

プラント 運転・保守の教育訓練への Virtual Reality 適用研究の展望

下田 宏^{*1} 石井 裕剛^{*1} 山本 倫也^{*1} 吉川 榮和^{*1}

Application Studies of Virtual Reality to Training for Plant Operation and Maintenance

Hiroshi Shimoda,^{*1} Hirotake Ishii,^{*1} Michiya Yamamoto^{*1} and Hidekazu Yoshikawa^{*1}

Abstract – This paper describes present status of virtual reality (VR) application studies to training environment for engineering plant operation and maintenance work. First, problems of VR application to training are described, and required elemental technologies for both operation and maintenance training are discussed based on characteristics of actual plant training and general framework of VR-applied training system. Then, methodologies and related technologies for constructing VR training system are reviewed from the viewpoint of characteristics of operation/maintenance training, followed by introduction of some developed training systems both for plant operation and maintenance work. Finally, the present status and future prospects of VR-applied training system are discussed.

Keywords : Engineering Plant, Training, Virtual Reality, Operation, Maintenance

1. はじめに

原子力プラントに代表される工学プラントが複雑大規模化するにつれ、その信頼性の一層の確保が課題とされている。ヒューマンエラーによる運転過誤や設備故障、人身事故の防止のため、プラントを運転する運転員や保守作業を行う作業員の教育訓練の高度化が不可欠とされている^[1]。

この一環として、最近、プラント運転・保守の教育訓練へ人工現実感 (Virtual Reality、以下、VR) を適用しようとする研究開発が進められている^{[2]~[7]}。これは、VR が作り出す仮想空間内で実際の訓練に替わる体験的な訓練を行おうとするものである。これにより、訓練費用の削減や訓練場所が小さくて済む利点だけでなく、例えば、高圧の配管から水が噴出している部分の保守作業訓練のように、モックアップでは再現が困難な作業の体験的訓練が実施できる利点が期待できる。

VR をプラント運転・保守の教育訓練へ応用する研究は、主に、原子力プラントを中心に行われている。本稿では、プラントの中でも主に原子力プラントの運転・保守の教育訓練を中心に、教育訓練の問題点と VR 適用上の課題、関連要素技術、実際の研究開発の事例、および、研究開発の現状と今後の方向性について展望する。

2. プラント 運転・保守の教育訓練への VR 適用上の課題

2.1 教育訓練の課題と VR 適用の効果

プラント運転・保守の教育訓練では、プラント構成機器の構造や動作などの学習のみならず、モックアップを用いた実習が不可欠である。実際の訓練では、例えば原子力プラントの運転訓練の場合、プラントの物理的挙動をリアルタイムで模擬できるシミュレータと制御室を再現したモックアップを作成し、訓練生は、その制御室内でプラントの起動停止や異常事象への対応操作などを体験的に学んでいる^[8]。保守作業も同様に、対象機器のモックアップを用いて訓練を行っている^[9]。しかし、現在の教育訓練の環境は、表1に示すような問題点があり、その改善が望まれている。表1では、VRの適用により期待される効果を問題と対比させて示したが、VRを教育訓練に適用することにより、仮想空間内で運転や保守作業を疑似体験でき、さらにモックアップでは実現が難しい訓練を実施できる可能性がある。特に、訓練コストの削減、安全の確保、モックアップでは再現が難しい作業の訓練に効果が期待できる。

それでは、VRをプラント運転・保守の教育訓練に適用するには、どのような要素技術が求められ、どのように構成されるべきであろうか。以下では、まず、プラント運転・保守の教育訓練の特質について考察し、次に、VRによる教育訓練システムの枠組みについて述べる。そして、これらより、VRによる教育訓練システムの構成要素について、求められる要素技術を整理する。

^{*1} 京都大学大学院エネルギー科学研究科

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

表1 プラント教育訓練の問題点とVR適用による改善

Table 1 Problems of Plant Training and Improvements by applying VR

	問題点	VR適用により期待される効果
運転・保守 訓練共通	(1) 体験訓練のためのモックアップが必要になり訓練コストが高い	・モックアップが不要なため訓練コストを削減できる
	(2) 訓練環境の変更が困難	・コンピュータ内に訓練環境をモデル化するため変更が容易
	(3) 訓練を実施する際、参加者が一ヶ所に集まる必要がある	・ネットワークにより、遠隔地から訓練に参加することも可能
	(4) 訓練に広い場所が必要	・コンピュータと周辺デバイスがあれば、訓練可能
	(5) 必要な訓練期間が長い	・CAIによる教示支援機能を付加できる
	(6) 訓練中に緊張感を持続するのが難しい	・作業現場の雰囲気を再現することも可能
運転訓練	(7) 高度な経験と知識をもつ指導者が必要	・CAIによる教示支援機能を付加できる
	(8) 実際の保守作業と同等の危険性がある	・安全に訓練を実施できる
保守訓練	(9) 訓練生の数が多い	・訓練の機会が増える
	(10) モックアップでは再現が難しい訓練がある	・モックアップでは再現不可能な事象も仮想空間内で訓練可能
	(11) 訓練に使用するモックアップが破損する可能性がある	・仮想空間中の機器は破損しない

