

石井裕剛

京都大学

原子力発電プラントにおける保守作業

原子力発電は、現在の日本の総発電量の約3割を占める重要なエネルギー源である。地球温暖化問題が深刻化する中、太陽光発電や風力発電等の環境に優しい新エネルギーの普及が十分に進むまでは、運転時に二酸化炭素をほとんど排出しない原子力発電は、日本の重要なエネルギー源の1つであり続けると予想される。

しかし原子力発電は、近年、経済性を向上させると同時に、安全性や信頼性をさらに向上させることが求められており、その方策の1つとして、プラントの保守形態を、定期的に機器の保守・交換を行うTBM (Time-based maintenance) から、機器の劣化状態に合わせて保守・交換を行うCBM (Condition-based maintenance) へ移行させることが進められている。TBMからCBMへ移行させることにより、不必要な分解点検に伴うヒューマンエラーを低減させる効果が期待できる一方で、保守作業員には、これまでより高いレベルの知識・技能が要求されるようになってきている。また、これまで原子力発電プラントの安全を支えてきた多くの熟練保守作業員が、定年退職を間近に控えており、経験の浅い保守作業員の割合が急速に増加することが懸念されている。そのため、今後、原子力発電プラントの保守作業には、何らかの支援が必要になる。

拡張現実感 (Augmented Reality ; AR) は「通常は目に見えないものを見せることができる」「現実世界の位置や方向を直感的に示すことができる」「現実世界と仮想世界の間の対応を直感的に示すことができる」等の特徴を備えており、これらの特徴を上手く利用することにより、原子力発電プラントの保守作業を効果的に支援することが可能である。

本稿では、これまで試みられてきた拡張現実感の保守作業支援への応用例と、実際に拡張現実感を保守作業の現場で使用するために必要となる要素技術の開発状況および今後の課題について述べる。

拡張現実感の保守作業支援への応用例

--- 保守作業員の感覚を拡張する ---

拡張現実感という言葉には、もともとユーザの感覚を拡張するという意味が含まれているが、拡張現実感を用いて保守作業員の感覚を拡張することにより、これまでより高次の認知行動が可能になる。

たとえば、保守作業対象物の内部の構造や圧力、放射線強度、温度分布など、通常は直接見ることができない情報をセンサやデータベースから取得し、3次元的に可視化して保守作業員の視界に重畳表示することが考えられる。これにより、保守作業員はあたかも自分の感覚能力が拡張したかのようになり、機器の状況の把握や健全性の診断などの作業の支援が可能になる。

実際に保守作業員の感覚を拡張することを目的とした拡張現実感の応用例としては、IFE (Institute for Energy Technology of Norway) による放射線可視化システムがある¹⁾。これは、プラント保守作業現場の放射線分布をあらかじめ計測・シミュレーションした結果を作業現場で可視化するものである。保守作業員は、これから作業を行う現場でHMD (Head Mounted Display) を介して周りを見回すことにより、外界の視野に重畳された形で、放射線の強度を見ることができる。

図-1に、放射線可視化の例を示す。ここでは、人の胸の高さでの放射線強度をメッシュの高さと色で提示しており、通常は人間の目には見えない放射線の強度を、あたかも感覚が拡張したかのように視覚的に知覚することが可能となる。これにより、保守作業員が作業現場での放射線分布をより直感的に参照することが可能になり、危険区域を避けながら目的地まで移動する等の行動を、より安全・確実に遂行することが可能になる。

