

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

石井 裕剛 *・手塚 哲央 **・吉川 榮和 **

(* 京都大学大学院工学研究科、** 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

Hirotake ISHII*, Tetsuo TEZUKA**, Hidekazu YOSHIKAWA**

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Graduate School of Energy Science, Kyoto University

Gokasho, Uji-shi, Kyoto-fu, 611 Japan

e-mail: hirotake@uji.energy.kyoto-u.ac.jp

Abstract: Basic methods are proposed for constructing VR-based maintenance training system for various kinds of machines, and how the design support system is organized as an effective user interface. First, a new Petri-Net-based description model is introduced to describe the related manual procedure in virtual environment effectively, and the basic terminologies and algorithms are reduced from the model in order to facilitate the designing of the maintenance training system. Second, the overall framework of the design support system is also illustrated, which is now under development based on these basic ideas.

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

1. はじめに

原子力発電所保守訓練センターでは毎年、数十人の作業員に対して実物模型を用いた機器分解・点検・組立作業の実施訓練を行っている。しかし、模型製造コスト・設置場所・訓練時間・インストラクター不足等の問題により、訓練の対象とする機器の数を実際に発電所で点検する機器に比べかなり制限しているのが現状である。

そこで本研究室では、実物模型を用いた訓練に比べ、安全・安価で場所を必要とせず、またインストラクターの負担を軽減できる新しい訓練システムとして人工現実感技術を用いた訓練システムを提案し、これまでいくつかの試作を行ってきた[1][2]。これまでの研究により、人工現実感技術を用いた訓練システムは、機器の構造や各部品の名称、分解・組立手順等を習得する際に効果的な訓練法となることを確認したが、同時に人工現実感技術を用いた訓練システムの構築には、そのプログラミングに専門的な知識を要し、非常に多くの労力

がかかるというソフトウェア作成上の問題も明らかになった。

本研究は、専門的な知識を持たない人でも効率的に人工現実感技術を用いた訓練システムを構築できるようにするための支援システムの構築を目的とする。本報告では、第2章において、これまで構築してきた訓練システムの概要と構築に問題となる事柄について、第3章において、仮想空間を効率的に管理するための手法としてのペトリネットの利用法について述べ、第4章において、本研究で構築する支援システムの概要について、第5章において、本報告のまとめと今後の展望について述べる。

2. 人工現実感技術を用いた訓練システム

2.1 人工現実感技術を用いた訓練システムの概略

本研究室でこれまで構築してきた訓練システムは、機器分解・組立手順の習得と機器の各部品の名称、機器の構造の理

解を目的としたものであり、Fig.1 に示すように計測部、シミュレーション部、情報表示部から構成される。計測部はDataGloveとPolhemus Sensorで構成され、各々作業員の両手の位置と角度、手の形状を計測する。シミュレーション部はSGI社のWorkStationで構成され、計測部から送られてきた両手の形状に関する情報に応じて仮想空間を構成する。情報表示部は大型ディスプレイとCrystalEYESで構成され、作業員にFig.2に示すような訓練対象機器の3次元画像や写真等の情報を提示する。これらのシステムを通じて作業員はDataGloveをはめた両手を動かし、訓練を行うことができる。また、訓練システムは効果的に分解・組立手順を習得できるようにするための自動実演機能を備えており、作業員は作業手順が分からなくなった場合、その機能呼び出してその場面での適切な作業の画面上での自動実演を見て正しく理解できる。

2.2 訓練システムを構築する際に必要となる作業

2.1 で述べた訓練システムを構築する際に必要となる作業は、Table1に示すように大きく5つに分けることができる。

Table1に示す(A)から(E)の5つの作業の内、特に(C)の作業は、仮想空間内の訓練に必要な物理法則を適用するために必要な作業である。例えばナットとボルトは実空間では、Table2に示すような組立・分解作業に関連した性質を元々持っているが、仮想空間で物体の3次元形状データだけを用いてこれらの物理的性質を模擬することは、計算機の性能や

