

仮想空間設計支援システムの開発

○石井 裕剛・手塚 哲央・吉川 榮和
(京都大学大学院エネルギー科学研究科)

Development of a Design Support System for Constructing Virtual Environment

Hirotake ISHII, Tetsuo TEZUKA, Hidekazu YOSHIKAWA

Graduate School of Energy Science, Kyoto University
Gokasho, Uji-shi, Kyoto-fu, 611-0011 Japan
e-mail: hirotake@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

Abstract: A support system has been developed for designing and constructing the VR-based training environment for machine maintenance work without any expertise programming effort. The features of the developed system are : (1) the user can feed the necessary information under GUI environment, and (2) the user can set the state transition of objects by constructing Petri net visually. It was verified through some experiments that the developed system can reduce the workload and working hours remarkably, needed for constructing training environment. In this report, the system configuration and the experimental results are described.

Keywords : virtual reality ; design support system ; maintenance training system ; Petri net

1. はじめに

近年、計算機の飛躍的な性能向上により、仮想空間内に複数の物体を配置し、3次元マウス等の特殊なデバイスを用いて、機器保守の訓練等を行うことが可能となってきた。仮想空間内に仮想的な機器を配置し、それらを操作することにより訓練を行う方法は、実機を用いて訓練を行う方法に比べ、安全で、安価で、機器の設置のための場所を多くは必要としない等の利点があるが、一方で、仮想空間内で、実空間と同様の保守作業を行うことを可能にするためには、CAD(Computer Aided Design)等を用いた訓練対象機器の3次元形状データの作成作業に加え、仮想空間内での可能動作を一つ一つ作り込んでいく作業が必要となる。これまで、このような可能動作の作り込み作業は殆どの場合、プログラミングにより行われており、計算機に対する専門的な知識が必要であると同

時に作業効率が非常に悪かった。

そこで本研究では、仮想空間内に機器保守の訓練環境を構築する際の作業の効率化を図るため、訓練環境の構築支援システムの開発を行ってきた。その結果、プログラミングを全く行わなくてもGUI(Graphical User Interface)を介して必要な情報を入力することにより、柔軟に目的の訓練環境を構築することができる支援システムを開発することに成功した[1]。本報告では開発した構築支援システムの概要と、新たにその評価実験を行った結果について述べる。

以下、第2章では開発した構築支援システムの概要について述べる。第3章では構築支援システムの評価のために、原子力プラントの構成機器の一つである「スイング式逆止弁」の分解・組立作業を行うことができる訓練環境を構築した結果について述べる。第4章では、構築

支援システムを初めて利用するユーザが、困難無く支援システムを利用できることを確認するために行った実験の結果について述べ、第5章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

2. 訓練環境の構築支援システムの概要

本研究で開発した訓練環境の構築支援システムは、訓練に必要な情報を入力する環境と同時に、訓練を実行する環境も提供する。情報を入力する者（以下ユーザと呼ぶ）は必要に応じて両環境を切り替えて利用することができる。訓練に必要な情報を入力する場合に用いるハードウェア、ソフトウェアと、訓練を実行する場合に用いるハードウェア、ソフトウェアが若干異なるため、以下では、そのそれぞれについて説明する。

2.1. 訓練に必要な情報を入力する場合

訓練に必要な情報を入力する場合のシステムの構成を図1に示す。システムは、計測部、情報処理部、情報提示部に分けることができる。計測部は3次元マウスと2次元マウス、キーボードで構成され、情報提示部はDisplayで構成される。情報処理部はSGI社のワークステーション（MaximumImpact）で構成され、ソフトウェアとしては、OpenGLライブラリとMotifライブラリを使用した。ユーザはOpenGLライブラリを用いてレンダリングされた仮想空間を、ディスプレイを介して眺めながら3次元マウスと2次元マウスを操作し、必要な情報を入力していく。2次元マウスとキーボードは、主に情報の選択や数値や名称の入力に用い、3次元マウスは主に仮想空間内の3次元位置を指定する場合に用いられる。