--- 現実世界の位置や方向を示す ---

拡張現実感を用いて操作対象の機器の位置や操作方法を提示することにより、従来の紙のマニュアルを用いる場合に比べて、短時間かつ確実に作業を遂行できるようになる。

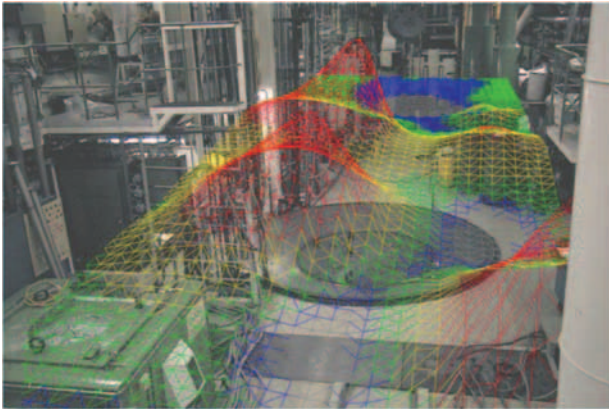


図-1 放射線可視化の例¹⁾

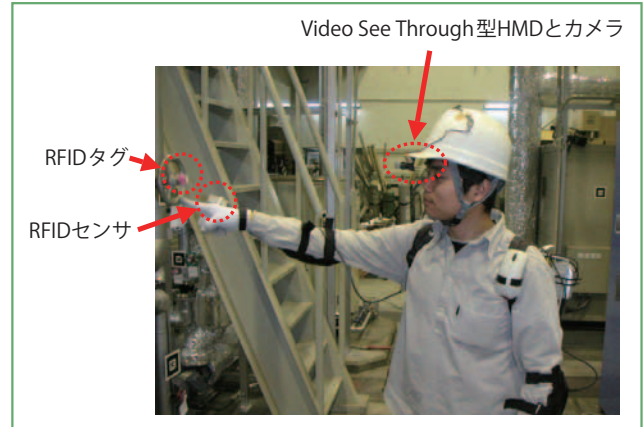


図-3 配管系統隔離支援システムの試作例

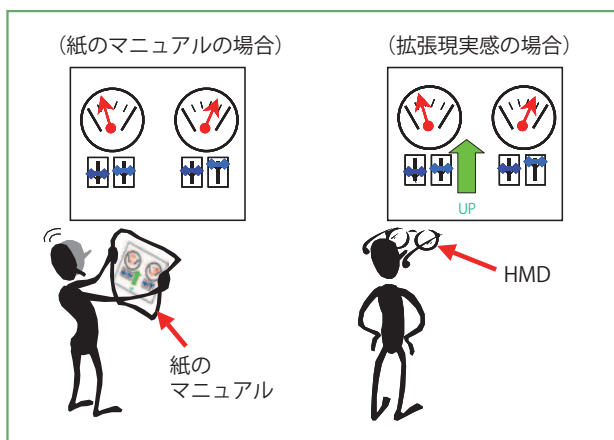


図-2 操作対象を見つける作業の比較

たとえば、図-2に示すような機器のレバーを上げる操作を行う作業を考える。従来の紙のマニュアルを参照する方法では、保守作業員がマニュアルに書かれた内容を理解したとしても、実際に操作を行うためには、マニュアルに書かれた機器が、プラント内のどこにあるのかを探さなければならない。この場合、保守作業員は操作対象のレバーを特定するために、マニュアルに書かれた内容を記憶するか、もしくはマニュアルと実際の機器の間の視線移動を繰り返す必要があり、時間がかかると同時に間違いも起こりやすい。一方、拡張現実感を用いて、文字や矢印などの情報を、操作対象となるレバーの上に重畳表示すれば、保守作業員は、煩雑な探索作業を行うことなくしに目的のレバーを見つけることが可能になる。

また、保守作業員の眼前に操作対象の機器がない場合でも、現在の保守作業員の位置と方向に応じて、拡張現実感を用いて進むべき方向を示すことができれば、地図を見ながら自分が今どこにいてどちら方向を向いているかを考える必要がなくなるため、短時間かつ確実に操作対象の機器のある場所まで移動できるようになる。

拡張現実感を用いて保守作業員をナビゲーションする

システムを試作した例としては、系統隔離作業を支援するシステムがある²⁾。系統隔離作業は、保守作業対象となる機器施設等をプラントの全体系統から隔離する作業であり、保守作業員は、作業指示書に従って、バルブを正しい順番に見つけ出して操作する必要がある。具体的には、(1) 隔離の対象となる機器の付近へ移動し、(2) バルブについている銘板に記載された識別IDをもとに操作対象となるバルブを見つけ出し、(3) バルブを操作する、という一連の作業を繰り返すことになる。しかし、プラント内には膨大な数のバルブがあり、それらの中から目的のバルブを間違えずに探し出すことが必要である。