形状データの精度等の問題から現状では不可能に近い。そこで、形状データに加えて、予め各物体がどのような物理的性質を持っているのかについての情報を作成しておき、その情報を元に各物体の物理的性質を模擬する必要がある。

また(D)の作業は、訓練システムに正しい作業手順で自動実演を行わせるのに必要な情報と、訓練生が間違いを犯した場合に警告するための情報を用意する作業であるが、正しい手順を効果的に記述する方法がなければかなり複雑な作業となる。

このように、人工現実感技術を用いた訓練システムを構築するためには多くの作業が必要となるが、複数の機器を対象とした訓練システムを構築しようとした場合、各機器に共通して使用できるものは(B)だけであり、その他の部分は訓練対象の機器に応じたものを作らなければならない。(A)・(E)の作業に関しては、市販の適切な作成支援用アプリケーションを用いれば容易であるが、(C)・(D)の作業に関しては、その作業内容が非常に複雑で労力を必要とするにもかかわらず、効果的な作成支援アプリケーションはまだ存在していない。そのため、この部分の構築作業が訓練システムを構築する際の大きな負担となっていた。

そこで本研究では、主に(C)・(D)の作業を効率的に行うための手法を考案し、それを用いて訓練システムを構築するための支援システムの開発を行うこととした。

Table1 訓練システムを構築する際に必要な作業

(A)訓練対象となる機器の3次元形状データの作成
(B)作業員が訓練を行うためのインターフェースの構築
B-1 作業員への3次元画像提示のためのインターフェース
B-2 作業員へ写真等の情報を提示するためのインターフェース
B-3 作業員のジェスチャ認識のためのインターフェース
(C)訓練対象機器に物理法則を適用するための情報の作成
C-1 作業の段階に応じて、仮想空間内の機器の状態を決定するための情報
C-2 作業の段階に応じて、作業員の可能な作業を決定するための情報
(D)訓練の作業手順データの作成
D-1 正しい作業手順を表す情報
D-2 作業中に禁止作業を行った場合に警告等を出すための情報
(E)作業員への情報提示のための情報の作成
E-1 訓練対象機器の写真
E-2 訓練対象機器の各部名称を示す画像データ

Table2 ナットとボルトの実空間での性質

(1)	ナット、ボルトとも手に持つことができる。
(2)	ナット、ボルトとも、他の物体に拘束されなければ、手を放すと重力の影響で下に落ちる。
(3)	ナットはボルトにはめることができる。
(4)	ボルトにはまったナットはボルトの動きに追随する。
(5)	ボルトにはまったナットは取り外すことができる。

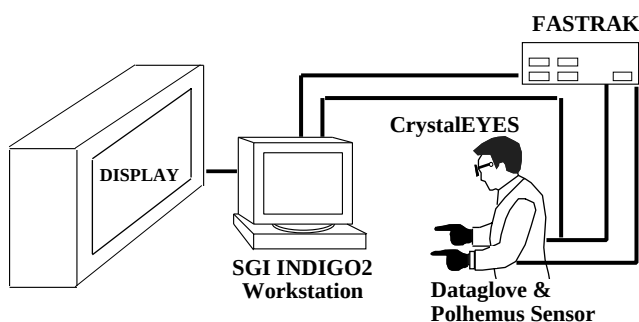


Fig.1 訓練システム構成図

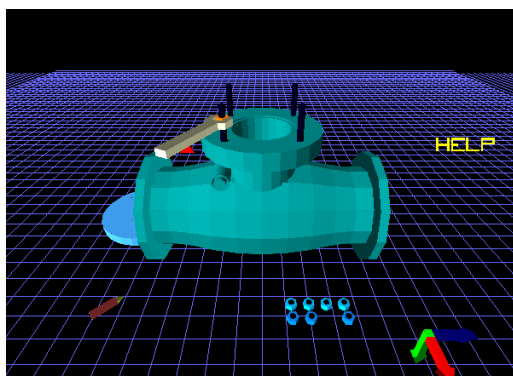


Fig.2 作業員に提示する訓練画面

3． 訓練システムへのペトリネットの適用

3.1オブジェクトの状態

仮想空間内のオブジェクトに対して実空間の物理法則を適用する場合、まず訓練の各場面に応じた各オブジェクトの「状態」を知る必要がある。ここで「状態」とは各オブジェクトの相対的位置関係を表すものであり、例えばペンに関しては、