2.2 プラント教育訓練の特質

運転と保守のそれぞれの教育訓練の特質を、訓練内容、訓練方法、人と機械のインタラクション、人と人のコミュニケーションの観点からみると、表2のようにまとめられる。運転と保守の体験的訓練では、特に、人と機械のインタラクションに関する部分が大きく異なる。運転では、主に運転員がプラント操作盤を通してインタラクションするのに対して、保守では、主に保守作業員が直接手や道具で機器を取り扱うインタラクションが中心である。また、保守訓練では、作業の手順、工具の使用法、機器の良否の判断方法等が、主な教示内容であるのに対し、運転訓練では、複雑なプラントの構造や物理的特性に始まり、異常発生時の対応操作まで、プラント全体に関わる高度で幅広い知識や手順の習得が対象となる。そのため、通常、運転訓練では、保守訓練に比べて高度な知識や実地の経験を持つ指導者が必要であるという特質がある。

2.3 要請される要素技術

図1にVRによる教育訓練システムの構成上の枠組みを示す。これは、一般的なVRの構成に教示支援機能を付加したものである。すなわち、人間からVR環境への作用(入力)、VR環境から人間への作用(出力)、仮想世界のシミュレーション、仮想空間内の物体の3次元モデル、および、教示支援機能から構成される。そこで、表2で挙げた運転・保守の教育訓練の特質に対比させて、これらのそれぞれの構成要素について、VRによる教育訓練システムに要請される要素技術を表3に示す。

人間からVR環境への入出力に関しては、運転訓練が主に制御盤とのインタラクションによるのに対し、保守訓練では主に機器を手や道具で扱う。そのため、保守訓練には、入出力に高い時間分解能と詳細な3次元映像が必要となるが、ほぼ平面状の制御盤に配置された機器を扱う運転訓練には、それほど高い時間分解能や詳細な3次元映像は必要ない。

同様に、仮想空間内の物体の3次元モデルは、保守訓

練の場合、物体の形状自体に意味があるため、精密な3次元モデルが必要であるのに対し、運転訓練では、3次元モデルよりも制御盤に表示される各種の計装情報が重要である。

シミュレーションに関しては、運転訓練の主なシミュレーション対象がプラント全体の物理的挙動であるのに対し、保守訓練では、主にプラント構成機器やその部品の力学的な振舞いが対象である。

教示支援機能に関しては、運転・保守ともに、誤りの指摘機能や作業中の記録を残す機能が必要である。運転訓練では、特に複雑なプラントの構造や複雑な挙動を効率よく学習するための教示支援技術が必要である。

また、運転・保守訓練は、通常、複数人で行われるため、仮想空間内でも人と人とのコミュニケーションが重要である。仮想空間内でコミュニケーションを行うためには、複数人で仮想空間を共有し、音声会話、身振りなどにより、互いの意思の疎通が必要である。さらに、保守訓練では、機器の分解・組み立て訓練の際に、協力して機器を移動させたり道具の受け渡しのような物理的な共同作業が要求される。

3. システム構築の方法論と関連要素技術の展望

ここでは、VR技術による運転・保守訓練システムを

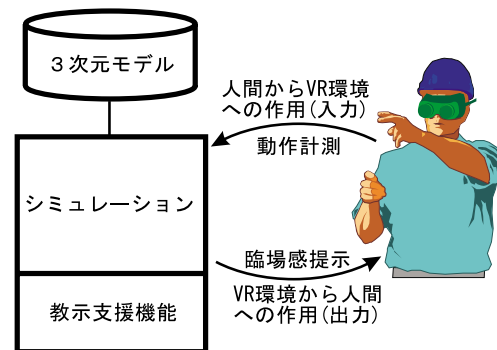


図1 VRによる教育訓練システムの枠組み

Fig.1 Framework of VR-applied Training System.

