

プラント解体作業支援のための現場再構成モデルを用いた 情報参照システムの開発

原園 友規^{*1} 木村 太郎^{*2} 石井 裕剛^{*1} 下田 宏^{*1} 香田 有哉^{*3}

Development of an Information Reference System using Reconstruction Models for Supporting Plant Dismantling Work

Yuki Harazono^{*1}, Taro Kimura^{*2}, Hirotake Ishii^{*1}, Hiroshi Shimoda^{*1} and Yuya Kouda^{*3}

Abstract – There are many nuclear power plants(NPPs) which are approaching their operational lifespan. The need to dismantle NPPs is increasing. By using AR, workers can understand the information related to dismantling work intuitively. 3D reconstruction models of dismantle fields make it possible for workers to observe circumstances of dismantling fields without visiting the fields. In this study, an information reference system based on AR and 3D reconstruction models has been developed and evaluated. The evaluation consists of interview and questionnaire survey with 6 workers at NPP, who used this system along with a scenario. The results showed that it may be possible to reduce the time spent and mistakes in decommissioning fields. The results also showed that it is easy to refer information in dismantling fields. However, it was also found that it is difficult for workers to build reconstruction models of dismantling fields by themselves.

Keywords : dismantling support system, reconstruction model, augmented reality, annotation

1 研究の背景と目的

1.1 本研究の背景

日本で初期に建設された原子力発電プラントは、近年、設計寿命を迎えつつあり、また、2011年の福島での事故以降、多くの原子力発電プラントが運転を停止している。停止している原子力発電プラントを再稼働するためには厳しい新基準を満たす必要があり、その対策へのコストが高いために、発電規模の小さいプラントの多くは再稼働せず廃炉とすることが決まりつつある。そのため、今後、多くの原子力発電プラントを解体する必要がある。

原子力発電プラントの解体作業では、現場に放射能が残存している可能性があるため、綿密に作業計画を立案した上で、それに従って、作業を進める必要がある。具体的には、まず、解体作業の指揮を執る現場監督が作業現場を訪れて現場の状況を確認し、その後、自ら持つ知識や経験に基づき、解体対象機器の切断箇所や除染方法、作業手順等を決定している。また、解体した機器は、一旦仮置きし、順に専用の装置を用いて放射能の残存量を計測する必要がある。さらに、プ

ラント内部は狭隘な箇所が多くあるため、大きな機器を運搬する際には経路を事前に検討する必要がある。このように、現場監督は現場の状況を明確に把握する必要がある。しかし、解体計画の立案や準備を行う際の被ばく量を減らすためには、可能な限り現場を訪問する回数や滞在時間を減らす必要がある。実際の解体作業時においても、作業対象の誤認等のヒューマンエラーに起因する重大な事故を防ぐためには、解体対象設備の稼働状況や残留水の有無等の情報を作業員が確実に把握することが必要不可欠である。さらに、原子力発電プラントの廃炉は数十年という長期間での作業となるため、専門知識や技術の継承も必要となってくる。

このように、原子力発電プラントの解体作業では現場監督や作業員の被ばく量や作業ミスの低減、若手への技術継承などが必要である。一方、原子力発電プラントでの解体作業支援に、拡張現実感を用いたシステムは、従来の解体作業で用いられている紙媒体の作業計画書とは異なり、現実世界の対象物と情報との関係を直感的に把握できるようになるため、作業における安全性や効率の向上が期待できる [1]。また近年では、RGB-D カメラの普及によって、従来よりも容易に、作業現場の状況を忠実に反映した 3 次元の現場再構成モデルが作成できるようになった。現場環境を撮影して作成した現場再構成モデルは、CAD モデルには存

^{*1}京都大学

^{*2}現在、ソフトバンク株式会社

^{*3}日本原子力研究開発機構

^{*1}Kyoto University

^{*2}Present: SoftBank Corp.