- A. 「机の上に置かれた状態」
- B. 「右手に握られた状態」
- C. 「空中で手を放され、机に向かって落ちている状態」

等が、ペンの取りうる「状態」となる。オブジェクトの「状態」が決定すれば、今度はそれに応じてオブジェクトに適用される物理法則を仮想空間で模擬すればよい。例えばペンが「空中で手を放され、机に向かって落ちている状態」にあれば、ペンが机と接触するまで、自由落下させてやればよい。

さらに、仮想空間内での作業を可能とするためには、作業員のジェスチャによって、仮想空間内のオブジェクトの状態がどのように変化するかについての情報も必要となる。例えば、ペンが「机の上に置かれた状態」で、作業員が「右手でペンを握る」ジェスチャを行った場合、ペンの状態は、「右手に握られた状態」に遷移する必要がある。

このように、仮想空間内にオブジェクトを作成し、それを用いて作業を行うためには、各オブジェクトの「状態」遷移の管理が重要となる。しかし、訓練の行程が多くなるにつれ、各オブジェクトの状態数は多くなり、その管理が難しくなる傾向がある。そこで本研究では、各オブジェクトの状態を容易に管理できるように、ペトリネットを採用することとした[3]。

3.2ペトリネットとは

ペトリネットはコンピュータの並列処理や、工場の生産ライン等、離散的・並列的に進行するシステムのモデル化に用いられている。ペトリネットはグラフ的には有向二部グラフに分類されるものであり、Fig.3-1,2にその実例を示した。このペトリネットのグラフは、トランジションとプレースと呼ばれる2種類のノードから成り、これらは各々棒及び丸で描かれる。アークはトランジションからプレースもしくはプレースからトランジションへ引かれる。プレースにはトークンと呼ばれるマークが複数個入ることができ、トランジションの入力側にあるプレース（入力プレースと呼ぶ）全てに1つ以上のトークンが存在する場合、そのトランジションは「発火可能」とであるといい、トランジションの発火によって入力プレース内のトークンは、トランジションの出力側にあるプレース（出力プレースと呼ぶ）に遷移する。本研究では機器の分解・組立作業のペトリネットとして、上記の定義の他に独自の定義を加え利用する。Table3にその記号の一覧を示す。

3.3 ペトリネットによる仮想空間内作業のモデル化

ペトリネットを用いて仮想空間内作業をモデル化するにはまず、オブジェクトの各状態に対して個別にプレースを用意し、オブジェクトがある状態にあることを、その状態に対応したプレースにトークンが存在することによって表現する。このようにすることによって、仮想空間内のオブジェクトの状態変化をペトリネット上でのトークン遷移に対応させることができ、作業員の作業をトランジションの発火に対応させることができる。簡単な例として、「右手でボタンを押す」作業をペトリネットを用いてモデル化すると、Fig.3のようにな

Table3 ペトリネットの定義と規則

名称	記号	備考	名称	記号	備考
トランジション (ノーマル トランジション)		トランジションにはノーマルトランジションと自動発火トランジションを用い、自動発火トランジションはトランジションの発火条件が成立すると、発火の指示がなくても自動的に発火する。	プレース (ノーマルプレース)		プレースにはノーマルプレースと制御プレース、プールプレースを用い、ノーマルプレースと、制御プレースには高々1個のトークンしか入ることができないが、プールプレースは複数のトークンが入ることができる。制御プレースはネットを簡素化するために用いる特別なプレースとして扱う。
自動発火 トランジション			制御プレース		
トークン .		仮想空間内のオブジェクトと1対1の関係がある。ある一つのトランジションに関して、入力プレースと、出力プレースは、総数、種類ともに同じであるとし、トランジションの発火の前後で、トークンの総数は保存される。	プールプレース		
			アーク (ノーマルアーク)		アークにはノーマルアークと抑止アークを用いる。プレースとトランジションを結ぶアークが抑止アークである場合、そのプレースにトークンが存在するならば、トランジションは発火することができない。
			抑止アーク		

