

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2報)

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)

A Study on Design Support for Constructing Machine-Maintenance Training System by Using Virtual Reality Technology (The 2nd report)

Hirotake Ishii, Tetsuo Tezuka and Hidekazu Yoshikawa

Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Gokasho, Uji, 611-0011, Japan

email : hirotake@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

Abstract: A design support system has been developed for constructing virtual training environments where a trainee can disassemble/assemble machines by using human interface devices special for virtual reality. Using this system, the users can construct various training environments easily without any programming effort under Graphical User Interface environment. But through some experiments, it was turned out that there were some disabilities on the user interface in this system. In this study, the user interface of the system has been improved and the effect of the improvement was verified through some newly conducted experiments. In this report, the system configuration is outlined and the improvements of the interface and the result of the new experiments are explained. The result of constructing the training environment for disassembling a pump used in nuclear power plants is described, as an example of constructing a virtual training environment using this refined system.

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

1. はじめに

近年の人工現実感技術の発展により、仮想空間に訓練環境を構築する研究が盛んに行われるようになってきた^{1, 2)}。人工現実感技術を用いた訓練は、実空間における実物機器を用いた訓練に比べ、安全で、容易に同じ訓練を繰り返し実施することができる等、数多くの利点がある。しかし一般に、実空間と同様の作業を行うことができる仮想訓練環境を構築するためには、高度な技術と経験、多くの時間が必要となる。特に、多くの時間が必要なことは、直接開発コストの増加に繋がるため、早急に解決すべき問題である。

一方、仮想空間を構築する際の労力削減を目指したシステムとして、英国 Division 社の「dVISE」³⁾や、株式会社ソリッドレイ社の「RealMaster」⁴⁾等、GUI(Graphical User Interface)を介して仮想空間を構築できるシステムが開発

されつつある。これらのシステムを用いることにより、コンピュータに関する高度な知識のない人でも「ドアのノブを触るとドアが開く」といった、単純な仮想空間は容易に構築できる。しかし、実空間と同様のジェスチャでモータやポンプ等の複雑な機器を分解・組立できるような仮想空間を構築することは、基本的に不可能ではないが高度な技術が必要である。

そこで、筆者らは、構築の対象を機器保修の訓練環境に特化し、高度な知識を持たない人でも、容易に目的の仮想空間を構築することができる、仮想空間の構築支援システムを開発してきた⁵⁾。そして、実験によりシステムの評価を行い、支援システムを用いることにより、プログラミングにより仮想空間を構築する場合に比べ、作業効率が飛躍的に改善されることを確認したが、同時に支援システムに幾つか改善すべき点があることも判明した⁶⁾。

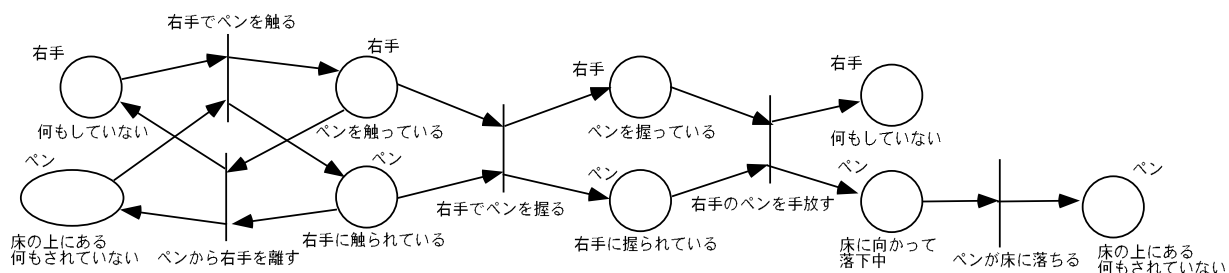


図 1 仮想空間のペトリネットによるモデル化の例

本報告では、先行研究⁶⁾での評価実験により得られた結果を元に、支援システムのインタフェースを改良し、さらにその改良の効果を、新たに実験を行うことにより評価した結果について述べる。また、改良した支援システムを用いて、新たに原子力発電所等で用いられている「横型ポンプ」の分解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。

以下、第 2 章では、開発した設計支援システムの概略とこれまでの研究の経緯について述べ、第 3 章では、今回行ったインタフェースの改良の内容と、その評価実験を行った結果について述べる。また、第 4 章では、新たに構築した「横型ポンプ」の分解作業を行うことができる訓練環境について述べ、最後に結論と今後の課題について述べる。

