

拡張現実感を応用した解体廃棄物の 運搬・仮置き作業検証支援*

Verification Support for Conveyance and Temporary Placement of Dismantling Waste Using Augmented Reality

石井裕剛**
Hirotake ISHII

Key words

augmented reality, nuclear power plant, dismantling planning support, 3-dimensional model, spatial clearance verification

1. はじめに

視覚を対象とした拡張現実感¹⁾は、位置や方向などの三次元の情報をユーザに直観的に伝えることができるため、古くからプリンタのメンテナンス支援²⁾などの作業支援に応用することが提案されてきた。しかし、主にトラッキング技術（ユーザの位置と方向をリアルタイムで計測する技術）のコストパフォーマンスが十分ではなかったことが原因で、拡張現実感に関する研究開発が盛んに行われるようになった2000年代以降も、しばらくの間は、トラッキングの性能が低いことがあまり問題とならないエンターテインメントの分野に応用されるにとどまっていた。しかし、近年、パソコンやスマートフォンの処理速度が向上したことにより、計算量が多い複雑なアルゴリズムをリアルタイムで実行できるようになったため、あらかじめ特別に整備された環境でなくても、安価なカメラのみを用いたトラッキング²⁾³⁾を利用することが可能となり、拡張現実感を作業支援に応用する試みが再び盛んになってきている⁴⁾⁵⁾。

筆者らは、長年、日本原子力研究開発機構と共同で、拡張現実感を原子力発電プラントの保守作業や解体作業の支援に応用する研究を行ってきた⁶⁾⁸⁾。本解説では、これらの共同研究の中から、解体廃棄物を運搬・仮置きする作業の計画立案を支援するシステムの研究開発について紹介する。

2. 運搬・仮置き作業検証支援システム

運転が終了した原子力発電プラントは解体する必要があるが、一部の機器や配管には放射能が残存しているため、一般のビルや工場の場合のように重機を用いて大規模に解体することはできない。事前に詳細な作業計画を立案し、除染を進めながら電動カッターなどの比較的小型の機械を用いて一つひとつ手作業で解体する必要がある。しかし、解体対象物が高所や狭隘な場所にあり、その場での細断作

業が難しい場合など、解体対象物をいったん土台から切り離し、別の場所に運搬した後に、細断作業を実施する方が望ましい場合がある。このような場合、周囲の環境に干渉せずに解体対象物を運搬できるかどうかをあらかじめ確認し、干渉する場合は、どの箇所が干渉するのかを確認し、その干渉する箇所を先に解体する必要がある。また、細断後の機器は、すぐにはプラント外に搬出することはできず、汚染の度合いに応じて適切に処理するために、一つひとつ放射能の残存レベルを計測する必要がある。そのため、細断後はしばらくの間、プラント内の適切な場所に仮置きする必要があるが、仮置きできる場所は限られているため、細断後の機器を仮置きする十分なスペースがあるかどうかを事前に確認する必要がある。しかし、解体対象物やプラント内の通路、仮置き用のスペースは複雑な形状をしている場合が多く、これらを確認するためには、多くの労力と経験が必要である。

