

人工現実感技術を用いた原子力プラント運転の 体験型教育システムの開発

石井 裕剛^{*1} Wu Wei^{*1} 下田 宏^{*1} 吉川 榮和^{*1}

Development of a VR-based Experienceable Education System
for Operating Nuclear Power Plants

Hirotake Ishii^{*1} Wei Wu^{*1} Hiroshi Shimoda^{*1} and Hidekazu Yoshikawa^{*1}

Abstract – A VR-based experienceable education system has been developed by realizing a human-shaped virtual operator in virtual control room of Nuclear Power Plants (NPP). The virtual operator has expertise knowledge about NPP on how to diagnose some anomalies and operate the control panels by himself. The human-like body motion of the virtual operator can be synthesized as 3 dimensional animations and a trainee can watch the virtual operator operating the control panels from any view-direction the trainee would like to see. And he can also 'experience' the plant operation by viewing the control room from the virtual operator's viewpoint as if the trainee would operate the control panels by himself. Moreover, the trainee can understand what the virtual operator thinks, by hearing the verbal utterance of the virtual operator. With this education system, it is expected that the trainee can master the skills for operating the control panels effectively. The overall architecture of the developed education system and the functional configuration of the system are described in this paper.

Keywords : Virtual Reality, Human Motion Synthesis, Human Model, Education System, Nuclear Power Plant

1. はじめに

原子力発電プラントの運転員を育成する原子力発電訓練センターでは、毎年専門の訓練カリキュラムを設け、数ヶ月に渡る長期の教育訓練を実施している^{[1],[2]}。訓練生は、この訓練カリキュラムにおいて、前半は原子力発電の基礎知識や原子力発電プラントの構造および設備、プラントの起動と停止操作の手順、異常発生時の対応方法等を座学形式の講義で学び、後半はモックアップやシミュレータを用いた実技訓練を受ける。モックアップ等を用いた実技訓練では、実際の運転状況に近い環境で作業を体験できるために訓練効果が高く、訓練カリキュラムの重要な部分を占めているが、モックアップ等の設備は非常に高価であり、また、実技訓練を実施するためには、現時点では訓練のインストラクタが常に付き添う必要があるために、人的資源が不足し、十分な訓練を実施できていないのが現状である。

これに対し、モックアップ等を用いた実技訓練の不足を補うための新しい訓練環境として、人工現実感技術を用いて発電プラントの運転操作を教育訓練するシステムが幾つか開発されてきている。松原ら^[3]は、ITS(Intelligent Tutoring System)と発電プラントの制御盤を模擬する

仮想環境を組み合わせた教育システムを開発し、仮想空間内で発電プラントの制御盤の操作やウォークスルーを可能にしている。吉川ら^[4]は、原子力発電プラントを運転する際に用いられる知識およびそれらのつながりを仮想空間内に描画することにより、訓練生がプラントシミュレータを運転しながら、知識の全体像の観察を可能にすることによって、原子力発電プラントに対する深い理解を支援するシステムを開発している。これらの教育訓練システムは、訓練生が自ら制御盤を操作することにより、運転操作を仮想体験させる訓練方式であると言えることができる。従って、主に既得の知識を利用して要求される作業を遂行することに重点が置かれており、知識や技術をある程度修得した訓練生でなければ利用することが難しい。

そこで本研究では、プラント運転操作に関する知識や技術をほとんど備えていない訓練生でも、プラント異常発生時における異常診断と対応操作の方法を学習できる教育訓練システムとして、人工現実感技術を用いて、プラント異常発生時の運転員の行動を、その思考過程や機器等の詳細な参照行動まで総合的に情報可視化し、その結果を訓練生が観察することにより学習効果を上げることを目指した教育システム(VR-based Education System for Operating Nuclear Power Plants; VENUS)の開発を行った。具体的には、まず、仮想空間内で人の

*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

自然な動きを合成できる人体モーションの合成技術を開発し、原子力発電プラントの異常発生時における運転員の行動と思考過程を、計算機で模擬できるヒューマンモデルシミュレータを用いて、仮想空間内で実際の作業に近い自然な動作でプラントの異常診断と対応操作を行う仮想運転員を構築する。そして、その仮想運転員の作業の様子を自由に観察できる機能や、仮想運転員の視点からの映像を立体視しながら眺める機能等を構築し、訓練生が仮想運転員が実演する作業の様子を観察することにより複雑なプラント運転操作の方法を学習する教育訓練システムを開発する。

以下では、まずはじめに本研究の関連研究について展望した後、VENUSを開発する際の基本方針を述べる。その後、開発したVENUSについて、ソフトウェア構成とハードウェア構成について述べた後、VENUSを構成する各シミュレータの概要を説明し、VENUSを試用した結果と今後の課題について述べる。

2. 関連研究

本研究では、原子力発電プラントの異常発生時における運転員の行動と思考過程を模擬できるヒューマンモデルを利用し、仮想空間内に実際の運転員に近い自然な動作で作業を行う仮想運転員を構築するが、プラント運転員のヒューマンモデルの開発や仮想空間内における運転員の動作の合成に関する研究として、高野ら、土井らの研究を挙げることができる。

高野ら^[5]は、原子力発電プラントにおける異常発生時のプラント運転員のチームとしての行動をモデル化する研究を行っており、多重事故時におけるプラント運転員間の会話も含めた行動を計算機上で模擬できるシステムを開発している。このシステムでは、模擬した運転員の行動を2次元映像として観察できる機能が構築されているが、シミュレーション結果を確認する目的で構築されたものであり、訓練生がプラントの異常発生時の診断や対応操作の方法を学ぶために利用するには、システムの機能を拡張する必要がある。

また、土井ら^[6]は、仮想空間内に発電プラントの制御室を構築し、その中で制御盤を操作する運転員の動作を合成するシステム(VIGOR)を開発している。VIGORでは、運転員が制御盤を操作する際の姿勢や視界を評価することにより、仮想空間内に構築された制御盤等の設計を評価する機能が構築されている。しかしVIGORでは、運転員の行動は、データグローブやマウス等を介して人間が指示する必要があるため、運転員が自らの判断でプラントを操作する機能は構築されておらず、そのままではプラントの運転操作を学習する教育訓練システムとして利用することはできない。