2. 支援システムの概略とこれまでの研究の経緯

2.1 支援システムの基本概念

開発した設計支援システムでは、様々な物体を自由に操作できるインタラクティブな仮想空間を、簡潔に記述するために、仮想空間の物体に「状態」の概念を導入した。例えば、「ペンが机の上に乗っている状態」「ナットが右手に握られている状態」等が物体の「状態」となる。これらの物体の各「状態」に対して、訓練生のジェスチャに応じて、物体がどのように運動するのか（物体の振る舞い方）を設定し、さらにイベントの発生に応じた物体の「状態遷移の仕方」をペトリネット⁷⁾によりモデル化することにより、複雑な仮想空間も容易に記述することを可能にした。

例えば、「右手でペンを握ることができ、手を離すとペンが床まで自由落下する空間」は図 1、表 1、表 2 のように記述することができる。設計支援システムを用いて仮想空間を構築する場合、これらの情報をシステムに入力することになるが、支援システムでは特に、物体の「振る舞い方」を定める情報として、約 60 のパラメータを設定することにより、プログラミングを行わなくても柔軟に仮想空間を構築することを可能にした。具体的なペトリネットの定義とパラメータの内容に関しては筆者らの論文^{8, 9)}を参照されたい。

表 1 各状態における物体の振る舞い方

状態名（右手）	振る舞い方	形状
何もしていない	自由に動く	開いた手
ペンに触っている	自由に動く	開いた手
ペンを握っている	自由に動く	握った手
状態名（ペン）	振る舞い方	形状
何もしていない	静止	ペン
右手に触られている	静止	ペン
右手に握られている	右手の動きに追随	ペン
床に向かって落下中	自由落下	ペン

表 2 物体の状態を遷移させるイベント

トランジション名	イベントの内容
右手でペンを触る	右手とペンが接触する
ペンから右手を離す	右手とペンが分離する
右手でペンを握る	右手を握る
右手のペンを手放す	右手を開く
ペンが床に落ちる	ペンと床が接触する

2.2 システムの概略

本研究で開発した支援システムの構成を図 2 に示す。支援システムは、SGI 社のワークステーション（Indigo2 Maximum Impact）、Logitech 社の 3 次元マウス（Magellan、以下 3D マウス）、2 次元マウス（以下 2D マウス）、ディスプレイ、キーボード、立体視メガネ（CrystalEyes）からなる。ソフトウェアはワークステーション上に、C 言語で構築されており、3 次元グラフィックのレンダリング用に OpenGL ライブラリ、GUI 環境の構築用に Motif ライブラリ、仮想空間の立体視用に SGL ライブラリを用いている。プログラミングソースは約 18,000 行で、一人のプログラマが、約 6 カ月で構築した。