図-3に示すシステムでは、HMDを装着した作業員に対して拡張現実感により作業対象のバルブの位置を示すことで、系統隔離作業を支援する。本システムを装着した保守作業員は、HMDを介して図-4に示すような映像を見ることができ、多数のバルブの中から操作対象のバルブを容易に探し出すことができる。また本システムは、RFIDセンサも備えており、バルブに貼付されているRFIDタグをスキャンすることにより、特定したバルブが正しいものであることを再確認することも可能である。

--- 現実世界と仮想世界を比較する ---

拡張現実感の「現実世界と仮想世界の間の対応を直感的に示すことができる」という特徴は、「現実世界と仮想世界の間の異なっている個所を見つけやすくできる」という特徴でもある。この特徴を利用すれば、現実世界をモデル化した3次元CADデータと現実世界の間の異なっている個所をユーザに見つけてもらい、その違いを修正してもらうことが容易になる。

運転を終了した原子力発電プラントは、解体する必要があるが、通常のビルの解体とは異なり、設備・機器が放射化されているため、適切に管理しながら作業を進める必要がある。また、放射性廃棄物を適切に管理するためにも、解体作業の進捗状況は詳細かつ正確に記録する

必要がある。

図-5に示すのは、拡張現実感を応用した解体作業支援システムである³⁾。このシステムでは、(1)切断対象箇所や切断禁止箇所の参照支援と(2)作業進捗状況の記録支援の2つの支援環境が実現されている。作業員はビデオカメラが接続された小型タブレット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モデルが現実世界の解体対象機器に位置・方向・大きさを合わせて重畳表示される。(1)の参照支援では、重畳表示される3次元CADモデルは、あらかじめ設定された切断対象箇所、切断禁止箇所等の情報を元に色分けされて表示される。このモデルを参照することにより、作業員はどの部分を解体すべきか、どの部分は残すべきか等を直感的に知ることができる。一方、(2)の記録支援では、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、その日の作業開始前の状態の機器の3次元CADモデルが重畳表示される。作業員は、すで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モデル上では残っている部分の境界線を電子ペン(スタイラスペン)を用いて指定することにより切断済みの箇所を入力する。このシステムを用いることにより、小型タブレットの画面上で実際の映像と3次元CADモデル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。

要素技術の開発状況と課題

以上に述べたように、拡張現実感を応用することにより、さまざまな保守作業支援が可能になるが、実際に保守作業の現場に拡張現実感を導入するためには、さらなる要素技術の開発が必要である。ただし、その際、保守作業に特有の事情を考慮しながら開発を進める必要がある。

たとえば、エンタテインメントに拡張現実感を応用する場合、現実世界の光源を考慮して仮想物体を描画する等、光学的整合性を考慮することにより、視界に重畳表示させる仮想物体のリアリティを向上させることが重要

(視界内に操作対象バルブがない場合) (視界内に操作対象バルブがある場合)

