

プラント技能訓練へのバーチャルリアリティ技術適用の展望

京都大学大学院エネルギー科学研究科
石井裕剛、吉川榮和

Application Studies of Virtual Reality to Plant Maintenance Training

H. ISHII and H. YOSHIKAWA

Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Abstract: This paper describes present status and future prospect of virtual reality (VR) application studies to training environment for maintenance work. First, problems of VR application to training are described, and the required elemental technologies are explained to realize a new training environment in which a virtual human performs an instructor or a collaborator of a trainee and teaches the procedural tasks such as assembling and disassembling machines by demonstrating them.

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)はその概念が提唱されて以来、様々な分野への応用が期待され、精力的に研究開発が行われている。手術シミュレーションや製品の設計支援、アミューズメント等は、その主な応用分野である。そのような中で、近年 VR 技術を用いたプラント運転や保守の訓練システムの実用化が始まろうとしている。VR 技術を用いて訓練システムを構築し、訓練を実施することにより、(1)高圧が掛かる機器や、クレーン等を用いる必要がある大規模な機器の保守作業など、実空間では危険な環境における訓練を安全に実施できる、(2)訓練対象の実機を構築せずに、仮想の機器を構築することで安全・安価に訓練を実施できる等の利点がある。これらは VR 技術を用いて訓練システムを構築することによる利点であるが、実際にはこれらに加えて、計算機を用いて訓練を実施することから、(3)訓練実施時の訓練生の作業内容を容易に記録できるため、訓練の評価・検討が容易になる、(4)訓練システムに訓練生を支援するための各種機能を付加することで訓練効率を高めることができる等の利点も生じる。特に最近では、(4)の利点に関して、単に文章や図で訓練生に対して作業手順等を教示する機能に止まらず、仮想空間内に人と同じ形状をした仮想のインストラクタを配置し、実際のインストラクタと同様に訓練生に作業を指示したり、作業を実演したりする機能の研究開発が行われている[1]。このように、仮想のインストラクタが、実際のインストラクタや共同作業員の代役を果たすことで、訓練生が独りの時でも、インストラクタの指導が必要な作業に対する訓練や、複数人で同時に作業を行うチーム連携の訓練等を実施できるようになる。

本論文では、まず始めに、VR 技術を用いたプラント運転・保守作業の訓練システムに関する研究の現状について述べ、次に仮想空間内に仮想インストラクタや仮想共同作業員を配置し、訓練生と仮想人間が共同作業しながら訓練を実施できる新しい訓練システムについて、システムを実現するために必要な要素技術の概要と各技術の研究開発の現状について述べる。

2. バーチャルリアリティ技術を用いた訓練システム

2.1 VR 技術を用いた訓練システムとそのユーザインタフェースによる分類

これまでに開発された VR 技術を用いたプラント運転・保守作業の訓練システムとしては、南雲らによる原子炉ドライウエルにおけるウォークスルー環境[2]、安部らによる機器の修復支援システム[3]、新井らによる変電所保守員向け体感型シミュレータ[4]、吉川らによるスイング式逆止弁の分解・組立作業の訓練システム[5]等を挙げることができる。

南雲らの研究では、原子炉のドライウエルと呼ばれる箇所の 3 次元モデルを仮想空間内に構築し、円筒形スクリーンに映し出された仮想空間を見ながらジョイスティックを用いてウォークスルーできる環境を構築している。安部らの研究では、仮想空間内に配置された機器をマウスやデータグローブを用いて、予め示された補助線に沿って分解・組立作業を行うことにより、機器修復の作業手順を学習する訓練システムを開発

している。新井らの研究では、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。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。吉川らの研究では、原子力発電プラントの構成機器の1つであるスイング式逆止弁を、データグローブを介して、実際の作業と同様のジェスチャで、分解・組立できる訓練システムを構築している。

以上のように、これまでに VR 技術を用いて訓練システムを開発する様々な研究が行われているが、これらは訓練生がシステムを利用する際のユーザインタフェースに応じて、以下の4つのシステムに分類できる。

[分類1] ウォークスルー式訓練システム[2]

ウォークスルー式訓練システムは、訓練生がマウスやキーボード、ジョイスティック等を用いて仮想空間内を歩き回ることにより、訓練対象機器の構造や各種名称を学習する訓練システムである。訓練対象機器の3次元モデルを作成し、訓練生の視点変更機能を構築することにより比較的容易に実現できるが、作業手順や機器の操作方法等の学習はできない。