2.2. 訓練を実行する場合

訓練を実行する場合のシステム構成を図2に示す。システムは、一般の人工現実感技術を用いたシステムと同様に、計測部、シミュレーション部、情報提示部で構成される。計測部は3次元マウスで構成される。訓練生は、3次元マウスのバックとボタンを操作することによって、手の把持・開放・回転等のジェスチャに対応する動作を行うことができる。シミュレーション部は、ハードウェアとしてSGI社のワークステーション、ソフトウェアとしてOpenGLライブラリを用いる。情報提示部は、大型ディスプレイとCrystalEyesとで構成され、訓練生は、OpenGLライブラリによって描かれた3次元画像を

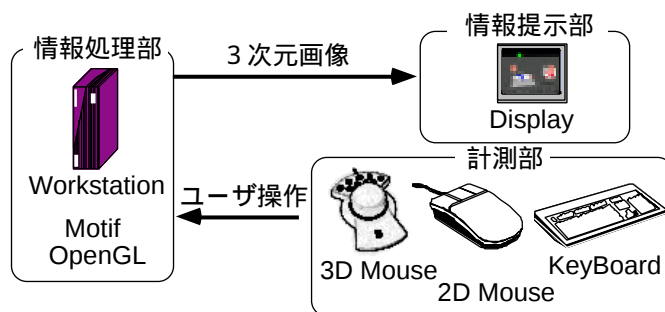


図1 訓練環境を構築する場合のシステム構成
Figure1: System configuration when constructing.

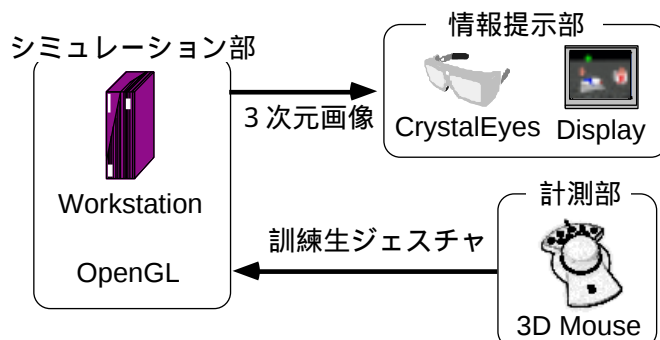


図2 訓練を実施する場合のシステム構成
Figure2: System configuration when training.

CrystalEyesを通して立体映像として見ながら訓練を行うことができる。

2.3. 仮想空間構築の基本方針

仮想空間内で実空間と同様に機器を操作することを可能にするためには、各物体相互間の干渉や物理法則による運動等（以下単に物理法則という）をシミュレーションする必要がある。本研究では仮想空間内の物体に「状態」の概念を導入し、その各状態に於いて訓練生のジェスチャに応じた物体の運動の仕方を設定することにより、物理法則をシミュレーションすることとした。具体的には、予め「物体が取り得る状態とその状態における物体の運動の仕方を規定したデータベース（運動データベース）」と「イベントの発生に応じた各物体の状態遷移の仕方を規定したデータベース（状態遷移データベース）」を作成する。訓練を実施する際には各物体の現在の状態を調べ、運動データベースを元に物体の運動を制御し、物体同士の接触等のイベントが起これば、状態遷移データベースを元に関係する物体の状態を遷移させる。例えば、机の上にあるナットを手で握る作業を考えた場合、物体の状態遷移の仕方とシミュレーションすべき物体の運動の関係は図3のようになる。

表 1 設定可能なパラメータの例
Table1: Examples of variable parameters

項目	内容
3次元形状	仮想空間に配置する物体の外見を表す形状データ D X Fフォーマットファイルを指定する
テクスチャ	物体の表面に張り付ける画像ファイル R G Bフォーマットファイルを指定する
回転可能軸	訓練生のジェスチャにより回転することのできる軸を 指定する（ワールド座標系もしくはローカル座標系を 基準にした指定が可能）
平行移動可能軸	訓練生のジェスチャにより移動することのできる軸を 指定する（ワールド座標系もしくはローカル座標系を 基準にした指定が可能）
時間推移運動	物体の座標を時間の関数で示すことにより 自由落下等の運動を表現する



図 3 物体の状態と運動の関係
Figure3: Relationship between state and its movement.