^{*3}Fugen Decommissioning Engineering Center, JAEA

在しないような小さな設備や、設備の更新等によって過去の CAD モデルでは把握できなくなってしまう、現在の細部の状況も反映している。このような再構成モデルを現場を一度訪問して作成し、それを参照するようにすれば、CAD モデルでは確認できない、設備の更新等による状況の変化も、実際に作業現場に向かうことなく、繰り返し確認できる。また、現場で作業員に伝えたい情報を、再構成モデル上の関連する機器等に情報を付加し、拡張現実感を用いて参照可能にすることにより、これまでよりも容易に情報を伝達できる可能性がある。また、電子データで作業に関する情報を保存することによって、過去の情報の検索も容易になり、作業計画立案の際の若手への指針になる可能性がある。さらに、現場再構成モデルを用いてモデルベースのトラッキングを利用することによって、拡張現実感を用いるための事前準備も同時に行うことができる。

このように現場再構成モデルを活用することで、作業現場の確認や、情報共有及び継承が容易になる。また、拡張現実感を利用する際の基盤にもなると考えられる。

1.2 本研究の目的

本研究では、原子力発電プラントの解体作業で使用可能な、現場再構成モデルを活用した情報参照システムの開発と評価を目的とする。具体的には、

- 現在の状況を忠実に反映した現場環境の再構成モデルを用いることで現場に向かうことなく作業計画を検討・立案できる。
- 拡張現実感を用いることによって直観的に作業対象箇所や作業に関する情報を理解できる。

ことを特徴とする情報参照システムを開発する。また、原子力発電プラントの管理区域内で実際に解体作業に従事している作業員にシステムを試用してもらい、有用性の評価や実際の解体作業時に採用するための問題点を調査した。

以下、2章では開発したシステムについて、3章では開発したシステムの有用性の評価及び考察について、4章では結論と今後の展望について述べる。

2 開発した情報参照システム

2.1 システムの全体構成

本システムは図1に示すように、Modeler、Annotator、Viewerの3つのサブシステムで構成される。Modelerでは、解体作業現場を撮影して得たRGB-D画像を基に、現在の状況を忠実に反映した3次元再構成モデルを作成する。Annotatorでは、Modelerで作成した再構成モデルを用いて、デスクトップPCで、

オフィスにて作業現場の状態を確認し、作業対象箇所や作業時の注意事項を記述する。また、解体廃棄物を格納する容器の作業現場での配置をシミュレーションする機能も有する。Viewerは、現場での解体作業時に使用し、タブレットPCを用いて、Annotatorで付加した情報等を現場を撮影して得たカメラ映像上に重畳表示する形で参照する。各サブシステムを順に使用することにより、作業計画立案時の現場への訪問回数や滞在時間を減らし、解体作業時における作業員間での情報の共有や直感的な理解を促す。なお、各サブシステムは現場監督や作業員が使用することを想定しているため、コンピュータに関する専門知識を持たない人でも簡単に使用できるようにしなければならない。

2.2 各サブシステムの詳細

Modeler

現場再構成モデルを作成するための手法としてRGBカメラを用いた手法[2]、RGB-Dカメラを用いた手法[3]、レーザスキャナを用いた手法等が挙げられるが、原子力発電プラント内に持ち込めるような小型のデバイスで利用でき、詳細な現場再構成モデルを作成できるという点から、今回のシステムではRGB-Dカメラを用いた手法[4]を採用した。ただし、この手法の利用は試験的なものであり、今後、別の手法で現場再構成モデルを作成可能にするための開発作業を進めている。また、取得したモデルは、Quadric Clustering[5]を用いて、3軸方向ともに解像度が約1cmになるようにダウンサンプリング処理を施す。