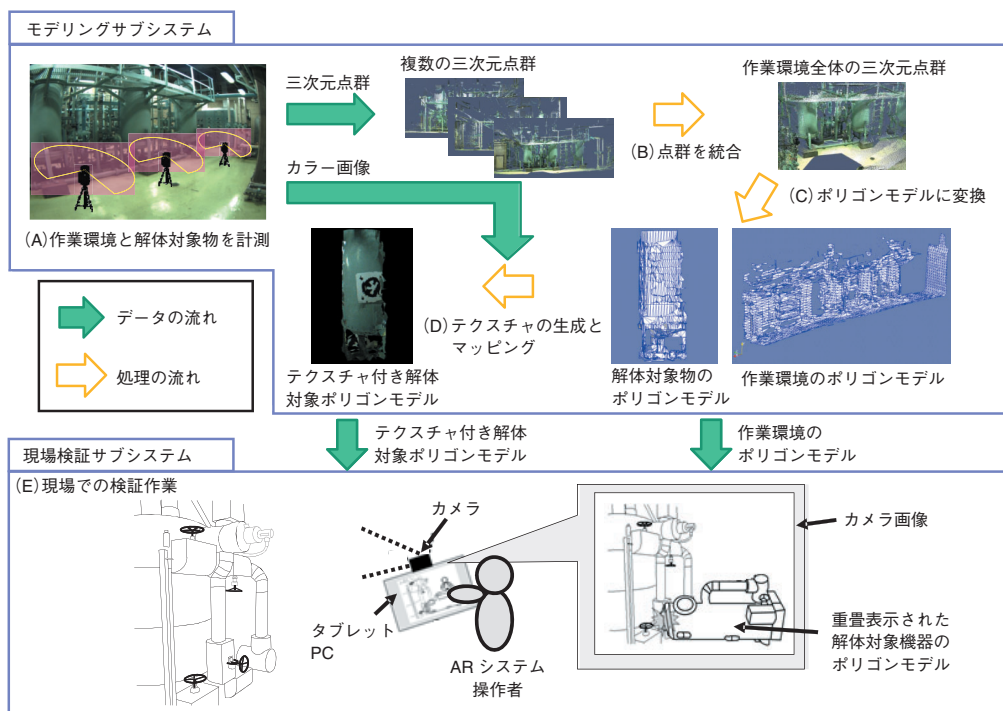
そこで、筆者らと日本原子力研究開発機構の研究グループは、これらの確認作業を支援するため、環境モデリング技術と拡張現実感を用いた解体廃棄物の運搬・仮置き作業検証支援システムを開発してきた。本システムでは、実際の解体作業現場で、拡張現実感を用いて解体対象物の運搬や仮置き作業をシミュレーションすることができ、その際、解体対象物と周囲の環境との干渉箇所を確認することができる。

本システムは、図1に示すように、モデリングサブシステムと現場検証サブシステムで構成される。

モデリングサブシステムでは、事前準備として、作業環境と解体対象物を計測し、これらの実スケールの三次元ポリゴンモデルを作成する。解体対象となるプラントは、設計・建築から長い年月が経過しており、いわゆる青焼きのみが残っていて、詳細なCADデータが存在しない場合が多い。また、古い機器が撤去されたり新しい機器が設置されたりした際に、CADデータが完全には更新されない場合もあり、作業環境や解体対象物の詳細な形状を知るためには、あらためて計測する必要がある。モデリングサブシステムでは、図1の上部に示すように、まず、(A)作業