本研究では、これら 2 つのデータベースを、GUI を介して効率的に作成することができるインタフェースを構築した。

運動データベースに関しては、各種情報を項目の選択と数値の入力により作成することとした。この時、柔軟に複雑な訓練環境を構築することを可能にするためには、数多くのパラメータを設定可能にする必要がある。そこで、本システムでは、物体の外見に関するデータ、物体の動きに関するデータ等、約 60 パラメータの設定を可能とした。表 1 に本支援システムで設定可能とした主なパラメータの例を示す。これらのパラメータを設定することにより、「開いた手・閉じた手」や、「落下する物体」、「空中に浮かぶ風船」等も仮想空間で表現することができる。

設定可能なパラメータを数多く準備すると、設定作業が煩雑になり、かえって訓練環境を構築する上での効率を低下させる可能性がある。そこで、本研究では、仮想空間内の物体の状態では、良く似た物理法則を適用すべき状態が数多く存在することに注目し、よく使用するパラメータの値の組み合わせを、「オブジェクトテンプレ

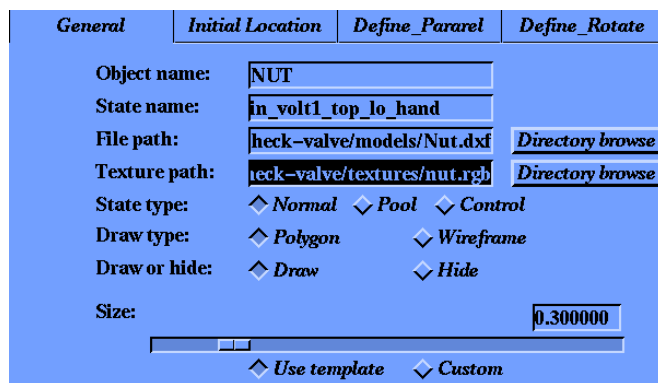


図 4 インタフェースの例
Figure4: An example of GUI.

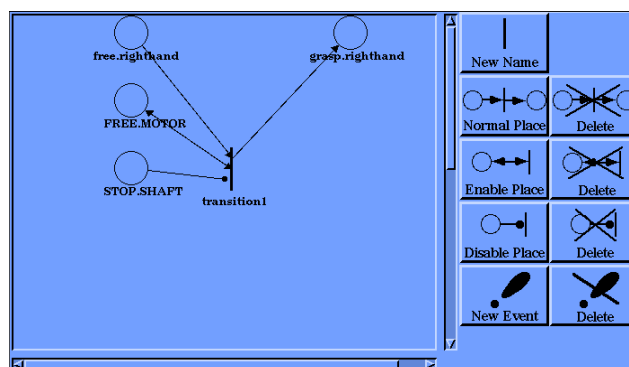


図 5 ペトリネット構築の際の画面例
Figure5: An example of GUI for constructing Petri net.

ト」として登録し、これも GUI を介して選択することができるようにすることにより、さらに訓練環境の構築の効率をあげる試みを行った。

状態遷移データベースに関しては、物体の状態遷移の仕方をペトリネット[2]を用いてモデル化する方法を考案し、支援システム上でペトリネットを視覚的に構築することにより、物体の状態遷移の仕方を設定できるようにした。具体的には、支援システム上で、遷移前の状態と遷移後の状態、そして状態遷移を起こさせる原因となるイベントを項目選択で入力することにより、ペトリネットを作成するものとした。

2.4. 支援システムのインタフェース

図 4 に本研究で開発した支援システムのインタフェースの画面例を示す。訓練環境を構築するために必要な情報の入力は、トグルボタンによる項目の選択や、スライダーによる数値の設定により行う。また、本支援システムでは、前述のペトリネットも図 5 に示すように視覚的に構築することを可能にした。また、支援システムの操作ボタンには図 6 に示すようなアイコンが張り付けて



図 6 アイコンを張り付けたボタンの例
Figure6: An example of icon buttons.