る。このペトリネットにおいて、作業の初期状態として「右手は何もしていない」「ボタンはまだ押されていない」状態であることを表現すると、Fig.3-1のようになり、「右手でボタンを押す」作業を行うと、トランジションt-1、t-2、t-3が順に発火し、Fig.3-2のような状態になる。

このように、仮想空間内のオブジェクトの状態遷移をペトリネットを用いてモデル化することにより視覚的に分かりやすくなるだけでなく、トランジションの発火可能性を調べることで、各状態において作業員の次の動作として可能なものを調べるができる。

3.4作成したペトリネットの利用

作成したペトリネットに初期状態を与えトランジションの発火系列を検索すると、系列の中で、両手に何も持っていない状態（初期配置）から、その後他のオブジェクトの状態を変化させ、再び何も持っていない状態となるトランジションの発火系列を抜き出すことができる。これらの発火系列を特に「仕事を行う発火系列」（以下「仕事発火系列」）と呼ぶ。これらの系列を用いることにより、以下に述べるようにペトリネットの自動描画、ペトリネットの簡素化、分解・組立作業の自動実演等を実現することができる。

ここで説明のために、仕事発火系列fを構成するトランジションが順にt1,t2,...,tnである場合を

$$\text{Member}(f)=[t1,t2,...,tn]$$

また、仕事発火系列fを構成するトランジションが順にすべて発火することによって最終的にプレース{p1,p2,...,pk}にあるトークンがプレース{p1',p2',...,pk'}へ遷移することを

$$\text{Before}(f)=[p1,p2,...,pk], \text{After}(f)=[p1',p2',...,pk']$$

で表現する。

3.4.1ペトリネットの自動描画

ペトリネットを画面上に描く際、トランジションをランダムに配置しただけでは、各トランジション間の関係が分かりにくくなり不便であるが、トランジション間の関係を考慮しながら配置する作業を手作業で行う時は、多くのトランジ

ションとプレースを限られたスペースの範囲内に配置せねばならず、かなりの負担となる。しかし、仕事発火系列Member(f)=[t1,t2,...,tn]は、複数のトランジション[t1,t2,...,tn]から構成され、系列中のあるトランジションとその前後に発火するトランジションは、お互いにプレースを共有している場合が多く、トランジションを仕事発火系列別に分け、t1,t2,...,tnの順に並べて配置することによって、お互いに関係のあるトランジションを近隣に並べることができ、比較的に見やすいペトリネットを自動的に描くことが可能となる。

