がる土壌汚染を想定して いるため,単眼固定式カメラから得られた画像を用いて汚染土 壌を模擬した BB弾任意形状の楕円モデルによる位置・姿勢計 測を行った.

また模擬汚染物質である BB 弾を吸引回収する装置としてロ ボットのハンド部先端に図.3(c) に示す様に掃除機(National 社 製,電気掃除機 MC-UIC,吸込み口形状は 500ml ペットボト ルの飲み口(内径 20mm,外形 24mm))の吸引口を鉛直下方に 向け取り付けた.(c)の吸引開口部は(b)の吸引装置に繋がって おり BB 弾を吸引し,吸引装置内の袋に蓄積された個数を計数 した.



(a) Ellipsoid (b) Rectangular (c) Triangle (d) Star (e) Arbitrary

Fig. 2 Prepared arbitrary-shaped target objects made by particles



Fig. 3 Target model for residual contaminated cake and decontamination system

3.2 ロボットによる除染作業手続き

除染作業シミュレーション手続きを図.4 のフローチャートに 示す.図中①「同定」では,脱水ケーク汚染物体の疑似モデ ルである BB 弾形状の楕円モデルによる近似形状の位置・姿勢 を同定する,②「残粒子確認」では残汚染物質の有無の判断を 楕円モデルと残留汚染物質の相関の度合いである適合度 $F(\underline{\Phi})$ によって判断し,0.2 < $F(\underline{\Phi})$ の場合に残留汚染物質ありと判 断する.③「認識レベルの確認」では,残留汚染物質認識強度 の高低の判断を行う.0.2 < $F(\underline{\Phi})$ < 0.3 の場合に残留汚染物 質が存在するが放射能強度レベルが低いと判断し,カメラ位置 を現在の位置よりを150[mm]下げた位置に移動させた後,① に還り再同定を行う.カメラの初期高さは750[mm]であり,カ メラの降下位置は,600[mm],450[mm]の計3段階を設定した. ④「除染」では,掃除機の吸引開口部を形状認識した BB弾の 直上に移動させた後,10秒間吸引することで除染作業をシミュ レートする.その後上記①に戻り,①~④を繰り返すことで 徐々に残っている赤色球状粒子は減少し,除染シミュレーショ ン作業は完了する.



Fig. 4 Flow chart for decontamination procedures including

4. 結果

4.1 残留ケークモデルの吸引回収

図.5-7 に吸引実験結果を示す. 図中赤枠はGA によりロボット に認識された吸引前の楕円モデルをそれぞれ示す.提案する除 染システムでは任意形状に変化する残留ケークモデルの位置・ 姿勢を GA の進化過程によって得られた楕円モデルによって代 表させる. 残留ケークモデルに対する吸引は図.5(a) の吸引前の 楕円モデルの中心に吸引位置が来るようにビジュアルサーボが 自律的に行った.図.5(b)に第1回目の吸引後の残留ケークモデ ルの様子を示す.これによると初期状態に対して吸引の結果ケー クモデル中心箇所の一部が吸引により消失しているとともに, 残留ケークモデルが三つに分割されていることがわかる.また, 同図には第1回吸引後に不定形変形を起こした残留ケークモデ ルに対して再度 GA により再認識された中央部での楕円モデル が示されている、その他、残留ケークモデルから離れたところに 吸引時の取りこぼしによる残留物(A)が同図左側の破線部に 観察された.これは,BB 弾吸引時に接着面から剥離する際の 粘着テープの戻りによりリコイルされた結果生じたものである. 第2回目の吸引後の残留ケークモデルの様子を図.5(c)に示す. これによると、第2回目吸引により第1回目吸引後に3分割さ れた箇所の中央部がほぼ消失していることがわかる.また,吸 引後の GA 楕円モデルが3分割されたうちの右側の部分を近似 しているとともに,第1回吸引後生じたリコイル粒子はそのま まであることがわかった.図.5(d)に第3回吸引後の残留ケーク モデルを示す.これによると第2回吸引時に認識された楕円モ デル部位では少量の BB 弾が残留していること, またリコイル 粒子はそのままであることがわかる.図.6(e)-(g) に第 4-7 回目 吸引後の残留ケークモデル状態を示す.前回の吸引後に GA に より認識された楕円モデル部位において確実に残留 BB 弾の残 数は減少しており,またリコイル粒子はそのままの状態で残存 していた.図.6(h)に第7回目吸引時の残留ケークモデルの状態



Fig. 5 Decontamination process of the target model: (a) initial state, (b) after 1st, (c) after second and (d) after third decontamination.