Annotator

Annotatorは、Modelerで作成した現場再構成モデルを参照し、1. 情報を付加する機能、2. 任意の点間の距離を計測する機能、3. 解体廃棄物を格納する容器の配置シミュレーションを行う機能を有する。これらの機能は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との事前インタビューを基に決定した。図2にAnnotatorのインタフェース画面例を示す。Annotatorの画面は主に3次元再構成モデルを表示するモデル表示画面と操作インタフェースで構成される。モデル表示画面ではVisualization Tool Kit[6]を用いて現場再構成モデルを表示する。操作インタフェースには、新規ファイルの作成、ファイルの保存や読み込み、モデル表示画面の視点を移動させるボタン、視点のリセット、床面の設定を行う各種のボタンと、情報記述タブ、距離計測タブ、格納容器配置タブ等がある。

情報記述タブを選択した状態で、モデル表示画面に表示されている現場再構成モデルの任意の箇所を左クリックすると、その箇所に十字型のカーソルが表示される。ここで情報記述タブ上に表示されている、コメ

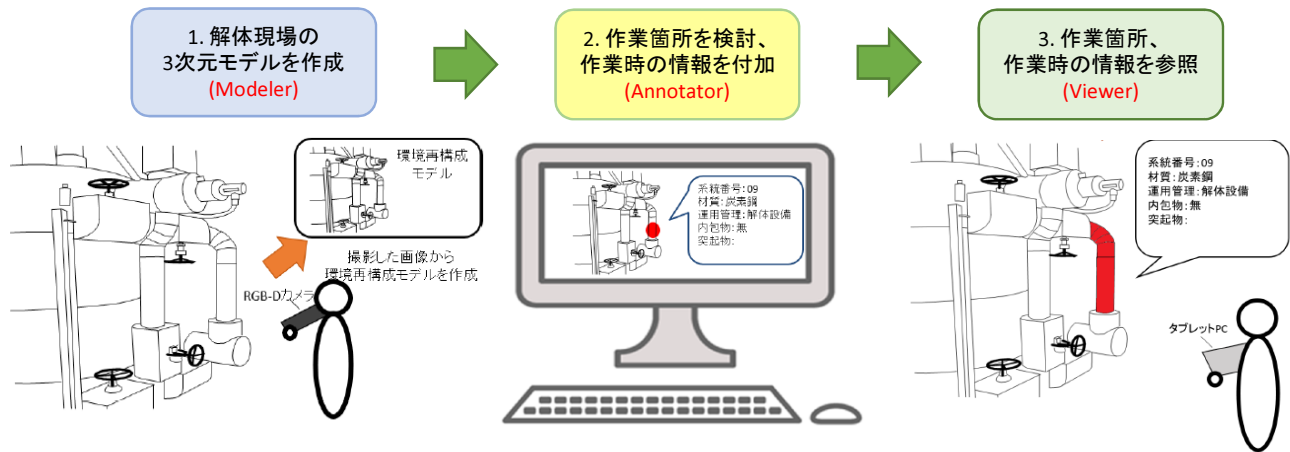


図1 情報参照システムの全体構成
Fig.1 Overview of information reference system.

ント追加のボタンを押すことにより、カーソルが表示されている箇所にタグを設置できる。この際、操作インタフェース上に情報入力のためのフォームが表示され、作業の注意事項等の情報を入力できる。記述できる情報の項目や選択肢は、原子力発電プラントの解体作業に従事している作業員に意見を求め、設備の系統番号及び系統名称、材質、運用管理状況、突起物の有無、内包物、その他の注意事項の6つの項目とした。タグの設置箇所とその状態を容易に把握できるように、選択中のタグは赤色、非選択のタグは青色と黄色の点滅で表示する。

距離計測タブを選択した状態で、モデル表示画面に表示された環境再構成モデルの任意の2点以上の箇所を順にクリックするとそれらの箇所に円が表示され、図3に示すように、各点間の距離が表示される。パソコンの画面上に再構成モデルを表示すると、実際の大きさを把握することが難しくなるが、本機能を用いることにより、作業員が、現場の状況を容易に把握できるようになると期待される。

