

## 船舶の建造自動化に関する一考察

田中 邦彦\*、菅澤 忍\*、金湖 富士夫\*

# A Consideration of Automation Method of Ship Hull Construction By Kunihiko Tanaka\*, Shinobu Sugasawa\* Fujio Kaneko\*

### Abstract

Now researches and developments on ship building CIM are carried out by several organizations. And many reports on automation method of construction have been published.

But construction methods of most of them are to build expert system using rules which human operators adopt now. So it must be said that it is difficult to find out the compatible and optimized construction procedure.

In this report whole configuration of automatic ship hull construction system is proposed and several discussions on elements of the automatic construction system are commented.

### 目次

- 1. はじめに
- 2. 船舶建造自動化手法の基本概念
  - 2.1 船舶建造の定式化
  - 2.2 建造自動化手法の基本的構成
- 3. 建造手順書作成部分
  - 3.1 GPS (General Problem Solver)を用いた組立手順の自動生成
    - 3.1.1 GPSによる組立手順の自動生成プログラム
    - 3.1.2 動作例
  - 3.2 エキスパートシステムを用いた組立手順の自動生成
    - 3.2.1 エキスパートシステムによる組立手順の自動生成プログラム
    - 3.2.2 動作例
  - 3.3 考察
- 4. オペレーション部分
  - 4.1 概要
  - 4.2 ロボットアームを用いたオペレーション部分の実例
    - 4.2.1 システムの概要
    - 4.2.2 システムの機能
  - 4.3 考察
- 5. 考察
  - 5.1 プランニングについて
  - 5.2 スケジューリングについて

---

\* システム技術部

原稿受付 平成4年4月28日

### 5.3 オペレーションについて

## 6. おわりに

### 1. はじめに

現在、造船CIMの研究・開発が種々の団体で行われており、建造の各段階の自動化、エキスパートシステム化に関する報告も最近多くなっている<sup>1)2)3)4)5)6)7)</sup>。しかし、船舶の建造とはどういうものかを基本から検討している例はほとんどなく、人間が現在行っていることをエキスパートシステム化するというを想定している場合が多い。したがって、建造の際、矛盾がなく、最適な建造方法を見いだすことが困難となっている。

また、設備、道具を使用する場合、人間が行うとの立場をとっており、それらを自動で稼働させることはほとんど検討されていない。しかし、今後、熟練労働者の急速な減少等のため、建造の自動化は必然的と思われる。

著者等は建造を自動化することを目指し、建造自動化システムを全体的に考察するとともに、建造自動化システムの要素について種々の検討を加え、今後の見通しを得ることができた。以下にこれらについて報告する。

## 2. 船舶建造自動化手法の基本概念

### 2.1 船舶建造の定式化

この節では、船舶建造の自動化手法を検討するにあたり、船舶建造という問題を分析し、関連する要素を明確にして、船舶建造の定式化を行い、以後の展開の土台を据える。

船舶建造とは、船舶の設計情報（部材、およびそれらのつながりの定義）に従い、工場内の種々の設備および道具を用いて、鋼材から部材を生成し、それらの部材を接合して、船舶を完成することである。この手続きは、すべての構造物の建造と同様である。したがって、ここではどの構造物でも共通して応用可能な建造の自動化手法について検討し、その基本概念を提示する。

船舶建造の定義から明かなように、建造手続きは、設計情報から、部材を接合していく手順を作成する部分（プランニング）、および求められた手順の各々に、工場内の設備、道具を割付ける部分（スケジューリング）、さらに割付けられた設備、道具を稼働させて実際に組み立てる部分（オペレーション）の3つの部

分に分けられる。

プランニングにおいては、外部から進入不可能な閉じた構造（以下、閉構造と呼ぶ）を作成してからその内部に部材を取付けようとする等の幾何学的に実行不可能な組立手順、あるいは、十分な強度の下部構造を作成する以前に上部構造を組立てる等の物理的に実行困難な組立手順が排除された実行可能な手順を作成するだけでなく、組立時間を最小にする等の最適化を行うことが望ましい。そのためには、工場の設備、道具に関する情報が不可欠であり、スケジューリングも同時に考慮することが必要である。