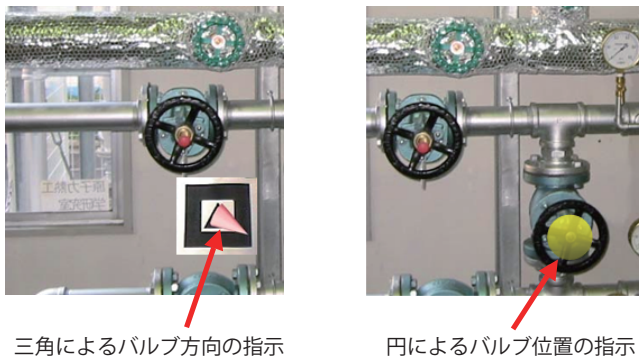


図-4 保守作業員に提示される映像の例

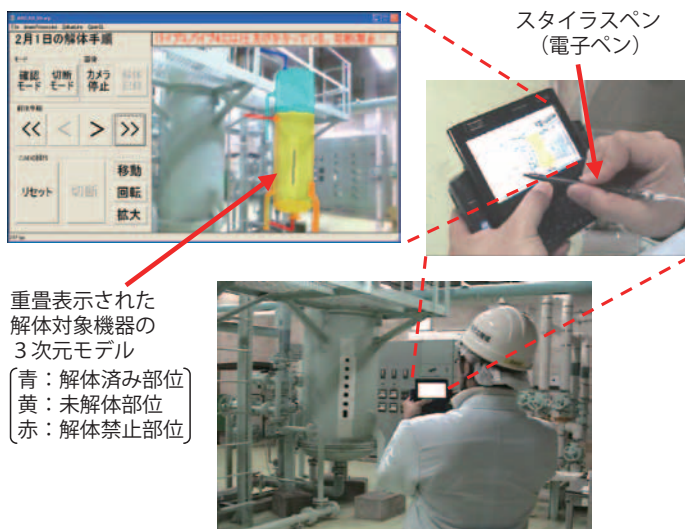


図-5 解体作業支援システム

な要素の1つとなるが、保守作業の現場で提示する映像では、光学的整合性は必ずしも考慮する必要はなく、影等をまったく含まない映像を提示しても問題がない場合が多い。提示する映像のフレームレートに関しても、必ずしも高い必要はなく、拡張現実感の利用形態によっては、静止画に対して重畳表示を行うだけで十分である場合もある⁴⁾。しかしその一方で、保守作業員に対して間違った位置に情報を提示した場合、保守作業員が間違った機器を操作してしまう、実際には危険な区域を安全であると間違って認識して近づいてしまう等、危険な行動を誘発してしまう可能性があるため、現実世界と仮想世界の位置合わせは、高い精度・安定性で実現することが重要になる。

以下では、拡張現実感を実現する際に重要な役割を果たすトラッキング技術とディスプレイ技術について、開発の現状と課題を紹介する。

トラッキング技術	利点	欠点
GPS	<ul style="list-style-type: none"> カーナビ等で利用実績があり安定 屋外環境であれば広範囲で利用可能 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内環境では利用できない
Wi-Fi	<ul style="list-style-type: none"> 屋内環境でも利用可能 比較的安定して利用できる 既存のインフラを利用可能 	<ul style="list-style-type: none"> インフラ整備が進んでいない環境では利用できない 精度が低い
慣性センサ	<ul style="list-style-type: none"> 環境内に新たに機器を設置する必要がない 計算負荷が非常に低い 	<ul style="list-style-type: none"> ドリフト成分に起因する誤差が蓄積する 世界座標値を得るには他の方法と併用が必要
超音波センサ	<ul style="list-style-type: none"> 比較的広い範囲で精度良く計測できる 	<ul style="list-style-type: none"> 環境内に新たに機器を設置する必要がある 環境内にある物体に影響されやすい
磁気センサ	<ul style="list-style-type: none"> 安定した磁場内では比較的精度が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 環境内に新たに機器を設置する必要がある 金属など磁場を乱す要因があれば精度が低下する トランスミッタが発生する磁場内でしか利用できない
ビジョンセンサ (自然特徴)	<ul style="list-style-type: none"> 環境内に新たに機器を設置する必要がない 	<ul style="list-style-type: none"> 複雑すぎる／単純すぎる環境内では不安定 環境が大きく変化する場合は利用できない
ビジョンセンサ (マーカ)	<ul style="list-style-type: none"> 安価に実現できる マーカが撮影できる範囲では高精度で安定 	<ul style="list-style-type: none"> あらかじめマーカの 3 次元位置を計測する必要がある マーカを貼るスペースが必要 広範囲で利用する際には大量のマーカが必要