収納容器配置タブを選択した状態では、収納容器の配置のシミュレーションを行うことができるが、そのために、予め再構成モデル内で床面がどの位置にあるのかを設定する必要がある。本システムでは、現場再構成モデルの床面の1点をユーザが選択することで、RANSACによる平面認識で自動的に床面を認識するようにした。床面が認識された後に、ユーザが床面上の任意の箇所をマウスで左クリックすると、その箇所に十字型のカーソルが表示され、その状態で操作インタフェースに表示されている収納容器追加ボタンを押すことで、収納容器を模した直方体の箱が配置される。配置した収納容器の種類、段数、向きは操作インタフェース上に表示されるプルダウンメニューやラジオボタン、スライダーを操作することにより変更で

きる。さらにモデル表示画面上で収納容器を選択し、マウスでドラッグ操作を行うことで収納容器を床面に沿って平行移動させ、配置位置を変更できる。配置された格納容器同士や、格納容器と作業環境間の間では、リアルタイムに接触判定が行われ、これらが互いに接触している場合には、格納容器の色が変わり、ユーザにこれらが接触していることを知らせる。

また、これらの結果はファイルに保存でき、Viewerで使用する。

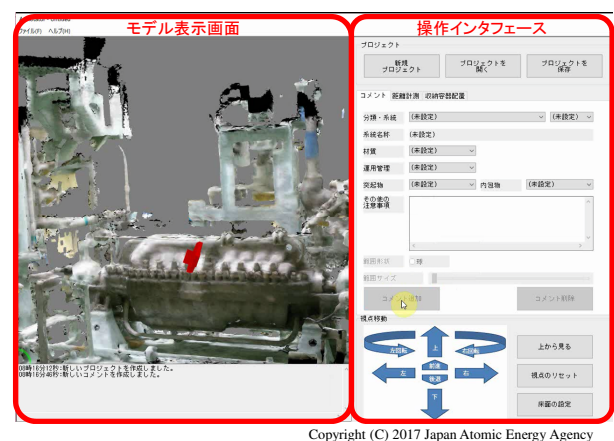


図2 Annotator 使用時の画面
Fig.2 Screen shot of Annotator.

Viewer

Viewerは図4に示すように、カメラ画面、操作インタフェース、情報表示部分の3つの部分から構成される。現時点では、Viewerを利用する際のハードウェアとしては、Microsoft社のSurface3を使用している。カメラ画面では、デバイスで撮影して得たカメラ映像をリアルタイムで表示する。カメラ映像上には、現在のカメラの位置と方向に応じてタグや収納容器を重畳表示する。ユーザは、カメラ画面上のタグをスタイラ

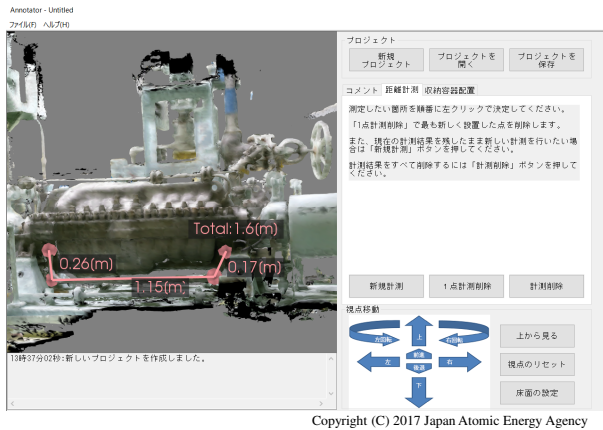


図3 距離計測機能使用時の画面

Fig.3 Screen shot of distance measuring function.

スペンを用いて選択することで、情報表示部分に選択したタグに記述されている注意事項などの情報が表示される。操作インターフェースではファイルの読み込み、カメラ画面の更新停止・更新再開を行うボタンがある。Viewer を用いて作業箇所や注意事項を確認する際、常にカメラを作業対象に向け続ける必要があると、使用する作業員の負担となってしまうため、カメラ映像の更新を一時停止する機能を実装した。

