

拡張現実感を利用した 原子力発電プラントの解体支援手法の提案と評価

石井 裕剛^{*1} 中井 俊憲^{*1} 卞 志強^{*1} 下田 宏^{*1}
泉 正憲^{*2} 森下 喜嗣^{*2}

Proposal and Evaluation of Decommissioning Support Method of Nuclear Power Plants using Augmented Reality

Hirotake Ishii^{*1} Toshinori Nakai^{*1} Zhiqiang Bian^{*1} Hiroshi Shimoda^{*1}
Masanori Izumi^{*2} Yoshitsugu Morishita^{*2}

Abstract – A support method of decommissioning work of nuclear power plants using Augmented Reality was proposed and a prototype system was developed. Then, using the prototype system, the proposed method was evaluated. Three workers used the prototype system along with a scenario which dismantles an ion tower, and then questionnaire and interview investigation was conducted. As the results, it was found that the proposed method that records the cutting parts on the CAD data using a stylus pen seems easy for the workers compared to the legacy recording method using paper documents, but a new tablet PC that has a larger screen with lighter weight is necessary in order to apply the proposed method to the real decommissioning work.

Keywords : augmented reality, decommissioning support method, 3 dimensional CAD

1 はじめに

原子力発電プラントは数十年稼働した後に停止される。運転を停止した原子力発電プラントは解体・撤去されるが、運転中に放射化された構造物や一次冷却系を通じて汚染された設備、機器等に放射能が残存しており、これらの放射性機器、構造物等を安全に解体し、発生した放射性廃棄物を適切に処理しなければならない。そのため、原子力発電プラントの解体作業を行う際には、詳細な作業計画が立案され、解体作業員は、立案された作業計画に沿って安全・確実に作業を進めると同時に、作業の進捗状況を適切に記録することが求められる。しかし現状では、プラントの3次元CAD(3 Dimensional Computer Aided Design; 3DCAD)データを作成し、コンピュータを用いて作業計画が立案されているにもかかわらず、作業現場には紙の作業要領書を持ち込み、紙を参照しながら解体作業を進め、また、作業の進捗状況も紙に記録している[1]。この方法では、作業要領書と作業現場を見比べる必要があるため、参照ミスが起り、不適切な解体作業が行われてしまう可能性があり、また、一旦紙に記録した情報を、改めてコンピュータに記録しなおす作業が必要

となる。

そこで本研究では、拡張現実感と3次元CADデータを利用して解体作業を支援する手法を提案し、実際に原子力発電プラントの解体作業に従事している人を評価者として、提案手法の問題点を見つけ出し、改善策を提案することを目的とする。なお、本研究では、評価者のシステムに対する主観的な評価を研究の対象とし、提案手法を利用した場合の作業効率や作業の正確さ等に対する客観的な評価は研究の対象としない。拡張現実感を用いることにより、紙を用いた場合に比べ、直感的な情報提示や情報入力が可能になり、作業員が解体作業内容を適切に理解し、作業の進捗状況を記録することがより容易になると期待される。

これまでの拡張現実感の産業応用としては、車の運転のナビゲーション[2]や航空機のメンテナンス支援[3]、発電所における系統隔離作業の支援[4]、産業用ロボットの教示システム[5]等が試みられているが、拡張現実感を原子力発電プラントの解体作業の支援に応用するための手法の提案と評価を行った研究は行われていない。また、これまでの研究では、拡張現実感の「直感的な情報提示と参照が可能である」という特徴を利用して、仮想世界(3次元CAD)から情報を得ることを目指したシステム[6][7]の開発が多く、「直感的に現実世界と仮想世界(3次元CAD)を比較できる」という特徴を積極的に利用して、実世界から情報を得

^{*1}京都大学大学院エネルギー科学研究科

^{*2}日本原子力研究開発機構ふげん発電所

^{*1}Graduate School of Energy Science, Kyoto University

^{*2}Fugen Nuclear Power Plant, Japan Atomic Energy Agency

ることを目指したシステムの開発と評価を行った例は少ない。特に、3次元 CAD 情報を更新する為に拡張現実感を利用するインタフェースの開発とその評価は行われておらず、このインタフェースを実際の現場に近い状況で使用した場合に、ユーザ（作業員）がどのように感じるかを調べることは今後の開発を効率的に進めるために重要である。さらに、これまでの研究では、対象となる作業に関して素人である人を被験者として、情報提示デバイスの違いがユーザに与える影響等を評価した研究が多く、対象となる作業に習熟した熟練者を評価者として、後述するヒューリスティック法によりインタフェースの問題点等を見つけたすことを目的とした研究は少ない。以上より、本研究で得られる知見は拡張現実感を利用した解体支援システムを実用化するにあたり有用な指針になると考えられる。

2 プラント解体作業の現状

原子力発電プラントにおいて機器を解体する場合、(1) 解体計画の立案、(2) 解体作業の準備、(3) 解体作業の実施と記録、(4) 後片づけ、という流れで作業が進められる。「解体計画の立案」ではプラントの3次元 CAD データやプラント建設時から管理されてきた図面等を用いて大まかな作業計画を立てた後、実際に現場に赴き、作業スペース等を確認した上で機器の詳細な切断箇所・順序等を決定する。その際、足場を組む必要があるか、どのような除染方法を用いるか、どのような機材や工具を使用するか等が検討される。検討された結果は作業要領書として紙上に纏められる。次いで「解体作業の準備」では、現場監督が作業要領書を現場に携帯し、それを参照しながら切断箇所を確認する。また、稼働中の系統等、解体禁止箇所等も確認する。その際、場合によってはチョークやテープ等を用いて切断箇所や解体禁止箇所に目印を付ける（マーキング）。足場が必要な場合は設置し、除染が必要な場合は除染を行う。また、必要に応じてグリーンハウスの設置等も行う。「解体作業の実施と記録」では、現場監督が指揮を執りながら4, 5人程度のグループで作業を行う。その大まかな流れは以下の通りである。

1. 解体現場へ向かう前にグループでミーティングを行い、1日の解体手順を作業要領書や3次元 CAD データ等を用いて確認する。
2. 作業内容が記述された作業要領書を現場に携帯し、解体手順等を再確認する。
3. 現場監督の指揮のもと、解体作業員が機器を解体する。
4. 1日の作業を終える際に現場監督が解体の進捗

状況を紙上に記録する。

5. 事前の作業計画と実際の進捗状況を照らし合わせ、必要に応じて作業計画を修正する。
6. 1から5の作業を機器が完全に解体されるまで繰り返す。

機器を解体後は、「後片づけ」において足場の解体、工具の片づけ等が行われる。このように、原子力発電プラントの解体は、一般の建造物やプラントの解体と異なり、詳細な計画に基づいて作業が進められる。しかし、以上に述べた方法に従って解体作業を行う場合、以下に示す3つの問題がある。

