

# 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

## A Support System for Water System Isolation Task of Nuclear Power Plant by using Augmented Reality and RFID

京都大学大学院	下田 宏	Hiroshi SHIMODA	Non-Member
京都大学大学院	石井 裕剛	Hirotake ISHII	Non-Member
京都大学大学院	山崎雄一郎	Yuichiro YAMAZAKI	Non-Member
京都大学大学院	吉川 榮和	Hidekazu YOSHIKAWA	Member

**Abstract** Aiming at improvement of task performance and reduction of human error of water system isolation task in NPP periodic maintenance, a support system using state-of-art information technology, Augmented Reality (AR) and Radio Frequency Identification (RFID) has been proposed under the concept of off-site operation and maintenance support center, and a prototype system has been developed. The system has navigation function of which an indication is superimposed directly on the user's view to help to find the designated valves by AR. It also has valve confirmation function by scanning RFID tag attached on the valve. Using the prototype system, an evaluation experiment has been conducted in order to confirm its effectiveness and to reveal its problems. As the result of the experiment, it was found that the system improved efficiency and reliability of water system isolation task, and it was also found that the visibility of HMD and its troublesome feeling to wear were the problems of the system.

**Keywords:** Augmented reality, radio frequency identification, maintenance support, water system isolation, off-site operation and maintenance support center  
E-mail: shimoda@energy.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

原子力発電所の定期点検はプラントの安全性・信頼性確保のために必要不可欠であるが、それは数千人規模の作業員が必要とされる大規模な作業であり、膨大な費用を必要とする。また近年の電力自由化から、作業の信頼性を確保しつつもその経済性を向上させることが望まれている。

これに対し、(財)エネルギー総合技術研究所革新的実用原子力技術開発提案公募事業「原子力発電所運用高度化のための次世代ヒューマンマシンシステムに関する技術開発」プロジェクトでは、原子力立地地域で設置されているオフサイトセンタと関連づけた「オフサイト運転保守支援センタ」を構想している[1]。この構想は、原子力プラントに関連する災害の防災対応のために設置されたオフサイトセンタを拡張してオフサイト運転保守支援センタを設置し、このオフサイト運転保守支援センタで複数ユニットの運転保守機能を共有化することによりプラント運転と保守の両面で効率的に人

的資源を再配置し、人材を活用しつつ、コスト低減を図ろうとするものである。本論文では、このプロジェクトの一環として進めてきた、拡張現実感(Augmented Reality; 以下 AR)技術と RFID 技術による保守作業支援のためのシステム開発に関する研究結果について述べる。

## 2. AR 技術と RFID 技術とを用いた配管系統隔離作業支援システム

近年の情報技術の発展はめざましく、その中でも単にコンピュータ内で情報を処理するだけではなく、現実世界を対象とする情報技術として AR 技術と RFID 技術が注目されている。AR 技術はヘッドマウントディスプレイ等を装着したユーザの視点位置や視線方向をトラッキングし、使用者の視野にコンピュータで生成した文字や映像を現実世界に合わせて重畳表示することで、情動的に現実世界を拡張する技術である[2]。RFID 技術は、物体に貼り付けた小さな RFID タグを非接触に RFID スキャナでスキャンすることにより、RFID タグ内に記録された情報を読み書きすることができる技術であ

り[3]、近年、商品管理や製造プロセス管理に用いられ始めている[4]。

本研究では、このAR技術とRFID技術をプラントの保守作業に適用し、その作業効率と信頼性の向上を目指している。保守作業において膨大な数の機器の中から作業対象物を特定する際には、その位置、形状、銘板に記載された情報などに基づいているが、RFID技術を作業対象物の特定に適用すると、作業対象物に貼付されたRFIDタグをRFIDスキャナでスキャンすることにより確実に効率よく作業対象物を特定することができる。これらの利点として、「作業対象物を特定する際の間違いが減少すること」、「作業効率が向上すること」等が挙げられる。すなわち、AR技術とRFID技術を保守作業に適用することにより、保守作業の信頼性向上と効率向上に寄与できると考えている。