Viewer では拡張現実感技術を用いることにより、正しい配置位置にタグや収納容器を重畳表示させる。重畳表示を行う際には、トラッキングを行う必要があるが、本システムでは Modeler で作成した、現場再構成モデルを用いたモデルベースでのトラッキングを行うことで、現場環境内に AR マーカ等を取り付ける必要なく拡張現実感技術を用いることができる。ただし、後述するように、評価を実施する際には、準備の所要時間を削減するために、トラッキングにマーカを用いた。

Viewer を使用する際には、ファイルの読み込みを選択することで、Annotator で作成したファイルを選択して読み込み、設置したタグや収納容器をカメラ画面上に重畳表示する。その際、収納容器は Annotator で設定した種類、段数、向きを反映して表示する。

3 システムの評価及び考察

3.1 評価の目的

今回開発した情報参照システムが、実際の解体作業において有用であるか、また、実際の解体作業に採用するにあたり問題となる点を調査することを本評価の目的とした。

3.2 評価方法

本評価では、原子炉廃止措置研究開発センター（以下、ふげん）の職員 6 名に、ふげん内の管理区域であ



Copyright (C) 2017 Japan Atomic Energy Agency

図4 Viewer 使用時の画面

Fig.4 Screen shot of Viewer.

る充填ポンプ室及び会議室にて、予め設定した作業シナリオに沿って、開発したシステムを試用してもらった。その際、主にヒューリスティック法 [7] に従い、アンケートとインタビュー調査にて有用性を評価した。充填ポンプ室の様子を図 5 に示す。

評価の手順としては、図 6 に示すように、まず全体に関する事前説明を行い、その後、Annotator の試用、Annotator に関するアンケート及びインタビュー、Viewer の試用、Viewer に関するアンケート及びインタビュー、システム全体に関するアンケート及びインタビュー、を順に実施した。Modeler は事前検討にて、解体作業に従事している作業員の方が使用するのは現時点では難しいことが分かったため、今回は評価せず、Annotator と Viewer に関してのみ評価した。そのため Annotator の試用では、あらかじめ実験者側で作成した充填ポンプ室の再構成モデルを用いて行った。再構成モデルの作成の際には、Microsoft Kinect Sensor を用いて撮影した。また、Viewer の試用では事前準備の時間を短縮するため、AR マーカ [8] を現場環境に貼り付けトラッキングを行った。

Annotator の試用では、まず実験者が約 25 分、各機能に関して一通りデモンストレーションを行った後、評価者に試用してもらった。評価者は会議室で 2 名ずつ組になり、Annotator を用いて充填ポンプ室の現場再構成モデルに対して、解体する際に必要となる注意事項を考えてタグを設置し、その内容をファイルに書き出す作業を実施するよう求めた。その後、プラントを模した部屋の現場再構成モデルに対して収納容器を配置し、その内容をファイルに書き出す作業を実施するよう求めた。その際、評価者には各機能を記したタスクリストを提示し、これら全ての操作を実施してもらうようにしたが、その操作の順番は自由とした。最後に、Annotator の各機能の使いやすさに関するアンケートとインタビューを実施した。アンケートは各項目に関して 5 段階評価にて回答してもらった。インタビューはアンケートの各項目の回答理由について個

別に質問した。アンケートの質問項目の一部を表1に示す。

Viewerの試用では、充填ポンプ室にて実験者が各機能に関して口頭で説明した後、1名ずつ試用してもらった。試用はタグを参照する作業と収納容器を参照する作業を充填ポンプ室の異なる2箇所で実施してもらった。評価者は実験者があらかじめ作成した、注意事項や収納容器を出力したファイルを読み込み、カメラで撮影された映像の上に位置を合わせて重畳表示されたタグをスタイルスペンでタッチすることで注意事項を参照した。また、収納容器に関しては充填ポンプ室の床面に重畳表示され、設置されている様子を確認してもらった。そして、その場でアンケートを実施した。その後会議室に戻り、アンケートの各項目の回答理由について個別にインタビューを行った。アンケートの質問項目の一部を表2に示す。

AnnotatorとViewerの試用とアンケート及びインタビューの後に、今回開発したシステム全体に関して、アンケートを実施した。その後、アンケートの各項目の回答理由について個別にインタビューを行った。アンケートの質問項目の一部を表3に示す。



Copyright (C) 2017 Japan Atomic Energy Agency

図5 充填ポンプ室の様子

Fig. 5 Appearance of Filling pump room.