[分類2] メニュー選択式訓練システム[3]

メニュー選択式訓練システムは、ウォークスルー式訓練システムに、仮想空間内に配置された物体間の物理的拘束関係を論理的にモデル化してシミュレーションする機能を付加したもので、訓練生はマウスやキーボードで訓練対象機器に対する作業の種類を選択することで、機器の分解や組立作業を行う。主に作業手順の学習に用いることができる。

[分類3] ジェスチャ式訓練システム[4,5]

ジェスチャ式訓練システムは、メニュー選択式訓練システムでマウス等を用いて作業の種類を選択する代わりに、データグローブや3次元マウス等を用いて、実際の作業に近いジェスチャで機器を操作して作業を進める訓練システムである。仮想物体間の物理的拘束関係を実世界の物理法則に近い形でシミュレーションし、結果を視覚的に表現する必要がある。作業手順に加え、具体的な機器の操作方法も学習できる。

[分類4] 力覚フィードバック式訓練システム

力覚フィードバック式訓練システムは、仮想空間内の機器を PHANTOM や SPIDAR、サイバークロブ等の力覚フィードバックデバイスを用いて、実際の作業に近いジェスチャで操作し、その結果得られる物理的反発力を力覚として感じる事ができる訓練システムである。機器を分解・組立する際の力の入れ具合等を体験することができるが、実現するためには、仮想物体間の物理的拘束関係を実世界の物理法則に近い形でシミュレーションし、結果を視覚的および力学的に表現する必要がある。

これまでに、上記4つの分類の内、分類1～3までの訓練システムを実際の訓練に使用した例が報告されているが、分類4に関しては、実現可能性が力覚フィードバックデバイスの性能に依存するため、まだ十分な研究がされていない。

2.2 VR 技術を用いた訓練システムにおける訓練生の作業を支援する機能

2.1 節で述べたような VR 技術を用いた訓練システムに、訓練生の作業を支援するための教示機能を付加する場合、「訓練生の作業の進捗状況を判断するかどうか」、「作業を実演して示すかどうか」によって、以下の4通りに分類できる。

[分類1] 進捗状況を判断せず作業も実演しない

作業手順が記載されたマニュアルを無条件に提示する機能等が相当する。最も容易に実装できる機能であるが、訓練生が自らの判断で作業せず、常にマニュアルを見てしまう可能性があり、作業手順を覚える際に時間を要したり、すぐに作業手順を忘れてしまう等、訓練効率が下がる危険性がある。

[分類2] 進捗状況を判断せず作業を実演する

予め設定された機器の前まで移動した場合に、その機器を操作する様子を動画で提示したり、予め定められたシナリオに従って機器の操作を実演したりする機能等が相当する。訓練対象機器の操作方法等を学習する場合に効果的であるが、訓練生が自ら作業しないため、訓練が受け身になってしまう危険性がある。

[分類3] 進捗状況を判断するが作業を実演しない

訓練生がある程度作業を進めた時点で、次に実行すべき作業を指示したり、過去の作業に間違いがある場合は、それを指摘したりする機能等が相当する。このような機能を実現するためには、訓練システムに正しい作業手順に関する情報を格納し、常に訓練生の作業の進捗状況を監視する必要がある。訓練生が自ら判断して作業を行うため、訓練効率が上がるが、訓練生が機器の操作方法等をある程度理解している必要がある。

[分類4] 進捗状況を判断し作業を実演する

仮想空間内に人と同様な形状をもつ仮想インストラクタを配置し、訓練生の作業の進捗状況に合わせて間違いを指摘して修正したり、次に実行すべき作業を実演したりする機能等が相当する。訓練生は、自らの判断で作業を進め、分からなくなった場合は、仮想インストラクタに尋ねることで、実際に機器をどのように操作するかを目で見て確認できるため、最も訓練効率を高めることができる機能であると考えられる。この機能を実現するためには、分類3での機能に加え、各作業を実行する際の仮想インストラクタの動作を3次元アニメーションとして合成する機能が必要となる。