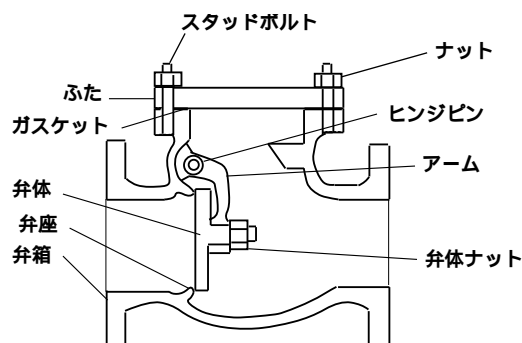


図 7 逆止弁構造
Figure7: Structure of check valve.

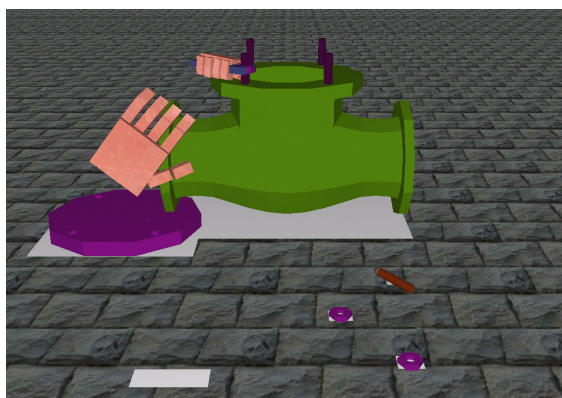


図 8 逆止弁保守訓練環境の画面例
Figure8: An example scene of maintenane training.

あり、初めて支援システムを利用する場合でも、各ボタンの機能が直感的に理解できるように工夫した。

3. 複雑な訓練環境の構築

本章では、第 2 章で述べた構築支援システムを用いて、原子力プラントの構成機器である「スイング式逆止弁」の分解・組立作業を行うことができる訓練環境を構築した結果について述べる。

3.1. 構築する訓練対象の機器

スイング式逆止弁の構造を図 7 に示す。今回構築した訓練環境は、簡単化の為に蓋を固定するナットとボルトの総数を実際の機器に比べ 16 個から 4 個に減らしてある。また、操作の対象も弁の蓋の部分に限定した。しかし、蓋を固定するナットは、訓練開始時は固く締め付け

表 2 作業時間の比較

Table2: Comparison of construction time between previous work and this support system

	先行研究	支援システムを使用
構築作業人数	2 人 (プログラマ)	1 人 (支援システムユーザ)
構築時間	約 4 ヶ月	約 12 時間

てあるために最初にスパナで緩める作業を行わなければ、手で緩めることはできない等、出来る限り実世界と同様の訓練環境を提供するようにした。また、一度外したナットや蓋は、任意の時点で再び填める作業を行うことができる等、出来る限り自由な手順で作業を行うことができる環境を構築した。このような訓練環境は、ペン、スパナ、ナット等、8 種類、計 14 個のオブジェクトで構成され、作業開始から最短で約 100 動作で作業が終了する。

3.2. 構築結果

構築した訓練環境の画面例を図 8 に示す。今回の構築作業では、支援システムの操作に習熟した一人のユーザにより作業を行ったが、作業開始から作業終了までに約 12 時間が必要であった。これには訓練対象機器の 3 次元形状データを構築する作業時間は含まれていないが、本研究室での先行研究[3]において、同様の訓練環境をプログラミングにより構築した場合、二人のプログラマにより、約 4 ヶ月の作業時間を要したことを考慮すると、支援システムを用いることにより、訓練環境を構築する際の作業効率が飛躍的に改善されたと言える(表 2)。

3.3. 考察

このように飛躍的に作業効率が改善された理由としては、プログラミングによる訓練環境の構築作業は、仮想空間内で訓練作業を可能にするための各種アルゴリズムの考察や、プログラムのバグ取り等の作業が必要であり、これらの作業はプログラマが熟練していなければかなりの時間を要するのに対して、支援システムを用いた構築作業では、各種アルゴリズムを細部まで考察する必要がなく、また、作業手順が簡略化されたため、構築作業に間違いを起こしにくくなったためであると考えられる。