表2 運転・保守の教育訓練の特質

Table 2 Characteristics of Operation / Maintenance Training

	運転訓練	保守訓練
主な訓練内容	・プラントの立ち上げ、監視、異常診断・対応操作、シャットダウン等の操作 ・高度な知識と論理的思考を修得	・プラント構成機器の分解、組み立て点検、交換等の手順 ・安全で確実な作業技能を修得
代表的な訓練方法	・プラントシミュレータを操作し訓練後に操作記録を検討する ・高度な知識と経験を持つ指導員が教示する	・モックアップを使用して保守作業を行い、訓練後に作業記録を検討する
人と機械のインタラクション	・制御盤上に配置された計器を参照し、装置を操作する	・プラント構成機器を手や道具で扱う
人と人のコミュニケーション	・運転員同士やリーダーとのバーバル/ノンバーバル交流 ・指導員による指導	・手順を読む人、作業する人記録する人同士のバーバル/ノンバーバル交流 ・指導員による指導

表3 要請される要素技術

Table 3 Required Elemental Technologies

	運転訓練	保守訓練
人間から VR 環境への入力	・ある程度の時間分解能が必要 ・大まかな 3 次元位置が計測可能であればよい ・位置入力は 2 次元のみでも可 ・レバーやボタンが操作できればよい	・比較的高い分解能が必要 ・正確な 3 次元位置入力が必要 ・複雑な動作の入力が必要 ・道具を扱える必要あり
VR 環境から人間への出力	・計装情報等の大量の情報を提示 ・更新速度は比較的遅くてもよい ・2 次元表示でも可	・提示情報は比較的少ない ・高速な更新速度が必要 ・3 次元表示が必要 ・3 次元音響や力覚フィードバックが効果的
3 次元モデル	・物体の形状はおおまかでもよい ・数値情報等を表示する必要あり	・比較的正确な 3 次元形状を表示する必要あり
シミュレーション	・プラント挙動をリアルタイムで模擬する必要あり ・プラント異常を模擬する必要あり	・構成部品の力学的挙動をリアルタイムで模擬する必要あり ・物体の詳細な接触判定が必要
教示支援機能	・誤りの指摘 ・訓練中の記録を残す ・プラント挙動や操作のタイムチャート ・高度な知識の効果的な教示	・誤りの指摘 ・訓練中の記録を残す
人と人とのコミュニケーション	・仮想空間の共有 ・音声会話	・仮想空間の共有 ・音声会話 ・人の動作の可視化 ・道具の手渡し ・共同作業

構築するための方法論と関連する要素技術について展望する。表 4 に、前章で述べた VR 教育訓練システムの構成要素ごとに、その方法論と関連要素技術を示し、以下で説明する。

人間から VR 環境への作用では、訓練生が仮想空間内を自由に移動し、物体を操作できることが必要である。特に、保守訓練では、プラント構成機器や道具をあたかも手で扱っているように操作できることが望ましい。そのためには、ポヒマスセンサやデータグローブを用いて訓練生の行為を計測し、VR 環境への直接操作としてモデリングする方法がある^[10]。

VR 環境から人間への作用では、複雑なプラントの訓練環境を効率的に描画するため、LOD(Level of Detail)法による描画の高速化が必要であろう^{[11],[12]}。例えば、第 2 世代と呼ばれるプラント制御盤では、1 つの制御盤上に 100 個前後の機器が配置されている。これに対し、石井らの研究^[3]では、10 個の制御盤上に合計 500 個以上配置された機器を高速に描画するために LOD を用いており、LOD を用いない場合と比べて約 2 倍から 5 倍の高速描画に成功している。また、出力デバイスでは、体験

型訓練として没入感の高い視覚提示を実現するために、HMD(Head Mounted Display)のような立体映像提示デバイスや、大型プロジェクタのような大画面型デバイスが用いられる。大画面型デバイスは、複数の訓練生を対象とした集合教育にも用いることができる。

VR 環境のシミュレーション方法としては、プラント全体あるいは構成機器の複雑な動作を効果的にシミュレーションするために、状態遷移モデルによる状態管理方法^[13]と物理法則を適用して挙動を計算する方法が用いられる。また、そのための基盤ソフトウェアとしては、複雑な仮想環境を効率的に構築するために、dVISE^[14]のような構築支援ツールや WorldToolKit のような構築支援ライブラリがある。汎用性や高速描画を重視する際には、OpenGL のような 3 次元映像描画ライブラリを用いる。

プラントの運転・保守訓練では、実際に存在するプラント環境を仮想空間内に構築する必要がある。そのため、物体の 3 次元形状をモデリングする方法としては、プラントの設計図である CAD データを流用する方法^[15]や、実際の物体を 3 次元スキャンして形状データを得る

表4 VR教育訓練システム構築の方法論と関連要素技術

Table 4 Methodologies and Elemental Technologies for constructing VR Training System