*原稿受付 平成29年3月17日

**京都大学大学院エネルギー科学研究科（京都市左京区吉田本町）



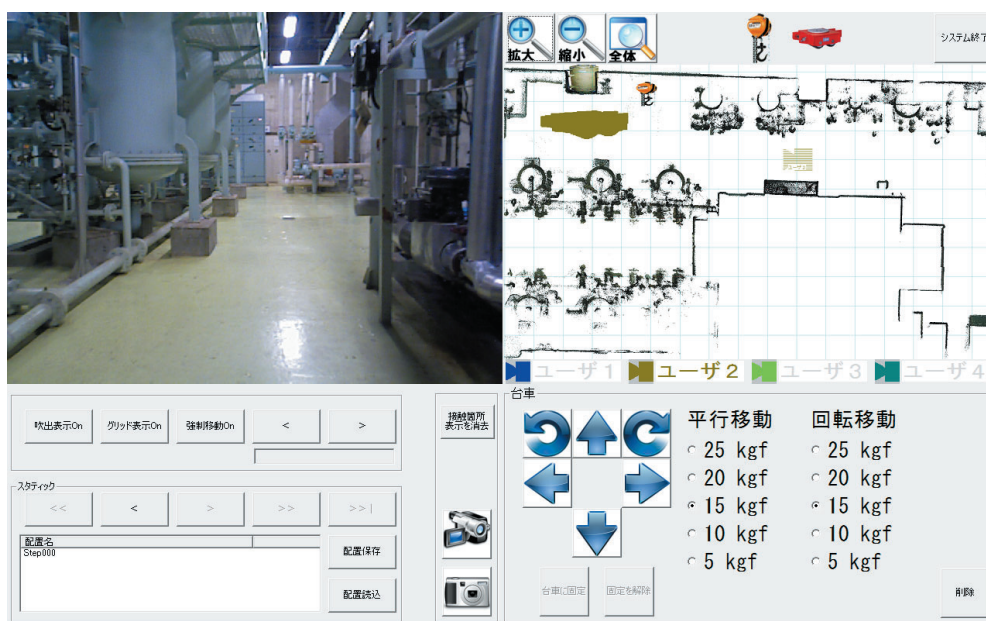
©2017 Japan Atomic Energy Agency

図 1 解体廃棄物の運搬・仮置き作業検証システム

環境内の複数の場所から三次元レーザスキャナとカメラを用いて作業環境や解体対象物を計測し、これらの三次元点群（対象の表面形状を表す三次元座標の集合）とカラー画像を取得する。その後、(B) 複数の三次元点群を一つの三次元点群に統合し、(C) 作業環境と解体対象物を切り分け、それぞれ三次元ポリゴンモデルに変換する。そして、(D) カラー画像を用いて解体対象物の三次元ポリゴンモデルのテクスチャを作成する。なお、(B) の複数の三次元点群を一つの三次元点群に統合する処理には、Iterative Closest Point (ICP) アルゴリズムを用いるが、ICP アルゴリズムを用いるためには、三次元点群間の相対位置の初期値を適切に設定する必要がある。ICP アルゴリズムの初期値を自動的に設定する手法として、三次元特徴量を用いて点群間で物理的に同じ箇所を見つけ、それを基に点群間の相対位置を求める手法も存在する⁹⁾が、三次元特徴が少ない環境や、似た形状が多数存在する環境では使用できない場合もあるため、完全に自動化することは難しい。そこで、本モデリングサブシステムでは、環境に画像処理により識別可能なマーカを複数貼り付けて計測し、このマーカを基準にして ICP を実行する際の初期値を自動的に設定することを可能にしている。ただし、作業環境が狭隘で見通しが悪い場合など、マーカを計測できない場合もあるため、GUI のツールを用いて手作業で初期値を設定することも可能にしている。また、(C) の作業環境と解体対象物を切り分ける作業も、GUI のツールを用いて行えるようにしている。

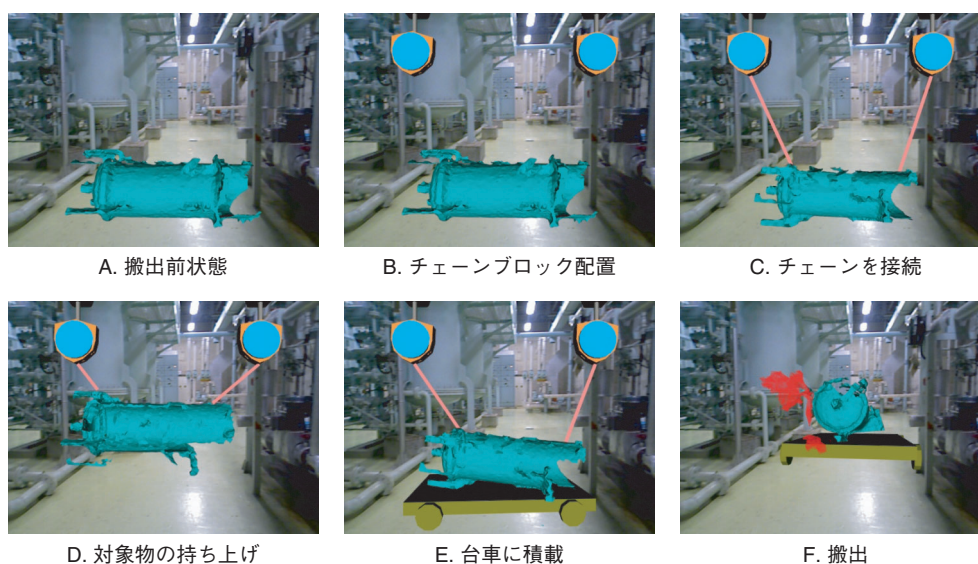
一方、現場検証サブシステムでは、モデリングサブシステムで作成した作業環境と解体対象物の三次元ポリゴンモ

