

α 汚染遠隔計測における 3 次元空間再構築技術の開発

Development of 3D reconstruction for remote alpha contamination measurement

東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	坂本 直弥	Naoya SAKAMOTO	Member
東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	大甕 舜一朗	Shunichiro OMIKA	Member
東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	三浦 崇広	Takahiro MIURA	Non-member
東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	久米 直人	Naoto KUME	Non-member
東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	松崎 謙司	Kenji MATSUZAKI	Non-member
東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	宮原 康文	Yasufumi MIYAHARA	Non-member
東芝エネルギーシステムズ (株)、 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構	高木 純一	Junichi TAKAGI	Non-member

Abstract

Alpha Camera has been developed to check the alpha contamination of solid wastes generated during decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (1F). A lot of measurements are needed to reveal the alpha contamination distributions due to the narrow field of view of the Alpha Camera. Therefore, in this paper, we propose a novel approach which reconstructs the divided measurement data in a three-dimensional space to identify the contaminated area easily.

In primitive demonstration using new reconstruct algorithm, 3D model was constructed in 98 seconds. It was fast enough to grasp the alpha distribution on time.

We have achieved visualization of alpha contamination distribution that contributes to planning of dismantling and decontamination work.

Keywords: 1F, Decommissioning, Alpha contamination, Alpha Camera, 3D reconstruction

1. 開発背景

福島第一原子力発電所(以下、1F)は震災による事故に伴い放射性物質が飛散しており、調査により原子炉建屋内の一部にα核種の付着が確認されている。α汚染の可能性のある廃棄物に対しては、スミヤ測定を行い、一定以上の汚染が検出された場合は分別した上で保管容器に収納・保管している。しかし、全ての廃棄物をスミヤ測定する場合、測定に係る時間が膨大になり、測定作業を行う作業員の被ばくが増加する懸念がある。

そこで、遠隔から解体前建屋など建造物の表面α汚染分布を測定し、解体や除染工事に寄与できる汚染評価技術を開発している。表面α汚染分布を検出する装置としてアルファカメラと呼ばれる装置を開発している[1]。アルファカメラの視野は狭いため、1Fの現場で使用する際

には対象を分割して計測する必要がある。そこで、分割された計測データを3次元空間で再構築する技術を開発したので報告する。

2. アルファカメラによる計測

2.1 計測フロー

アルファカメラによる計測は、対象を床面、壁面、天井面とし、計測と移動を繰り返す計画である。作業員の被ばくを低減するために、計測場所に装置を設置した後は遠隔地から操作して計測する。検討中の計測対象毎の計測フローを Fig.1 に示す。

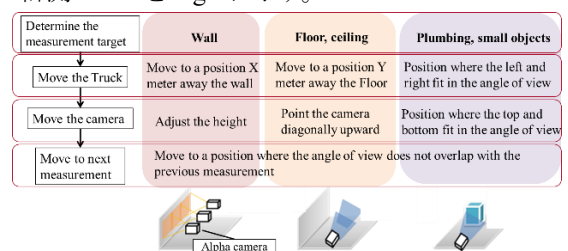


Fig.1 Measurement flow

連絡先: 坂本 直弥、〒183-8511 東京都府中市東芝町1、
東芝エネルギーシステムズ (株)、
E-mail: naoya2.sakamoto@toshiba.co.jp

2.2 システム概要

広範囲の表面 α 汚染分布を計測するためには、アルファカメラを移動しながら撮影方向を変更し、分割して計測する必要がある。そこで、パン・チルト回転動作と昇降動作が可能な運搬台車装置を試作して Fig.2 に示す計測システムを構築した。アルファカメラには撮影方向以外の放射線の影響を受けないように遮蔽体を組み込んでおり重量が大きいので、パン軸およびチルト軸の軸心がアルファカメラの重心位置近傍を通るように設計することで安定した回転動作ができるようにした。また、現場での運用性を考慮して電気工事が必要な AC200V ではなく、AC100V のコンセントから給電して駆動できるようにした。昇降機能には市販の電動式リフターを活用したが、手元スイッチで昇降操作する仕様であったため、昇降高さをワイヤ式のポテンショメータで計測し、目標高さに位置決めできるように制御装置から操作できるように改良した。パン・チルト機構およびリフター昇降の制御装置は台車上に搭載し、遠隔地にある操作用 PC からイーサネット経由で操作できるようにした。計測時のパン・チルト角度および昇降高さ等の位置決めに係る測定情報は時刻情報とともにファイルに記録している。