2.3 改良前のインタフェース

インタフェースを改良する前の支援システムの画面例を図 3 に示す。必要な情報は全て、図 4 に示すような GUI 環

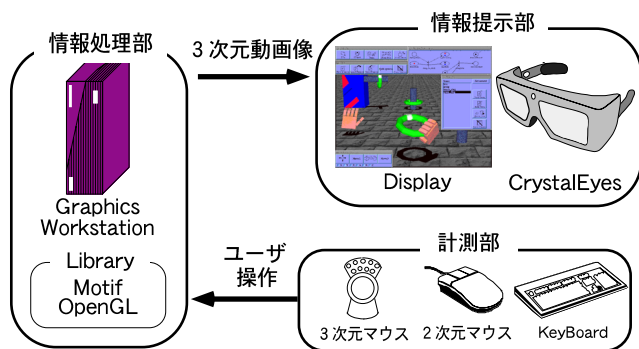


図2 支援システムの構成

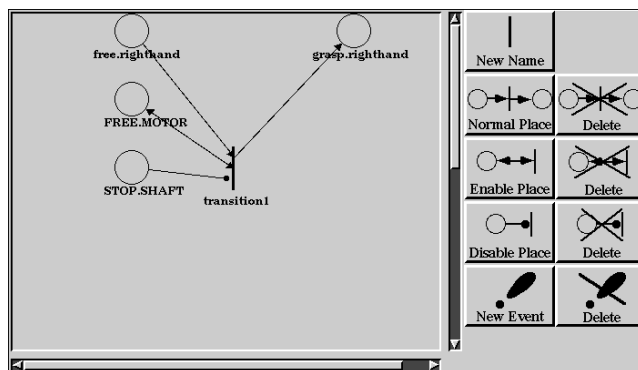


図4 情報を入力する際のインタフェースの例

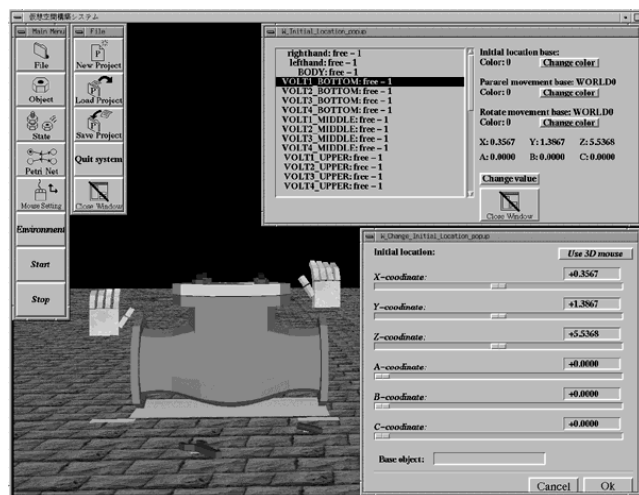


図3 インタフェース改良前の支援システムの画面例



図5 アイコンを張り付けたボタンの例

の仮想空間を構築することができた。このように、支援システムを用いることにより、仮想空間構築の作業効率が飛躍的に改善されることが確認されたが、同時に、システムに改善すべき点があることも判明した。

3. 支援システムの改良と評価

3.1 支援システムの改良

本研究では、先行研究における評価実験でのアンケート結果を元に、訓練環境を構築する場合の支援システムのインタフェースの改良を行った。以下に主な改良点を述べる。

1. 仮想空間内の3次元位置を入力する場合のインタフェースを、3Dマウスを用いたものから、2Dマウスを用いたものに変更した。

3Dマウスは、3次元空間における大まかな位置を示す場合に向いているが、3Dマウスは初心者には使いにくく、また、熟練者が使用する場合でも、正確な3次元位置を示すのには向いていないことが判明した。そこで、今回は、仮想空間を構築する際には、3Dマウスは視点移動のみに利用するものとし、物体の3次元位置は、2Dマウスを用いて入力するものとした。このようにすることにより、ユーザは、正確な位置を示しやすくなるだけでなく、視点移動する場合と、位置入力する場合とで、使用するデバイスが完全に分かれるため、間違いを起こしにくくなると考えられる。

2. 複数のウィンドウに分かれていた機能を一つのウィンドウにまとめた。

様々なウィンドウを何度も表示させる煩雑さを解消するために、操作ボタンを一回り小さくし、関連した機能を極力一つのウィンドウにまとめた。

境を介して入力する。支援システムは、システムを初めて使用する場合でも、各ボタンの機能が直感的に分かるようにするため、殆どのボタンに図5のようなアイコンが張り付けてある。訓練環境を構築する際は、主に3Dマウスを用いて仮想空間内の3次元的な位置を指定し、2Dマウスとキーボードを用いて、物体の名称や、各種数値等を入力する。また、視点移動も3Dマウスを用いて行うこととした。

2.4 インタフェース改良前のシステムの評価実験

筆者らは、先行研究⁶⁾において、構築した支援システムの実験による評価を行っている。実験は、複雑な仮想空間を、支援システムに習熟したユーザが構築する場合（実験1）と、簡単な仮想空間を、支援システムを初めて利用するユーザが構築する場合（実験2）の2つに分けて行った。その結果、実験1では、以前、2人のプログラマがプログラミングにより、約4カ月かけて構築した仮想空間と殆ど同じ仮想空間を、支援システムを用いることにより、1人のユーザが、約12時間で構築することができた。また、実験2では、2人のユーザにモータの回転を制御する仮想空間を構築してもらったが、両者とも、約40分間で目的