表-1 トラッキング技術とその利点・欠点

--- トラッキング技術 ---

拡張現実感を実現する際に利用可能なトラッキング技術としては、GPS、Wi-Fi、慣性センサ、超音波センサ、磁気センサ、ビジョンセンサ(カメラ)等を利用したものがあがるが、表-1に示すように、それぞれ利点と欠点がある。保守作業を行う現場は、頑健な建屋の内部であり、金属の機器が多数配置されている等の特徴があるため、GPS、超音波センサ、磁気センサは、現状では使用することが難しい。また、保守作業員が比較的長時間システムを使用することになる、保守作業が進行するにつれて環境が大きく変化等の特徴があるため、慣性センサや自然特徴点を用いた手法も、単独で使用する事は難しい。また、Wi-Fiのようなインフラは、原子力発電プラント内部ではまだ十分に整備されておらず、また、ナビゲーション以外の用途では、精度が十分ではない。以上のような背景から、これまでは、マーカを用いた手法をプラント内部で使用可能なように改良する試みがなされてきた。

ラインマーカを用いたトラッキング

これまで拡張現実感を実現する際に広く使用されてきた正方マーカ(正方形の枠の内部にID識別のためのパターンを配置したマーカ)には、カメラで最低1つのマーカを撮影できれば、マーカとカメラの間の相対的な位置と方向を計測できるという利点がある。しかし、カメラとマーカ間の距離が長い場合は、高い解像度のカメラを用い、さらに縦横方向ともにサイズを大きくしたマーカを用いる必要がある。原子力発電プラント内部でマーカを使用する場合、マーカを環境に貼り付けることにより景観が損なわれることは大きな問題にはならないが、大きな正方マーカを多数貼り付ける領域を確保するこ

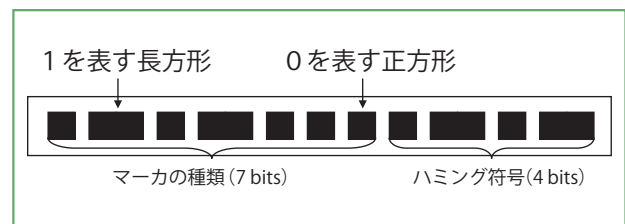


図-6 ラインマーカの例

とは難しいという問題がある。そこで、原子力発電プラントの内部には配管が多数配置されていることに注目し、配管の上に貼り付けやすい形状のマーカとして、図-6に示すような線形状のマーカ(ラインマーカ)を用いたトラッキング手法が開発されている⁵⁾。

このマーカでは、合計11個並べた正方形と長方形の組合せで11ビットの情報を表現しており、7ビットでマーカの種類を表現し、残りの4ビットのハミング符号により、任意の1ビットの誤りを訂正できるようにしている。また、マーカの両端をトラッキングの計算に使用するための特徴点としている。

マーカとカメラの間の相対的な位置と方向を計測するためには、4点以上の特徴点が同時にカメラに写る必要があるため、このマーカを用いる場合は、最低2本のマーカをカメラで同時に撮影する必要があるが、遠距離から認識可能にするためにマーカのサイズを大きくしたとしても、マーカの短辺の長さは短く抑えることができるため、配管の上に容易に貼り付けることが可能である。