表1 Annotator 評価のアンケート項目 (一部抜粋)

Table 1 Examples of questionnaire about Annotator

アンケート項目
表示されたモデルを細部まで観察することができる
簡単に解体作業に必要である系統番号等の情報を入力できる
収納容器を意図した場所に設置できる
初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる

3.3 結果及び考察

評価には、事前説明に約5分、Annotatorの試用に約75分、Viewerの試用に約10分、システム全体に関するアンケートとインタビューに約30分を要した。

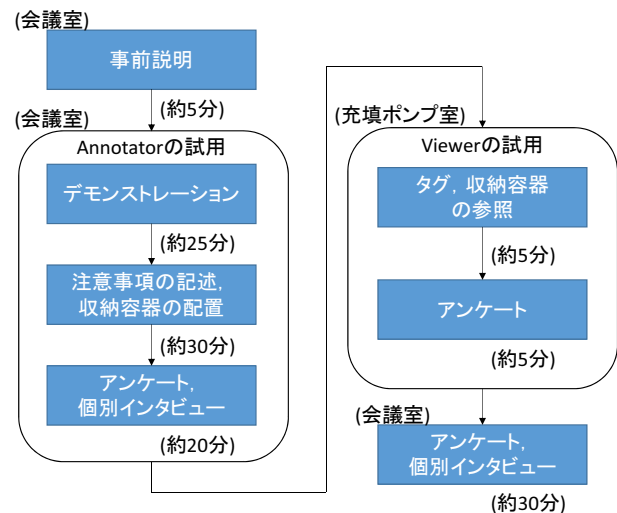


図6 評価実験の流れ

Fig. 6 Flow of experimental evaluation.

表2 Viewer 評価のアンケート項目 (一部抜粋)

Table 2 Examples of questionnaire about Viewer

アンケート項目
作業環境内において、どの箇所にマーカが設置されているかを容易に理解できる
画面内のマーカ設置箇所をタッチすることで情報を参照することは簡単である
作業環境内において、どの箇所に収納容器が設置されているかどうかを容易に理解できる
初めてシステムを使う人でも簡単に使用できる

各サブシステム試用後のアンケートの結果及びインタビューでの意見から、Annotatorでは、現場再構成モデルを観察する際に、モデルに近づいて観察すると荒く感じるという意見が得られた。このことから、本評価で用いた現場再構成モデルは、詳細を観察するにはまだ不十分であったことが分かった。今回の評価実験では、使用するパソコンの性能を考慮し、現場再構成モデルのサイズが大きくなり過ぎないようにするために、Quadric Clusteringでの解像度を約1cmとして、現場再構成モデルを作成したが、性能の良いパソコンを使用することにより、より細かな現場再構成モデルを用いることを可能にする必要がある。

視点移動の操作において、マウス操作による視点移動は簡単かつ有効であることが分かったが、一方で、ボタンを用いた視点移動は、回転移動の移動軸が分からない等の意見やマウスでの操作の方が速いなどの意見が得られた。システムの開発段階では、インタフェース画面上に視点移動ボタンを配置することでユーザが直感的に操作ができるのではないかと想定していたが、このことから、マウスでの操作の方が直感的で適していることが分かった。また、平行移動に関してもマウスでの操作で行えるとよいという意見が得られた。

表3 システム全体の評価のアンケート項目 (一部抜粋)

Table 3 Examples of questionnaire about whole system

アンケート項目
Annotator を用いることによって現場での総滞在時間は短くなると思われる
Viewer を用いることによって現場での作業ミスは減ると思われる
今回試用したシステムは紙媒体よりも有効であると思われる