3.4.2ペトリネットの簡素化と自動実演への応用

訓練内容が複雑になりペトリネットが巨大化すると、全体的な作業の流れをペトリネットから把握する事が難しくなる。そこで、仕事発火系列

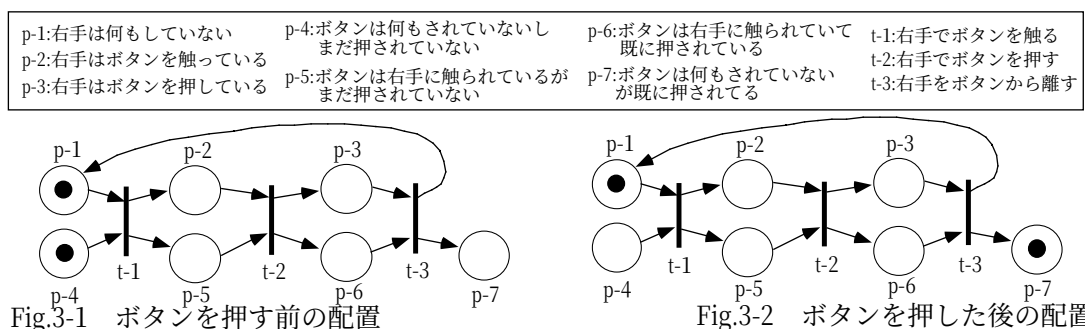
$$\text{Member}(f)=[t1,t2,...,tn]$$

$$(\text{Before}(f)=[p1,p2,...,pk], \text{After}(f)=[p1',p2',...,pk'])$$

に対して、入力プレースとして{p1,p2,...,pk}、出力プレースとして{p1',p2',...,pk'}をもつトランジションtを作成すると、このトランジションは発火系列fと同じ働きをすることになるので、[t1,t2,...,tn]のようにn個のトランジションで表現される作業を一つのトランジションtで表現でき、作業手順の全体的な流れを分かりやすく代表できるようになる。

また、仕事発火系列を用いると正解作業手順を作業員に示す自動実演機能が可能となる。仕事発火系列を予め検索しておく、あるトークン配置を変化させるためのトランジションの発火系列を仕事発火系列の組み合わせで表現することが可能となり、仮想空間内で、「どのオブジェクトをどのような状態に変化させるべきか」という条件から、発火させるべきトランジションを求めることが可能となる。そこで、訓練作業の正解手順をオブジェクトの状態変化の優先順位として予め登録しておき、作業員の作業の段階（すなわちオブジェクトの状態）に応じて次に変化させるべきオブジェクトの状態を決定し、仮想空間内でその状態変化を実現することにより自動実演が可能となる。

このとき、仕事発火系列の以下に示す基本的な性質を用い



ることになる。但し ϕ は空集合を表す。

1. $\text{Before}(f1)=\text{Before}(f2)\cup\text{Before}(f3)$ 、 $\phi=\text{Before}(f2)\cap\text{Before}(f3)$ 、 $\text{After}(f1)=\text{After}(f2)\cup\text{After}(f3)$ 、 $\phi=\text{After}(f2)\cap\text{After}(f3)$ となる仕事発火系列 $f1, f2, f3$ が存在する場合、 $f2, f3$ を組み合わせることにより、 $f1$ と同じ働きをさせることができる。
2. $\text{Before}(f1)=\{p1, p2, \dots, pk\}$ 、 $\text{After}(f1)=\{p1', p2', \dots, pk'\}$ 、 $\text{Before}(f2)=\{p1', p2', \dots, pk'\}$ 、 $\text{After}(f2)=\{p1, p2, \dots, pk\}$ である仕事発火系列 $f1$ 及び $f2$ は互いにトークンの遷移を打ち消し合う仕事発火系列であり、一方が作業を進めるものであれば、もう一方は作業を元に戻すものとなる。

4. 訓練システム構築支援環境

本研究では、これまでに述べたオブジェクトの「状態」や「仕事」の概念と、本報告でのペトリネットの定義を利用し、訓練システム構築支援環境の構築をめざす。本章では、現在構築中の支援環境について述べる。

4.1 システム全体の概要

支援環境のハードウェア環境は、SGI社のワークステーション、Logitech社の3Dマウス(Magellan)、CrystalEYESから構成され、ソフトウェア環境はFig.4に示すように、「訓練データ作成部」と「訓練実行部」から構成される。訓練システムを構築しようとするユーザは、「訓練データ作成部」において、CrystalEYESを通してFig.5のような3次元画像を見ながら、2Dマウスを用いて支援システムを操作し、3Dマウスを用いて物体の3次元位置を入力して、訓練に必要なデータを作成していく。作成されたデータは「訓練実行部」に送られ、2.1節で述べた環境で、訓練を行うことができる。

3次元物体の描画はC言語のライブラリであるOpenGLにより実現し、Fig.6のようなGUI環境をMotifを利用して実現する。

4.2 支援システムの利用法

以下に訓練システムを構築する手順を説明する。

(I) 仮想空間へのオブジェクトの読み込み

仮想空間内に、訓練で用いるオブジェクトの形状データを読み込み、個別に名前を付けて登録する。以後、この名前を用いて、訓練用のデータを作成していく。例えば、仮想空間内に「ナット」と「ボルト」を登録する場合、各オブジェクトの形状データをシステムに示し、それぞれ「ナット」「ボルト」と名前をつけて登録する。