このように、原子力発電プラントの異常発生時におけ

る運転員の行動と思考過程を模擬できるヒューマンモデルを利用して、仮想運転員の行動を3次元映像として視覚化し、また、仮想運転員の視点からの映像を体験させることによって、訓練生にプラントの異常診断と対応操作を体験学習させるシステムはまだ開発されていない。

3. 開発の基本方針

原子力発電プラントの異常診断と対応操作を行う場合、制御盤上に配置された数多くの機器から、プラントの様々な状態を参照し、それらの結果を総合して判断することにより異常の原因を推定し、次に参照すべき機器の種類や、次に実行すべき操作等を決定する。従って、原子力発電プラントの異常診断と対応操作の方法を訓練生に学習させる場合、主に以下に示す内容を訓練生が理解しやすい形で提示する必要があると考えられる。

1. 制御室内のプラント制御盤の配置
2. 制御盤上の機器の配置
3. プラント異常発生時の制御盤の挙動
4. 制御盤の挙動に応じた異常診断の方法
5. 異常原因を推定した後の対応操作の方法
6. 各機器の操作方法

そこで本研究では、これらの内容を訓練生が効率的に理解できるようにするために、人工現実感技術を用いて総合的に可視化・可聴化する。

まず、1.と2.に関しては、教育対象となる原子力発電プラントの制御室を3次元モデルとして仮想空間内に細部まで構築し、自由に視点を移動しながら制御室の様子を観察できる機能を構築する。

次に3.に関しては、異常事象を模擬できる原子力プラントシミュレータを使用し、そのシミュレータの計算結果をリアルタイムに仮想空間内に構築した制御盤上の機器に反映させることにより、訓練生が3次元映像として制御盤の挙動を観察できるようにする。

そして4.と5.に関しては、仮想空間内で実際の運転員に近い自然な動作でプラントの異常診断と対応操作を行う仮想運転員を構築し、自由な視点から仮想運転員の作業の様子を観察できる機能を構築する。また、原子力発電プラントの異常診断の方法を学習する場合には、その思考過程を理解することが非常に重要であることを考慮し、仮想運転員がプラントの異常診断中にリアルタイムに思考内容を発話する機能を構築する。この機能により、仮想運転員が制御盤を操作する様子を観察し、同時に仮想運転員が考えている内容を理解することが可能となり、原子力発電プラントの異常診断の過程をより深く理解できるようになると期待される。

さらに6.に関しては、仮想運転員が作業する様子を外部から眺める機能だけでなく、仮想運転員の視点からの映像を立体視しながら眺める機能を構築し、訓練生が

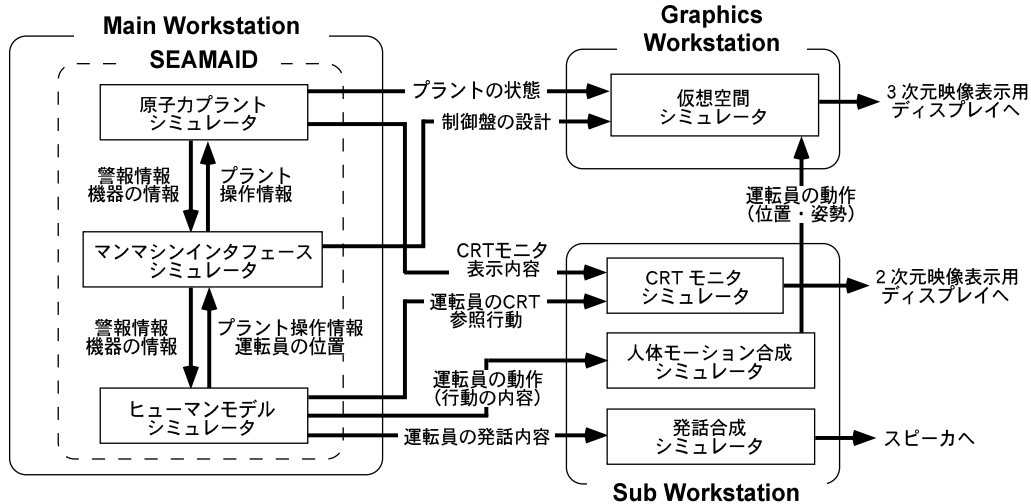


図1 VENUSのソフトウェア構成
Fig. 1 Software configuration of VENUS.

あたかも自分で制御盤を操作しているような感覚を得ることができるようにする。仮想運転員の作業の様子を外部から眺めるか、仮想運転員の視点からの映像を眺めるかは、訓練生自身が訓練の途中で自由に変更できるものとする。

4. システム構成

本研究ではVENUSを、システム全体を複数のシミュレータに分けて実装する、分散型シミュレーションシステムとして開発した。これにより、大量の計算を要する大規模なシミュレーションを、比較的安価な計算機を複数使用することにより負荷を分散させて実行できるため、コストを削減でき、また、システムの拡張も容易に行うことができる。以下では、VENUSのソフトウェア構成及びハードウェア構成について述べる。

4.1 ソフトウェア構成

VENUSのソフトウェア構成を図1に示す。VENUSは、SEAMAID^[7]、人体モーション合成シミュレータ、仮想空間シミュレータ、CRTモニタシミュレータ、発話合成シミュレータで構成される。

SEAMAIDは三菱電機との共同研究で開発した¹マンマシンインタフェース設計評価支援システムであり、複数の異常事象をリアルタイムに模擬できる原子力プラントシミュレータ、制御盤の設計情報を管理するマンマシンインタフェースシミュレータ、プラント異常発生時の運転員の行動と思考過程を模擬するヒューマンモデルシミュレータより構成される。VENUSでは、このSEAMAIDが模擬する原子力発電プラントの挙動や運転員の行動・思考過程を人工現実感技術を用いて可視化、