1. 解体作業の準備の際、切断箇所や解体禁止箇所等を確認するが、作業要領書と実際の機器を見比べながら該当箇所を探さなければならないため、対象の機器が複雑な場合や近くに似た機器が多数存在する場合等に、認識を誤る可能性がある。
2. 1日の作業が終了した時に、どの機器のどの部分を切断したかを記録しなければならないが、2次元平面である紙上にこれらを適切に記録することは難しく、分かりにくい情報を記載したり、十分な情報を記載できなかったりする可能性がある。
3. 解体の進捗情報は、解体ノウハウの蓄積や解体計画の修正を行うために3次元 CAD データ等のデータベースに入力する必要があるが、紙上に記録された情報をコンピュータに入力し直す作業が必要となる。この作業は煩雑であり、また入力漏れや入力誤りが生じる可能性もある。

これらの問題は作業の安全性や効率の低下につながると考えられる。そのため、現場において機器の切断箇所や解体禁止箇所を直感的に把握できることや、進捗状況の記録やデータベースへの入力をより簡単かつ効率的に行えることが望まれる。

3 拡張現実感を用いた解体支援手法の提案

本研究では、拡張現実感を利用することにより現実世界と仮想世界（3次元 CAD）の比較が直感的に行えるという点と、最近の原子力発電プラントでは一部の機器ではあるが、既に3次元 CAD データが作成されている [1] という点に注目し、2章で述べたプラント解体作業の3つの問題を解決するために、3次元 CAD データと拡張現実感を用いた解体支援手法を提案する。

提案する解体支援手法は(1) 切断箇所・解体禁止箇所の参照支援と(2) 進捗状況の記録支援の2つの支援

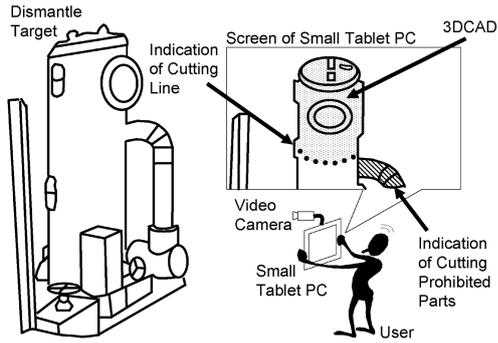


図1 拡張現実感を用いた切断箇所
Fig.1 Reference of Cutting Parts using Augmented Reality.

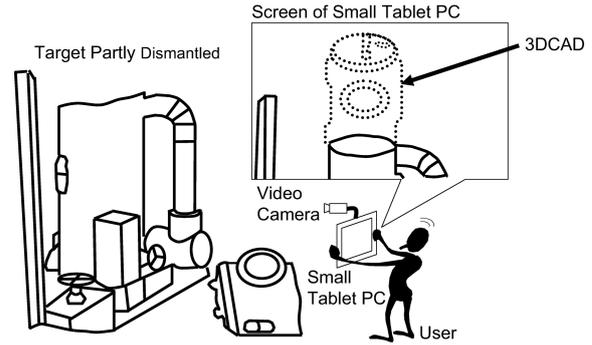


図2 拡張現実感を用いた解体部分の記録
Fig.2 Recording of Dismantled Parts using Augmented Reality.

方法で構成される。支援方法を利用するユーザは2章で述べた解体作業における現場監督とする。解体作業における現場監督は、必ずしもコンピュータの操作に慣れているとは限らない。そのため、提案手法を利用する方法は分かりやすく、直感的であるべきである。

3.1 切断箇所・解体禁止箇所の参照支援

切断箇所・解体禁止箇所の参照支援では、ユーザは図1に示すようにビデオカメラが接続された小型タブレットPCを作業現場に携帯する。カメラで解体する機器を撮影すると、小型タブレットPCの画面上に、カメラの映像が映し出され、さらにその映像の上に、撮影した機器の3次元CADが自動的に位置・方向・大きさを合わせて重畳表示される（拡張現実感による重畳表示）。重畳表示される3次元CADは、予め設定された切断箇所、解体禁止箇所の情報を元に色分けされる。特に、解体禁止箇所は認識ミスを起こさないようにするために強調して表示する。ユーザは、この色分けされた3次元CADを参照して、切断箇所や解体禁止箇所を認識する。その際、ユーザは表示された3次元CADの位置・方向・大きさを自由に変えることもできるものとする。これは機器を見ている方向と逆の方向から参照したり、機器の一部を拡大したり（近くから見たり）、縮小したり（遠くから見たり）できるようにする為である。また、表示される3次元CADは、CADの後ろに隠れた実際の機器も同時に見ることができるようにするため、半透明表示もできるものとする。

以上に述べた方法が実現されれば、紙の作業要領書を参照する場合に比べ、「提示情報と実物機器を、視点を移動させながら見比べる」動作が必要なくなるため、より直感的に切断箇所と解体禁止箇所を理解できるようになると期待される。

3.2 進捗状況の記録支援

進捗状況の記録支援では、切断箇所・解体禁止箇所の参照支援の場合と同様に、ユーザは図2に示すよう

にビデオカメラが接続された小型タブレットPCを作業現場に携帯する。1日の解体作業が終わった時点で解体途中の機器をカメラで撮影すると、小型タブレットPCの画面上に、カメラの映像が映し出され、さらにその映像の上に、その日の作業開始前の状態の機器の3次元CADが自動的に位置・方向・大きさを合わせて重畳表示される。ユーザは、既に解体されたために作業現場（現実世界）には存在していない部分と、3次元CAD上では残っている部分の境界線を小型タブレットPC上で電子ペン（スタイラスペン）を用いて指定することにより切断箇所を入力する。その際、ユーザはカメラの映像取得を一旦停止させ、手元に小型タブレットPCを持った状態で、静止映像の上に進捗状況を記録できるものとする。これは、解体対象の機器をカメラに写す際のユーザの姿勢と電子ペンを用いて作業の進捗状況を記入する際の姿勢は通常異なるため、カメラで解体対象の機器を写しながら同時に電子ペンを使うことは難しいと考えられるためである。この方法は、紙の上に通常のペンを用いて情報を記入する方法とメタファが非常に似ており、直感的な情報入力方法であると考えられる。また、一度記録した進捗状況は、自由に参照できるものとする。