スケジューリングにおいては、プランニングの出力である組立手順を構成する各組立作業の順序関係より、それぞれの作業で使用する設備、道具の時間の割り振りを行うことになる。この際には、既にあるPERT等の手法を適用することが可能であるが、設備および道具の移動量の多い船舶の建造に使用する際にはこのことを考慮に入れて最適化する手法を考案することが必要である。

また、プランニング、スケジューリングの自動化を行う際には、得られた結果をシミュレーションにより検討し、組立を実施するに当たっての問題点を把握し、それらの問題点を解決するためにプランニング、スケジューリングを再実行する機能が必要である。

プランニング、スケジューリングの部分は、オペレーションから見れば実際に組立てるための建造手順書を与えるものであり、これら2つの部分を建造手順書作成部分と呼ぶことにする。

オペレーションにおいては、実際に設備、道具を動かし、部材の運搬、溶接等を行うことになるが、この場合、周囲の状況により操作方法を変化させる必要が生じる。すなわち、障害物の認識および回避等を行うことが求められる。これらのことは、現在人間が行っているが、自動化する場合は人間の持っている画像認識・理解機能、経路計画機能等の機能をモデル化する必要が生じる。自動車等の装置産業では、ロボット等の設備は移動することがなく、人間がそれらの動作を教示し、ロボットはそれを繰り返すだけで良いが、造船では、クレーン、溶接機等の設備、道具が移動しなければならず、オペレーションの段階は、造船は他の製造業と比べて、自動化のためには高いレベルの技術を必要とする。