遠近両用マーカを用いたトラッキング

前述した系統隔離作業のように、保守作業員が広い範囲を移動しながら作業を行う必要がある場合がある。そ

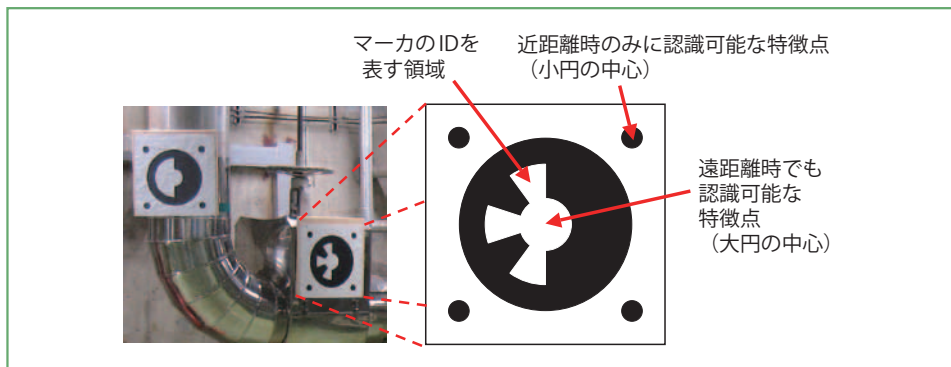


図-7 遠近両用マーカの例

のような場合に、マーカを用いたトラッキング手法を利用するためには、環境に大量のマーカを貼り付ける必要があり、現実的ではない。マーカの数が増える理由の1つに、これまでは、マーカとカメラの距離に応じたさまざまな大きさのマーカを環境に貼り付ける必要があったことが挙げられる。すなわち、ユーザが拡張現実感を利用しながら広い範囲を移動することを可能にするためには、サイズが大きい遠距離用のマーカと、サイズが小さい近距離用のマーカの両方のマーカを環境に貼り付ける必要があった。

このような問題を解決するマーカとして、図-7に示すような遠近両用マーカがある⁶⁾。遠近両用マーカでは、遠距離からでも安定して認識可能な特徴点を持つ1つの大円と、近距離からのみ認識可能な特徴点を持つ4つの小円が、1つのマーカ内に配置されている。カメラとマーカとの距離が長い場合は、カメラ画像上ではマーカが小さく写るため、1つのマーカからは、大円が持つ1つの特徴点のみ認識可能であるが、作業環境内の広い領域を撮影することになるため、同時に複数のマーカがカメラに写ることになり、複数のマーカからの特徴点を用いてトラッキングを行うことができる。一方、カメラとマーカとの距離が短い場合は、カメラに同時に写るマーカ数は少なくなるが、カメラ画像上ではマーカが大きく写るため、大円と小円の両方の特徴点を同時に認識することができる。そのため、1つのマーカのみを用いてトラッキングを行うことができる。このように、遠近両用マーカを用いることで、1つのサイズのマーカを環境に貼り付けるだけで、遠距離と近距離の両方の距離でトラッキングを行うことができるようになり、広い範囲を保守作業員が移動する必要がある場合でも、環境に貼り付ける必要があるマーカ数を少なくすることができる。

マーカ位置自動計測システム

マーカを用いたトラッキング手法を用いる場合には、環境に貼り付けられたマーカの3次元位置と方向を事前に計測する必要がある。しかし、原子力発電プラント内



図-8 マーカ位置自動計測システム

には、さまざまな形状の機器が複雑に配置されているため、マーカの貼り付け位置も複雑になる。そのため、遠近両用マーカを用いることにより、環境に貼り付ける必要があるマーカ数を減らすことができたとしても、マーカの3次元位置と方向を手作業で計測することは、非常に多くの労力を要するだけでなく、間違いも誘発する可能性がある。

そこで、図-8に示すような、マーカの3次元位置と方向を全自動で計測するシステムが開発されている⁷⁾。このシステムは、電動雲台、電動ズーム付きカメラ、レーザー距離計測器、および、それらを制御するパソコンで構成されている。このシステムは、環境に貼り付けられたすべてのマーカを上下左右に回転するカメラで認識した上で、レーザー距離計測器を用いて各マーカの特徴点の3次元位置を正確に計測する作業を全自動で行うことができる。前述のように、遠近両用マーカには、5点の特徴点が定められているため、これらの3次元位置の計測結果から、マーカ方向も求めることができる。このシステムを用いることにより、マーカを用いたトラッキング手法を用いる際に必要となる準備の労力を大幅に削減することが可能になる。

以上に述べたように、原子力発電プラント内部でも使用可能なトラッキング手法が、徐々に実現されつつある

が、今後は、よりトラッキングの安定性を高めると同時に、準備の労力をさらに低減させるために、マーカ、自然特徴、慣性センサ等を組み合わせたハイブリッド方式のトラッキング手法を実現する必要があると考えられる。