本研究では、保守作業へのAR技術とRFID技術の適用例として、構成機器の保守作業の前後に行われる配管系統隔離作業を取り上げる。配管系統隔離作業では、保守作業センタの系統隔離作業支援ワークステーションから出力される作業指示書に従って、作業者がバルブの識別IDをもとに操作対象のバルブを順に見つけ出し操作する。しかし、原子力プラントの定期点検時には多くの機器の点検が必要であり[5]、それに伴って膨大な数のバルブ操作を実施する必要がある。AR技術とRFID技術によりこの作業の信頼性と効率が向上できれば、保守作業全体の信頼性と効率向上に寄与できる。

### 2.1 配管系統隔離作業支援の構想

オフサイト運転保守支援センタを活用した配管系統隔離作業支援の構想を以下に述べる。

- (1) オフサイト運転保守支援センタ内の保守作業センタより、作業計画に従い情報ネットワークを用いて現場作業者が携行する支援システムに配管系統隔離作業指示を出す。
- (2) 現場作業者が支援システムを用いて作業対象バルブを探し出す。
- (3) 探し出した作業対象バルブを確認する。
- (4) 支援システムの作業指示に従って作業対象バルブを操作する。
- (5) 操作実績を支援システムに入力する。作業

実績は即座に情報ネットワークを通じて保守作業センタに送られる。

- (6) 一連の作業指示が終わるまで(2)~(5)を繰り返す。

上記のうち特に(2)の作業対象バルブを探し出す作業では、現在、現場作業者が経験と勘を頼りにバルブを探しており、非常に時間のかかる作業である。また、(3)ではバルブに付与されている英数字で記載された銘板だけを頼りに探し出したバルブを確認しているため、銘板の読み間違いにより間違ったバルブを操作する可能性もあり、慎重に確認しなければならない。そこで、本研究では、配管系統隔離作業のうち、作業対象バルブを探し出す作業とバルブを確認する作業に着目し、AR技術を用いて(2)のバルブを探し出す工程を、RFID技術を用いて(3)の探し出したバルブを確認する工程を支援する方法を提案する。

### 2.2 AR技術とRFID技術を用いた配管系統隔離作業支援

上記の(2),(3)の作業を支援するためには、(a)どのバルブが作業対象のバルブかを作業者に直観的にわかりやすく提示する機能、および(b)探し出したバルブを確実に効率よく確認する機能、が必要である。本研究では、上記(a)の機能をAR技術で、(b)の機能をRFID技術で実現する方法を提案する。

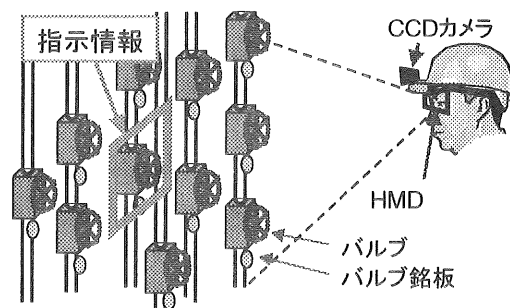


Fig.1 Indication of target valve by AR.

具体的には Fig.1 に示すように、HMD を装着した作業員に対して、AR 技術により作業対象バルブに指示情報を提示することで、直観的にバルブの探索を支援する。また、作業対象バルブにそのバルブの識別 ID を記録した RFID タグを貼付しておき、作業員が探し出したバルブに貼