可聴化することにより、プラント運転操作の教育訓練へ応用する。SEAMAIDの概要は5.1節で述べる。

人体モーション合成シミュレータは、SEAMAIDを構成するヒューマンモデルシミュレータから仮想運転員の行動に関する情報を受け取り、仮想運転員の移動や機器操作の動作を合成し、結果を仮想空間シミュレータに送る。人体モーション合成シミュレータの概要は5.2節で述べる。

仮想空間シミュレータは、原子力プラントシミュレータ、マンマシンインタフェースシミュレータ、人体モーション合成シミュレータから、それぞれ、原子力発電プラントの現在の状態に関する情報、制御盤の設計情報、仮想運転員の位置と姿勢に関する情報を受け取り、制御室と仮想運転員を3次元映像として描画する。仮想空間シミュレータの概要は5.3節で述べる。

CRTモニタシミュレータは、制御盤上に配置される機器の1つである「CRTモニタ」と呼ばれる機器に表示される原子力発電プラントの状態に関する詳細な情報を、仮想空間シミュレータが3次元映像として描画する代わりに、2次元映像として描画し、仮想空間シミュレータの計算負荷を軽減させる働きをする。CRTモニタシミュレータの概要は5.4節で述べる。

発話合成シミュレータは、ヒューマンモデルシミュレータから仮想運転員の思考内容に関する情報を受け取り、発話として仮想運転員の思考過程を可聴化するシミュレータである。発話合成シミュレータの概要は5.5節で述べる。

4.2 ハードウェア構成

VENUSのハードウェア構成を図2に示す。VENUSはSEAMAIDを実行するMain-Workstation (Hewlett Packard 社 VISUALIZE C200)、人体モーション合

1: SEAMAIDは通産省及び原子力発電技術機構の委託により開発したものである。

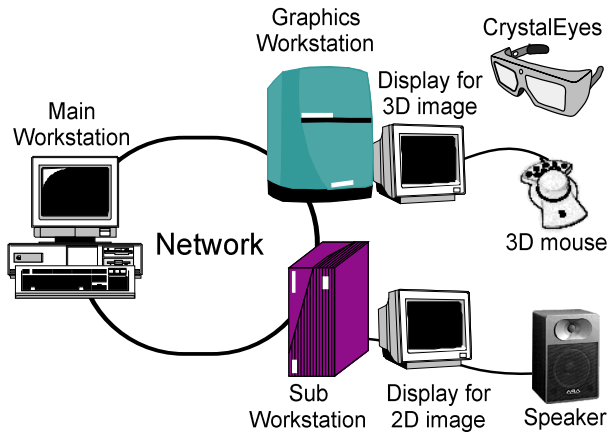


図2 VENUSのハードウェア構成
Fig.2 Hardware configuration of VENUS.

成シミュレータ、CRT モニタシミュレータ、発話合成シミュレータの3つのシミュレータを実行する Sub-Workstation (SGI 社 Indigo2 Maximum Impact)、仮想空間シミュレータを実行する Graphics-Workstation (SGI 社 OCTANE)、3次元映像を表示するためのディスプレイ、2次元映像を提示するためのディスプレイ、3次元映像を立体視するための液晶シャッター眼鏡 (StereoGraphics 社 CrystalEyes)、視点を変更するための3次元マウス (Logitech 社 Magellan)、仮想運転員の発話を提示するためのスピーカから構成され、各 Workstation 間はネットワークにより繋がれている。

図2では、Graphics-Workstation が一台のみ使用されているが、VENUS では、仮想運転員の行動や思考過程を模擬するシミュレータと、模擬した結果を訓練生に提示するシミュレータを、別々の計算機上に実装しているために、容易にシステムを拡張することが可能である。例えば、Graphics-Workstation を複数台用意し、各 Workstation 上で個々に仮想空間シミュレータを実行することにより、既存の Graphics-Workstation 上に表示する3次元映像の画質をほとんど落とすことなく、同時に複数の視点から制御室の様子を眺める環境を実現できる。これにより、1人の訓練生が仮想運転員の視点からの映像を立体視しながら眺めると同時に、別の訓練生が仮想運転員の作業の様子を別の方向から眺めることも可能である。

5. 各シミュレータの概要

本章では、VENUS を構成する各シミュレータの概要を述べる。

5.1 SEAMAID

SEAMAID は、計算機シミュレーションにより原子力発電プラントの制御盤のインタフェースを評価するために開発されたシステムで、原子力発電プラントの異常発生時におけるプラント運転員の行動と思考過程を模擬

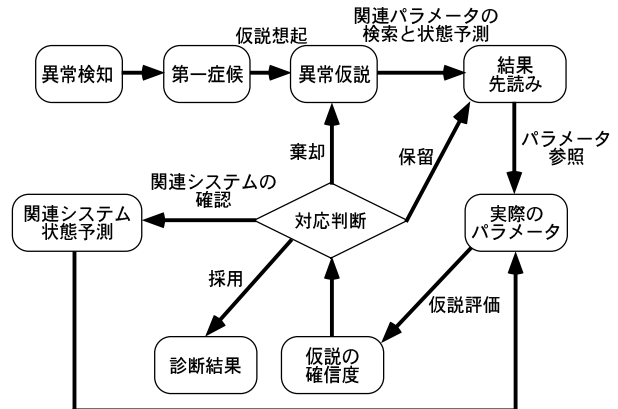


図3 ヒューマンモデルシミュレータの異常診断過程

Fig.3 Process flow of human model simulator in anomaly diagnosis.