以上に述べた方法が実現されれば、従来の紙の上に進捗状況を記録する場合と比べ、「紙に記載された情報と実世界の状況を、視点を移動させながら見比べる」動作が必要なくなり、小型タブレットPCの画面上で実際の映像と3次元CADの映像の間の違いを見つけるだけで切断箇所が記録できるため、より直感的に作業の進捗状況を記録できると期待される。また、現場で直接3次元CADデータとして進捗状況を記録できるため、小型タブレットPCに格納されたデータを転送するだけでデータベースを更新でき、改めて情報を入力する手間を省くことができると期待される。

3.3 提案手法を利用する際に用いる機器の検討

拡張現実感を利用する際にユーザが使用する機器としては、プロジェクションディスプレイやヘッドマウントディスプレイ等も考えられるが、本研究で提案する手法は原子力発電プラント内部で利用することを想定している。そのため、提案手法を利用する際に使用する機器は、携帯可能であり、また、視野を隠さない等、安全性を考慮したものでなければならない。そのため、本研究ではユーザは前述のように小型タブレット PC を用いるものとする。

4 提案手法の有用性評価

4.1 評価の目的と基本方針

3章で述べた提案手法では、原子力発電プラント内部で利用可能にするために、携帯可能な小型タブレット PC を用い、また、コンピュータの操作に慣れていない人にも利用可能にするために、直感的であると予想される操作を採用している。しかし、「各設計が意図通り有効であるか」、「提案手法がどの程度現場で受け入れられるか」、「実用化するにあたりどのような問題があるか」等は不明である。そこで本研究では、これら进行评估することを目的に評価実験を行うことにした。しかし、提案手法を完全に利用できるシステムを実際に開発し、原子力発電プラントを解体する際に利用してもらうことにより評価する方法は、大きな労力が必要であると共に危険も伴う。さらに、複数のユーザに同じ条件で使用してもらうには、同じ機器を解体してもらう必要もあるため、実験環境の準備も困難である。

そこで本研究では、2章で述べたプラント解体作業における問題の内、切断箇所・切断禁止箇所の参照や切断箇所の記録が現状では難しい点を解決することに注力し、ヒューリスティック法と呼ばれる評価手法を参考に提案手法を評価することにした。ヒューリスティック法はニールセンが提唱した手法で、ガイドラインに基づいて、プロトタイプやその仕様書を検査し、インタフェースの問題点を発見する方法である [8]。しかし、オリジナルのガイドラインには多数の項目があり、それら全てを厳密に照合する方法は効率が悪いいため、評価者各自が持っている直感と常識によって評価をすることが多い。ヒューリスティック法はセッション形式（評価を複数の段階に分けて実施する形式）で行われ、評価者は評価技術についても対象機器についても熟練した人が望ましいとされる。評価者の人数は3人から5人が適当であるとされる [9]。

本研究において、ヒューリスティック法を参考にし提案手法を評価する場合、仕様書のみに基づいて評価することも考えられるが、拡張現実感を用いて情報

参照や入力が行えるインタフェースは、仕様書のみでは適切に理解することが難しいと考えられる。

以上より本研究では、評価用プロトタイプシステムと解体作業シナリオを作成し、実際に解体が予定されている原子力発電プラントの一室において、シナリオに沿って解体作業が進められたと想定しながらプロトタイプシステムを評価者に使ってもらうことにより提案手法を評価することにした。その際、評価者は原子力発電プラントの解体作業に深く関係している人とし、ヒューリスティック法で提案されているガイドラインを参考にアンケートを作成し、それに答えてもらうことにより提案手法を評価することにした。

4.2 開発したプロトタイプシステムの概要

本研究では、プロトタイプシステムとして、ヒューリスティック法を用いて提案手法を評価するのに必要最低限な機能のみを実現するものとした。すなわち、プロトタイプシステムでは、(1) 切断箇所・切断禁止箇所の参照と切断箇所の記録の操作に使用するインタフェース、(2) カメラに写った機器の上に位置・方向・大きさを合わせて3次元 CAD を重畳させる機能、(3) 評価者の操作に応じて3次元 CAD データを模擬的に切断する機能を実現し、(4) 実際の解体作業時に入力する必要がある様々な情報を入力するためのインタフェースや、(5) 作業後に解体記録をデータベースサーバに転送する機能等は実現しないものとした。

なお、提案手法の実用化に際しては、(4)の機能に関して、解体対象機器の汚染の状況や、解体作業に要した時間、解体の際に起こった問題等、多様な情報を入力可能にするインタフェースが必要となるが、これは既存の技術で実現可能である。また、(5)の機能に関して、データベースの内容と実際のプラントの状況が一致していない期間ができることや転送漏れを防ぐために、現場で入力された解体記録は、無線等を用いてリアルタイムでデータベースサーバに転送されることが望ましい。しかし、データ転送速度が遅い PHS は多くの原子力発電プラントでも使用されているが、IEEE 802.11 等の高速無線通信は使用が認められていない場合が多い。データ量が数 MB 以上になる場合もある3次元 CAD データを実用的な時間でサーバに転送するためには、高速無線通信の安全性の確認等のデータ転送環境の整備が必要である。一方、(2)の機能に関しては、後述する様に、プロトタイプシステムではラインマーカを用いた手法を利用して3次元 CAD の重畳表示を可能にするが、この方法は作業現場の周りに多数のマーカを貼付する必要があり、実用化に際しては、複雑な環境では貼付が難しい、準備の労力が多い、マーカが作業の邪魔になる等の問題がある。今後は、自然特徴点や慣性センサも併用した手法を実現す

ることにより、貼付する必要があるマーカの数を減らすことが必要であり、新たな技術開発が必要である。

4.2.1 3次元CADを重畳させる機能の実現

画面上に表示された機器の上に3次元CADを重畳させる機能を実現するためには、小型タブレットPCに接続したカメラの位置と方向をリアルタイムに計測する技術（トラッキング技術）が必要である。本研究ではBianらが開発したラインマーカを用いたトラッキング手法[10]を一部改良して用いた。Bianらの手法はプラントの配管等に貼り付けやすい線形状のラインマーカを作業環境に貼り付け、そのラインマーカをカメラで撮影することにより、マーカとカメラの間の相対的な位置と方向をリアルタイムで計測できる手法である。図3にラインマーカの例を示す。Bianらの手法では、ラインマーカの両端を特徴点として利用するため、6自由度のトラッキングを行うためには、複数のマーカを同時に撮影する必要がある。しかし、マーカを解体する対象付近に貼り付けた場合には、作業員が解体する対象に近づいた際にカメラの視野からマーカが外れてしまい、トラッキングを継続できない。そこで本研究では、1本のマーカでもトラッキングができるようにBianらの手法を改良した。具体的には以下の方法でトラッキングを行うことを可能にした。