付された RFID タグの識別 ID を RFID スキャナで読みとることにより、探し出したバルブが正しいかどうかを確認する。

### 2.3 配管系統隔離作業支援システムの設計

支援システムを具体的に設計するため、上記のような作業支援を行うシステムの機能を整理すると以下ようになる

#### (A)バルブ指示機能

作業対象バルブが作業者の視界中にある場合、AR 技術を用いて指示情報を作業者の視界に重畳表示することにより、作業対象バルブを指示する。

#### (B)ナビゲーション機能

作業対象バルブが作業者の視界中不在の場合、AR 技術を用いて作業対象バルブのある方向を指し示す情報を作業者の視界に表示する。

#### (C)バルブ確認機能

作業対象バルブにあらかじめ貼付した RFID タグの情報を読みとることにより、探し出したバルブが作業対象バルブであるかどうかを確認する。

#### (D)作業進捗管理機能

一連のバルブ操作の順序を管理する。

次に、上記の機能構成を具体的なハードウェアとして実現するためのシステム構成を考える。支援システムは作業員が携行して使用するため、システムが作業の妨げにならないように配慮する必要がある。AR 技術による情報提示と上記の制約条件を考えた場合、システムのハードウェア構成としては Fig.2 に示すようなウェアラブルな構成が適当である。

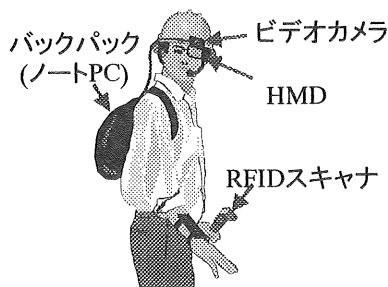


Fig.2 System structure of support system.

### 2.4 配管系統隔離作業支援システムの試作

前述の設計に基づき支援システムを試作した。ここでは、その具体的なハードウェア構成とソフトウェア構成について述べる。

支援システムのハードウェア構成は、Fig.3 のような構成とした。また、支援システムの情報提示デバイスとしては三菱電機製の SCOPO を用いた。Table 1 に SCOPO の詳細を示す。

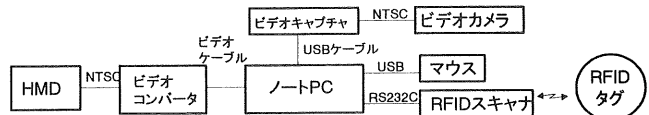


Fig.3 Hardware structure of support system.

Table 1 HMD used for support system

型式(メーカー)	SCOPO(三菱電機)
外観	
種類	片目参照型
解像度	23 万画素 (800×238dot デルタ配列)
入力信号	NTSC ビデオ信号
AR の方式	ビデオシースルー
外界映像	実視界

HMD には様々な種類があるが、支援システムの情報提示デバイスとして用いる場合には、(i)作業者の移動を妨げないように外界視野が十分確保できること、(ii)作業中に HMD がずれた場合でも正確に指示情報を重畳表示できること、(iii)作業の負荷にならないように小型軽量であること、の点を考慮して、SCOPO を採用した。SCOPO は、片目の下隅に映像を提示するものであり、ユーザは外界環境を直接見ることができるとともに、ビデオカメラで撮影した外界映像に仮想情報を電子的に重畳させた映像を見ることができる。

一方、ソフトウェアは Microsoft Windows 2000 をオペレーティングシステムとし、Microsoft Visual C++ 6.0 で作成した。また、本システムでは、AR 効果を実現するためのソフ

トウェアライブラリである ARToolKit[6]を用いた。ARToolKitでは、複数の8cm四方のARマーカを周囲の環境に貼付しておき、ユーザの頭部に取り付けた小型ビデオカメラでARマーカを撮影して画像処理することにより、周囲の環境に対するユーザの頭部の位置と方向を認識する。そして、その位置情報をもとに、HMDを用いて表示すべき仮想情報をユーザの視野中の適切な位置に重畳表示する。なお、このARToolKitでは、ARマーカのおおよそ2m以内でかつARマーカの法線方向からの角度が70度以内からビデオカメラで撮影した場合、ARマーカを認識することができる。