構成要素	方法論	関連要素技術
人間からVR環境への作用/入力デバイス	・操作と移動のモデリング ・直接操作モデリング	・3次元位置センサ ・データグローブ
VR環境から人間への作用/出力デバイス	・複雑な訓練環境を効率的に描画 ・LODによる描画の高速化	・立体像提示型デバイスと大画面提示型デバイス ・3次元音響デバイス
シミュレーション方法/基盤ソフトウェア	・状態遷移モデルを用いたオブジェクト状態管理 ・物理計算による状態計算	・構築支援ツール ・構築支援ライブラリ ・描画ライブラリ
物体の3次元形状のモデリング	・設計CADからの流用/3Dスキャンによる形状計測	・DXF形式、VRML形式
教示支援	・体験型訓練 ・訓練の記録と事後分析 ・手順提示/自動実演 ・誤りの指摘 ・高度な知的教育支援	・ITS (Intelligent Tutoring System)
コミュニケーション方法/技術	・共有仮想空間 ・音声/映像通信	・インターネット ・高速通信技術

方法^[16]などが効果的である。この形状をコンピュータ内で表現する方法としては、CADデータであるDXF形式や、ネットワークとの親和性のよいVRML形式^[17]が用いられる。

教示支援方法としては、VRの特徴を最も生かした方法として体験型の教示方法が挙げられるが、その他にもコンピュータが仮想環境を制御している利点を生かして、訓練記録、手順提示、自動実演、誤り指摘などの方法が必要である。例えば、吉川らは、機器修作業に対する自動実演機能を構築し、修作業の初心者が作業手順を学習するのに効果的であるとの結果を得ている^[6]。また、運転訓練では、プラント挙動の高度な知識を修得する必要があるため、知的教育支援方法としてITS(Intelligent Tutoring System)^[18]等が効果的である。

仮想空間内での訓練生同士や教官とのコミュニケーションに関しては、仮想空間自体を複数人で共有し、音声・映像通信によってコミュニケーションする方法がある。そのためには、インターネットに代表されるコンピュータネットワークが用いられる^{[19], [20]}。

4. 実際のシステム開発事例

本章では、プラントの運転訓練と保守訓練のそれぞれについて、代表的なシステム開発研究を挙げ、研究の着眼点、VR適用による解決課題、および特徴について述べる。

4.1 運転訓練のシステム開発研究

4.1.1 ITSによるプラント運転教育システム^[2]

この研究では、発電プラントの運転に関する高度な知識を教示する支援機能に重点をおいたものであり、ITSと制御盤を模擬するVR環境を組み合わせたシステムを開発している。このシステムでは、HMDにより立体的な制御室環境を提示するとともに、2次元マウスやSpaceballを用いることで、仮想空間内の発電プラントの制御盤を操作したり発電プラントをウォークスルーできる。このような体験型訓練に加えて、ITSにより、例えば、

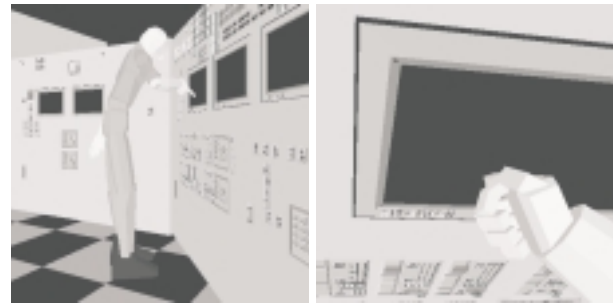


図2 プラント運転体験型教育システムの表示画面例

Fig.2 Snapshots of Experienceable Training System for Plant Operation.

生徒モデルを用いて訓練生の理解度を推定し、教示戦略を変更すること等で、効果的な教示支援を実現している。

4.1.2 プラント運転体験型教育システム^[3]

この研究では、仮想運転員が原子力プラントの制御室内で異常事象の診断と対応操作を行う様子を様々な視点から眺めることができる教育支援システムを開発している。このシステムは、大型ディスプレイと液晶シャッター眼鏡により、制御室内の仮想運転員の動作だけでなく、仮想運転員の視点からの立体映像を眺めることで、実プラントを運転している感覚が得られることが特徴である。図2に提示画面例を示す。また、仮想運転員が異常事象を診断する際の思考過程を発話で提示することにより、異常診断時の複雑な論理を効率的に理解することができる。

4.2 保守訓練のシステム開発研究

4.2.1 変電所保守員向け体感型シミュレータ^[5]

この研究では、変電所保守員の安全に対する意識向上を目的として、仮想空間内に変電所全体を構築し、保守員の正規の操作だけでなく、感電等を伴う危険な行為も体験させるシステムを開発している。このシステムは、大規模な変電所の3次元モデルを細かいパーツに分解し、訓練生の視野内のパーツのみを描画対象とすることで高