デルを用いて、実際の解体作業現場で運搬や仮置き作業のシミュレーションを実行し、解体対象物を運搬した際や、仮置きした際の周囲の環境との干渉の状態を確認する。ハードウェアとしては、カメラを備えたタブレット PC を使用し、カメラで撮影して得た作業環境の映像の上に、解体対象物や運搬・仮置きした際の干渉箇所を重量表示する。解体対象物の運搬や仮置きのシミュレーションをすべて仮想空間内で実行する（したがって、解体作業現場ではなくオフィスで実行する）ことも技術的には可能であるが、解体作業現場で拡張現実感をを用いて実行することにより、実際の解体作業現場のどの箇所が干渉するのかを、より直観的に確認できる。図 2 に現場検証サブシステムのインタフェースを、図 3 に現場検証サブシステムを使用した運搬作業のシミュレーションの例を示す。ユーザは、タブレット PC 上のタッチ操作で、チェーンブロックや台車等を配置・操作する。チェーンブロックと解体対象物は、タッチ操作でチェーンを介して接続することができ、チェーンブロックの牽引力を調整することにより解体対象物を持ち上げることができる。また、チェーンブロックを用いて持ち上げた解体対象物は、台車に載せることができ、台車の駆動力を調整することにより解体対象物を移動させることができる。牽引力や駆動力に応じた解体対象物の動きは、物理シミュレータを用いてリアルタイムに計算される。物理シミュレータを用いた計算は、実世界での動きを完全に模擬したものではないが、これによりチェーンブロックや台車を用いた大まかな運搬作業をシミュレーションできる。また、解体対象物を運搬・仮置きした際の周囲の環境との干渉箇所は、モデリングサブシステムを用いて作成し



©2017 Japan Atomic Energy Agency

図2 現場検証サブシステムの画面例



© 2017 Japan Atomic Energy Agency

図3 現場検証サブシステムを用いた運搬作業のシミュレーション

た作業環境のポリゴンモデルを基に検出され、図4に示すようにペンキを模したCGとして実世界の作業環境の映像に位置を合わせてリアルタイムに重畳表示される。ユーザは、この重畳表示されたペンキを参照することにより、解体対象物を運搬したり仮置きしたりした際に、周囲の環境のどの箇所が干渉するかを直観的に理解できる。

3. 実用化に向けての課題

2章で紹介した運搬・仮置き作業検証支援システムは、実際に原子力発電プラントの解体作業に従事している作業員の方に試用していただき、良好な評価を得ているが、日常作業のツールとして恒常的に使用できるようにするため

には、モデリングサブシステムを改良する必要がある。

本システムでは、作業環境や解体対象物の三次元ポリゴンモデルを作成する必要があるが、検証作業を適切に実施するためには、作業環境や解体対象物を抜け落ちなく計測し、現場を正しく反映した三次元ポリゴンモデルを作成する必要がある。最近では、高性能で安価な三次元レーザスキャナが市販され、高精度で密な三次元点群を取得することが可能になっているが、レーザスキャナは設置した場所から直接見える範囲しか計測できず、他の物の陰になっている箇所などは計測できない。そのため、作業環境や解体対象物をさまざまな方向から計測し、それらを一つに統合する必要がある。しかし、プラント内部には、狭隘で複雑に

カメラの映像の上に重畳表示された
干渉箇所を示すベンキを模した CG



©2017 Japan Atomic Energy Agency

図4 拡張現実感を用いた干渉箇所の重畳表示の例

入り組んだ領域や、足元が平面ではないためにレーザスキャナを設置することが困難な領域も存在し、常に適切な場所から計測できるとは限らない。さらに、レーザスキャナの設置場所を決定し、作業環境や解体対象物を抜け落ちなく計測できるようになるためには、ある程度の経験を積む必要がある。そのため、今後の実用化に向けて、過去の計測結果に応じてレーザスキャナの次の設置場所を推薦する機能を実現するなど、誰でも適切な三次元点群を取得できるようにする必要がある。