する機能を持つ。ここでは、SEAMAID を構成するシミュレータの1つであるヒューマンモデルシミュレータについて説明する。

ヒューマンモデルシミュレータは、Reason の提唱するモデル^[8]を発展させた運転員認知モデルをフレームワークとし、実際のプラント運転員がプラントの異常事象を診断する際の行動を計測した実験の結果に基づき構築されている^[9]。具体的にはヒューマンモデルシミュレータは図3に示すような流れで異常診断を行う。以下に、その内容を時系列順に説明する。

- 手順1 警報の発生、またはパラメータの異常変動によって、異常の発生を検知する。この時の警報やパラメータ逸脱を第一症候と呼ぶ。
- 手順2 原子力発電プラントの異常事象に関する知識ベースを用いて、第一症候に応じた異常仮説を立てる。
- 手順3 立てられた異常仮説が発生した場合に変動するパラメータ群 (関連パラメータと呼ぶ) とその変動の傾向を予測する。
- 手順4 手順3で予測した関連パラメータの実際の状態を確認する。
- 手順5 確認したパラメータの状態と当初の予測とを比較し、その一致・不一致によって、思考中の仮説の確信度 (仮説に対する自信の度合い) を増減させる。
- 手順6 思考中の仮説の確信度によって、その仮説を棄却するか、採用するか、または更なるパラメータの参照を行うかを決める。更なるパラメータの参照を行う場合には、手順4に戻る。仮説を棄却する場合には、手順2に戻る。
- 手順7 仮説を採用する場合には、他の異常事象が起こっていないことを確認する (異常仮説成立の十分条件確認と呼ぶ)。

表 1 移動用の動作データ

Table 1 Motion database for synthesizing the operator's walk

動作の分類	動作データの種類	数
1 歩で到着	・移動方向について 0 度から 180 度まで 30 度ステップ ・目的地点で向いている方向について 0 度から 180 度まで 30 度ステップ ・普通の歩幅と小さい歩幅	合計 98
2 歩で到着	・移動方向について 0 度から 180 度まで 30 度ステップ ・目的地点で向いている方向について 0 度から 180 度まで 30 度ステップ ・普通の歩幅と小さい歩幅	合計 98
歩き始め	・移動方向について 0 度から 180 度まで 30 度ステップ	合計 7
直進	・1 歩歩くデータ	合計 1
歩き終り	・目的地点で向いている方向について 0 度から 180 度まで 30 度ステップ ・最後に踏み出した足の左右 ・普通の歩幅と小さい歩幅	合計 28

手順 8 異常仮説成立の十分条件を確認した後、その異常仮説を診断結果として出力する。

以上のようなヒューマンモデルシミュレータは、運転員の行動と思考過程をよく再現できることが確認されている^[10]。

また、SEAMAID は、制御盤の設計を変更するための専用のエディタを備えており、GUI(Graphical User Interface)を介して容易に制御盤の設計を変更できる。これにより、制御盤の設計を自由に変更し、それに応じて仮想運転員がどのように制御盤を操作するかを観察することも可能である。

5.2 人体モーション合成シミュレータ

VENUS では、訓練生に仮想運転員の行動を観察させ、プラントの異常診断や対応操作の方法を理解させることが目的であるため、合成する仮想運転員の動作は、実際の人間と見間違えるほど自然である必要はなく、訓練生が見て違和感を感じない程度に自然であることで十分であると考えられる。現在、計算機を用いて人の動作を 3 次元映像として合成する方法は幾つか提案されているが^[11]、本研究では、仮想運転員の動作をリアルタイムに合成する必要があること、制御室内での運転員の動作は比較的少ない種類の動作を組み合わせで表現できること等を考慮し、3 次元モーションキャプチャシステム^[12]を用いる方法を採用した。すなわち、3 次元モーションキャプチャシステムを用いて基本的な運転員の動作を計測し、基本動作データベースを作成する。そして、仮想運転員の動作を合成する際には、基本動作データベースから最も目的の動作に近い動作を選択し、それを変形することにより目的の動作を合成するものとした。具体的には、仮想運転員の動作を歩行動作と機器を操作する動作に分け、歩行動作に関しては表 1 に示す 232 種類の基本動作を、機器を操作する動作に関しては表 2 に示す 117 種類の動作を基本動作データベースとして作成した。

この手法により、制御室の任意の場所、任意の方向へ

表 2 操作用の動作データ

Table 2 Motion database for synthesizing the operator's operation

動作の分類	動作データの種類	数
操作対象まで腕を移動	制御盤の格子点の 9 点に手がある姿勢と直立姿勢の組み合わせ間の動作	合計 99
操作対象を実際に操作	制御盤の格子点の 9 点上にあるレバーを前後にスライドする動作	合計 18

の歩行動作と、体の前面に置かれた機器を操作する動作について毎秒当たり 10～30 姿勢の連続的な変化として計算することが可能となった。仮想運転員の動作合成例を図 4 に示す。仮想運転員の動作の合成方法の詳細については参考文献^[13]を参照されたい。

5.3 仮想空間シミュレータ

仮想空間シミュレータは、仮想空間内に、制御室、制御盤、及び、仮想運転員の動作を 3 次元映像として描画する。本節では、制御盤の描画方法、仮想運転員の描画方法及び、仮想運転員の視点からの映像を描画する方法について述べる。

5.3.1 制御盤の描画

仮想空間シミュレータは、SEAMAID を構成するマンマシンインタフェースシミュレータが管理する制御盤の設計情報をもとに、仮想空間内に制御盤を描画する。本研究で教育の対象とする原子力発電プラントは、その制御室に 10 個の制御盤が配置され、それらの制御盤上に 25 種類の機器が、合計約 500 個配置されている。訓練生が仮想空間内に配置された機器を見ることにより、原子力発電プラントの状態を把握できるようにするためには、ある程度詳細に機器及びその数値表示等を描かなければならない。しかし、これら全ての機器をその細部まで詳細に描いた場合、原子力プラントシミュレータの計算結果をリアルタイムに反映させるには、非常に描画能力が高い計算機が必要となる。そこで本研究では、訓練生の視点と個々の機器との距離に応じて、描く機器の詳細度を変化させる、LOD(Level Of Detail)の手法を適用した。具体的には、訓練生の視点と各機器との距離が遠い順番に、1. 何も描かない、2. 機器の枠のみ描く、3. 数値表示以外の機器の全体を描く、4. 機器の数値表示等まで詳細に描くの 4 段階に分けて機器を描画するものとした。また、制御盤上の機器の数値表示等を更新する場合、原子力プラントシミュレータからは、更新された機器の情報のみ、1 秒ごとに受け取るものとした。この手法により、全ての機器の数値表示等までを詳細に描く場合(4～7 frames/sec)と比べて、約 1.5 倍(訓練生と制御盤の距離が近い場合、約 10 frames/sec)から約 5 倍(訓練生と制御盤の距離が遠い場合、約 40 frames/sec)の描画速度を得ることができた。図 5 に本手法で描画した制御室を、図 6 に制御盤を示す。