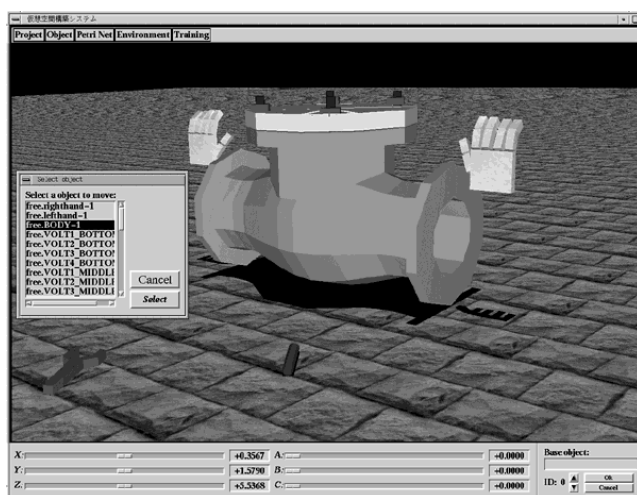


図 6 インタフェース改良後の支援システムの画面例

3. アイコンボタンの使用を極力減らした。

インタフェース改良前には、支援システムを初めて利用するユーザが、直感的に各ボタンの機能が分かるようにするために、大きめのアイコンボタンを採用したが、大きなアイコンボタンは、システムを本格的に利用する場合には、3次元映像を提示するための画面を隠してしまうことになり、使いにくいという意見があった。そこで今回は、アイコンを張り付けたボタンの利用は、3次元画面を見る必要がない場合に限定し、多くの場合、機能を説明するテキストを張り付けたボタンを主に利用するプルダウンメニューに変更した。

4. メニューの階層構造を再設計した。

これまでのシステムでのメニューの階層構造は、作業の順番を基準にして構築されていたが、この方法では、仮想空間を修正する際に、目的の機能を探すのに時間がかかった。そこで、操作メニューの階層構造を見直し、作業の順番で分類するのではなく、入力する情報の種類により分類したメニュー構造とした。

5. 多くのパラメータにデフォルト値を定め、極力入力工程を減らす試みを行った。

特に、これまで訓練開始時の各物体の「状態」は、ユーザが個々に指示していたが、仮想空間内に配置する各物体に対して、最初に作成した「状態」を、デフォルトでの訓練開始時の「状態」とした。これは、ほとんどのユーザが、訓練開始時の状態から作成する傾向があるため、効果的である。

インタフェース改良後の支援システムの画面例を図 6 に示す。

3.2 支援システムの実験による評価

インタフェースの改良による効果を確認するために、評価実験を行った。評価は支援システムを初めて利用する初心者、簡単な仮想空間を構築させ、その構築に必要とした時間を計測し、また構築後のアンケート調査も行った。

3.2.1 被験者と実験方法

実験の被験者は支援システムを初めて利用する 20 代の男性 2 人（被験者 C,D）とした。両被験者は、インタフェース改良前に行った評価実験の被験者（被験者 A,B）とは別の被験者である。被験者 C はプログラミングにより仮想空間を構築した経験はあるが、被験者 D はその経験がない。両者ともに 2 次元マウスとキーボードの操作には十分慣れており、必要な情報を不自由なく入力することができる。インタフェースの改良による効果のみを確認できるようにするため、実験の条件は、インタフェース改良前に行った実験と、できるかぎり同条件で行うものとした。すなわち、訓練に利用する機器の 3 次元形状データとテクスチャファイル、提示する効果音は、予め適当なアプリケーションを用いて構築されており、被験者には各ファイルの格納場所とその内容について予め説明した。また、構築作業を開始する直前に、支援システムに十分習熟した者が、支援システムの各機能の説明と操作方法等を前実験と同じ時間（約 30 分）で説明した。

被験者が構築する仮想空間は、「手でスイッチを操作することにより、モータのシャフトの回転を制御する仮想空間」とした。この場合、仮想空間に配置する物体は、モータ、シャフト（ファン付き）、スイッチ、スイッチの台の計 4 つとなる。

3.2.2 実験結果

二人の被験者は共に仮想空間を正しく構築することができた。構築した仮想空間の画面例を図 7 に示す。仮想空間構築に必要とした時間は、被験者 C が 20 分、被験者 D が 16 分であった。構築作業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。