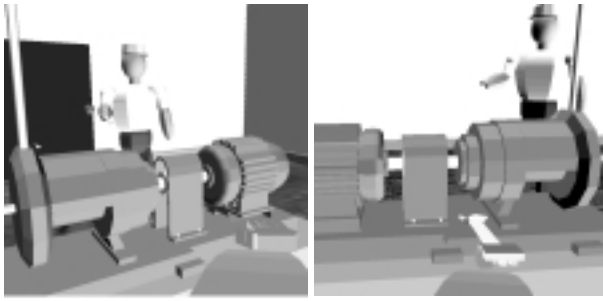


図3 DVEによる機器保守訓練システムの表示画面例

Fig.3 Snapshots of Machine Maintenance Training System using DVE.

速な処理を実現するとともに、あらかじめ定義された属性を利用して可動パーツの動作をシミュレーションしている。HMDやデータグローブを用いてウォークスルーや機器を操作できることに加え、充電部との距離判定によりアークの発生等を模擬し、リアリティの高い体感型教育を実現している。

4.2.2 分散型仮想環境による 機器保守訓練システム^[7]

この研究では、分散型仮想環境(Distributed Virtual Environment)技術により、インターネットに接続されたパソコンを用いて、複数の保守作業訓練生が共有仮想空間内に没入し、共同でプラント構成機器の分解組み立て作業を修得する訓練システムを開発している。このシステムは、訓練生間のマルチモーダルなコミュニケーションの実現に重点置き、共有仮想空間内で訓練生の視点や手を表示して作業相手の状況を確認し、音声通信によるコミュニケーションにより、協調作業を行うことができる。図3に、それぞれの訓練生に提示される画面例を示す。このシステムでは、共有仮想空間内の物体の効率的な動作シミュレーションとネットワーク通信量の削減のため、ペトリネットにより物体の状態を管理している。さらに、訓練の事後検討のため、作業内容を記録・再生する機能も備えている。

その他、プラント以外を対象にした機器保守の訓練システムの開発事例として、1993年に衛星軌道上で実施されたハッブル宇宙望遠鏡の修理作業のための訓練環境の開発を挙げることができる^[21]。この研究は、宇宙空間での非常に危険な作業に対する訓練を、VR技術を用いて安全・安価に実施することを目指したものであり、広視野惑星カメラの交換作業や、太陽電池アレイの交換作業、補正レンズ装置の交換作業等、6つの異なった訓練シナリオ用の環境が作成され、実際の任務遂行のために開発されたVR技術を用いた訓練環境としては、過去最大の100人を越すフライトチームのメンバーを訓練す

表5 VRによる教育訓練の問題点
Table 5 Problems of VR-applied Training

問題点
生理的問題
1. システムを長時間利用するとVR酔いの可能性がある
2. ステレオアノマリと呼ばれる立体視ができない人がある
心理的問題
3. テレビゲームのような感覚になり緊張感が持続しない
デバイス
4. 保守訓練に適した操作デバイスがない
5. 保守作業に欠かせない異音や異臭の提示が難しい
シミュレーション方法
6. 自由度の高い仮想空間を作りこむのが困難

るために使用され、後のアンケート調査でもその有効性が確認されている。

以上のように、運転訓練用のVRシステムでは、主に、教示支援機能に重点をおいたものが多く、保守訓練用では、仮想空間内で体験的に作業を行うことに重点をおいたものが多い。これは、プラント運転技能の修得では、主にプラントの複雑な挙動や構造の理解が主眼になっているのに対し、プラント保守技能の修得では、構成機器の点検・交換の手順や道具の使い方を憶えることに主眼がおかれているためと考えられる。

5. 現状と今後の方向

プラント運転・保守の教育訓練へVRを適用する研究開発は端緒についたばかりである。VRによる訓練環境には、訓練コストの削減や訓練時の危険性の低減だけでなく、教育訓練支援、モックアップでは再現不可能な作業の訓練、遠隔地からの共同訓練参加等の実現が期待されている。

しかし、VRを利用したプラント運転・保守の教育訓練では、表5のような問題も残っている。

1. のVR酔いの原因は正確には解明されていないが、過去の経験によって記憶された感覚情報の組み合わせと実際の感覚情報が異なるときに酔いが誘起されるという説が有力である。特に、身体への動揺と視覚情報との間に不一致がある場合に酔いが発生しやすいとされている。したがって、仮想環境が提示する感覚情報を現実のものに近づけていけば解決すると考える向きもあるが、様々なセンサを持つ人間の知覚を完全に満足させることは非常に難しく、一方で、リアリティを増すほどに認知の混乱を招く危険性をもはらんでいる^[22]。よって、現時点あるいは近い将来にも、VR酔いを起こさないシステムを開発することは難しく、システムの使用時間を制限する等の対策を取らざるを得ないと考えられる。