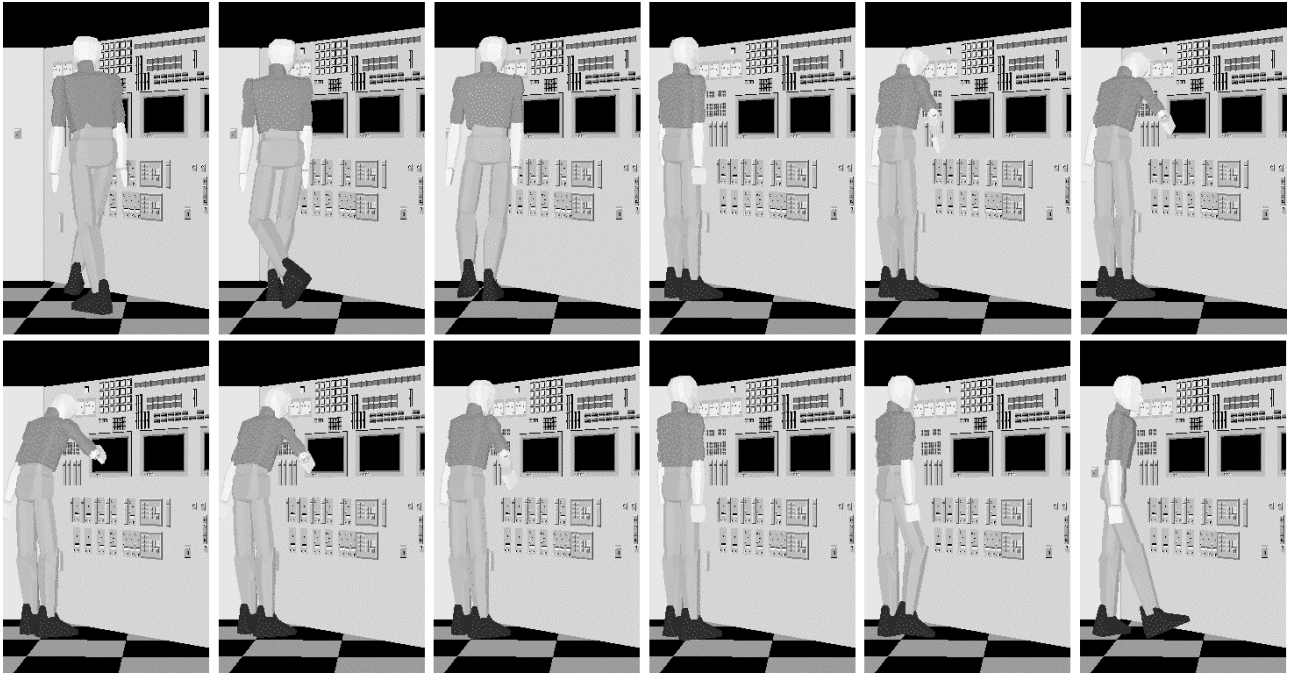


図 4 仮想運転員の動作合成例

Fig.4 Composition example of the operator's motion.

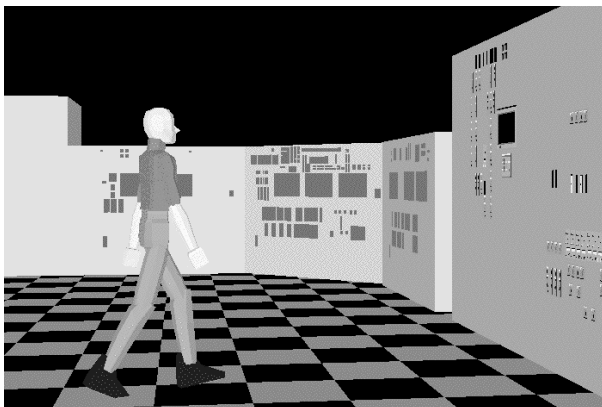


図 5 仮想制御室

Fig.5 Virtual control room.

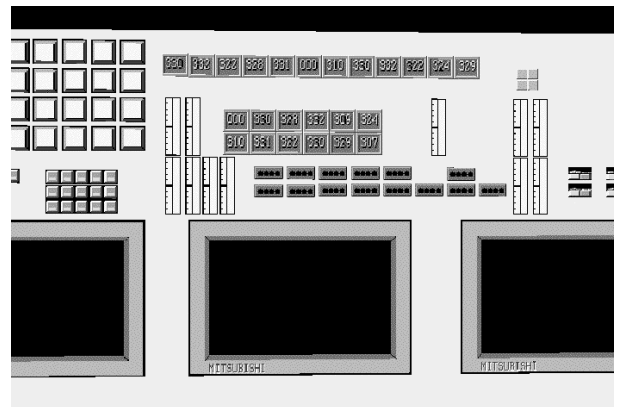


図 6 仮想制御盤

Fig.6 Virtual control panel.