ただし、構築対象の訓練環境がさらに複雑になると、

表3 回転中のシャフトの状態を表す情報
Table3: State information of rotating shaft

パラメータ	値	パラメータ	値
状態名	Rotate	形状ファイル	Shaft.dxf
テクスチャファイル	Shaft.rgb	状態タイプ	Normal
描画方法	Polygon	描画サイズ	1.0
初期位置	設定無し	平行移動	不可
回転	可能（時間推移）	回転可能軸	ローカル座標系Z軸
マウスによる移動	不可		

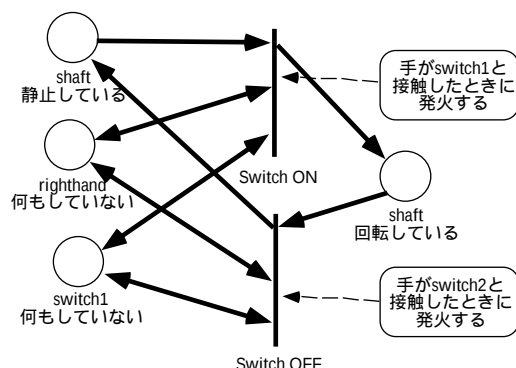


図8 シャフトの状態遷移のモデル化例
Figure8: Example of modeling shaft's state transition.

支援システムを用いる場合でも、構築作業の間違いが目立つようになる。この点に関しては、支援システムのインタフェースをさらに改良する等の対策が必要と考えられる。

4. 初心者による支援システムの利用実験

第3章で述べた構築支援システムの使用例は、支援システムに精通した者による作業の評価であった。そこで本章では支援システムを初めて使用する場合の作業効率の評価実験を行った結果について述べる。

4.1. 実験の目的

本研究で構築した訓練環境の構築支援システムを第三者に使用してもらい、支援システムを用いることによる訓練環境構築の作業能率の改善を確認する。またアンケート調査により支援システムの改良すべき点を見出す。

4.2. 被験者と実験方法

被験者は2人で、プログラミングにより訓練環境を構築した経験のない20歳代と40歳代の男性とした。2人とも2次元マウスとキーボードの操作には十分慣れてお

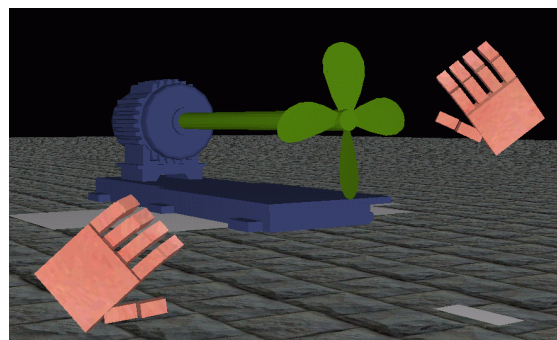


図9 モータ操作の訓練環境
Figure9: A scene when training motor operation.

り、必要な情報を不自由なく入力できる。また、2人とも支援システムを初めて使用する。被験者に人工現実感技術を用いた訓練環境を支援システムを用いて構築させる。3次元形状データとテクスチャデータは予め作成されており、どのファイルにどのデータが格納されているかを予め被験者に教示しておいた。被験者には、支援システムの各機能の説明と操作方法を約30分間説明し、例として「手でペンを握ったり放したりできる訓練環境」の構築作業を実際に見学させた。実験では、作業開始から作業終了までに要した時間を計測し、また、作成した訓練環境データの内容も記録した。さらに、作業終了後、支援システムを使用した感想を述べてもらった。そして予め準備した、訓練環境構築の回答例と比較し、被験者が正しく訓練環境を構築することができたかどうかを検討した。

4.3. 被験者が構築する訓練環境

モータとそのスイッチが配置しており、スイッチを操作することにより、モータを回転させたり、静止させたりすることができる訓練環境を構築する。準備する3次元形状データは、モータの土台、シャフト、スイッチの台、スイッチの4つである。

このような訓練環境を構築するために入力する必要がある情報の一例を、表3と図8に示す。この構築作業では、ペトリネットの作成、すなわち物体の状態遷移の仕方の設定は比較的容易であるが、シャフトの回転方法の設定は難しい作業である、と予想を立てた。