ことから、画面上のボタンだけでなく、マウス操作でもすべての視点移動の操作が行えるように設計することで、より現場再構成モデルの観察が簡単になると考えられる。

任意の点間の距離を計測する操作に関しては、狭隘箇所や解体用機器のハンドリングが難しい箇所に対して大いに活用できるのではないかという意見が得られたことから、任意の点間の距離を計測する機能は有用であることが分かった。しかし、さらに距離だけでなく指定した部分の表面積や体積も計測できると良いという意見が得られた。また、収納容器の配置だけでなく、足場や解体に用いる装置も配置できるようにしたいという意見も得られた。

Viewer でも、Annotator と同様にアプリケーションの画面の大きさやボタン、文字の大きさが小さいという意見が得られた。実際の作業現場は暗くて視認性が悪く、さらに手袋を装着していることから、オフィスでアプリケーションを使用する場合と比べて特に文字とボタンを大きく表示する必要があることが分かった。記述された情報の参照に関しては、タグの設置箇所及び記述された内容のどちらも理解できたという意見が得られたが、重畳表示されたタグにより、環境設備が隠れてしまうという意見も得られたため、タグの形状や大きさを再検討することや、タグの表示を枠線のみにするなどの表示に関するさらなる検討が必要であることが分かった。また、作業現場でも Annotator のように情報が記述できれば、過去のケースではこのように作業を行った等の、現場を訪問中の作業員ならではの情報が付加できるのではないかという意見が得られたことから、Viewer にも情報を記述できる機能を組み込むことで、よりシステムの有用性が向上する可能性があることが分かった。ただし実装する際には、現場での滞在時間を短くするため必要があることから、現場での入力を容易にするために定型文を用意しておく等の工夫が必要である。

システム全体としては、Annotator では、上で述べたようなインタフェース面での課題を改善することによって現場での滞在時間が短縮できる、有用なシステ

ムになるとの意見が得られた。また Viewer では、このサブシステムを用いることで作業時におけるミスを減らすことができる可能性があることが分かった。ただし各機能を細かく見ると、現時点では、タグの表示の方法等、多くの技術的な課題が存在し、上で述べた機能などの改良が必要であることが分かった。さらに Modeler に関しては、現在のシステムでは作業員が自ら使用して抜け落ちのない高精度なモデルを作成することが難しいため、今後は Modeler のインタフェースを改良するなど、作業員自身が容易に必要なモデルを作成できるようにする必要がある。

4 結論

本研究では、原子力発電プラントの解体作業における安全性と効率の向上を目指し、解体作業現場の再構成モデルと拡張現実感技術を用いた情報参照システムを開発し、アンケート及びインタビューにより有用性の評価と実際の解体作業時に採用されるための問題点を調査した。今回の評価により、現場での滞在時間の短縮や解体作業時のミスの低減が期待できることが分かった。今後の課題としては、作業員自身が容易に現場再構成モデルを作成できるシステムの実現が挙げられる。

参考文献

- [1] Hirotake Ishii: Augmented Reality: Fundamentals and Nuclear Related Applications; International Journal of Nuclear Safety and Simulation, 1(4), pp.316-327(2010)
- [2] Tomasi, C and Kanade, T: Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method; International Journal of Computer Vision, 9(2), pp.137-154(1992)
- [3] Shahram Izaki et al.: KinectFusion: Real-time 3D reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera; Proceedings of the 24th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.559-568(2011)
- [4] Olaf Kahler et al.: Very High Frame Rate Volumetric Integration of Depth Images on Mobile Devices; IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 21(11), pp.1241-1250(2015)
- [5] Peter Lindstrom: Out-of-core simplification of large polygonal models, Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.259-262(2000)
- [6] Will Schroeder, Ken Martin: The Visualization Toolkit(4th ed.), Kitware Inc.(2006)
- [7] ヒューマンインタフェース, オーム社, pp.428-429(1998)
- [8] Hirotake Ishii et al.: Development of Wide Area Tracking System for Augmented Reality, Proceedings of 12th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol.14, pp.234-243(2007)