開発したアルファカメラには、 α 線強度を計測するセンサのほか、距離補正のために距離画像とカラー画像を同時に取得可能な TOF (Time Of Flight) カメラを組み込んでいる。

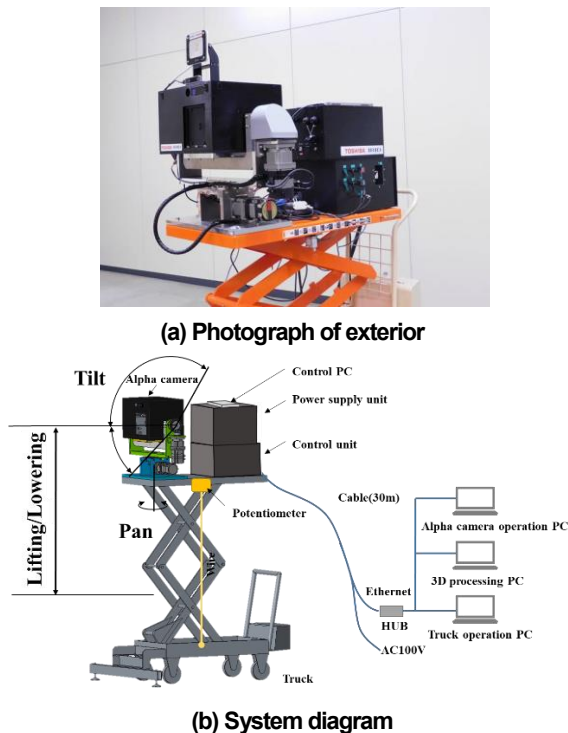


Fig.2 Measurement system

2.3 現場適用における課題

開発したアルファカメラの視野角は $\pm 13.6^\circ$ である。しかし、この視野では1回の計測で得られる範囲が狭く、例えば1m先の $2m \times 2m$ の範囲を計測するには少なくとも16回計測する必要がある。そのため、計測漏れを調べるには大量のデータを確認する必要があり、確認作業に時間がかかる、分割して計測されているために全体像の把握が難しい、などの課題があり、計測したデータを集約し、俯瞰的に確認するための技術が求められる。そこで、複数の計測データを3次元的に再構成する技術を開発した。

3. 3次元空間再構築技術について

3.1 3次元空間再構築技術の概要

計測したデータを集約し、俯瞰的に確認するための技術として、パノラマ合成がある [2]。この方法は、合成したパノラマ画像を任意の画角で俯瞰的に見ることができる。しかし、今回の運搬台車装置では、パン、チルトの回転移動に加え、昇降や台車自体の移動といった並進移動を行う。パノラマ合成では回転移動と並進移動を行う場合、視差が生じるためパノラマ合成は困難である。

今回、回転移動と並進移動両方を組み合わせた移動に対応する合成技術として、取得したデータを3次元点群に変換し、3次元点群を運搬台車装置の移動量に応じて3次元空間で再構築していく技術を開発した。処理の流れを Fig.3 に示す。これにより、すべての計測データを3次元空間上で1つのデータに集約することができる。また、任意の画角、位置から計測結果を視認することができる。