トラッキングの準備

1. 解体する機器に、予め定めた一端が機器の中心に来るようにラインマーカを貼り付ける。
2. 解体する機器とラインマーカを、同時に1フレーム分撮影する。
3. 2.で撮影したラインマーカの両端を認識し、両端を結ぶベクトルの長さ l_n と角度 θ_n を計算する。
4. 2.で撮影した画像の上に、予め定めたマーカ的一端と中心が一致するように機器の3次元CADを表示させる。その後、手作業で方向と大きさが実際の機器の映像と同じになるように調整し、その時の3次元CADの方向と大きさを記録する。

トラッキングの実行

5. カメラで撮影したラインマーカの両端を認識し、両端を結ぶベクトルの長さ l と角度 θ を計算する。
6. 大きさを4.の場合の l/l_n 倍、角度を4.の場合から $\theta-\theta_n$ だけ画面上で回転させた3次元CADを、中心がマーカ的一端に一致するように表示する。

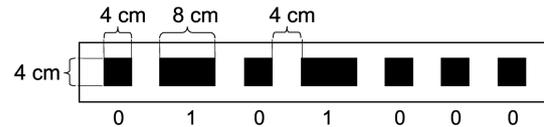


図3 ラインマーカの例
Fig. 3 Example of Line Marker.

以上により、作業員が機器に貼り付けたマーカのほぼ正面にいる場合には、撮影されるマーカが1本であっても、ユーザに大きなズレを感じさせない精度で3次元CADを重畳表示できる。

なお、多数のラインマーカを用いてトラッキングを行う場合は、ラインマーカを1つ1つ環境に貼り付け、3次元位置を事前に計測する必要がある。この作業が困難である場合、本研究で提案する手法を実際に現場で利用することが困難になるが、ラインマーカは線形状をしているため、プラント内部の様な複雑な環境にも容易に貼り付けることができ、また、電動雲台とレーザー距離計測器を組み合わせたマーカ3次元位置計測手法も実現されている[10]。この手法では、①レーザー距離計測器(Leica社DISTO A6、測定精度 $\pm 1.5\text{mm}$ 、パソコンで制御)を電動雲台(Directed Perception社PTU-D46-70、角度分解能 0.013 度、パソコンで制御)に固定する。②電動雲台を駆動して、レーザー距離計測器のレーザー照射位置をラインマーカの特徴点の位置に合わせ、距離を測定する。③電動雲台から得られる角度情報とレーザー距離計測器から得られる距離情報から、マーカの特徴点の3次元位置を計算する。この手法により、容易にマーカの3次元位置を計測できる。

4.2.2 3次元CADデータを切断する機能の実現

3章で述べた提案手法では、ユーザは解体作業の進捗状況を記録するにあたり、3次元CAD上で切断済み箇所を指定する。その際、切断済み箇所として指定された部分は、3次元CAD上でも切断されたものとして表示された方がインターフェースとして分かりやすいと考えられる。この機能を実現するにあたり、実際の作業では、機器は任意の箇所切断する可能性があるため、3次元CADも任意の箇所切断できるようにする必要があると考えられる。しかし、今回の評価では、評価者はシナリオに沿って切断済み箇所を記録するため、切断済み箇所として指定される3次元CAD上の位置は予め決まっている。そこで、今回の評価では、3次元CADの任意の位置を切断可能にするアルゴリズムは実装せず、シナリオ上で切断済み箇所として指定される可能性がある箇所を既に切断した3次元CADを用意し、画面上で評価者がスタイラスペンを用いて示した切断箇所に応じてそれらをファイルから読み込んで表示する方法を用いた。なお、3次元CAD



図4 開発したプロトタイプシステムのインターフェース
Fig.4 Interface of the Developed Prototype System.

の任意の位置を切断するアルゴリズムは[1]の研究等で実現されており、技術的には実現可能であることを確認済みである。

4.2.3 開発したインターフェースおよび使用したハードウェア

前述のラインマーカを用いたトラッキング、3次元CADの重畳表示、評価者が利用するインターフェースはWindows XP上でVisualStudio2005を用いて開発し、開発言語にはC#を用いた。図4に開発したインターフェースの画面例を示す。また、各部の詳細を以下に示す。

①切断箇所・順序の確認モードボタン

切断箇所と順序を確認するモードに切り替えるボタン。切断箇所と順序は⑬の領域に実際の機器に重畳される形で3次元CADとして提示され、図5に示すように、当日の作業で解体する箇所は水色、解体済みの箇所は灰色、解体禁止箇所は赤色、次に解体する箇所は青色で示される。その際、⑤から⑧のボタンを操作して表示する情報の日時を変更できる。

②解体の記録モードボタン

解体作業の結果を記録するモードに切り替えるボタン。切替後は⑩のボタンを押した後、スタイラスペンで⑬の領域をなぞることにより切断済みの箇所を指定する。

③カメラ停止ボタン

解体の記録を行う際にカメラの画像を一時停止させるボタン。

④解体記録の参照モードボタン

過去の解体記録を参照するモードに切り替えるボタン。切替後は⑤から⑧のボタンを操作して表示する情報の日時を変更できる。

⑤前日へボタン

解体手順や解体記録を参照する際に表示する情報の日時を1日分戻す。

⑥前へボタン

解体手順や解体記録を参照する際に表示する情報を1ステップ分戻す。

⑦次へボタン

解体手順や解体記録を参照する際に表示する情報を1ステップ分進める。

⑧翌日へボタン

解体手順や解体記録を参照する際に表示する情報の日時を1日分進める。

⑨CAD表示リセットボタン

手作業で3次元CADの表示位置・方向・大きさ等を変更した際に、それらの変更を元に戻すボタン。

⑩切断モードボタン

解体の進捗状況を記録する際にこのボタンを押してから⑬の領域で、スタイラスペンを用いて直線を描くことにより、切断済み箇所を入力する。図6および図7に、スタイラスペンを用いて切断箇所を指定する際の画面例を示す。今回のシステムでは、入力された直線の位置に応じて予め作成されている3次元CADデータをファイルから読み込んで表示する。

⑪⑫⑬CAD操作ボタン

手作業で3次元CADを操作する際に押すボタン。これらのボタンを押した後、スタイラスペンで画面をなぞることにより、3次元CADを移動・回転・拡大・縮小することができる。なお、このボタンを利用するとトラッキングの結果に関係なく3次元CADが画面に表示される。この場合、実際の機器と3次元CADを比較する作業ではなく、3次元CADを詳しく見る作業を行うことになる。

⑭現在の日時表示

表示されている情報の日時を示す。

⑮コメント表示領域

映像だけでは表現が難しい指示を文字として表示する領域。

⑯映像表示領域

カメラの映像や3次元CADを表示する領域。この領域内をスタイラスペンでなぞることにより、3次元CADを操作できる。

情報提示デバイスとしては、図8に示す小型タブレットPC (SONY VGN-UX90PS)を用いた。このPCは背面にカメラを搭載しており、画面はタッチパネル液晶になっている。付属のスタイラスペンを用いて画面をなぞることにより、画面上の任意の点を指示することができる。この小型タブレットPCの性能を表1に示す。このPCを用いてマーカ認識および解体対象機器の3次元CADを表示したときの平均描画速度は7fps程度であった。



図5 解体作業支援時に表示される画面の例
Fig.5 Example of Screen Image during Reference of Cutting Parts.