(II) オブジェクトの3次元物理的位置の登録

オブジェクト同士が特別な位置関係にある場合の、お互いの物理的位置関係を、3Dマウスを用いて実際にオブジェクトを操作して登録する。例えば、「ナット」が「ボルト」にはまる位置を「ナットがボルトにはまる位置」という名前をつけて登録する。

(III) オブジェクトの「状態」の登録

訓練中に各オブジェクトが取り得る「状態」を、状態名を付けて登録し、その状態におけるオブジェクトの性質と、(II)で登録した物理的位置を関連付ける。オブジェクトの性質の登録は、予め準備してある選択肢から選ぶことによって

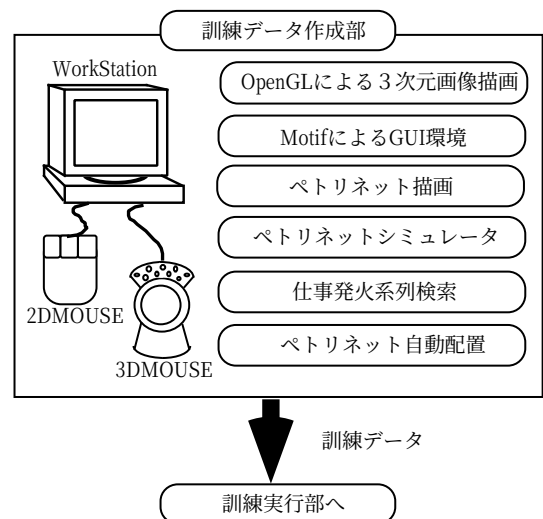


Fig.4 支援システム全体概略

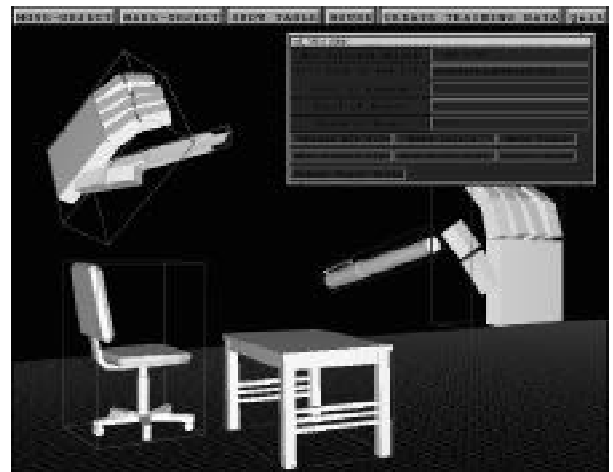


Fig.5 構築支援アプリケーション 3次元画面

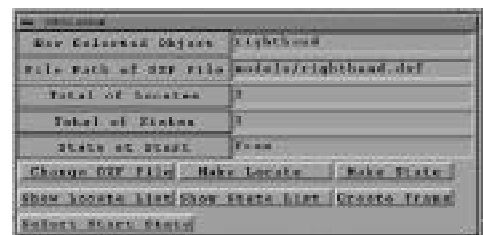


Fig.6 支援環境のインターフェース例

行う。例えば、「ナット」の状態としてTable4上側の状態を登録し、「ボルト」の状態としてTable4下側の状態を登録する。さらに各々の状態に対して、Table5の性質を選択肢から選択する。さらに「ナット」の「ボルトにはまっている」時の特別な位置として(Ⅱ)で作成した、「ナットがボルトにはまる位置」を登録する。この作業によって、システム内部では、ペトリネットのプレースが自動的に作成される。