2. のステレオアノマリは、人工立体視環境における眼球の輻輳と焦点調節の不一致が原因といわれている^[23]。現在の立体像提示デバイスは、輻輳角の変化のみによって奥行き感覚を提示しているが、この問題を根本的に解決するには、焦点をも一致させる方法の開発が必要である。現状では、輻輳と焦点調節を一致させる方法として、

輻輳と焦点調節を一致させることができる特殊な HMD やホログラフィの利用等が考えられる。輻輳と焦点調節を一致させる HMD としては、3DDAC が開発されている^[24]。これは、コンピュータで制御可能な光学系により提示映像までの焦点を調節できる HMD であり、画像の光学的な提示位置を 0.25 m から無限遠まで、約 0.3 秒で移動できる性能を持っている。また、立体像を提示すると同時に CCD カメラを用いて眼球の回転角度を計測し、視点位置をリアルタイムで求めることができる ES-HMD が開発されており^[23]、3DDAC の焦点調節機能と ES-HMD の視点位置検出機能を組み合わせることにより、自動的に眼球の輻輳と焦点調節を一致させる HMD を開発できる可能性がある。一方、ホログラフィを利用する方法では、仮想空間内の物体の 3 次元形状から光の干渉を計算してレーザー等により立体像を提示するが、これを動画像として作成するためには膨大な計算量が必要のため^[25]、現状ではリアルタイムで動的な仮想空間を生成するシステムは実用化されていない。

3. の緊張感の問題を解決するためには、VR 環境への没入感の向上だけでなく、訓練内容やその実施方法の改善が必要である。具体的には、(1) 繰り返し訓練を実施する際には、訓練が単調にならないように、訓練内容を適宜変化させる。(2) ただ単に作業を体験させるだけでなく、訓練内容に点数をつけて評価するなど、訓練に目的を持たせる。(3) 仮想空間の共有技術等を用いて、訓練のインストラクターが訓練生と共に訓練空間に入り、訓練を監視する。(4) 何度もやり直しが可能な訓練の実施体制にせず、やり直しの回数に制限を設ける。等の対策が考えられる。しかし、(3),(4) に関しては、「訓練実施にインストラクターが付き添う必要がない」「繰り返し訓練を実施することができる」といった、VR を用いる利点が失われる可能性があり、訓練の目的に応じて適宜、対策を考える必要がある。

4.,5. は、主にデバイス関連の問題である。保守作業の技能訓練には、力覚、聴覚、嗅覚への情報提示が不可欠であるが、現状では、これらの点はあまり重視されておらず、すでに商品として販売されており、入手が容易であるが、保守訓練を実施する際に使用するには機能が不足しているデータグローブやボヒマスセンサ、PHANToM 等を流用していることが多い。今後、効果的に技能訓練を実施するには、(1) 訓練生の動作、位置等をリアルタイムに計測できる (2) 可動範囲が十分に広く、訓練生が保守作業を行う際にその行動を制限しない (3) 工具を使う際の力の入れ具合や、機器の重量等を体感するための力覚フィードバックを提供できる、といった仕様を同時に満たすデバイスの開発が必要である。また、嗅覚への情報提示に関して、現時点では、テーマパーク等で、予め用意した特定の臭いを有する気体を大気中に混入する

等の方法で嗅覚合成の試みがなされてるが、即応性等の問題があり、訓練生の移動や異常の発生に応じて、臭いの内容を変化させる必要がある保守訓練には使用できない。今後、(1) 人間の嗅覚刺激を発生させるメカニズムの解明、(2) 特定の臭いを合成する手法の確立、(3) 人間の鼻の粘膜等に直接臭いを提示する方法の確立等を行う必要がある。

6. の問題の解決には、自由度の高い仮想空間を効率よく構築できるシミュレーションモデルの開発や構築支援環境の整備が必要である。これに対し、石井らは、自由度の高い仮想空間を効率的に開発するためのシミュレーションモデルとして、仮想空間内の物体の状態遷移をペトリネットを用いてモデル化する手法^[26]を考案し、さらに訓練環境を構築するための支援システムの開発^[27]も行っている。ただし、この方法では、仮想空間内への物体の追加に伴いペトリネットが複雑になり、構築可能な仮想空間に一定の制限がある欠点も残っている。例えば、石井らが提案したモデル化手法では、14 個の物体で構成され、作業開始から約 100 動作で作業が終了する仮想空間をモデル化した場合、トランジションの総数が 367 個、プレースの総数が 158 個となる。今後、ペトリネットの構造化等による改良が必要である。