一方、作業環境や解体対象物の三次元点群を取得する方法として、手持ちビデオカメラの映像から三次元点群を生成する手法もある。特に、通常のカラー画像に加えてピクセルごとにカメラから被写体までの距離も取得できる RGB-D カメラを用いた手法¹⁰⁾は、近年、レーザスキャナを用いた場合と比べても遜色ない三次元点群を取得することが可能となっている。RGB-D カメラは低消費電力で小型の物も市販されており、狭隘な領域に持ち込んで撮影することも可能である。しかし、これらの手法で安定して三次元点群を取得するためには、カメラを低速で移動させる必要がある。また、単色の平面や似た形状が繰り返し現れる環境では、三次元点群の取得に失敗する場合があるなど、成否が環境に左右され、常にこれらの手法で三次元点群を取得できるとは限らない。さらに、撮影対象が複雑な形状をしている場合には、抜け落ちなく計測できたかどうかを判断することが難しいという問題もある。そのため、今後、この手法を採用する場合でも、カメラの動かし方を誘導する機能を実装するなどの工夫が必要である。

また、人の手によらずに全自動で環境の三次元点群を取得する方法として、カメラを搭載した自走ロボットやドローンを使用することも考えられる。しかし、段差が多いプラント内では自走ロボットを使用することは難しく、また、プロペラが高速回転するドローンは、安全性の確保の

問題だけでなく、風により粉塵が飛散する可能性もあり、特に放射能が残存している環境では使用することが難しいという問題がある。そのため、作業環境や解体対象物の三次元ポリゴンモデルの取得を全自動化することは、しばらくは困難であると考えられる。

4. お わ り に

本解説では、筆者らと日本原子力研究開発機構との共同研究の成果の一つである拡張現実感を用いた解体廃棄物の運搬・仮置き作業検証支援システムについて紹介した。このようなシステムを実用化するためには、「使用する可能性がある場所ではどこでも、使用する可能性がある人には誰にでも使用できるようにすること」が大切であるが、現時点では、作業環境や解体対象物の三次元ポリゴンモデルを作成するためのシステムが「どこでも誰でも使用できるシステム」にはなっていない。今後は、さらに小型化・軽量化されることが見込まれる RGB-D カメラを用いた手法を採用し、インタフェースを工夫することにより、この問題を解決していく予定である。

参 考 文 献

- 1) S. Feiner, B. Macintyre and D. Seligmann: Knowledge-based augmented reality, Communications of the ACM, **36**, 7 (1993) 53.
- 2) J. Engel, T. Schöps and D. Cremers: LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM, Proceedings of European Conference on Computer Vision, (2014).
- 3) R. Mur-Artal, J.M.M. Montiel and J.D. Tardós: ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, IEEE Transactions on Robotics, **31**, 5 (2015) 1147.
- 4) D. Stanimirovic, N. Damasky, S. Weibel, D. Koriath, A. Spillner and D. Kurz: A mobile augmented reality system to assist auto mechanics, 2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, (2014) 305.
- 5) H. Wuest, T. Engekle, F. Wientapper, F. Schmitt and J. Keil: From CAD to 3D Tracking—Enhancing & Scaling Model-based Tracking for Industrial Appliances, 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, (2016) 346.
- 6) 石井裕剛, 卞志強, 関山友輝, 下田宏, 吉川榮和, 泉正憲, 兼平宜紀, 森下喜嗣: 原子力発電プラントの現場作業支援のための拡張現実感用トラッキング手法の開発と評価, 保全学, **5**, 4 (2007) 59.
- 7) H. Ishii, S. Oshita, W. Yan, H. Shimoda and M. Izumi: Development and Evaluation of a Dismantling Planning Support System based on Augmented Reality Technology, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, **2**, 1 (2011) 52.
- 8) H. Ishii, Z. Man, W. Yan, H. Shimoda and M. Izumi: Development of an Augmented Reality Based Simulation System for Cooperative Plant Dismantling Work, E-Journal of Advanced Maintenance, **7**, 2 (2015) 145.
- 9) 橋本学: 距離データハンドリングのための3次元特徴量, 動的画像処理実用化ワークショップ, SS-1 (2015) 1.
- 10) O. Kaehler, V.A. Prisacariu, C.Y. Ren, X. Sun, Ph. Torr and D. Murray: Very High Frame Rate Volumetric Integration of Depth Images on Mobile Devices. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **21**, 11 (2015) 1241.



石井裕剛

2000年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士課程修了（期間短縮）。京都大学博士（エネルギー科学）。同年京都大学大学院エネルギー科学研究科助手、現在同准教授。複合現実感、知的生産性、環境配慮行動の促進などの教育・研究に従事。