これまでに、上記4つの分類の内、分類1～3までの機能が実際の訓練に使用された例が報告されている。分類4については、現在、研究開発が精力的に進められている。

2.3 VR技術を用いた訓練システムを実用化する場合の問題点

2.1節および2.2節で述べたように、分類1～3までの訓練システム及び分類1～3までの支援機能が、実際の訓練に使用された例が報告されているが、これらの訓練システム及び支援機能はまだ一般に実用化されているとは言えない。これは、現時点での技術で十分に実用に耐えうる訓練システムや支援機能を構築することは可能であるが、その構築する際の労力が膨大であるために、構築する際の人件費が実機を構築する費用を上回る場合が少なくないことが原因である。例えば新井らの研究[4]では、「3次元モデル上に、色々なイベントを起動するためのトリガを設ける必要があり、このためには通常の業務用システムの開発と同様な膨大な作業が発生する」との結論が得られている。今後、VR技術を用いた訓練システムを実用化するためには、「訓練システムおよび支援機能を構築する際の労力を如何に削減するか」という問題を中心に研究を進める必要がある。これに対し、訓練システムおよび支援機能を構築する際の労力を削減する方法として以下の2つの方策が考えられる。

[方策1] Graphical User Interface (GUI)を介して仮想空間を構築することを可能にし、訓練システムを構築する際の作業労力を軽減させる。

[方策2] 過去に訓練システムを構築した際に作成したプログラムや各種データを、新しい訓練システムを構築する際に再利用可能にする。

筆者らは、2.1節で述べた分類3の訓練システムに、2.2節で述べた分類4の支援機能を付加した訓練システム、すなわち、訓練生がデータグローブ等を介して実際の作業と同様なジェスチャで機器保守の作業等を行うことができ、仮想インストラクタが訓練生に作業の指示を出したり、作業を実演して示したり、訓練生と共同作業したりする機能を備えた訓練システム（以下、共同作業訓練システムと呼ぶ）を、上記の2つの方策を考慮して構築できる新しい手法の開発を進めている。

以下では、共同作業訓練システムを実現するために必要となる要素技術の概要と各技術の研究開発の現状について述べる。

3. 共同作業訓練システムを実現するための要素技術

共同作業訓練システムを実現するためには、主に以下の5つの処理を行う必要がある。

1. 訓練生の動作を計測する

訓練生が実際の作業に近いジェスチャで作業することを可能にするために、訓練生の動作をデータグローブや3次元マウスを介して計測する。仮想物体を操作する動作（物体の把持・解放、回転・移動等）に加えて、仮想インストラクタとコミュニケーションする動作（物体を指し示す）等も計測する必要がある。

2. 訓練生の動作に応じて仮想物体の状態を変化させる

訓練生の動作が仮想物体を操作する動作であった場合、それらの動作の種類に応じて仮想物体の状態（位置・角度、他の仮想物体との物理的拘束関係等）を変化させる。その際、仮想物体間の物理的拘束関係を実世界の物理法則に近い形でシミュレーションする必要がある。

3. 仮想インストラクタの動作を決定する

仮想空間の状態や訓練生の動作に応じて仮想インストラクタの動作を決定する。訓練生のこれまでの作業履歴や、仮想空間の状態に応じて、過去の作業に間違いがあればそれを指摘・修正し、間違いが無ければ訓練を先に進める作業を指摘・実演する。また、訓練生が仮想インストラクタとコミュニケーションするための動作をした場合には、それに対応するための動作を決定する。

4. 仮想インストラクタの動作を合成する

3.で決定された仮想インストラクタの動作を実際に仮想空間内で3次元アニメーションとして合成する。

合成する動作としては、仮想空間内を移動する動作や仮想物体を操作する動作、訓練生とコミュニケーションするための動作等がある。

5. 仮想インストラクタの動作に応じて仮想物体の状態を変化させる

訓練生の動作に応じて仮想物体の状態を変化させるのと同様に、仮想インストラクタの動作に応じて仮想物体の状態を変化させる。

以上の検討を基に設計した共同作業訓練システムのシステム構成を図1に示す。動作入力サブシステムにおいて訓練生の動作を計測し、仮想空間管理サブシステムにおいて訓練生や仮想インストラクタの動作に応じて仮想物体の状態を変化させる。また、行動決定サブシステムにおいて仮想インストラクタの動作を決定し、動作合成サブシステムにおいて仮想インストラクタの動作を合成する。