(Ⅳ) オブジェクトの状態変化の登録

オブジェクトの状態変化を名前を付けて登録する。このとき、その状態変化を起こす基因となる仮想空間内のイベントと関連するオブジェクトの状態を、その状態変化が起こるための条件として設定することができる。例えば、オブジェクト「ナット」の「右手に握られている」状態から「ボルトにはまっている」状態への状態遷移を「ナットをボルトにはめる」状態変化として名前を付けて登録する。さらに、その状態変化が起こるために必要となる仮想空間内のイベントとして、「ナットとボルトが接触する」と、他のオブジェクトの状態として「ボルトが左手に握られている状態にある」ことを登録する。この作業によって、システム内部ではトランジションが自動的に作成され、最終的に(Ⅲ)の作業とあわせ、ペトリネットが完成する。

(Ⅴ) 訓練開始時の各オブジェクトの状態設定

訓練開始時の各オブジェクトの状態を(Ⅲ)で作成した状態の集合から選択する。この作業によって、システム内部ではペトリネットの初期トークン配置が決定される。例えば、

Table4 オブジェクトの状態の登録

状態の番号	登録する状態名
A-1	床の上にある
A-2	床の上であり右手で触られている
A-3	右手に握られている
A-4	ボルトにはまっている
A-5	床に向かって落ちている
状態の番号	登録する状態名
B-1	床の上にある
B-2	床の上であり左手で触られている
B-3	左手に握られている
B-4	ナットがはまっている
B-5	床に向かって落ちている

Table5 オブジェクトの各状態における性質

状態の番号	オブジェクトの性質
A-1:A-2:B-1:B-2	床の上で静止
A-3:B-3	手の動きに追随する
A-4	ボルトの動きに追随する
B-4	ナットの動きに追随する
A-5:B-5	床に接触するまで自由落下する

「ナット」、「ボルト」の初期状態として、それぞれA-1、B-1を登録することができる。

(ⅤⅠ) 「仕事」の検索

システムに作成したペトリネットの発火系列を検索することにより、「仕事発火系列」を求める。例えば、「ナットをボルトにはめる」仕事が検索結果として示されることになる。この時、予めペトリネットをいくつかのサブネットに分割し、検索に要する計算量を減らす必要がある。

(ⅤⅡ) 作業手順の指示

システムに、作業の正解手順として、(ⅤⅠ)で検索された「仕事」の優先順位を登録する。この場合、仕事の手順は「ナットをボルトにはめる」のみとなる。

(ⅤⅢ) 訓練生に提示する各種情報の準備

システムに、訓練対象機器の写真や、機器の各部名称を示した図を登録することにより、訓練中に作業員が自由にそれらの情報を利用することができるようになる。

以上の作業を行うことによって、訓練システムを構築することができ、従来仮想空間内に訓練システムを構築するために必要であった作業を大幅に軽減することができる。

5. おわりに

本報告では、仮想空間内での機器の分解・組立作業をペトリネットを用いてモデル化する方法と、オブジェクトの「状態」の概念や「仕事発火系列」について説明し、それらを用いた訓練システム構築支援環境について述べた。支援環境は現在も構築中であり、今後はより簡単に仮想空間を構築することができるようにするためのインタフェースの改良や、よく利用するオブジェクトを予め「オブジェクトテンプレート」として用意しておくこと、そして本支援環境を用いた本格的な訓練環境の構築等を行っていく予定である。

参考文献

- [1]Ishii, H., Kashiwa, K., Tezuka, T. and Yoshikawa, H.(1997). A Study on Constructing a Machine-Maintenance Training System Based on Virtual Reality Technology. Proc. of Fifth International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics(NUTHOS-5). April 13-16. Beijing, China. DD2-1 - DD2-6.
- [2]Ishii, H., Kashiwa, K., Tezuka, T. and Yoshikawa, H.(1996). Development of Machine-Maintenance Training System using Petri Net and VR Environment. Proc. of Cognitive Systems Engineering in Process Control(CSEPC96). November 12-15. Kyoto. Japan. pp138 - 143.
- [3]J.L.Peterson. (1992).ペトリネット入門. 共立出版社