図7 切断後の画面例
Fig.7 Example of Screen Image after Indication of Cutting Place.

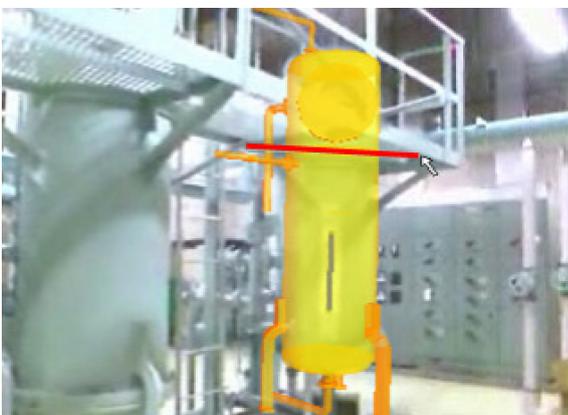


図6 作業員による切断箇所の手指示例
Fig.6 Example of Indication of Cutting Place by Workers.



図8 評価に用いたディスプレイデバイス
Fig.8 Display Device used for the Evaluation.

4.3 評価の方法

4.3.1 実験環境

評価実験において解体の対象とする機器は、図9に示すふげん発電所の純水装置室にあるイオン塔(直径約1m、高さ約3.7mの円筒形状)とした。図10に実験環境のレイアウトを示す。プロトタイプシステムでは、このイオン塔を図10の Evaluator Working Area として示す3箇所から眺めることを可能にした。

4.3.2 評価者

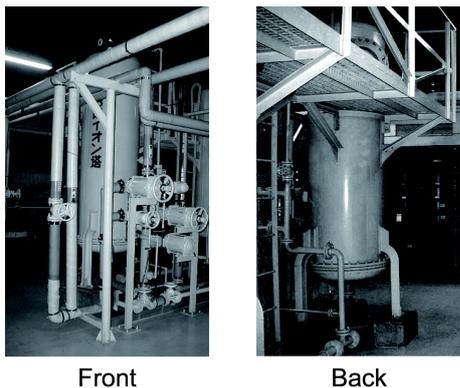
評価者はふげん発電所の職員3名(評価者A、B、C)とした。評価者Aはふげん発電所における運転員グループの班長、評価者Bはふげん発電所において試験解体を実施している部署の職員、評価者Cはふげん発電所において解体作業の技術開発を行っている職員である。評価者AおよびBは、今回の解体支援手法の提案研究とは利害関係がなく(否定的な評価を下しても不利益を被らない)、システム的设计・開発にも全く関わっていない。システムに関して見聞きするもの

今回の評価が初めてである。一方、評価者Cは、システム的设计の段階と後述するシナリオ設定の段階で数回、ヒアリングを受けており、評価を行う前からシステムに関しては予備知識を持っていた。共に、システムに対して評価を行う際には、思うことを何でも自由に述べることをお願いした。

なお、今回の評価では、評価者の数が3名であり、一般的な主観評価実験と比べて評価者の数が少ないが、Nielsen らの研究[8]において、インタフェースの評価者の人数を変えた実験を行った結果、問題発見に関してもっともコストパフォーマンスの良い人数として、3~5人という数値が得られており、今回の評価では、提案手法の問題点を全て見つけだすことや、信頼性の非常に高い結果を得ることはできないが、提案手法の

表1 ディスプレイデバイスの仕様
Table 1 Specifications of Display Device

CPU	Intel Core Duo U1400(1.20GHz)
Display	4.5 Inch TFT Color LCD
Size	150.2mm x 38.2mm x 95.0mm
Weight	492g
Camera Resolution	VGA(640x480)
Focal Length	3.8mm



Front Back

図9 解体対象
Fig.9 Dismantling Target.

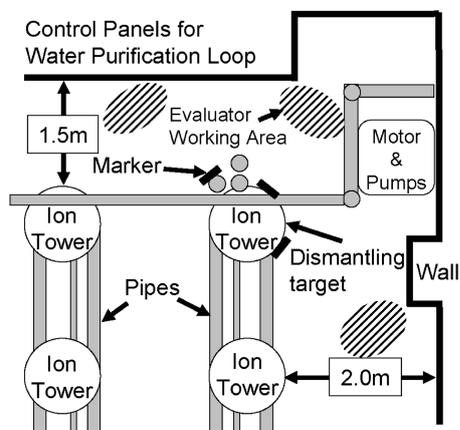


図10 純水生成室の配置図
Fig.10 Layout of Water Purification Room.

問題点を効率的に発見するのに必要な最低限の人数は確保できていると思われる。

4.3.3 解体シナリオ

解体シナリオは前述の評価者Cから事前に意見ももらいながら設定した。システムを適切に評価するためには、3章で述べた提案手法の全ての機能を最低1回は使用する内容にシナリオを設定する必要がある。作業が全て予定通りに進んだ場合、作業員が記録すべき情報は「作業が予定通りに終了した」という情報だけになり、この場合は、システムの解体箇所を参照する機能しか使わないことになる。そこで本研究では、作業の一部が予定通りに進まなかったため、どこまで作業が進んだかを記録するために、実物と比較しながら3次元CADを切断する必要があるシナリオとした。すなわち、シナリオでは、図9に示したイオン塔を3日間で解体するものとし、当初の解体作業計画は以下の通りであるとした。

第1日目

パイプ1, パイプ2, のぞき窓、イオン塔上部の

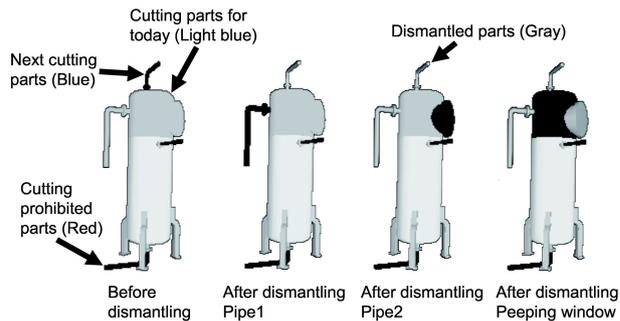


図11 ユーザに提示された3次元CADの例
Fig.11 Examples of 3DCAD displayed to the user.