- 思ったより簡単に仮想空間を構築することができた。（両被験者）
- ペトリネットには少し慣れが必要だと感じた。（被験者 C）
- プログラミングで同じ環境を一から構築しようとする 3 カ月は必要だと思う。（被験者 C）
- 物体の動き方を数式で表現しているが、「自由落下」「回転」等、抽象的な言葉を選択すると、それに応じた動きを設定できるようにしてほしい。（被験者 C）
- 地形（床）を自由に変更できるようにすれば、簡単なゲームが作れると思う。（被験者 D）

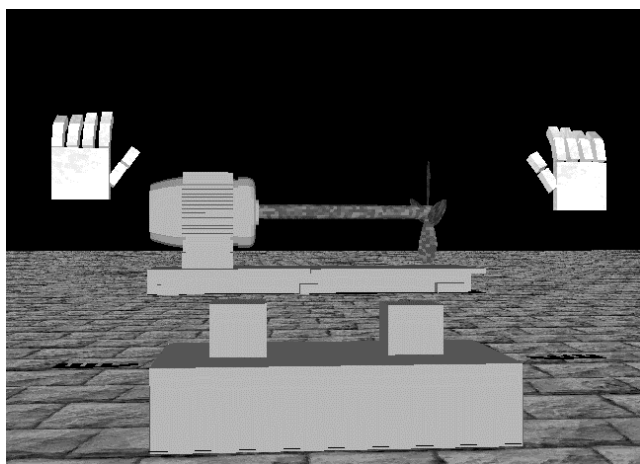


図 7 モータ操作の仮想空間の画面例

表 3 インタフェース改良による効果

インタフェース改良前		インタフェース改良後	
被験者 A	41 分	被験者 C	20 分
被験者 B	40 分	被験者 D	16 分

3.2.3 考察

インタフェース改良前の評価実験との比較結果を表 3 に示す。今回の評価実験では、全く同じ仮想空間を構築したにも関わらず、前回の約半分の時間で構築が完了している。このように、構築の作業時間が短縮された理由については、多くのパラメータ値に対して、デフォルトの値を定めたことによる効果が大きいようであった。実際、構築作業を観察すると、ユーザがシステムを操作する回数は、前回の評価実験の時に比べて、かなり減少していた。

また、今回の実験のアンケート調査では、前回の評価実験で得られた「物体の位置合わせが難しい」という意見は、得られなかった。物体の位置合わせのインタフェースに、3D マウスを用いず、2D マウスを用いるようにした効果が出たものと思われる。

また、プログラミングにより仮想空間を構築した経験がある被験者より、経験のない被験者の方が、短時間（約 4 分間の差）で目的の仮想空間を構築することができたが、これは、構築対象とした仮想空間が単純なものであったため、被験者 C の過去の経験が生かせなかったためであると考えられる。