5.3.2 仮想運転員の描画

仮想運転員の動作は、人体モーション合成シミュレータから得られる仮想運転員の位置と姿勢の情報をもとに描画する。今回、仮想運転員の3次元形状モデルは、腕の長さや足の大きさ等、実際の人の各部位のサイズを計測し、その結果をもとに市販のCADを用いて作成した。仮想空間シミュレータの描画負荷を軽減させるために、仮想運転員を構成するポリゴン数は少ないことが望ましいが、今回は人の目で見て違和感を感じない程度に仮想運転員の形状を簡略化することにした。これにより、仮想運転員を構成するポリゴンの総数は約700個となった。

5.3.3 仮想運転員の視点からの映像の描画

仮想運転員の視点からの映像は、基本的には人体モーション合成シミュレータにおいて求められた仮想運転員の各姿勢における、頭の位置と方向をもとに合成される。例えば、仮想運転員がある機器に向かって歩いている時には、上体が揺れるため、制御室が上下左右に揺れながら、目的の機器が徐々に大きくなっていく映像が合成される。また、仮想運転員が振り返る場合には、制御室が仮想運転員の頭の振りに応じて徐々に横にずれる映像が合成される。さらに、機器を操作する場合には、対象となる機器を視野の中心に合わせながら仮想運転員の手が機器を操作する映像が合成される。図7に仮想運転員の視点からの映像を示す。

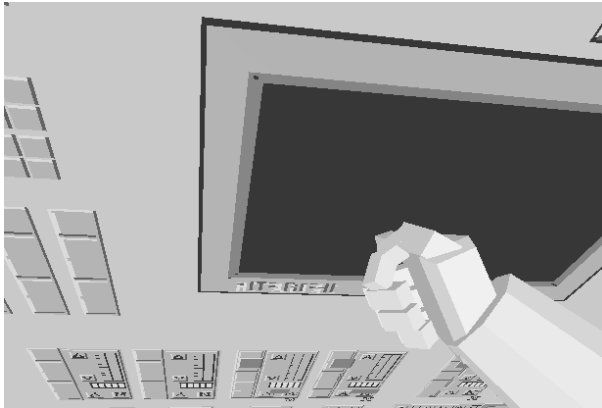


図 7 仮想運転員の視点からの映像

Fig. 7 An example of the image from the operator's viewpoint.

5.4 CRT モニタシミュレータ

VENUS が教育の対象とする原子力発電プラントの制御盤は、プラントの状態をまとめて表示する「CRT モニタ」と呼ばれる機器を備えている。この機器の画面上には、プラントのパラメータの時間的な推移を表したトレンドグラフのような複雑な映像が表示される場合がある。このような複雑な映像を、仮想空間内に配置された CRT モニタ上に、3 次元映像として詳細に描画する場合、計算機に多大な負荷が掛かる上に、訓練生には非常に見づらい映像になることが予想される。そこで本研究では、この CRT モニタに関してのみ、数値やグラフ等の詳細な描画は仮想空間内で行わず、3 次元映像を提示するディスプレイとは別の 2 次元映像を表示するための専用のディスプレイを用意し、その画面上に 2 次元の映像として描画することにした。

具体的には、CRT モニタシミュレータは、ヒューマンモデルシミュレータから、仮想運転員の行動に関する情報を受け取り、仮想運転員が眺めている CRT モニタの種類に応じて、2 次元映像をリアルタイムに変更する。図 8 に CRT モニタシミュレータが表示する 2 次元映像の例を示す。

さらに、VENUS では、CRT モニタ上で仮想運転員が眺めている箇所をリアルタイムに矢印で示す機能を構築した。この機能により、訓練生は、仮想運転員が CRT モニタを眺めているときに、具体的にどのパラメータを参照しているのかを知ることができ、より具体的に、プラント診断や対応操作の過程を理解できると期待される。

5.5 発話合成シミュレータ

発話合成シミュレータは、ヒューマンモデルシミュレータから得られる仮想運転員の思考内容を、「仮想運転員が自らの考えを発話する」という形で可聴化することにより訓練生に提示する。5.1 節で述べたようなヒューマンモデルシミュレータからは、仮想運転員の思考内容に

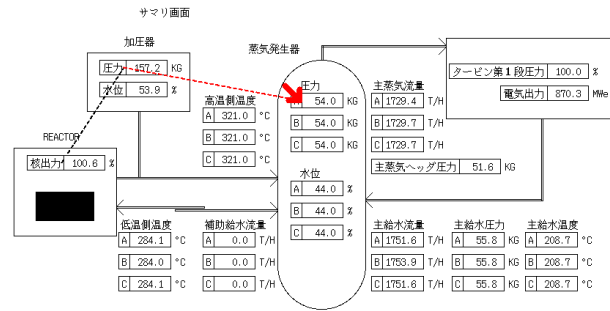


図 8 CRT モニタシミュレータが模擬する 2 次元映像の例

Fig. 8 An example of the 2-D image a CRT monitor simulator displays.

表 3 仮想運転員が発話する状況

Table 3 Conditions the operator speaks

仮想運転員が発話する状況	発話の例
プラントの状態を調査	加圧器圧力を調べます。
異常の発生を認知	異常が発生しました。診断を開始します。
異常仮説を想起	LOCA が発生したとの仮説を立てます。
プラントの状態を予測	加圧器圧力は大きいはずで。
参照した状態に対し判断	加圧器水位は減少中です。
異常仮説を棄却	LOCA ではなさそうです。
異常仮説を採用	LOCA が発生したと確信しました。

関する様々な情報を得ることができるが、一定の時間内に発話によって訓練生に伝えることができる情報量には限界があるために、これら全ての思考内容を仮想運転員に発話させるのは困難である。従って VENUS では、仮想運転員は、訓練生が仮想運転員の動作を観察するだけでは理解できない内容を中心に発話するものとした。具体的には、主に表 3 に示す場合に仮想運転員は思考内容を発話する。

実際には、発話合成シミュレータはヒューマンモデルシミュレータから送られてくる仮想運転員の思考内容に関する情報をもとに、予め人が発話した声を録音して作成したオーディオファイルを再生することにより仮想運転員の発話を模擬する。その際、録音するオーディオファイルを、名詞、動詞等、幾つかに分割し、発話を模擬する際に、適切なファイルを複数選択して連続して再生することにより、予め準備すべきオーディオファイルの総数を減らす工夫を行った。これにより、例えば LOCA (Loss of Coolant Accident) の異常事象が発生した場合の訓練シミュレーションを実行するために必要なオーディオファイルの総数は約 90 種類となった。