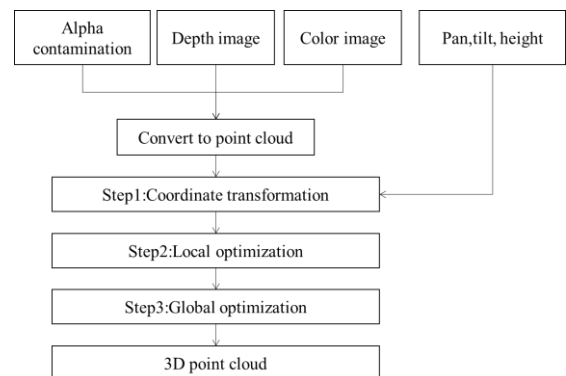


Fig.3 Processing flow

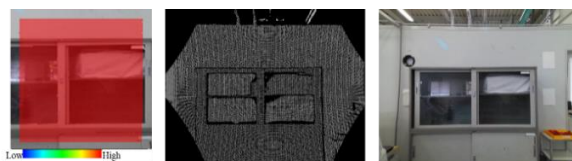
3.2 3次元点群への変換

本システムでは1回の計測により、Fig.4 に示すアルファカメラによる α 線強度、TOFカメラによる距離画像とカラー画像が得られる。なお、Fig.4 に示す α 線強度は表示用のサンプルデータである。

各カメラは運搬台車装置に固定されているため、カメラの位置関係をあらかじめ計測しておくことで、距離画像と α 線強度、距離画像とカラー画像を画素単位で対応づけることが可能である。

距離画像は各画素に距離情報が入っているため、カメラ画角と組み合わせると各画素の3次元座標が得られ、対応づけた情報とともに距離画像を3次元点群に変換することができる。

これにより、Fig.4 のデータを α 線強度とカラー情報を保有する Fig.5 に示すような3次元点群へ変換することを可能にした。

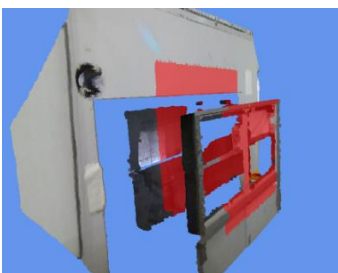


(a) Alpha intensity (b) Depth (c) Color

Fig.4 Camera images



(a) Front view of color and alpha intensity point cloud



(b) Side view of color and alpha intensity point cloud

Fig.5 Generated point cloud

3.3 3次元空間での再構築

変換した3次元点群は、それぞれ計測した位置を原点とする3次元点群になっている。そのため、計測した位置を推定し、3次元点群間の位置合わせを行わなければ、1つの3次元点群に集約することができない。これに対して、運搬台車装置に保存されたパン・チルト角度および昇降高さを利用し、アルファカメラの移動量を算出し、3次元点群の位置合わせを行うこととした。

また、位置合わせ精度の向上のため、計測地点が異なる

点群間で最近傍の点同士をペアとし、ペア間の距離が最小となるような3次元点群間の移動量を推定し、移動後に再び最近傍の点を求める演算を繰り返して移動量が収束するまで反復計算する反復最近接点 (Iterative Closest Point : 以下、「ICP」という) アルゴリズム[3]を用いて、位置合わせの最適化処理を行うこととした。

本処理の確認試験として、パン角度を3条件、チルト角度を5条件、昇降量を3条件組み合わせ、合計45条件で自社の実験室を計測した。本パラメータは、アルファカメラの視野角 $\pm 13.6^\circ$ を考慮し、隣接する計測位置で視野の一部が重なり合うように設定した。計測では、運搬台車装置を用いてアルファカメラを移動させている。計測対象と本処理による結果を Fig.6 に示す。再構築時の位置合わせに誤差が生じると、同じ構造物が異なる場所に投影されるので二重に見えてしまう。本処理結果では窓枠や仕切りといった構造物、床面にある通路を示す黄色線は二重に見えておらず、再構築が可能であることを確認した。



(a) Measurement area



(b) Result of 3D point cloud

Fig.6 Registration result

3.4 現場に向けた処理フロー構築

現場では、後戻り作業低減のために計測できていない領域がないか、計測後すぐに結果を確認する必要がある。しかし、Fig.6 の3次元再構築にはCPU6コア、メモリ16GBのPCで約12時間を要していた。そのため、3次元再構築処理を3段階に分ける構成とした。ステップ1は運搬台車装置に保存されたパン・チルト角度および昇降高さによる移動量算出と位置合わせまでを行う。ステップ2はICPアルゴリズムによる最適化を行うが、新規に計測されたデータのみを対象とし処理の高速化を