Fig. 6 Decontamination process of the target model: (e) after 4th, (f) after 5th , (g) after 6th and (h) after 7th decontamination.



Fig. 7 Decontamination process of the target model: (I) after 8th decontamination.

を示す.これによると残留ケークモデルの吸引は順調に行われ ているようだがリコイルによる新たな粒子(B)が発生したこ とが明らかとなった.図.7(I)に第8回目吸引後の残留ケークモ デルの状態を示す.これによると残留ケークモデルの吸引は順 調に進んでいるが,一方で吸引時にリコイル粒子(B)が残留 ケークモデルより遠方に移動していることがわかる.図.8に残 留ケークモデルに対して10回吸引を行った際の残留ケークモデ ル内の粒子数と吸引により除去された粒子数の変化を示す.こ れによると,吸引回数の増加に伴い残留ケークモデル内の粒子 数は減少していく傾向を示した.一方,各吸引回収された粒子 数は吸引初期に大きな回収率を示すが,吸引が進み残留ケーク モデル内粒子数の減少に伴い回収率が低下・飽和する傾向を示 した.

4.2 GA による残留ケークモデル近似

図.9 に図.5-7 に示す吸引作業によって不定形に変化した残留 ケークモデルに対して GA によるターゲットモデルの適合度 $F(\Phi)$ の進化過程を GA の世代に対してプロットしたものであ る.図中① - ④ は図.5 の (a)-(d) に対応し,⑤ - ⑧ は図.6 の (e)-(h) に対応し,⑨ は図.7 の (I) に対応している.これによる と,① - ③ までの吸引におけるターゲットモデル認識では比 較的高い適合度が得られているが,これは吸引除去作業の初期 段階では残留ケークモデルが比較的大きな形状であることが起 因している.④ 以降残留ケークモデルの分離が始まってからは, GA の認識に要する進化の世代数が増加している.また,さら



Fig. 8 Change in number of BB particles: Number of (a) residual in cake model and (b) vacuumed particles



Fig. 9 Convergence in genetic algorism for the contaminated target model

に吸引回数が増して BB 弾の分散ならびに低集積度化が進むに つれて適合度関数が低下する傾向が見られた.

5. 考察

5.1 負の偶発事象を伴った除染作業性と防止策

上記の実験結果より下記の減少が見られた.

(1)吸引後不定形変形された残留ケークモデルに対して再モデル化認識を行った後,継続して残留ケークモデルを解消する方向で除去作業を継続する.

(2) 吸引作業中に偶発的にも「取り残し」が生じる.

(3) この「取り残し」に対して残留ケークモデルを優先的に除去 作業対象とする傾向がある.

これは,除染作業に携わる人間が行う作業行為そのものである.すなわち,GAによる自己再生モデル型ビジュアルサーボロボットに除染作業行わせた場合,人間と同様の行為ならびにミスを犯すということが結論された.

そのため自律型ロボットによる図.5-7の残留ケークモデルの除 去の際に見られた「取りこぼし」の広域拡大の防止策を探った。 図.10(a) に示す残留ケークモデルの除去時に発生したリコイル粒 子群を模擬した「取りこぼし」モデルに対して,これらをロボッ トが自律的に再認識し,これらを全て回収するための検討を行っ た. この「取りこぼし」モデルは BB 弾を盤上に接着せず自由 に移動できる状態で不定形分散させたものである.図.10(a)-(e) において GA により獲得したターゲットモデルに従った除去に より順調に BB 弾の回収が進んでおり, その際回収と同時に希 薄化と分散も同時進行していることがわかる.図.11(f)の段階 でリコイル粒子群の希薄化と分散化が進んだため図中に示す様 に GA によるターゲットモデルの誤認証が生じた.これに対し 再度 GA の認識を試みた結果を図.11 に示す.その結果,小規模 な対象粒子群に対してそれぞれターゲットモデルを自動形成し 最終的にすべての拡散粒子を取り終えることができた.図.12 に 各吸引時の「取りこぼし」モデル内の BB 弾の数と除去時回収 された BB 弾数を示す. これによると 10 回の吸引ですべての 「取り残し」モデルの回収を終了した.図.8の固着された BB 弾 の場合と比較すると,吸引初期における回収率が「取り残し」 モデルの方が圧倒的に多いことが分かる.