4分の1を順に解体する。

第2日目

パイプ3, イオン塔上部の2分の1, イオン塔下部の4分の1を順に解体する。

第3日目

パイプ4, 残り全てを順に解体する。

しかし、作業を進めるうちに、第2日目の作業が計画よりも遅れたため、第2日目にはイオン塔下部の4分の1の箇所を解体することができず、第3日目の解体作業計画を第2日目の作業が終わった時点で以下のように変更するものとした。

第3日目

パイプ4, イオン塔下部の4分の1、残り全てを順に解体する。

イオン塔の解体順序として提示される3次元CADの例を図11に示す。

4.3.4 評価の手順

実験の事前説明の後、評価者は1人ずつ20分程度、解体シナリオに沿ってプロトタイプシステムを使い、その後、その場でアンケート用紙に記述した。その後、別室に移動し、評価者3人と同席にて1時間程度インタビューを行った。インタビューの際は、各アンケート項目について回答内容の判断理由を1人ずつ聞き、最後に解体支援手法の現場への適用可能性やその他の応用などについて意見を述べてもらった。

4.3.5 評価項目

アンケートは、システムの機能的な面に関して14項目、使いやすさの面に関して13項目をヒューリスティック法におけるガイドラインを参考に作成し、各項目を「1:そう思わない」、「2:あまりそう思わない」、「3:どちらとも言えない」、「4:ややそう思う」、「5:そう思う」の5段階で答えるものにした。さらに自由記述の欄を設け、その他気が付いた問題点や改善案を自由に記述してもらった。

表2 機能に関するアンケート項目と結果
Table 2 Questionnaire and its result about utility

質問	回答 評価者		
	A	B	C
1. 機器とCADデータを重ねることで指示書の平面図に比べてマーキング箇所を間違えにくい	3	3	3
2. CADデータの色分け(青色、水色)表示による解体順序はわかりやすい	2	4	4
3. CADデータの色分け(赤色)表示による解体禁止箇所はわかりやすい	5	4	2
4. 画面上部の文字による解体禁止の注意はわかりやすい	3	4	1
5. CADデータが半透明なので、実際の機器と重ね合わせたときに切断箇所の確認がしやすい	4	4	4
6. タッチペンで直接CADデータに解体箇所を記録できることで、簡単に進捗状況が記録できる	5	5	4
7. 実際の機器とCADデータを重ねながら解体箇所を記録できることで、正確に進捗状況が記録できる	5	5	5
8. CADデータを上下左右に移動できることは有効である	5	5	4
9. CADデータを左右に回転できることは有効である	5	5	2
10. CADデータを拡大・縮小できることは有効である	5	5	4
11. リセットボタンを押すと初期位置に戻る機能は有効である	5	5	4
12. カメラ画像を一時停止し、手元で操作できることは有効である	5	5	5
13. 解体記録を参照できることは有効である	5	5	4
14. CADデータに直接進捗状況を記録することで、紙に記録した情報をCADシステムに反映する手間が省けて作業効率率が上がる	4	4	4

なお、解体の手順指示・解体の進捗記録には、従来の紙を用いた方法と、本研究で提案する拡張現実感を用いた方法の他に、拡張現実感を用いずに3次元CADのみを用いて解体の手順指示の参照や解体の進捗記録を行う方法が考えられる。表2の最左列に示す機能に関するアンケート項目のうち、質問1、5、7は、拡張現実感を利用することの有効性を尋ねる質問であり、質問6、8、9、10、14は、3次元CADを利用することの有効性を尋ねる質問である。

4.4 評価の結果

機能に関するアンケート項目と各評価者の回答を表2に、使いやすさに関するアンケート項目と各評価者の回答を表3に示す。また、各評価者の自由記述やインタビューの結果の一部を表4に示す。

4.5 考察

機能に関するアンケートの結果(表2)を見ると、全体的に、作業情報の表示(評価項目1から5)に比べ、作業の進捗状況の記録(評価項目6, 7, 14)やCADの操作機能(評価項目8から10)の方が評価が高い傾向があると言える。

個々の評価項目を見ていくと、まず、質問1に対し

表3 使いやすさに関するアンケート項目と結果
Table 3 Questionnaire and its result about usability

質問	回答 評価者		
	A	B	C
1. パソコンの大きさは手や指にあってる	1	3	3
2. パソコンの重量は適切である	5	3	2
3. ソフトウェアのボタンは十分大きく、押しやすい	4	4	4
4. バッテリーの使用時間(4時間)は十分である	3	4	3
5. 使わない場合、所定の場所に収納しやすい	5	5	4
6. CADデータの移動操作は簡単である	5	5	5
7. CADデータの回転操作は簡単である	5	5	5
8. CADデータの拡大操作は簡単である	5	5	5
9. CADデータの切断操作は簡単である	5	5	5
10. 操作に対して応答は即座に返ってくる	4	5	5
11. 画面の広さは十分である	1	2	2
12. 表示内容が変化したときに容易に気づくことができる	1	4	1
13. 文字は小さすぎない	2	4	3

て評価者全員が「3:どちらとも言えない」と答えている。これはインタビューの結果(表4)の(B2)(B3)(B4)にあるように、「環境が複雑になると重畳表示が分かりにくくなるかもしれない」と考えられ、状況によって切断箇所や解体禁止箇所の認識を間違えやすいかどうかが変わるため、一概に答えられなかったと考えられる。

質問2から4に対しては、評価者Aは質問2が低評価、評価者Cは質問3と4が低評価、その他は高評価となっている。インタビューの結果を見ると、評価者Aは「色だけによる解体順序の表示は分かりにくい(A5)」と答えながらも「赤色の解体禁止表示は分かりやすい(A2)」、「CADは紙よりも分かりやすい(A3)」、「解体順序の番号表示もあれば分かりやすい(A4)」と答えていることや、評価者Cは「画面上部の警告表示が見にくい(C1)」と答えながらも「CADの付近に文字で表示されればわかりやすい(C5)」と答えていることから、色分け表示だけでなく、3次元CADの近くに説明を表示すれば、3次元CADによる切断箇所・手順の表示は有用に成り得ると考えられる。これは評価者Bのインタビュー結果(B7)からも確認できる。