以下では図1に示したシステム構成の内、動作合成サブシステムと行動決定サブシステムについて、研究開発の現状を述べる。動作入力サブシステムと仮想空間管理サブシステムについては[5-7]を参照されたい。

4. 動作合成サブシステム

本章では、行動決定サブシステムから得られる仮想インストラクタの行動に関する情報をもとに、3次元アニメーションとして仮想インストラクタの動作を合成する動作合成サブシステムについて述べる。

人の身体は数多くの部位から構成され、動作の自由度が非常に高い。従って、人の全ての動作を3次元アニメーションとして自由に合成できる汎用的なアルゴリズムを開発することは非常に困難であり、動作の特性に合わせて個々にアルゴリズムを構築する必要がある。例えば、ボタンを押す動作を合成する場合にはインバースキネマティクスを用いたアルゴリズムが適しており、移動する動作を合成する場合には実際の人の動作を計測したデータを再生するアルゴリズムが適している。また移動する動作を合成する場合でも、歩幅を変えた2種類の歩行を合成するには、再生するデータとして2種類のデータを用意する必要がある。従って、予め人の全ての動作を合成できるようにするためには、膨大な数のアルゴリズムとデータを作成する必要がある非常に困難である。そこで、動作合成サブシステムには、人の動作を合成するアルゴリズムやデータを必要に応じて柔軟にシステムに追加・変更して利用できる仕組みが必要となる。

そこで筆者らは、認知科学や人工知能の分野で注目されている、アフォーダンスの概念を参考に動作合成サブシステムを設計・開発した[8]。「アフォーダンス」とは、視覚心理学者であったJ.J.Gibsonにより提唱された概念であり、「観察者との関係で存在する環境の特性であり、環境が観察者に提供するもの」と定義される、環境に内在する情報である。アフォーダンスの概念では、人の動作は環境に誘発されて生じるものであるとされ、人が予め備えている環境のモデルに従って行動しているのではないとされる。この考え方は動作合成サブシステムを開発する際の重要な設計指針を与えてくれる。すなわち、仮想人間の動作を合成する際に必要な各種情報（アルゴリズムやデータ）は、動作合成サブシステムに予め格納するのではなく、動作の対象の仮想物体に内在させ、必要に応じてそれらの情報を仮想物体から動作合成サブシステムに伝達し、仮想人間の動作を合成する仕組みを構築するべきであるということである。

筆者らは以上の考えに基づいて、以下の仕様の動作合成サブシステムを設計・開発した。

[仕様1] 仮想物体の情報を格納するデータベースには、仮想物体の形状やテクスチャの情報だけでなく、その仮想物体に対して仮想人間が実行可能な動作の種類と、その動作を合成する際に使用するアルゴリズムとデータの種類の、個々の仮想物体毎に纏めて記述する。

[仕様2] 仮想人間の動作を合成するアルゴリズムは、動作合成サブシステムとは別に、外部プロセスとして起動して利用できる形で構築する。

以上の仕様を満たす動作合成サブシステムを開発することで以下に示す利点が生じる。

[利点1] 仮想物体の情報を格納するデータベースから、仮想物体を選択して仮想空間内に配置するだけで配置した仮想物体に対する仮想インストラクタの動作を合成する際に必要となる各種情報が利用可能になる。