Fig. 10 Decontamination of recoiled particles



Fig. 11 Decontamination of recoiled particles



Fig. 12 Change in number of BB particles: Number of (a) residual in recoiled model and (b) vacuumed particles



Fig. 13 Capture rate of random shape of residual cake models

5.2 不定形各種残留ケークモデルの完全回収

ロボットと残留ケークモデル間の接近距離を近接させた後, 様々な形状の残留ケークモデルに対して再度回収作業を実施し た.その結果を図.13 に示す.形状は不定形状,四角,楕円,星 型ならびに三角形である.これによるとどの形状においても10 回以下の吸引により100%の回収をすることができた.また, 不定形ならびに四角の場合,吸引初期における回収率が高いも のの不定形における収束が一番早く,これに対して四角形状で は最もその収束が遅かったことがわかる.一方,星型及び三角 形形状では初期吸引は中程度であるが収束に両者での差異はな かった.

6. 結言

今回の実験より以下のことが得られた.

(1) 不定形残留ケーク形状と楕円ターゲットモデルとの相関関数 を最大にする最適化問題の概念に基づき,遺伝的アルゴリズム (GA) 認識方法により不定形残留ケークの位置・姿勢をロボッ トが自律的に認識できることを示した.

(2) 上記楕円ターゲットモデルと不定形残留ケークをとの相関を

最大にする楕円モデルの位置・姿勢によって不定形残留ケーク の位置・姿勢を表現する任意形状物体の位置・姿勢の表現方法 を示した.

(3) 任意形状対象物の位置・姿勢の把握(Active sensing)とロ ボットによる吸引機能とを一体化すること,すなわち「見る」 と「取る」両作業を一体化することで不定形残留ケークに対し て適応的に吸引ポイントを探索しながら行う連続した除去作業 (Adaptive manipulation)の実現を可能にした.

(4) 除染作業が進むにつれ残留ケークの放射能レベルが下がる ことにより検出精度が劣化する.これを防ぐため放射能レベル が下がるとき,ハンドアイカメラと残留ケークとの距離を短く する能動的認識(Active sensing)を行うことで不定形残留ケー クに対して高精度で高い除去効果を実現でき,完全な除染作業 を完遂することができた.

(5) ビジュアルサーボのサーボ機能を「ターゲット探索」と「吸引作業」とに共用させることでロボットシステムの高機能性とコンパクト化を実現した。

(6)GA による不定形残留ケークの位置・姿勢を代表する楕円モ デルの進化計算過程を有する自律型ロボットによる除染模擬作 業において,あたかも人間が行う除染作業同様の行為プロセス を実現できることが明らかとなった.しかも人間が起こし得る 「取りこぼし」などの偶発事象が自律型ロボットにおいても起こ りえる.

(7) この偶発的に生じる「取りこぼし」事象を伴うフィルタプレ ス上の不定形残留ケークモデルの除染模擬作業において Move on Sensing 方式による完全除去を実現した.

文 献

- 日本原子力研究開発機構:"福島第一原子力発電所事 故に係る避難区域等における除染実証業務報告書", http://www.jaca.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report.html (平成24年3月26日)
- [2] 環境省: "中間貯蔵施設について", http://www.env.go.jp/jishin/rmp/attach/brief20120512-13.pdf (平成23年10月29日
- [3] 環境省:"ダイオキシン類対策特別措置法",http://law.egov.go.jp/htmldata/H11/H11HO105.html(平成 11 年 7 月 16 日法律第105号)
- [4] 環 境 省:"除 染 関 係 ガ イ ド ラ イ ン",http://josen.env.go.jp/material/download/index.html#s01-02 (平成 23 年 12 月第 1 版)
- [5] 石井慶造:"水洗浄による放射能セシウム汚染土壌の除 染方法について",第 34 回原子力委員会資料第 1 号 http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2011/siryo34/index.htm (平成 23 年 9 月 6 日)
- [6] 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 巻,802号(2013-6),pp.1106-1121.
- [7] 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,第 39 巻,第4号,pp.1-6(2013).
- [8] 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形化処理用フィルタブレス装置の性能評価"、日本機械学会論文集、第39巻、第4号、pp.1-6(2013)
- [9] F. Chaumette and S. Hutchinson: "Visual Servo Control, Part 1: Basic Approaches", IEEE Robotics and Automation Magazine, December(2006), pp.82-90.
- [10] G. Chesi, K. Hashimoto, D. Prattichizzo, and A. Vicino: "Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing: a switching approach", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 20, Issue 5(2004), pp.908-914.
- [11] M. Minami, J. Agbanhan, T. Asakura: "Robust Scene Recognition using a GA and Real-world Raw-image", Measurement, Elsevier, Vol.29, 249-267(2001)
- [12] J. Zhu, Y. Mae, M. Minami: "Finding and Quantitative Evaluation of Minute Flaws on Metal Surface Using Hairline", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.54, No.3(2007), pp.1420-1429.
- [13] M. Minami, 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, Vol.21, No.6(2009), pp.709-719.