質問6と7に関しては評価者全員から高評価が得られており、また、インタビューでも肯定的な評価が得られている(A1)(B1)。解体作業が全て予定通りに行われた場合は、どの箇所をどの程度解体する予定であったのかが予め分かっているため、作業をどこまで進めたかを新たに記録する必要はなく、作業の進捗を管理するシステム等に「予定通りの作業を終了した」旨を登録するだけでよいが、作業が予定の所までできなかった場合、もしくは予定以上に作業が進んだ場合には、実際に作業をどこまで進めたのかを具体的に記

表4 自由コメントとインタビューの結果
Table 4 Results of free comments and interview

評価者 A	(A1) 作業記録が簡単に記録できることがよかった。
	(A2) 赤色の解体禁止表示は分かりやすい。
	(A3) 3次元 CAD データによる表示は紙よりも直感的で分かりやすい。
	(A4) 解体順序が色でしか判別できないが、解体順序の番号表示もあれば分かりやすい。
	(A5) 色分けのみによる情報提示だと表示内容が変化した場合に気づきにくい。
	(A6) ディスプレイが小さい。
	(A7) バッテリーの持ち時間が十分かどうかは使用状況による。
	(A8) 解体記録にメモを入れられればよい。
	(A9) 初心者への事前教育に応用できるかもしれない。
評価者 B	(B1) ペンによる切断記録は簡単に有効である。
	(B2) 配管等が多くなると見にくくなると考えられる。
	(B3) 今回使用した箇所は比較的広いが、もっと狭く、込み入った環境も多い。
	(B4) 周辺のパイプがもっと多い場合、重畳表示が分かりやすいかどうか疑問がある。
	(B5) 狭い場所を対象物が大型の場合、画面に収まりきらない。
	(B6) 配管や足場など周りの状況が表示されていないため、実物と見比べにくい。画面が大きくなると見やすくなると思う。
	(B7) 文字による指示と CAD データの対応が分かりにくい。CAD データの上に文字を書いた方が分かりやすいかもしれない。
	(B8) 解体記録の結果は、対外アピールとして、どのように解体が行われているかの説明に使える。
評価者 C	(C1) 画面上部の文字による警告表示が見にくい気がした。
	(C2) カメラでマーカを撮影する際、腕を水平に固定しなければならず、少し疲れを感じた。カメラを目線の位置にもってくると楽だと思う。
	(C3) パソコンを長時間使用する場合は少し重く感じる。
	(C4) 画面はもっと広い方がよい。
	(C5) 画面上部の文字による解体禁止箇所が分かりにくかった。CAD データの付近に文字で表示されれば分かりやすい。

録する必要がある。今回の評価で、第2日目に予定通りに作業が進まなかった状況を想定して評価者にプロトタイプシステムを使用してもらったが、その結果、質問6や質問7の評価が高かったことから、本研究で提案する拡張現実感を用いた切断箇所の記録方法は、作業が予定通りに進まなかった場合に、進捗状況を記録する方法として現場で受け入れられる可能性が高いと言える。ただし、質問7に関して、今回の評価では実際の機器の切断は行っておらず、切断箇所の指定も、シナリオに沿って評価者に切断箇所を想像してもらい、その位置を画面上で指定することにより行っている。従って、「正確に進捗状況が記録できる」というのは、あくまでも評価者の主観的な評価であり、実際に本研究で提案する手法が十分実用的であるかどうか、正確に進捗状況を記録できるかどうかは、新たに別の評価実験を行うことにより確認する必要がある。

質問5、8、10、11、12に関しては評価者全員から高評価が得られており、CADデータを半透明に表示することや、CADデータを手作業でも移動・拡大・縮小ができること、作業の進捗の記録の際にカメラを一時停止できることは有効であると言える。

質問9に関しては、評価者によって評価が分かれているが、後日評価者Cに評価が低かった理由を確認した結果、「この機能を利用する状況があまり想像できない」ことが原因であったことが分かった。また、質問13に関しても高評価が得られており、解体記録の参照機能は有効であることが確認できた。

一方、質問14に関しては、評価者全員が「5:そう思う」ではなく「4:ややそう思う」と答えている。この回答の理由について後日評価者に確認したところ、「まだ実際に運用してしていないので100%作業効率上がるかどうか分からない面もある」と考えていることが分かった。

以上を3次元CADを利用することの効果および拡張現実感を利用することの効果の観点から整理すると、3次元CADを利用することの有効性を尋ねる質問に関しては、質問9に対する評価者Cの評価以外は高評価であったことから、3次元CADを用いた方法は従来の紙を利用した方法に比べて有効であると言える。また、拡張現実感を利用することの有効性を尋ねる質問に関しては、環境が複雑になると重畳表示が分かりにくくなる可能性があるが、質問5と7の結果が高評価であったことから、3次元CADを用いた方法にさらに拡張現実感を用いた方法を加えることにより、より有効性が高まると言える。このように、拡張現実感を利用する方法に効果が認められた要因としては、原子力発電プラント内は非常に複雑であり、また、似た外見の機器が多数並んでいることから、3次元CADを用いた方法だけでは、3次元CADと実際の現場の対応を判断することが難しいためであると考えられる。

一方、使いやすさに関するアンケートの結果(表3)を見ると、質問6から9に対する回答により、CADデータの操作は非常に簡単であったことが確認できる一方、質問11と13およびインタビューの結果(A6)(B6)(C4)を見ると、今回使用したPCの画面が小さすぎたことが分かる。しかし、画面を大きくするためにはPCも大きくする必要があるが、質問2に対する回答やインタビューの結果(C3)を見ると、既に現在のPCでも重すぎると感じている評価者もいる。今回提案する手法では、監督者がシステムを利用するのは、作業前の解体箇所の確認と、解体後の記録の、数十秒から長くても2、3分程度(今回の評価での使用時間から判断される推定値)であると考えられるが、監督者の中には、今回の評価者よりも筋力が弱い人もいる

可能性もあるため、単に大きなPCを用いるだけでは重さが問題となる可能性が非常に高い。

PCの処理性能に関しては、質問10に対して高評価が得られていることや、インタビューでも動作速度に関して否定的な意見は得られていないことから、今回用いたPCの処理性能は十分であったと言える。そのため、提案手法を実用化するにあたり、PCの性能は高くする必要は無いが、軽くて大きい画面のPCが必要であると言える。