また、船舶建造の自動化システムを構築するに際して、プランニング、スケジューリング、オペレーショ

ンという建造の3つの部分と設計（デザイン）とは密接な関係を持つことは重要である。そのためには、設計と建造の各過程において、同じデータベースを共有

することが有効と思われる。

図-1にこのような設計と建造との関連を示す。

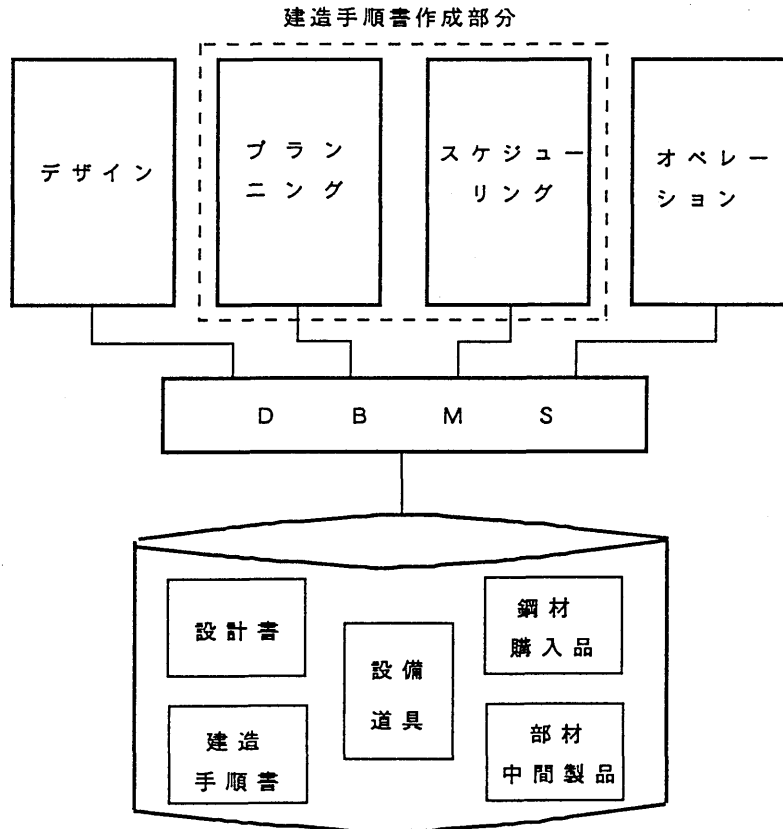


図-1 造船CIMの基本構成

## 2.2 建造自動化手法の基本的構成

ここで提案する建造自動化手法は、データベースを媒介にして設計と建造が歩調を合わせて同時並行的に作業を行うとともに、同じデータベースを介してオペレーション、プランニング、スケジューリングとの情報一元化を行い、それらの自動化を図るものである。この節は、建造自動化手法の基本的構成について説明を加えることにより、3章および4章の導入となっている。なお、それらの章では、建造の過程のうち組立に絞って検討を行っている。

以下に、提案する建造自動化手法の概要を示す。

### (1) 共通データベース

図-1にあるように、このデータベース上には、環境モデル、即ち、現場（工場）の現状を示すすべてのデータ（材料の詳細仕様（位置、重量等）、設備および道具の詳細仕様（機能、位置等）、船舶が組み立てられていく途中の状態（中間製品）、及びこれらの関係）を登録する。これらのデータは、種々の要素より構成される現場という世界を表現するため、そのような世界の表現に適したデータベースであるオブジェクト指向データベースを使用することが良いと思われる。このデータベースへは、手順書作成部分とオペレーション部分の両者から、データベース管理システム(DBMS)

を通してアクセスできる。データベース上の情報は、建造の進行に伴う変化に応じて、リアルタイムに更新される。データベースのデータ構造の一例を表-1に示す。

表-1 共通データベースのデータ構造

部品 A:	加工方法	:	〃
	重心位置	:	〃
	掘むヶ所	:	〃
	現在位置	:	〃
	生成位置	:	〃
	最終位置	:	〃
	.		
	.		
	.		
道具 C:	仕様	:	属性値
	能力	:	〃
	置き場所	:	〃
	現在位置	:	〃
	.		
	.		
場所 B:	位置	:	属性値

## (2) 建造手順書作成部分とオペレーション部分との間の作業分担

共通データベースには環境モデルがあるため、建造手順書に設備、あるいは道具が動作する方法（ロボットアームの移動経路等）まで含めることが可能である。しかし、建造の各過程の負荷を均等にするために、現実の世界での設備、あるいは道具が動作する方法に関する詳細な計画は、オペレーション部分が行うようにするのが適当と思われる。また、オペレーション部分は現実の工場の状況とデータベースの情報とが異なる場合は、そのことを建造手順書作成部分へフィードバ

ックするとともにデータベースを修正し、手順書の修正を行う。さらに、建造の進行に伴い、工場内の環境が変化するため、データベースの情報の変更を行う。

表-2に、船舶建造の自動化を図るに当たり、オペレーション部分に必要な機能を示す。

表-2 オペレーション部分機能表

### ◎ 部品を揃える

- 工場の中で生産する
- 工場の外から運ぶ

### ◎ 部品を組み立てる

- 部品を運ぶ
  - ・ 環境を理解する
  - ・ 部品を識別する
  - ・ 部品移動計画を立てる
  - ・ 部品を移動する
- 部品どうしを接合する（例：溶接）
  - ・ 部品識別
  - ・ 接合計画を立てる
  - ・ 接合する