6. VENUS の使用例と考察

VENUS の動作例として、原子力プラントシミュレータに LOCA の異常を発生させた場合の仮想運転員の行動と発話内容を表 4 に示し、さらにその時の仮想運転員が仮想制御室内を移動した軌跡を図 9 に示す。

また、VENUS を用いることにより、原子力発電プラントの異常診断と対応操作の作業の様子を観察でき、作

表 4 LOCA 発生時の仮想運転員の行動と発話

Table 4 The operator's utterance and behavior in the case of LOCA

時間 (分:秒)	仮想運転員の行動	仮想運転員の発話
00:00	(シミュレーション開始)	
00:00	A-AG 水位の確認作業を始める	
00:20	A-AG 水位の値を確認する	A-AG 水位を調べます
00:22	プロセスモニタ注意警報の発生を確認する	A-AG 水位は変化していません
00:22	LOCA が発生したとの仮説を立てる	プロセスモニタ注意警報が発生しました
00:22	格納容器ガスモニタの確認作業を始める	
00:24		診断を開始します
00:25		今考えられる異常は LOCA です
00:27		LOCA が発生したとの仮説を立てます
00:29		格納容器ガスモニタを調べます
00:41	格納容器ガスモニタの状態を確認する	格納容器ガスモニタの値は過去より大きくなっています
00:52	格納容器じんあいモニタの確認作業を始める	格納容器じんあいモニタの変化傾向を調べます
...	...	...
02:10	加圧器水位の変化傾向の確認作業を始める	加圧器水位の変化傾向を調べます
02:24	加圧器水位の変化傾向を確認する	加圧器水位は減少中です
02:31	LOCA が発生したと断定する	LOCA が発生したと確信しました
02:31	加圧器水位と圧力を維持する作業を始める	
02:34		対応操作に入ります
...	...	...

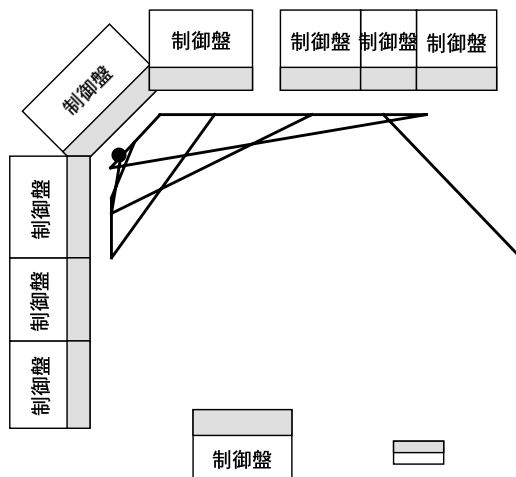


図 9 LOCA 発生時の仮想運転員の歩行軌跡

Fig. 9 Trace of the operator's walk in the case of LOCA.

業の内容を理解できることを確認するために、男子大学生 3 名に VENUS を試用してもらった。彼らは、原子炉工学の基礎的な授業を受講した経験があり、原子力発電プラントに関する基礎的な知識は備えているが、プラントの異常診断と対応操作に関する知識はほとんど備えていない。

試用後のアンケートにより、以下のような感想を得ることができた。

- 仮想運転員の視点からの映像を眺めることにより、自分で制御室の中を歩き回っているような感じがした。
- 仮想運転員の視点を体験する機能は面白いと思う。
- 仮想運転員が何を考え、何をしようとしているのかよく分かった。

- システムを使用しているうちに、気持ちが悪くなってきた。
- 画面がコマ落ちする場合があるので少し見にくかった。

これらの結果により、VENUS の使用者が仮想運転員の作業の様子を観察し、発話を聞くことにより、仮想運転員の行動と思考内容を理解できることが確認できた。また、「仮想運転員の視点を体験する機能は面白いと思う」という意見が得られたが、これは、一般の人工現実感技術を用いたシステムやゲームが、アミューズメントとして人の興味を引きつける特徴があることに関連しており、VENUS の使用者が仮想運転員の視点からの映像を眺めることが初めての体験であったため、このような感想が得られたと考えられる。

一方、「システムを使用しているうちに、気持ちが悪くなってきた」との意見が得られたが、特に仮想運転員が仮想空間内で体の方向を大きく変える動作を体験する時に気分が悪くなるようであった。これは、身体への動揺と視覚情報との間に不一致が生じるためであると推測されるが、VENUS を用いることにより訓練生の気分が悪くなるならば、訓練生の学習意欲を削ぐ可能性があるため、システムの使用時間を制限する等の対策が必要である^[14]。

また、「画面がコマ落ちする場合があるので少し見にくかった。」との意見が得られたが、VENUS で使用した Graphics-Workstation の性能上、現在の仮想空間の描画アルゴリズムでは、訓練生が制御盤に近づいた場合に、画面の更新速度が 10 frames/sec 以下になる場合があり、画面がコマ落ちしていると感じるようである。これを避けるには、さらに高性能な計算機を用いるか、描

画アルゴリズムを更に改良する必要がある。

7. おわりに

本研究では、原子力発電プラントの異常発生時における診断と対応操作の方法を学習するための新しい訓練環境として、仮想空間内に構築された仮想運転員が、原子力発電プラントの異常診断と対応操作を実演する様子を観察し、また仮想運転員の視点を仮想体験できる体験型教育システム VENUS を開発した。