## 2.5 配管系統隔離作業支援システムの動作

2.4で述べた試作システムの動作について説明する。

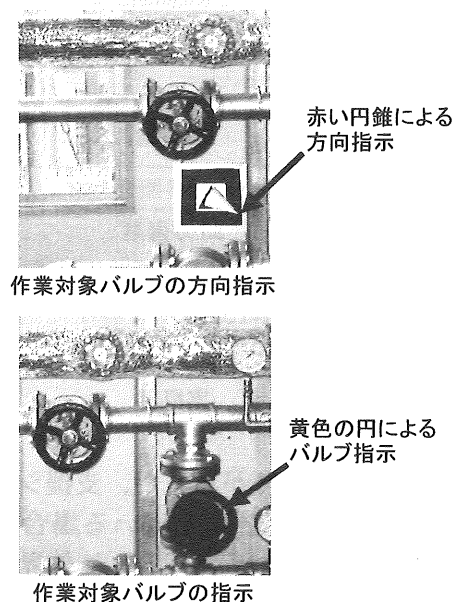


Fig.4 Examples of instruction presentation.

支援システムを装着した作業者の視界に作業対象バルブがある場合には、Fig.4 下のよう  
に、作業対象バルブに黄色い円形の指示情報が  
重畳された映像がHMDに表示される。一方、作  
業対象バルブが作業者の視界中にない場合に  
は、Fig.4 上のようにARマーカ上に作業対象バ  
ルブの方向を示す赤い円錐が重畳表示された  
映像がHMDに表示される。すなわち、作業者は  
作業対象バルブを探す際に、近くのARマーカ  
を参照して作業対象バルブの方向を調べ、その

方向に移動しながら順にARマーカを参照して  
いくことで作業対象バルブへと誘導される。  
作業対象バルブが見つければ、次にRFIDスキャ  
ナで作業対象バルブに貼付されているRFIDタ  
グを読みとり、探し出したバルブが作業対象バ  
ルブであることを確認する。バルブ操作後には、  
一連のバルブ操作が終わるまで操作インタ  
フェースであるマウスのボタンを押して次の  
作業対象バルブを探す。

## 3. 試作システムの評価実験

ここでは、上記で試作した支援システムを用  
いた評価実験について述べる。

### 3.1 実験の目的

実験の目的は、試作した支援システムが系統  
隔離作業の信頼性と効率の向上に有効である  
ことを確認すること、および支援システムの改  
良点を洗い出すことである。

### 3.2 実験方法

実験環境は、神戸大学商船学部を設置された  
マイクロガスタービン(タクマ汎用機械株式会  
社製TCP-30; 以下MGT)プラントである。これ  
が7.8m×9.0mの領域に密集していることから  
原子力プラントの一部を模擬する施設として  
適当であると考えた。実験環境には、50個のバ  
ルブがあり、これらにそれぞれバルブ識別ID  
を記録したRFIDタグを貼り付けた。また、AR  
効果を実現するため、環境に中心の絵柄が異な  
る62個のARマーカを貼付した。これらのバル  
ブとARマーカの位置は事前にシステムに登録  
しておいた。

本支援システムは特に経験の浅い作業員に  
対して有効であると期待できるため、実験の被  
験者として、配管系統隔離作業の経験がない大  
学生または大学院生12名(被験者A~L、平均年  
齢22.0歳、男性11名女性1名)に参加してもら  
った。そのうち4名はコンタクトレンズを使用し、  
残りの8名は裸眼である。実験では、支援シ  
ステムを使用して環境中の50個のバルブ  
から指定された10個を探し出して確認するタ  
スクを、指定するバルブを変えて2回ずつ行っ  
てもらった。各タスクとも指定されたバルブを

順に辿る行程は、理想的な最短経路の場合に約 63m になるようにしている。また、これらのタスクを行う前には、支援システムに慣れてもらうため、事前に支援システムを十分に使用してもらった。

実験では、評価指標として、支援システムによる効率向上とエラー削減の効果を調べるために、タスク遂行時間とエラー数を計測し、さらに、支援システムの改良点を探るためタスク実施後にユーザビリティアンケートを実施した。ユーザビリティアンケートは Table 2 に示す 7 項目を 5 段階の評価点(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: 少しそう思う、5: そう思う)で回答してもらい、さらに支援システムの長所と改良点を自由記述により回答してもらった。