### (3) 建造手順書

オペレーションの過程では、設計書に基づいて種々の設備および道具、例えば、治具、クレーン、溶接機等を用いて、工場内のあちこちにある種々の材料を加工して部品を作り、これを移動し、溶接し、組立てて建造を行う。建造手順書では、これらの作業の内容、手順を段階的に使用する道具を含めて具体的に記述する。前にも述べたように、部品を運ぶ経路の指示等については、ここには記述しない。記述される情報として、作業名、作業の種類、作業の内容、対象とする材料、部品の詳細仕様、例えば、長さ、重さ、置き場所等と、使用する道具の詳細仕様が上げられる。これらの情報は、上記のデータベースを基に記述される。しかし、手順書の中にはデータの重複が存在することが有り得るので一つ一つの手順書には詳細なデータを記述せずに、キーワードを用いて、データベースからその詳細(属性)を参照できるような形式にする。表-3に手順書の一例を示す。

表-3 建造手順書例

N o.	: 1
作業名	: W O R K 1
作業の種類	: 移動
作業の内容	: <u>部品A</u> を <u>場所B</u> へ運ぶ。
使用する道具	: <u>C</u> (クレーン)

## データ検索項目

部品	1 : A	2 :	3 :	4 :	5 :
道具	1 : C	2 :	3 :	4 :	5 :
場所	1 : B	2 :	3 :	4 :	5 :

## 3. 建造手順書作成部分

造船に限らず言えることであるが、組立という作業は、「組み立て前の生の素材に様々な働きかけをすることによって完成品へと変換する一連の手順である」と定式化できる。これから組立作業というものを3つの部分に分けて考えることができる。

- (1)初期状態 組立に用いる部材または材料の初期配置、またその材質、物性などの属性
- (2)目標状態 完成構造物がどのような部材でどのように組み上がっているかを示す設計情報
- (3)オペレーター 素材に働きかける一連の手段。例えば、部材の移動、部材間の溶接など

初期状態と目標状態が与えられた時、初期状態を目標状態に変換するオペレーターの系列が求まると問題が解けたことになる。そして組立手順の自動生成とはこのオペレーターの系列を自動的に導出することを意味している。

以下に組立手順を自動生成する方法として、GPS(一般問題解決器)およびエキスパートシステムの2つの手法を検討した。

## 3.1 GPS(General Problem Solver)を用いた組立手順の自動生成

GPSとは、人間の問題解決過程を心理学的に考察することによって考案された問題解決手法の一つである。これは人工知能の研究の初期に、A. ニューエル、J.

C. シャウ、H. A. サイモンによって提案された。この方法を用いることによって、“猿とバナナの問題”、“ハノイの塔の問題”、“宣教師と人食い土人の問題”など人工知能の古典的な問題が解かれている。

GPSの特徴は初期状態と目標状態との差異に着目し、その差異を減らすようなオペレーターおよびそのオペレーターを適用することによって目標状態になるような中間状態を求めることにある(この中間状態にはオペレーターを適用するのに必要な前提条件が満たされていない)。そしてその中間状態を新たな目標状態として、さらに、差異とそれを減らすオペレーターとを求めることによって初期状態と目標状態を一致させる。差異とそれを減らすオペレーターとがあらかじめ決まっていれば手順を自動的に導くことができる<sup>9)9)</sup>。

以下に船体組立にGPSを利用した場合について記す。なお、実際にロボットアームを用いた組立に関しては、4.2に述べる。

## 3.1.1 GPSによる組立手順の自動生成プログラム

このサブシステムはCommon LISPで書かれている。このプログラムでは、部材の初期状態および最終状態の記述部分、差異の種類に対応した、それぞれの差異を減少させるオペレータの定義部分、そしてGPS本体より構成される。GPSは初期状態と最終状態を引数として与えられたとき、初期状態を最終状態に変換するオペレーターを返す関数として表現されている。またGPSのアルゴリズムを図-2に示す。