将来の VR を利用したプラント運転・保守の教育訓練システムとしては、いくつかの方向が考えられる。運転訓練では、前章に挙げたように教示支援機能に重点をおいたもののほかに、プラントに何らかの異常が発生したような緊急時の対応操作の修得を目的とした訓練環境が考えられる。そのためには、上に挙げた問題点のうち、3. の緊張感の課題を解決する必要がある。また、保守訓練では 2 つの方向性が考えられる。一つは、分解組み立て時の力加減や異常・劣化診断時の異音・異臭等を提示することにより、より現実に近い保守技能の訓練を行おうとする方向である。例えば、訓練生の動作に応じて臨場感のある音を提示すれば、稼働中のモータが発する異音を聞き分けて、モータの異常の有無を判断する訓練や、機器をハンマーで叩いたときの僅かな音の違いを聞き分けることによって、機器の劣化診断を行う訓練等を実施することが可能になる。この場合には、前述のように 4.,5. のデバイスの問題を解決する必要がある。もう一つは、保守作業の技能修得ではなく、多数の部品からなる機器の複雑な分解組み立て手順を学習する方向である。この際には、構成部品の多様なインタラクションを実現する必要があるため、6. の問題を解決し、自由度の高い仮想空間を効率よく実現する必要がある。

6. ま と め

本稿では、プラント運転・保守の教育訓練への VR 適用研究について展望した。まず、プラント教育訓練の特

質をまとめ、特に人と機械のインタラクションに関する部分が、運転と保守で大きく異なることを示した。そして、その特質の違いをもとに、(1)人間からVR環境への作用、(2)VR環境から人間への作用、(3)シミュレーション方法、(4)物体の3次元形状のモデリング、(5)教示支援、(6)コミュニケーション方法、の6つの観点から運転と保守の訓練環境を構築する際に要求される要素技術についてまとめた。その後、実際のシステム開発事例として、プラントの運転訓練と保守訓練のそれぞれについて、代表的なシステム開発研究を挙げ、研究の着眼点、VR適用による解決課題、および特徴について述べた。そしてプラント運転・保守の教育訓練へのVR適用研究の現状と今後の方向として、現時点で解決すべき問題点とその解決への方策について述べた。

現状の研究開発では、まだ、教育訓練の一部に使用され始めたばかりであるが、今後は、プラントの運転・保守の教育訓練のみならず、様々な分野で、VR技術が生成する“仮想空間”内に没入して、安全に、かつ効率的に教育訓練を進められるような体験型教育支援環境への発展を期待する。

参考文献

- [1] 早苗, 三森: 原子力発電所の運転と訓練; 電気学会誌, **Vol.117**, No.8, pp.528-531(1997).
- [2] Matsubara, Y. et al.: Virtual Learning Environment for Discovery Learning and Its Application on Operator Training; IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, **Vol.E80-D**, No.2, pp.176-188(1997).
- [3] Ishii, H. et al.: A Basic Study of Virtual Collaborator - The First Prototype System Integration; Proc. of Fourth International Symposium on Artificial Life and Robotics, pp.682-685(1999).
- [4] 三輪他: VRを用いた保守教育支援システム; 電気学会論文誌, **Vol.115-C**, No.2, pp.203-211(1995).
- [5] 新井他: VR技術を用いた変電所保守員向け集合教育用体感型シミュレータの開発; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **Vol.2**, No.4, pp.7-16(1997).
- [6] 吉川他: 仮想空間における機器保守訓練シミュレーション; 日本原子力学会誌, **Vol.39**, No.12, pp.72-83(1997).
- [7] 山本他: 分散型仮想環境による機器保守訓練システム; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **Vol.4**, No.1, pp.321-330(1999).
- [8] 鈴木他: ABWRシミュレータを用いた運転訓練の実績; 火力原子力発電, **Vol.50**, No.5, pp.28-32(1999).
- [9] 吉田: 泊原子力事務所原子力訓練センターの概要; 火力原子力発電, **Vol.47**, No.5, pp.487-494(1996).
- [10] 野村, 澤田編著: バーチャルリアリティ; 朝倉書店, pp.19-22(1997).
- [11] Teller, S., Sequin, H.: Visibility Preprocessing for Interactive Walkthroughs; Proc. of SIGGRAPH'91, pp.61-69(1991).
- [12] 渡辺: TVF遠隔保守支援システムの開発(3); 日本原子力学会1998年春の年会要旨集, F37, p.243(1998).
- [13] 手塚他: 仮想空間における機器保守訓練システムの開発; 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェー

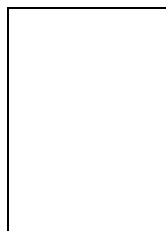
ス部会, News and Report, **Vol.11**, No.2, pp.245-252(1996).