4. 複雑な訓練環境の構築

インタフェースを改良した設計支援システムを用いて、原子力プラントで一般に使用されている「横型ポンプ」の分解作業を行うことができる訓練環境を構築した。

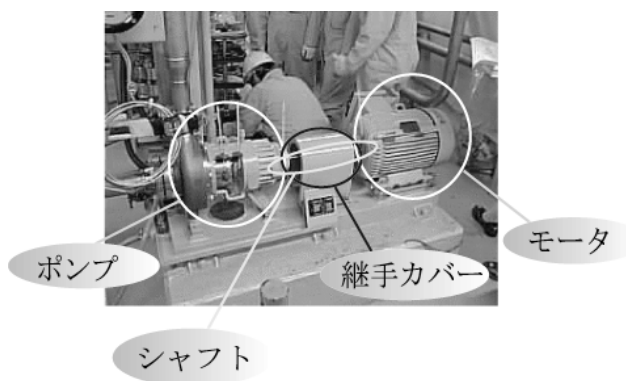


図 8 横型ポンプの構造

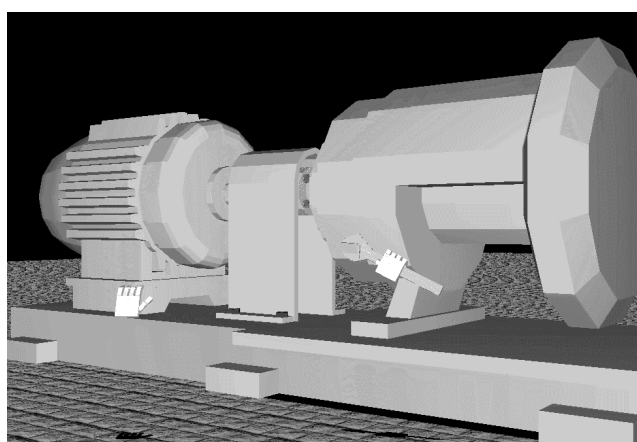


図 9 横型ポンプの分解訓練環境の画面例

4.1 構築対象

横型ポンプの構造を図 8 に示す。今回はポンプとモータの連結部分（図 8 の継手カバーとシャフトの部分）を分解することができる訓練環境を構築した。このような訓練環境は、3 種類のシャフト、シャフトのカバー、2 種類のボルトとナット、スパナ、モータ、ポンプの 11 種類、計 28 個のオブジェクトで構成され、作業開始から、最短で約 80 回トランジションを発火させる（すなわち約 80 回イベントを発生させる）ことにより作業が終了する。

4.2 構築結果

構築した訓練環境の画面例を図 9 に示す。今回の構築では、支援システムに習熟したユーザが一人で作業を行い、作業開始から作業終了まで、約 5 時間が必要であった。構築したペトリネットは、トランジションの総数が 70 個、プレースの総数が 140 個であった。

4.3 考察

先行研究で複雑な仮想空間を構築した場合と比較してみると（表 4）、インタフェース改良前に「逆止弁」の分解作業を行うことができる訓練環境を構築した際には、オブ

表 4 インタフェース改良による効果

	改良前 (逆止弁)	改良後 (横型ポンプ)
オブジェクト総数	1 4	2 8
ブレース総数	1 3 2	1 4 0
トランジション総数	1 3 8	7 0
作業時間	約 1 2 時間	約 5 時間

ジェットの総数が 1 4 個、構築したペトリネットのトランジションの総数（発生可能なイベントの総数）が 1 3 8 個、ブレースの総数（物体の状態総数）が 1 3 2 個であり、構築時間は約 1 2 時間であった。今回構築した訓練環境と比較すると、オブジェクトの総数が倍、ブレースの総数が同程度、トランジションの総数が約半分の規模になっているにも関わらず、構築時間は半分以下になっていることから、ある程度の作業効率の改善が行われたと思われる。

5. おわりに

本研究では、訓練環境の設計支援システムのインタフェースの改良を行った。そしてシステムの評価実験を行い、インタフェース改善前に比べて、仮想空間を構築する際の作業時間が短縮されることを確認した。また、「横型ポンプ」の分解作業を行うことができる訓練環境を新たに構築し、複雑な仮想環境を構築する場合でも、ある程度の作業効率の改善がなされることを確認した。

今後は、構築の対象を機器保修の訓練環境に限定せず、原子力発電所の制御室の運転操作のシミュレーションができる環境等、さらに複雑大規模な仮想環境の構築を行うことを考えている。また、システムに、人体アニメーションを提示できる機能を付加し、実演による訓練の自動実演機能を提示できるようにしていきたい。

参考文献

- [1] Seidel, R.J. and Chatellier, P.R. “Virtual Reality, Training’s Future?”, NATO Defence Research Group, PLENUM PRESS(1997)
- [2] 新井浩一、阿倍慶子、上地登. “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集, Vol.2, No.4, pp.7-16(1997)
- [3] 村上竜一. “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)
- [4] 神部勝之. “Real Master”, 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.87-93(1997)
- [5] 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 HIS 論文集, pp.33-38(1997)

- [6] 石井裕剛, 手塚哲央, 吉川榮和. “仮想空間設計支援システムの開発”, 計測自動制御学会, News and Report, Vol. 13, No.2, pp.237-242(1998)
- [7] J. L. Peterson. “ペトリネット入門”, 共立出版社 (1992)
- [8] Ishii, H., Tezuka, T. and Yoshikawa, H. “ A study on design support for constructing machine-maintenance training system by using virtual reality technology”, 7th IFAC/IFIP/IFORS/IEA SYMPOSIUM on ANALYSIS, DESIGN AND EVALUATION OF MAN-MACHINE SYSTEMS, Kyoto, Japan September 16-18(1998)（発表予定）
- [9] Ishii, H., Tezuka, T. and Yoshikawa, H. “ A Study on Design Support System for Constructing Machine-Maintenance Training Environment Based on Virtual Reality Technology”, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics Intelligent Systems For Humans In a Cyberworld, California, USA October 11-14(1998)（発表予定）