Table 2 Usability questionnaires

番号	質問内容
Q1(認知性)	このシステムを動かすために、事前にたくさん事を学ぶ必要がありましたか
Q2(操作性)	このシステムが持つ色々な機能はよくまとまっていますか
Q3(操作性)	このシステムはむだに複雑になっていると思いますか
Q4(認知性)	このシステムの使い方は分かりやすかったですか
Q5(総合評価)	このシステムはバルブを探して操作する作業に役に立つと思いますか
Q6(快適性)	このシステムの操作は快適でしたか
Q7(快適性)	このシステムの装着は快適でしたか
Q8(長所)	このシステムの良いところを挙げてください
Q9(改良点)	このシステムが改良すべき点を挙げてください

### 3.3 実験の結果

全被験者についてのタスク遂行時間を Fig.5 に示す。Fig.5 の縦軸は各被験者の 2 回のタスク遂行時間の平均を表しており、右端は全被験者の 2 回のタスク遂行時間の平均を表す。全被験者の 1 回目のタスクの遂行時間と 2 回目のタスクの遂行時間には差がなかった(t 検定、 $p < 0.05$ )。エラー数については、全被験者のすべてのタスクについてバルブ間違いはなかった。

また、ユーザビリティアンケートの Q1~7 の結果を Fig.6 に示す。Q1 と Q3 は評価が高いほ

ど評価点が低くなる逆質問であるため、Fig.6 では 6 から引いた値を示している。

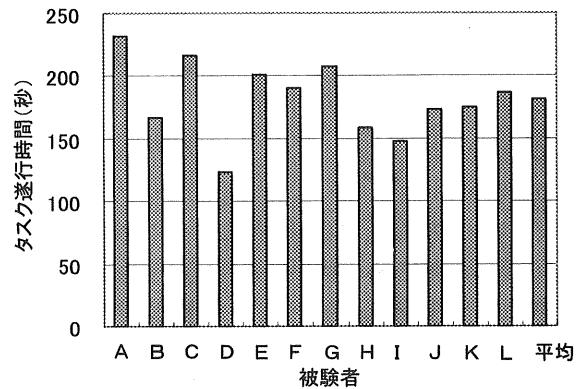


Fig.5 Result of task completion time.

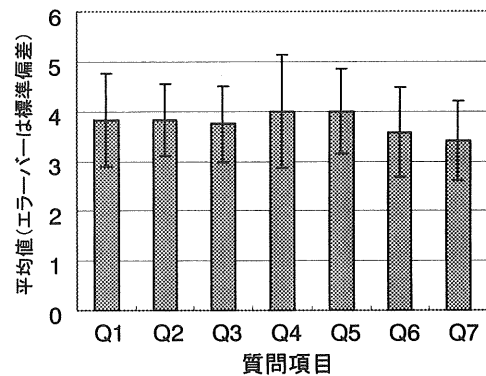


Fig.6 Result of usability questionnaire.

### 3.4 考察

Fig.5 から、被験者によってばらつきはあるものの、10 個のバルブを順に探し出して確認するのに要した時間は平均 181.7 秒であり、バルブ 1 つあたりにすると、約 18.2 秒となる。タスク遂行時間には、バルブを探し出す時間の他に、最短経路でも約 63m を歩く時間と RFID スキャナを使ったバルブ確認作業が含まれており、それを考慮すると支援システムを用いることで、バルブを探し出して確認する作業が短時間で終わっていることがわかる。

また、全被験者のすべてのタスクにおいて(延べ 240 バルブ)エラーがなかったことから、RFID での確認作業が効率よく行われ、バルブ間違いの防止に有効であることが示唆される。