4.4. 実験結果

二人の被験者(被験者A、被験者B)は共に訓練環境を正しく構築することができた。構築した訓練画面を図9に示す。訓練環境構築に必要とした作業時間は、被験者

Aでは41分、被験者Bでは38分であった。難しいと予想された、シャフトの回転方法の設定も、支援システムの各機能を説明する際に実演した方法を真似ることで、混乱することなく設定することができたようである。ただし、被験者Bは、ペトリネットを作成する際に、物体の状態の分け方にすこし戸惑ったが、試行錯誤の後、正しいペトリネットを作成することができた。実験後のアンケートにより、両者から次のような感想が得られた。

- ・支援システムを利用して、最初はどのボタンがどの機能に対応しているのかが分からなかったが、使っている内に分かるようになった。
- ・オブジェクトの位置を合わせる作業が難しかった。
- ・使っている内に、もっと凝った仮想空間を作ってみたいと思うようになった。
- ・システムを使い込むと、もっと自由に仮想空間を構築できるようになると思う。

4.5. 考察

実験の結果により、本支援システムを初めて利用する場合でも、単純な訓練環境ならば、試行錯誤しながら最終的には構築できることが確認された。被験者は2人とも、これまでに仮想空間を構築した経験はなく、プログラミングで仮想空間を構築させた場合、プログラミングの基礎から学ぶ必要があり、非常に時間がかかるものと思われるが、本システムを用いると、多くても数時間の練習を行うだけで、目的の仮想空間を構築できるようになると思われる。

一方、アンケートの結果からは、オブジェクトの位置合わせのインタフェースを改良すべきであることが判明した。また、3次元マウスを用いて、正確なオブジェクトの位置を設定することは、3次元マウスの操作に慣れていない初心者には困難であることも判明した。GUI環境で、2次元マウスを用いて位置合わせを行うことができるインタフェースを構築すべきであると思われる。

パソコン等を利用する時でも、何か新しいアプリケーションを利用する場合には、各機能の具体的な働きを十分理解するまでは、効率的に作業を行うことは難しい。今回開発したシステムを利用した実験でも同様の現象が見られたが、このような状況では、アプリケーションに対する適当なインストラクタがいない場合、操作マニュアル等が理解しやすいものである必要があると考えられ

る。今後、本システムを実用化する場合、操作マニュアルの整備も重要な事柄である。

5. おわりに

本研究では、人工現実感技術を用いた訓練環境の構築作業の効率化を図るため、訓練環境の構築支援システムの開発を行った。そして、開発したシステムの評価実験を行い、その結果、プログラミングにより訓練環境を構築する場合に比べて、作業効率が飛躍的に改善されることを確認した。また、支援システムを初めて利用する場合でも、数時間の練習を行うだけで、目的の訓練環境を構築することが出来るようになることを確認した。

本研究で開発した設計支援のためのアプリケーションは、インタフェースの善し悪しにより、作業効率がかなり違ってくることが考えられる。例えば、操作メニューの階層構造は、作業効率に大きく関わってくることが予想される。また、アイデア次第では、支援システムに様々な機能をつけ加えて行くことにより、さらに使いやすいシステムに改良していくことが出来ると期待される。

今回の研究では、支援システムを用いた仮想環境の構築対象を、機器保修の訓練環境に限定したが、開発した構築支援システムは、機器保修の訓練環境だけでなく、そのまま、ゲームや、バーチャルショールームといった、他のインタラクティブな仮想空間を構築する場合にも利用することができる。

今後は、システムの更なるインタフェースの改良と、システムへの自動実演機能の付加、複数人で作業を行う訓練環境を構築できるシステムへの拡張を行っていきたい。

参考文献

- [1]石井裕剛、手塚哲央、吉川榮和：人工現実感技術を用いた機器分解組立訓練システムの設計支援に関する研究、第13回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集、33/38(1997)
- [2]J.L.Peterson：ペトリネット入門、共立出版社(1992)
- [3]吉川榮和、手塚哲央、柏健一郎、石井裕剛：仮想空間における機器保修訓練シミュレーション、日本原子力学会誌、Vol.39-12、72/83(1997)