[利点2] 動作合成サブシステムを変更することなく、外部プロセスとして起動可能なアルゴリズムを用意し、

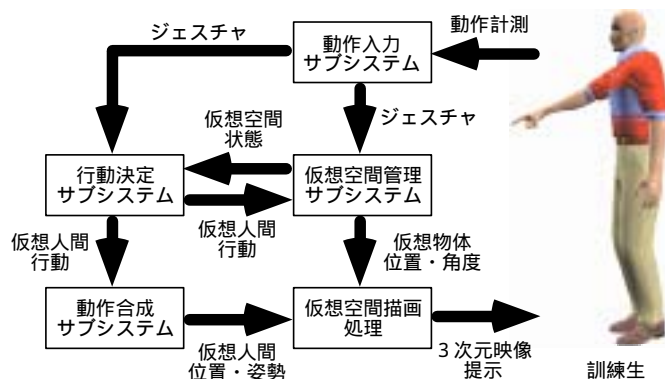


図1 共同作業訓練システムのシステム構成

仮想物体の情報を格納するデータベースを変更するだけで、合成可能な仮想インストラクタの動作の種類を追加できる。

[利点3] 訓練環境が構築された後は、動作の対象となる仮想物体と動作の種類を指定するだけで仮想インストラクタの動作を合成できる。

利点1により、仮想物体をGUIを介して配置できるシステムを開発することにより、仮想インストラクタが行動可能な仮想空間が構築可能になり、利点2により、動作を合成するためのアルゴリズムの再利用が容易になる。これらはそれぞれ、2.3節で述べた方策1と方策2に対応する。また、利点3のように、仮想インストラクタの動作を指示する方法が簡便であることは、次章で述べる行動決定サブシステムを開発する際の大きな利点となる。

5. 行動決定サブシステム

本章では、仮想空間の状態や訓練生の動作に応じて仮想インストラクタの行動を決定する行動決定サブシステムについて述べる。

行動決定サブシステムは仮想インストラクタのヒューマンモデルに相当する。訓練生を指導する教師としての仮想インストラクタの行動を決定するヒューマンモデルは以下の4つの特徴を備える必要がある。

特徴1. 仮想空間の状態を認識し次に実行可能な動作と実行不可能な動作を判断できる。

特徴2. 作業の目的としての仮想空間の最終の状態を知識として格納できる。

特徴3. 仮想空間の現在の状態から最終の状態までの作業手順を探索できる。

特徴4. 訓練生の作業により仮想空間の状態が変化しても常に上記1~3が実現できる。

筆者らは上記4つの特徴を備えるヒューマンモデルを構築するために、ペトリネットを用いた仮想物体の状態遷移と仮想インストラクタの行動のモデル化手法を開発する予定である。以下では、仮想空間内に机とペンがあり、ペンが机の引き出しの中に置かれ、引き出しからペンを取り出すことを最終目的とする作業を例題として、ヒューマンモデルを構築する方法と仮想インストラクタの行動を決定する方法について述べる。

[手順1] 仮想物体の1つの状態をプレースの1つに対応させる。

例題では引き出しの状態として「閉まっている状態」と「開いている状態」があり、ペンの状態として「引き出しの中にある状態」と「手に握られている状態」がある。そのそれぞれに対してプレースを作成する。（プレース内にトークンが存在する場合、そのプレースに対応する仮想物体の状態が成立するものとする。）

[手順2] 仮想物体の状態遷移を起こさせるイベントをトランジションの発火に対応させる。

例題では仮想空間内で「引き出しを開く」イベントが発生すると、引き出しの状態が「閉まっている状態」から「開いている状態」に遷移すると考えられる。そこで、引き出しが「閉まっている状態」を表すプレースを入力プレースに、引き出しが「開いている状態」を表すプレースを出力プレースに持つトランジションを作成し、そのトランジションに「引き出しを開く」イベントを対応させる。同様に、ペンが「引き出しの中にある状態」を表すプレースと引き出しが「開いている状態」を表すプレースを入力プレースに持ち、ペンが「手に握られている状態」を表すプレースを出力プレースに持つトランジションを作成し、「ペンを握る」イベントを対応させる。

[手順3] トランジションに訓練生の動作及び仮想インストラクタの動作を対応つける。

「引き出しを開く」トランジションに対して、訓練生の「引き出しを開く」ジェスチャを対応させ、また、仮想インストラクタの動作として、「動作の対象：引き出し」と「動作：開く」という情報を付加する。同様に、「ペンを握る」トランジションに対して、訓練生の「ペンを握る」ジェスチャを対応させ、仮想インストラクタの動作として、「動作の対象：ペン」と「動作：握る」という情報を付加する。

[手順4] 仮想空間の初期状態としてトークンを配置する。

仮想空間の初期状態は、引き出しの状態が「閉まっている状態」で、ペンの状態が「引き出しの中にある状態」である。従って、そのそれぞれに対応するプレースにトークンを配置する。以上のモデル化方法により、図2に示すペトリネットが作成される。