また、ユーザビリティアンケートの結果から、認知性(Q1, Q4)、操作性(Q2, Q3)において、平均 3.8~4.0 の高い評価点が得られており、支援シ

システムのユーザインタフェースは認知性と操作性の面で有効であることがわかる。また、快適性(Q6,Q7)の評価点は、それぞれ平均 3.6、3.4 であり、認知性と操作性に比べて若干低いものの、3 点(どちらとも言えない)以上の評価点である。総合評価(Q5)の評価点は平均 4.0 であり高い評価が得られていることがわかる。システムの長所を自由記述でたずねた質問 Q8 の回答では、「両手が空くので作業しやすい(9 名)」、「画面とは別に外の状況も把握できるので移動しやすい(3 名)」があり、移動しやすく作業の妨げにならないという設計時の制約条件は満たされている。一方、システムの改良点をたずねた質問 Q9 の回答では、「片目で集中してみるので目が疲れる(5 名)」、「画面が小さくて見にくい(3 名)」、「フィット感を向上してほしい(2 名)」があり、視野の右下隅に表示される映像が小さくて見にくいこと、および、HMD の装着感に問題があることが指摘された。

以上の実験結果から、試作した支援システムは特に経験の浅い作業員に対して配管系統隔離作業の際のバルブ探索、および確認作業の効率と信頼性向上に有効であることがわかった。しかし、ユーザビリティアンケートの結果から、HMD の視認性と装着感に問題があることがわかり、実用的な支援システムとするためには、この問題を解決するとともに、システムのさらなる小型軽量化が必要である。

試作した支援システムは AR 効果を実現するために ARToolKit を用いており、実験環境中に 62 枚もの AR マーカを貼付し、それらの位置をシステムに登録する必要がある。実用的な支援システムとするためには、事前準備が煩雑でないトラッキング手法の開発が必要である。

#### 4. 結論

本研究では、原子力プラントの定期点検時に行われる配管系統隔離における作業対象バルブの探索と確認作業を対象に、AR 技術と RFID 技術を用いた支援方法を提案し、その設計・試作を行い、評価実験からその有効性を確認するとともに、実用的なシステムとするための改良点を調べた。

まず、AR 技術と RFID 技術を配管系統隔離作

業支援に適用する方法について検討し、AR 技術により (a) 作業対象バルブを作業員に直観的にわかりやすく提示する機能、および RFID 技術により (b) 探し出したバルブを確実に効率よく確認する機能を実現することを述べた。次に、この支援方法を実現するための機能設計を行い、それに従って支援システムを試作した。試作した支援システムは片目参照型の HMD を用いたウェアラブル構成とし、AR 効果を実現するために ARToolKit を用いた。さらに、試作した支援システムを用いて、MGT プラントを模擬施設として評価実験を行った。実験では、実験環境中の 50 個のバルブから順に 10 個のバルブを探し出して確認するタスクを 12 名の被験者に与え、そのタスク遂行時間、エラー数を計測するとともに、タスク後にユーザビリティアンケートを実施した。実験の結果、試作した支援システムは特に経験の浅い作業員に対して配管系統隔離作業の信頼性と効率の向上に有効であることがわかった。

ただし、試作した支援システムで使用した HMD の視認性と装着感に問題があり、また、AR 効果を実現するための事前準備が煩雑であるという問題がある。これらの問題を解決するとともに、本研究では取り上げていなかった保守作業センタと現場作業の連携を実現する機能を追加し、実用的な支援システムを構築することが今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] 吉川榮和, 大井忠, オフサイト運転保守支援センター, 保全学, Vol.3, No.1, 2004.
- [2] Azuma, R., A Survey of Augmented Reality, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.6, No.4, pp.355-385, 1999.
- [3] Finkenzerler, K. 著, ソフトウェア工学研究所訳, RFID ハンドブック, 日刊工業新聞社, 2001.
- [4] Langnau, L., Applications in RFID, Material Handling Management, Vol.55, No.9, pp.43-45, 2000.
- [5] 横尾智之, 藤森昭彦, 特集: I. 原子力発電所の保守点検の現状, 日本原子力学会誌, Vol.44, No.4, pp.318-320, 2002.
- [6] Kato, H., Billingham, M., Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System, Proc. of 2nd Int. Workshop on Augmented Reality, pp.85-94, 1999.