

廃炉作業における原子炉内環境モデリング:
カメラ軌道推定にもとづく遠隔操作機器の移動記録生成
3D Modeling for Grasping the Internal State of the Nuclear Reactor in Decommissioning:
Generation of Motion Records of A Remotely Operated Robot
Based on Camera Trajectory Estimation

羽成 敏秀[†] 今淵 貴志[†] 川端 邦明[†]
Toshihide Hanari Takashi Imabuchi Kuniaki Kawabata

1. 緒言

昨年より、東京電力ホールディングス (TEPCO) 福島第一原子力発電所 (1F) の廃炉作業において原子炉格納容器 (PCV) 内から燃料デブリの試験的取り出しが開始された [1]。PCV 内は放射線量が高く、遠隔操作機器が用いられている [2]。作業者は遠隔操作機器に搭載されたカメラからの映像をもとに目視で作業空間の状況把握を行っている。また、記録された映像を元に作業計画の策定も行なわれている。しかし、廃炉作業で取得される映像データは複数台のカメラで 1 日あたり数時間撮影されるため、映像確認作業が作業員にとって大きな負担となっている。そこで、3 次元モデルを用いて作業空間を立体かつ俯瞰的に提示できることが可能となれば、作業空間内の構造物の把握が容易となり、作業員の負担低減につながると考えられる。そのため、我々は燃料デブリの安全かつ着実な取り出し作業に資する技術の開発を目的として、作業空間の迅速な 3 次元モデリングを行う手法の開発を進めている [3]。先行研究 [4] において、PCV 内調査で取得された動画データに対して 3 次元モデリングを適用した際に動画内の全ての画像フレームが必ずしも使用されるわけではないことが確認されている。これは、1F 廃炉作業で取得される動画は照明不足や放射線によるノイズ発生等の制約条件があり、その品質が 3 次元モデリングにあまり適していないためと考えられる。さらに、1F 廃炉作業では安全上の観点から周囲の状況を注意深く確認しながら遠隔機器の操作を行うため、移動と停止を繰り返し、類似の画像フレームが連続して記録されることがある。画像が低品質であること、類似の画像フレームが連続して存在することは、3 次元モデリングの復元精度を低下させ、生成される 3 次元モデルが分割される要因となる。そのため、生成された 3 次元モデルが分割されてしまった場合に、それぞれの位置関係を正しく補完する手法が必要となる。

そこで、分割された 3 次元モデルの位置関係を補完するために長時間撮影された動画データから撮影に使用した遠隔操作機器の移動を推定し、その移動記録を生成する手法の開発を行うこととした。本稿では、廃炉作業時の遠隔操作機器の動作を模擬した移動と停止を繰り返す動画に対して、カメラ軌道の推定にもとづく移動記録手法の基礎的な検証を行った結果について報告する。

2. 遠隔操作機器の移動記録手法

遠隔操作機器の移動を推定するために、遠隔操作機器に搭載されたカメラから取得できる動画データを構成してい

る画像フレームからカメラ軌道を求める。具体的には、ホモグラフィ行列の推定により、画像間の相対的な位置関係を連続的に推定することでカメラ軌道を導出する手法を採用することとした。

ホモグラフィ行列は 2 枚の画像間の相対関係を表しており、4 組の点の対応関係が分かれば求めることができる。ホモグラフィ行列の推定 [5] は、まず画像中の特徴点の抽出・対応付けを行う。対応付けられた特徴点が 4 組よりも多い場合、全てのペアで条件を満たすホモグラフィ行列を得ることは難しくなる。そのため、各点の写像誤差が最小となるホモグラフィ行列を探索するアルゴリズムによってホモグラフィ行列の計算を行う。得られたホモグラフィ行列から、2 枚の画像に対応するカメラの相対姿勢 (カメラポーズ) を推定する。

動画データの全画像に対して時系列順に上述の操作を繰り返すことによって、連続的なカメラ軌道を計算する。得られたカメラ軌道から、遠隔操作機器の移動を自動的に記録することが可能となる。これにより、カメラ軌道の推定にもとづく移動記録手法として動画データに対して適用可能か基礎的な検証を行うこととした。

3. 実験

ここでは、2.節で前述した移動記録手法を用いた基礎的な検証を行うための実験条件および実験結果について述べる。

3.1 実験条件

カメラ軌道の推定にもとづく移動記録手法を用いた基礎的な検証を行うため、日本原子力研究開発機構 梶葉遠隔技術開発センターの試験棟南側壁面付近で実験を行った。撮影にはアクションカメラ (GoPro 社製, Hero9 Black, 1920 pix x 1080 pix, 30 fps) を使用し、人が持った状態で歩行して実験用の動画を取得した。

ここで、カメラは人の進行方向に対して垂直に壁面方向に向け、直線的に移動させた。撮影時間は約 50 秒であり、取得された動画から抽出された画像は 1500 枚となった。また、提案手法が廃炉作業現場での遠隔機器に適用可能か検証を行うために移動・停止を含む間欠的な動作を模擬して撮影を行った。

ホモグラフィ行列を計算するために、画像特徴量として AKAZE (Accelerated-KAZE) [6] を用いて画像中の特徴点の抽出を行い、抽出された特徴点間のマッチングには総当たり法である Brute-Force matcher を用いることとした。各画像から抽出された特徴点のペアが選択され、それらのペアの位置関係の誤差が最小となるホモグラフィ行列を求めるために、外れ値を含むデータに対してロバストなモデル推定