- (I) リスト OPERATOR-LIST をヌルリストして定義する。  
これは S を G に変換するオペレーターの系列を格納するリスト
- (II) S = G なら状態 G が達成  
(RETURN (CONS S OPERATOR-LIST))
- (III) LOOP 1 :  
S と G の差異を求め、重要な順にリスト DIFFERENCE に入れる。  
eg. (D1 D2 ... Dn)
- (IV) (IF (NULL DIFFERENCE) (RETURN 'FAIL)) ; 差異がなければ失敗  
D1 <--- (CAR DIFFERENCE), DIFFERENCE <--- (CDR DIFFERENCE)
- (V) 差異 D1 を減少させるオペレーターを求め、リスト OPERATION に入れる。
- (VI) LOOP 2 :  
(IF (NULL OPERATOR) GOTO LOOP1)  
O<sub>i</sub> <--- (CAR OPERATOR), OPERATION <--- (CDR OPERATOR)  
G<sub>i</sub> : O<sub>i</sub> を適用する前提条件を満たす副目標
- (VII) S<sub>i</sub> = GPS (S, G<sub>i</sub>) ; GPS の再帰的呼出  
(IF (EQL(S<sub>i</sub>, 'FAIL) GOTO LOOP2) ; 別のオペレーターを試す  
ELSE  
O<sub>i</sub> を OPERATION-LIST に加える。  
(CAR S<sub>i</sub>) に O<sub>i</sub> を適用して得られる状態を S とする。  
(GOTO LOOP1)

図-2 GPSのアルゴリズム

以下に、例題として簡単な構造物をロボットアームで組み立てる場合を考慮する。

ロボットアームを駆動するオペレーターとして以下のものを採用した。すなわち

(1) MOVE: ロボットアームの位置の差異を減少させるオペレーター

(2) TRANSPORT: 部材の位置を減少させるオペレーター

である(図-3)。そして差異を減少させる優先順位として次のように定めた。

- ①部材の位置
- ②ロボットアームの位置

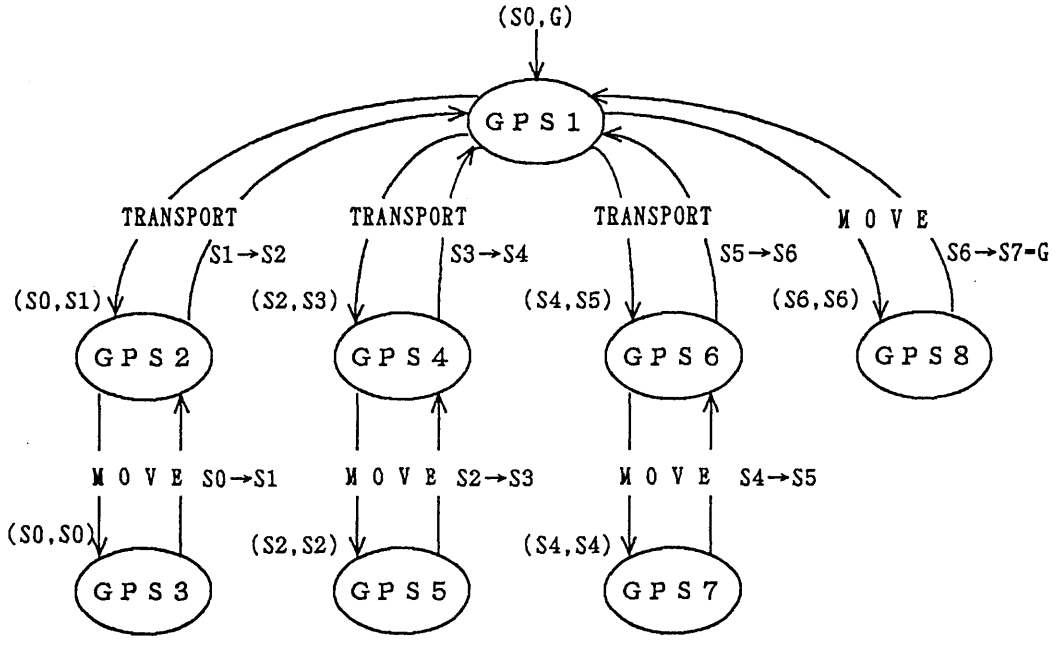
```
(MOVE P1 P2)
(TRANSPORT OBJ P1 P2)
P1: ロボットアームの現在位置
P2: ロボットアームの目標位置
OBJ: 移動させる部材
```