以上に述べたヒューマンモデルの構築手法によって作成されたペトリネットは前述の4つの特徴を備えていることを以下で確認する。

[特徴1について] 図2に示したペトリネットでは、「引き出しを開く」トランジションは発火可能であり、「ペンを握る」トランジションは発火不可能である。従って、仮想空間が図2に示した状態にある場合には、仮想インストラクタは「引き出しを開く」動作のみが実行可能であることが分かる。また「引き出しを開く」

トランジションは、予め手順3において、「動作の対象：引き出し」と「動作：開く」という情報が付加されているので、これらの情報を動作合成サブシステムに送ることで、仮想インストラクタの動作を合成できる。従って、このモデルは特徴1を満たすと言える。

【特徴2について】 図2に示したペトリネットにおいて、ペンが「手に握られている状態」を表すプレースにトークンが遷移することが最終の目的である。従ってこのモデルはトークン配置として目的の状態を格納でき、特徴2を満たすと言える。

【特徴3について】 図2において、ペトリネットの発火系列を検索することにより、「引き出しを開く」トランジションと発火させ、続いて「ペンを握る」トランジションを発火させることにより、仮想空間が目的の状態に遷移することが分かる。従って、このモデルは特徴3を満たすと言える。

【特徴4について】 訓練生が「引き出しを開く」ジェスチャを実行した場合、予め手順3において対応つけた「引き出しを開く」トランジションを発火させる。この場合、ペトリネットのトークン配置が図3に示すように遷移するが、この状態でも上記1～3は成り立つ。従って、このモデルは特徴4を満たすと言える。

以上、ペトリネットを用いた仮想インストラクタのヒューマンモデルの構築方法とその利用方法について述べたが、ペトリネットはグラフとして描画することができるため、ペトリネットのエディタを作成することで、GUIを介して仮想インストラクタのヒューマンモデルを構築できる環境も実現可能である。これは、2.3節で述べた方策1に相当する利点である。

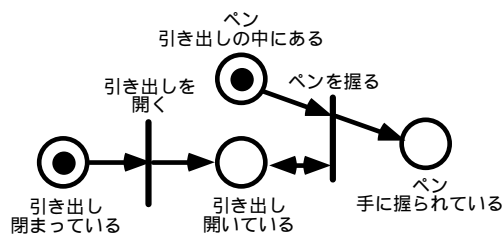


図2 ペトリネットで作成したヒューマンモデルの例

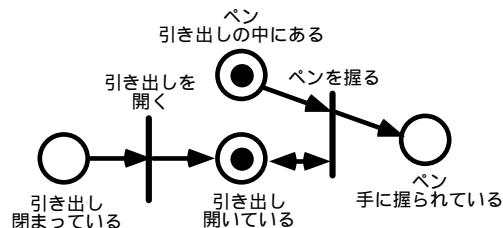


図3 状態遷移後のトークン配置

6. まとめ

本論文では、VR技術を用いた訓練システムの研究開発の現状と問題点について述べ、近年注目されている仮想インストラクタと共同作業しながら訓練できる新しい訓練システムについて、その実現のために必要となる要素技術の概要を述べた。さらに、筆者らがを行っている共同作業訓練システムの開発の現状について、仮想インストラクタの動作を合成する手法と、仮想インストラクタの行動を決定するヒューマンモデルの構築方法について纏めた。本論文で述べた共同作業訓練システムは原稿執筆時点では開発途中であるが、完成すれば、VR技術を用いた訓練システムを一般に実用化するための基盤になると考えている。

7. 参考文献

- [1] Rickel, J. et al.: Animated Agents for Procedural Training in Virtual Reality; Perception, Cognition, and Motor Control, Applied Artificial Intelligence 13, pp.343-382 (1999).
- [2] 南雲他: 小型円筒面スクリーンによる運転・保守作業訓練環境の構築; 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.207-208 (1998).
- [3] 安部他: 仮想機械を用いる機器修復法の教示と誤りの検出・修正機構; 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, pp.89-92 (1997).
- [4] 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).
- [5] 吉川他: 仮想空間における機器必修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).
- [6] 石井他: 人工現実感技術を用いた機器必修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).
- [7] 小牧他: オブジェクト指向に基づく仮想空間構築手法に関する研究; ヒューマンインタフェースシンポジウム 2000 論文集, pp.407-410 (2000).
- [8] 石井他: アフォーダンスの概念に基づく人体モーション合成システムの開発; ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.2, No.3, pp.73-78 (2000).