図る。ステップ3は全計測データに対してICP処理を適用し位置合わせを行う構成とした。また、それぞれのステップで結果を出力するようにしている。

これにより、ステップ1では計測直後から合成結果を簡易的に確認することが可能になる。また、ステップ2は最小の計算量で位置合わせを行うため、次の計測準備中に再構築結果を確認することができる。さらに、ステップ3はオフライン処理で行うことにより、より高い精度で再構築結果を得ることが可能である。

各ステップの処理時間を3.3のデータ用いて計測した。ステップ1は10秒以下の処理時間であることを確認した。また、ステップ2では、1か所の計測データを追加する場合の処理時間が平均98秒、最大で161秒であり、現場で結果を確認するには十分短い時間であることを確認した。

4. 性能確認試験

開発した3次元空間再構築技術により、 α 線強度の計測結果を重畳させて表示可能か検証するために、実際の α 線源を用いた計測を実施した。アルファカメラの計測は、 α 線が空気中の窒素に衝突することで発生する微弱な紫外線を検出するため、暗所で行う必要がある。そこで、約1.6m×5.2mの暗室内にアルファカメラおよび4個の α 線源をFig.7のように配置した。アルファカメラの向きをパン方向に20°刻みで4回変更し複数回計測を実施し、3次元空間での再構築を実施した。結果をFig.8に示す。 α 線源#1はTOFカメラに対して角度が大きいため距離情報が得られず、 α 線強度を補正することができないため、 α 線強度が表示されていない。これは、対象とTOFカメラを正対に近づけることで解決できるため、計測手順を反映することとした。また、#4は線源が弱いため α 線強度は背景と同色になっている。#2および#3については、3次元空間上で#2が壁面に、#3がパネルに存在していることが確認できる。これにより α 線強度とその位置関係を3次元空間で確認することができ、本技術により再構成ができることを確認した。



Fig.7 Positional relationship between Alpha Camera and sources

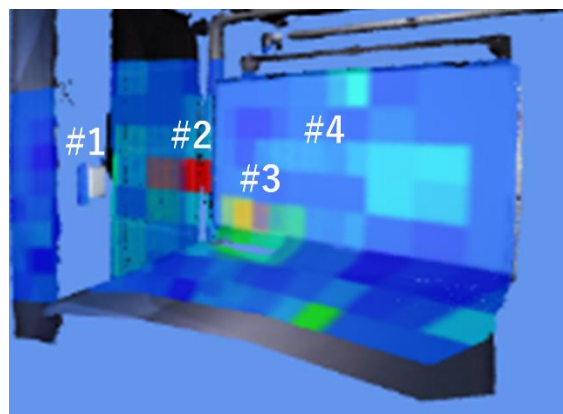


Fig.8 Result of alpha intensity of 3D point cloud

5. まとめ

表面 α 汚染分布の可視化に向けて、広い空間を分割して計測した場合に生じる課題に対して、3次元点群を用いた3次元空間再構築技術を開発した。

今後の開発課題として、再構築時の位置合わせの誤差がある。この位置合わせは、対象の形状に特徴的な変化がある事が前提となっている。しかし現場では、形状変化がない壁面等が存在する可能性があり、位置合わせができず誤差が発生する可能性がある。そこで、今回使用していない、カラー情報など、より多くの情報を用いて詳細な位置合わせを可能にするため、より高精度な3次元点群の再構築技術を開発していく。

本研究開発は、経済産業省 資源エネルギー庁の平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」の一部として、技術研究組合 国際廃炉研究開発機構の組合員である東芝エネルギーシステムズ株式会社が実施した内容の一部である。

参考文献

- [1] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構、“「平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発）」2019年度成果”、pp40-73、2020
- [2] 画像情報教育振興協会、“デジタル画像処理 [改訂第二版]”、画像情報教育振興協会、2020
- [3] 増田、“ICP アルゴリズム”、研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)、Vol.2009-CVIM-168、No.23、pp.1-8、2009