インタビューのその他の結果を見ると、新しい機能として、解体記録にメモを入れられるようにすること(A8)が提案されており、今後の開発で実装を検討する必要がある。また、新しい応用先として、初心者への事前教育(A9)や対外アピール(B8)に利用することが提案されており、拡張現実感と3次元CADを用いた手法の応用先が広いことも確認できた。一方、(B2)から(B6)の回答の様に、作業環境が複雑になった場合や、作業場所が狭い場合に、実際の機器と3次元CADの対応が分かりにくくなる可能性等も指摘されている。これは、CADデータに対象とする機器だけでなく、その周囲の配管などを含めて表示させ、それをユーザが自由に部分的に表示・非表示できるようにすることで解決できる可能性があるが、この方法が有効であるかどうかは今後、実際に確認する必要がある。

なお、ヒューリスティック法では、熟練者と初心者の間には、発見される問題点の数で2.7倍もの開きがあるとされる[6]ため、今回の評価実験では、問題発見の効率を上げることを目指して、被験者として全て、現場作業を良く理解した熟練者を選んだ。その結果、今回の評価では「作業環境が複雑になった場合や、作業場所が狭い場合に、実際の機器と3次元CADの対応が分かりにくくなる」という、現場を理解していない初心者には思いつきにくい問題点が指摘された。しかし、実際の作業では、作業内容に習熟していない人が作業を行う場合があるため、本研究で提案する手法をそのまま現場に適用すると、初心者が利用する際に、知識不足等が原因で、今回の評価では現れなかった新しい問題が生じる可能性がある。そのため、今後、本研究で提案する手法を実用化するためには、新たに初心者を対象とした評価実験を行う必要がある。

5 まとめと今後の課題

本研究では、拡張現実感と3次元CADデータを利用して解体作業を支援する手法を提案し、「各設計が意図通り有効であるか」、「提案手法がどの程度現場で受け入れられるか」、「実用化するにあたりどのような問題があるか」を調べるため、ヒューリスティック法により提案手法を評価した。その結果、以下のことが

分かった。

- 拡張現実感と3次元CADを用いた切断箇所の参照は、紙を用いる場合よりも直感的である。しかし、色分け表示だけでなく、文字による説明を3次元CADの近くに表示するべきである。
- 拡張現実感を用いた切断箇所の記録は簡単で使いやすく、現場で受け入れられる可能性が高い。
- 提案手法を実装するにあたり、使用したパソコンの処理性能(Intel Core Duo U1400)は十分であるが、画面をより大きく(4.5Inchより大きく)、重さをより軽く(500gより軽く)する必要がある。
- 提案手法は、初心者への事前教育や対外アピールにも利用できる可能性がある。

上記の結果のうち、特に1番目と3番目の結果は、今後、モバイルパソコンを用いて同様なシステムを実現するにあたり、一般的に活用できる有用な知見である。一方、今回の提案手法は、環境が複雑になった場合に使いにくくなる可能性があり、今後、より複雑な環境で提案手法が有用であるかを調べる必要がある。

謝辞

本論文は(財)関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団の出版助成を受けて出版された。

参考文献

- [1] Y. Iguchi, Y. Kanehira, M. Tachibana and T. Johnsen : Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS) of the Fugen Nuclear Station, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.41, No.3, pp.367-375(2004).
- [2] M. Tonnis, C. Sandor, C. Lange, H. Bubb : Experimental Evaluation of an Augmented Reality Visualization for Directing a Car Driver's Attention, Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.56-59(2005).
- [3] W. Friedrich : ARVIKA: Augmented Reality for Development, Production and Service, Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.151-152(2002).
- [4] 下田 宏, 石井 裕剛, 山崎 雄一郎, 吉川 榮和 : 拡張現実感とRFIDを用いた原子力プラントの系統隔離作業支援システム, 保全学, Vol.3, No.2, pp.30-37(2004).
- [5] M. F. Zaeh and W. Vogl: Interactive laser-projection for programming industrial robots, Proceedings of the International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pp.125-128(2006).
- [6] A. Webster, S. Feiner, B. MacIntyre, W. Massie, T. Krueger: Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation, Proceedings of ASCE Third Congress on Computing Civil Engineering, pp.913-919(1996).

- [7] S. Feiner, B. MacIntyre, D. Seligmann: D. Knowledge-based augmented reality, Communications of the ACM, No.36, Vol.7, pp.52-62(1993).
- [8] J. Nielsen, R. Molich. : Heuristic Evaluation of User Interface, Proceedings of ACM CHI'90, pp.249-256(1990).
- [9] 正明, 時津 倫子, 伊東 昌子: ユーザ工学入門, pp.194-199, 共立出版 (1999).
- [10] Z. Bian, H. Ishii, M. Izumi, H. Shimoda, H. Yoshikawa : Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to NPP Maintenance Work and its Experimental Evaluation, ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp. 35-44(2006).

(2007年6月26日受付)

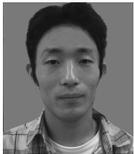
[著者紹介]

石井 裕剛 (正会員)



1998年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。2000年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程期間短縮修了。同年京都大学大学院エネルギー科学研究科助手。2004年-2005年ノルウェーエネルギー技術研究所客員研究員。博士(エネルギー科学)。人工現実感、拡張現実感の研究に従事。IEEE、ヒューマンインタフェース学会、電子情報通信学会、日本保全学会などの会員。

中井 俊憲



2007年京都大学大学院エネルギー科学研究科修士課程修了。現在株式会社キーエンスに勤務。在学中拡張現実感の研究に従事。

卞 志强



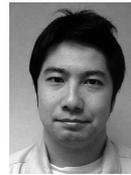
2007年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。現在松下電工株式会社に勤務。在学中拡張現実感の研究に従事。博士(エネルギー科学)。

下田 宏



1989年京都大学大学院工学研究科電気工学第二学専攻修士課程修了。同年株式会社島津製作所に入社。1996年京都大学大学院エネルギー科学研究科助手。1999年同助教授。2002年-2003年ノルウェーエネルギー技術研究所客員研究員。博士(工学)。ヒューマンインタフェースに興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会、システム制御情報学会、日本原子力学会などの会員。

泉 正憲



2002年核燃料サイクル開発機構(現日本原子力研究開発機構)入社。同年新型転換炉ふげん発電所発電課に所属し、運転業務に従事。2003年環境技術開発課に配属され、廃止措置におけるエンジニアリング支援システムの開発・保守業務に従事。2006年福井大学大学院工学研究科修士前期課程修了。日本原子力学会会員。

森下 喜嗣



1983年動力炉・核燃料開発事業団(現日本原子力研究開発機構)入社。新型転換炉(ATR)の安全評価に係わる業務、高速増殖炉(FBR)に係わる機器の開発業務及びナトリウム取り扱いの訓練・教育計画関係の業務を経て、現在ふげんの廃止措置に係わる研究開発業務に従事。日本原子力学会会員。