具体的には、VENUS を分散型シミュレーションシステムとして開発し、安価な計算機を複数使用する訓練環境を開発した。その際、仮想空間内で、運転員の歩行動作と機器を操作する動作を柔軟に合成できる人体モーション合成手法を開発し、プラント異常発生時における運転員の行動と思考過程を模擬できるヒューマンモデルを用いて、仮想空間内で実際の運転員に近い動作で、プラントの異常診断と対応操作を行う仮想運転員を構築した。さらに、仮想運転員の思考内容を発話させる機能を構築し、訓練生にプラントの異常診断の過程を深く理解させる機能も構築した。そして、開発した VENUS を試用することにより、システムの利用者がプラント異常発生時の診断と対応操作の方法を理解できることを確認した。

本研究で開発した体験型教育システム VENUS が実用化されれば、安全・安価に教育訓練が実施できるだけでなく、訓練のインストラクタが付き添わなくてもプラント運転操作の教育訓練が実施できるようになるために、訓練生の訓練機会が増え、プラント運転員の知識・技能の向上が期待できるが、VENUS を実際の訓練に使用するためには、今後、以下の項目を順次実現する必要があると考えられる。

1. 訓練生自らが仮想空間内の制御盤を操作し、その結果を体験できる機能の構築

現時点の VENUS を用いることにより、訓練生は原子力発電プラントの異常発生時における診断と対応操作の方法を理解できるようになると期待されるが、これに加えて、訓練生自らが制御盤を操作することにより、獲得した知識の確認ができるようになれば、さらに学習効果が上がると思われる。

2. VENUS で学習可能な異常事象の追加

現時点では、SEAMAID を構成するヒューマンモデルシミュレータが診断可能な異常事象が LOCA と SGTR (Steam Generator Tube Rupture) の 2 種類であるため、VENUS で対応可能な異常事象の種類もこれら 2 種類だけである。しかし、訓練生が診断および対応操作の技術を修得すべき異常事象は多岐に渡るため、今後、必要な知識を追加することにより、ヒューマンモデルシミュレータが診断可能

な異常事象を追加する必要がある。

3. VENUS の使用による学習効果の評価

今回、VENUS を試用してもらうことにより、原子力発電プラントの異常発生時における仮想運転員の行動と思考の内容を理解できることが確認されたが、実際に、訓練センターで訓練を受ける訓練生が、VENUS を用いることにより学習効果を上げることができるかどうかの評価がなされておらず、今後の課題である。

参考文献

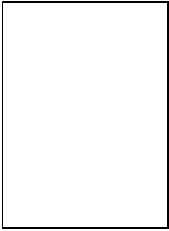
- [1] 早苗, 三森: 原子力発電所の運転と訓練; 電気学会誌, Vol.117, No.8, pp.528-531(1997).
- [2] 鈴木, 近藤, 渡部, 小林: ABWR シミュレータを用いた運転訓練の実績; 火力原子力発電, Vol.50, No.5, pp.28-32(1999).
- [3] Matsubara Y., et al.: Virtual Learning Environment for Discovery Learning and Its Application on Operator Training; IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, Vol.E80-D, No.2, pp.176-188(1997).
- [4] 菅野, 古田, 吉川: プラント運転操作に用いられる知識の可視化による深い理解支援システム; ヒューマンインタフェースシンポジウム'99 論文集, pp.691-696(1999).
- [5] Takano K., et al.: Intellectual Simulation of Operating Team Behavior in Coping with Anomalies Occurring at Commercial Nuclear Power Plants; Human-Computer Interaction, Vol.2, pp.1201-1205(1999).
- [6] Doi M., et al.: Visual Engineering System - VIGOR : Virtual Environment for Visual Engineering and Operation; Symbiosis of Human and Artifact, pp.435-440(1995).
- [7] Yoshikawa H., et al.: Development of an Analysis Support System for Man-Machine System Design Information; Control Engineering Practice, Vol.5, No.3, pp.417-425(1997).
- [8] Reason J.: Human Error; Cambridge University Press(1990).
- [9] Wu W., 高橋, 吉川: 原子炉異常診断過程の認知プロセスのモデル化とシミュレーション; 第 12 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.343-348(1996).
- [10] Wu W., 中川, 吉川: プラント運転員の異常診断行動のモデリングとヒューマンモデルシミュレーションによる人間認知信頼性 (HCR) 曲線の導出法の研究; ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.1, No.2, pp.11-24(1999).
- [11] Cavazza M., et al.: Motion Control of Virtual Humans; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.18, No.5, pp.24-31(1998).
- [12] Delaney B.: The Mystery of Motion Capture; IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.18, No.5, pp.14-19(1998).
- [13] Shimoda H., et al.: A Computer-Aided Sensing and Design Methodology for the Simulation of Natural Human Body Motion and Facial Expression; Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Design and Automation, CD-ROM(1998).

- [14] 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).

(2000年1月25日受付, 7月13日再受付)

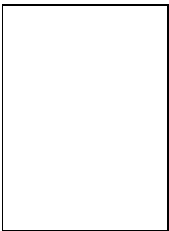
著者紹介

石井 裕剛



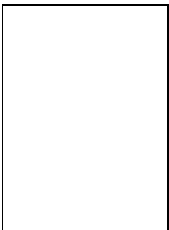
1998年京都大学大学院工学研究科電気工学第二学専攻修士課程修了、2000年同大学院エネルギー科学研究科博士後期課程研究指導認定、同年京都大学博士学位取得、同年同大学院エネルギー科学研究科助手、現在に至る。主に、バーチャルリアリティの分野に興味を持つ。日本バーチャルリアリティ学会、日本原子力学会、電子情報通信学会、計測自動制御学会、IEEEなどの会員。博士(エネルギー科学)。

Wu Wei (正会員)



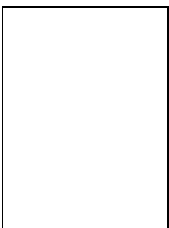
1997年京都大学大学院工学研究科修士課程修了、2000年同大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。同年三菱電機株式会社に入社。マンマシンインタフェースにおける人間と機械の相互作用に関する研究に興味を持つ。日本原子力学会、ヒューマンインタフェース学会の会員。博士(エネルギー科学)。

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、1999年同助教授、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)。

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。