[†] 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

が可能である RANSAC (RANdom SAmple Consensus) アルゴリズム [7] を適用することとした。各手法は OpenCV4 を用いて実装し、Python3 で実行した。これらのホモグラフィ行列の推定計算の実行環境として Apple MacBook Pro (CPU: Core i9, 8-core, メモリ: 64 GB RAM) を用いた。

3.2 実験結果

取得した動画から抽出した画像の一例を図 1 に示す。廃炉作業現場での遠隔機器に適用可能か検証を行うために、今回取得した動画は約 10 秒ごとに移動と停止を繰り返した。取得時間が 50 秒であることから、移動区間 3 回、停止区間で構成されている。これらの抽出された画像に対して、特徴点の抽出・対応付けを行い、画像間のホモグラフィ行列の計算を行い、画像の相対的な位置関係を連続的に求めることでカメラ軌道を推定した。得られたカメラ軌道の推定結果を図 2 に示す。図中の赤線がカメラ軌道の推定結果であり、x 軸が進行方向、y 軸が奥行き方向、z 軸が高さ方向をそれぞれ表している。この時、それぞれの軸方向の大きさは物理スケールではなくホモグラフィ行列の計算時に求められたピクセルベースのスケール情報であることに注意が必要である。図 2 より、カメラ軌道はピクセルベースの座標空間上に進行方向に対して直線的にプロットされていることが確認できる。ここで、カメラ軌道は連続的に推定できているが、この結果からは移動区間、停止区間の判別ができない。

そこで、カメラ軌道の推定結果からカメラの積算移動量を計算し、移動区間と停止区間の判別が可能か検証を行った。推定されたカメラ軌道から移動量を計算して時系列にプロットしたものを図 3 に示す。横軸が時間、縦軸が移動開始地点から終了地点までの移動量を 1 として無次元化を行った積算移動量を表している。図より、11 秒から 21 秒および 32 秒から 42 秒の区間で積算移動量が増加せず一定となっていることが確認できる。これは、約 10 秒の移動区間 3 回およびその間の停止区間 2 回が積算移動量から判別可能であることを示している。

以上の事から、連続的に取得された画像からホモグラフィ行列によってカメラ軌道を求め、遠隔操作機器の移動を推定することは十分に可能であることが確認できた。今後は、より複雑なカメラ軌道の推定が可能であるかの検証が必要である。また、1F 廃炉作業で取得された動画に対して適用性の検証を行っていく。

4. 結言

我々は、1F 廃炉作業において長時間撮影された動画データから撮影に使用した遠隔操作機器の移動記録手法の開発を行っている。本稿では、カメラ軌道の推定にもとづく移動記録手法の基礎的な検証を行った結果について述べた。得られた結果より、2 枚の画像のペアから求めたホモグラフィ行列にもとづいて逐次的にカメラポーズを推定することで連続したカメラ軌道を記録可能であることが確認できた。

今後は、1F 廃炉作業で取得された動画への適用性検証を行い、実用化に向けた課題の抽出を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 JPJA23P23813888 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] TEPCO, “福島第一原子力発電所 2 号機燃料デブリ試験的取り出し作業 (2 回目) における把持作業の完了について”, https://www.tepco.co.jp/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2025/1h/rf_20250417_2.pdf (2025 年 6 月参照).
- [2] TEPCO, “ロボット技術の活用”, <https://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/index-j.html> (2025 年 6 月参照).
- [3] 中村 啓太ら, “動画画像からの特徴量抽出結果に基づいた高速 3 次元炉内環境モデリングに向けた研究 -研究概要および取り組みの紹介-”, 第 23 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 (2023).
- [4] 今測 貴志ら, “PCV 内取得動画画像に対するシーン分割による構造物の立体復元”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2025 (2025).
- [5] Z. Zhang, A.R. Hanson, “3D Reconstruction based on homography mapping”, Proceedings of ARPA Image Understanding Workshop (1996).
- [6] F. Pablo et al., “Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces”, Proceedings British Machine Vision Conference 2013 (2013).
- [7] R. Raguram et al., “Usac: A universal framework for random sample consensus”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 2013 (2013).



図 1 取得画像の一例

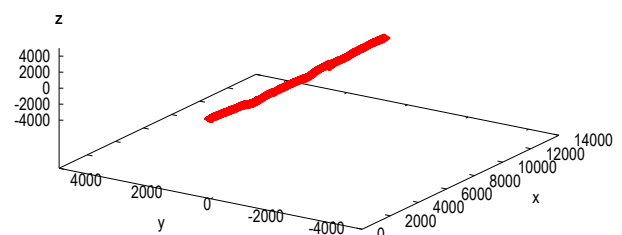


図 2 カメラ軌道の推定結果

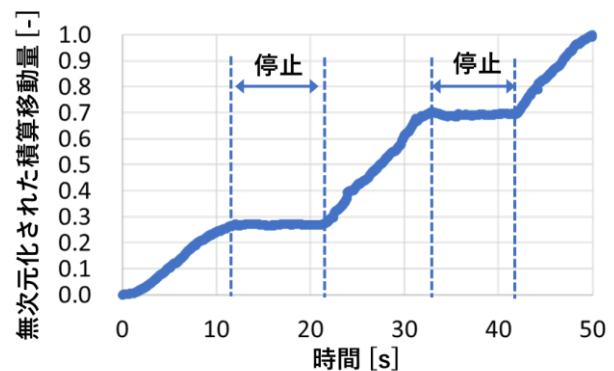


図 3 カメラ軌道の積算移動量