- [14] 村上: dVISE; 第5回産業用バーチャルリアリティ展・セミナー要録(IVR'97), pp.69-80(1997).
- [15] 渡辺: TVF遠隔保守支援システムの開発; 日本原子力学会1997年春の年会要旨集, G30, p.335(1997).
- [16] Pot, J. et al.: Techniques for CAD reconstruction of 'as-built' environments and application to preparing for dismantling of plants; Nuclear Engineering and Design, **Vol.178**, No.1, pp.135-43(1997).
- [17] ペッシ著, 松田訳: VRMLを知る; プレンティホール出版(1996).
- [18] Mizoguchi, R., Ikeda, M.: FITS: A Generic Framework for ITS - Student modeling and tutoring strategies; Proc. of Expert and Tutoring Systems Conference, pp.1-14(1992).
- [19] Stytz, M.: Distributed Virtual Environments; IEEE Computer Graphics and Application, **Vol.16**, No.3, pp.19-31(1996).
- [20] Waters, R., Barrus, J.: The rise of shared virtual environments, IEEE SPECTRUM, **Vol.34**, No.3, pp.20-25(1997).
- [21] Loftin, R. B. and Kenny, P. J.: Training the Hubble Space Telescope Flight Team; IEEE Computer Graphics and Applications, **Vol. 15**, No. 5, pp.31-37(1995).
- [22] 中川, 大須賀: VE酔い研究および関連分野における研究の現状; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **Vol.3**, No.2, pp.31-39(1998).
- [23] 福島他: 両眼視差による瞳孔反応のEye-Sensing HMDによる実験研究; 計測自動制御学会論文集, **Vol.35**, No.2, pp.191-199(1999).
- [24] 杉原他: 焦点調節補償機能を有するHMD:3DDAC Mk.4; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **Vol.4**, No.1, pp.261-268(1999).
- [25] Babbitt, W.R.: Memory, processing, and routing applications of spatial-spectral holography in ultra-high-speed computing systems; Proc. Advanced Optical Memories and Interfaces to Computer Storage, International Society of Optical Engineering, **Vol.3468**, pp.304-311(1998).
- [26] 石井他: 人工現実感を用いた機器保守訓練システムへのベトリネットの適用; 第40回システム制御情報学会研究発表講演会予稿集, pp.239-240(1996).
- [27] 石井他: 人工現実感技術を用いた機器保守の訓練環境構築支援システムの開発; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **Vol.4**, No.1, pp.303-312(1999).

(1999年7月5日受付, 10月15日再受付)

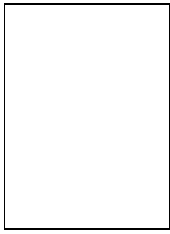
著者紹介

下田 宏 (正会員)



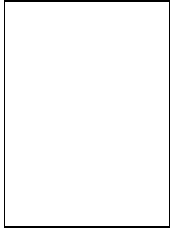
1989年京都大学大学院工学研究科電気工学第二学専攻修士課程修了、同年株式会社島津製作所に入社。1996年京都大学大学院エネルギー科学研究科助手、現在に至る。ヒューマンインタフェースに興味を持つ。1992年システム制御情報学会榎木記念賞論文賞受賞。システム制御情報学会、日本原子力学会、計測自動制御学会などの会員。博士(工学)。

石井 裕剛



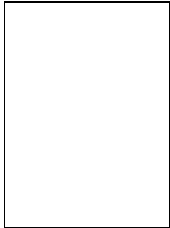
1998年京都大学大学院工学研究科電気工学第二学専攻修士課程修了、現在、同大学院エネルギー科学研究科博士課程在学中。主に、バーチャルリアリティの分野に興味を持つ。日本バーチャルリアリティ学会、日本原子力学会、電子情報通信学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。

山本 倫也



1999年京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻修士課程修了、現在、同博士課程在学中。主に、バーチャルリアリティの分野に興味を持つ。日本バーチャルリアリティ学会、日本原子力学会などの会員。

吉川 榮和（正会員）



1970年京都大学大学院工学研究科電気工学第二学専攻博士課程修了。同年同大学原子エネルギー研究所助手。1974年動力炉・核燃料開発事業団勤務。1981年京都大学原子エネルギー研究所助教授。1992年同教授。1996年同大学大学院エネルギー科学研究科教授、現在に至る。エネルギー情報学、マンマシンシステムの研究に従事。1992年システム制御情報学会榎木記念賞論文賞、1995年計測自動制御学会論文賞受賞。電気学会、計測自動制御学会、日本原子力学会などの会員。工学博士。