--- ディスプレイ技術 ---

原子力発電プラント内で拡張現実感を用いる場合、情報提示デバイスとしてどのようなデバイスを用いるかは非常に重要な問題である。保守作業は基本的に手を使うことになるため、両手を自由に使用できる HMD 型の情報提示デバイスを用いることが望ましいが、現在一般に入手可能な Video See Through 型の HMD は、(i) 視野が狭い、(ii) 故障やバッテリー切れの際に外界が見えなくなる、(iii) パソコン等の画像生成デバイスとの間の接続が有線であるため作業の邪魔になる等の問題がある。特に (i) に関しては、プラント内での保守作業中は、常に足下や頭上に注意を払う必要があるため、非常に危険である。Optical See Through 型の HMD であれば、(i) と (ii) の問題は解決できるが、装着位置がずれた場合に、正しい位置に情報を重畳表示できなくなるため、確実な情報提示を要求される保守作業の現場では使用が難しい。このような問題があるため、現在は、小型のハンドヘルドデバイスを片手に持って使用するか、タブレット型のパソコンを三脚の上に固定して使用するかたちでシステムが試作されている。しかし、前者は画面が小さいために表示が見づらい、後者は自由に移動できないため、用途に限られる等の問題がある。今後は、これらの問題を解決した新しいディスプレイデバイスを開発する必要がある。

今後の展望

実際の原子力発電プラントの保守作業では、事前調査、作業計画立案、資材調達、各種ミーティング、作業準備、後片づけ、作業報告等にも多くの時間や労力を投入しており、本稿で主に紹介したような現場で実際に機器を操作・点検・解体する作業ばかりが行われているわけではない。そのため、現場で保守作業を行う瞬間だけを支援

するシステムが技術的に実現可能だとしても、その実現に要する労力を小さくすることができなければ、実際の導入は進まないであろう。特に、本稿で紹介した応用例の中には、支援対象となる作業に関連した機器や環境の 3 次元モデルが入手可能であることを前提としているものもあるが、実際には、古いプラントでは 3 次元モデルが存在せず、プラント建設時に作成された 2 次元の設計図のみが入手可能である場合もある。今後は、このような事情を考慮に入れながら、保守作業員に提示する情報を効率的に作成できるオーサリングツールの整備も必要である。さらに、拡張現実感を応用した支援だけを考えるのではなく、他の支援サービスとの相乗効果を狙った総合的な支援環境の実現を目指す必要がある。

参考文献

- 1) Droivoldsmo, A., Johnsen, T., Louka, M. N. and Reigstad, M. : Using Wearable Equipment for An Augmented Presentation of Radiation, Proc. of the EPRI Wireless Technology Conference, Panel-C, Paper No.3 (2002).
- 2) 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).
- 3) 石井裕剛, 中井俊憲, 卞 志強, 下田 宏, 泉 正憲, 森下喜嗣 : 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.2, pp.289-300 (2008).
- 4) Georgel P., Schroeder, P., Benhimane, S., Hinterstoisser, S., Appel, M. and Navab, N. : An Industrial Augmented Reality Solution For Discrepancy Check, Proc. of ISMAR 2007, pp.111-115 (2007).
- 5) Bian Z., Ishii H., Shimoda H., Yoshikawa H., Morishita Y., Kanehira Y. and Izumi M. : Development of a Tracking Method for Augmented Reality Applied to NPP Maintenance Work and Its Experimental Evaluation, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E90-D, No.6, pp.963-974 (2007).
- 6) 石井裕剛, 藤野秀則, 顔 偉達, 楊 首峰, 下田 宏, 泉 正憲 : 遠近両用画像マーカを用いた拡張現実感用広域トラッキング手法の開発, 保全学, Vol.8, No.2, pp.43-50 (2009).
- 7) 石井裕剛, 楊 首峰, 顔 偉達, 下田 宏, 泉 正憲 : 拡張現実感用遠近両用マーカの自動登録システムの開発と評価, 保全学, Vol.8, No.3, pp.60-68 (2009).

(平成 22 年 1 月 31 日受付)

石井裕剛

hirotake@energy.kyoto-u.ac.jp

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修了・博士 (エネルギー科学)。同年, 同大学院エネルギー科学研究科助手。2004 ~ 05 年ノルウェー・エネルギー技術研究所客員研究員。2007 年から京都大学大学院エネルギー科学研究科助教。