図-3 ロボットアーム駆動オペレーター

一般的に言って、この優先順位のとり方を誤ると解が求らないことがあるため、優先順位の決定には前もって問題の分析が必要である。なお、MOVEを適用した場合ロボットアームの位置のみが変化するが、TRANSPORTの適用時には部材の位置とともにロボットアームの位置も変化する。このように、組立のような問題では、ある差異が減少できてもその結果他の差異が生じてしまい、差異が一方向的に減少しないところに問題解決の困難さがある。GPSではこの解決のため、必要に応じて関数の再帰的呼出し(関数が自分自身を呼び出すこと)から戻ってくるごとにその時点での初期状態にオペレーターを適用してできた新たな中間状態を初期状態とし解法を続けるという方法を用いている。

### 3.1.2 動作例

図-4にGPSがどのように自分自身を呼出し(再帰的呼出)ながら手順を生成していくかの例を示す。この例では、図-14にある3つの部材(部材1、2、3と名付ける)から構成される簡単な構造物を、ロボットアームを用いて、組立ることを想定しており、部材



状態：(P1,P2,P3,P4)      初期状態：S0-(I1,I2,I3,H)  
 ただし                      最終状態：G-(F1,F2,F3,H)  
 P1：部材1の位置          S1-(I1,I2,I3,I1)  
 P2：部材2の位置          S2-(F1,I2,I3,F1)  
 P3：部材3の位置          S3-(F1,I2,I3,I2)  
 P4：アームの位置         S4-(F1,F2,I3,F2)  
                                  S5-(F1,F2,I3,I3)  
                                  S6-(F1,F2,F3,F3)  
                                  S7-G

図-4 GPSによる組立手順の自動生成プログラムの動作例

の運搬のみを行う。

GPSはまず部材およびロボットアームの初期状態S0と最終状態Gの差異を検出する(GPS1)。そしてそのうちの1つ(部材1の差異)を減少させるオペレータ(TRANSPORT)を選択する。そして、そのオペレータが適用できるための前提条件(ロボットアームが部材1の位置にいる)を副目標S1とし、S0、S1を引数としてGPS2を再帰的に呼び出す。GPS2はS0とS1との差異(ロボットアームの位置)を検出し、これを減少させるオペレータ(MOVE)を選択する。そして、MOVEが適用できるための前提条件(ロボットアームがHに

いる)を副目標(S0となる)とし、S0、S0を引数としてGPS3を呼び出す。副目標がS0となり、GPS3の初期条件と同じになるため、GPS3は何もしないで処理をGPS2に戻す。GPS2はS0にTRANSPORTを適用し(S2になる)、GPS1に処理に戻す。次にGPS1は、S2とGの差異を検出し、そのうちの1つ(部材2)を減少させるオペレータ(TRANSPORT)を選択し、これが適用可能であるための前提条件(ロボットアームが部材2の位置にいる)を副目標S3としてGPS4を再帰的に呼び出す。

この手続きを副目標SがS0と等しくなるまで繰り返す。

このような過程を繰り返し、 $S_i = G$ の時に関数の

呼び出しを終了してオペレータの列(組立手順リスト)を出力する(図-5)。このリストがオペレーション部分に送られてロボットが駆動されることになる。

```
((MOVE HOME S1) (TRANSPORT OBJ1 S1 G1) (MOVE G1 S2) (TRANSPORT OBJ2 S2 G2)
(MOVE G2 S3) (TRANSPORT OBJ3 S3 G3) (MOVE G3 HOME))
```

図-5 組立手順リスト (GPS)

以上の手続きより明かなように、GPSでは設備・道具の移動を部材の移動と同様に扱うことができ、プランニングとスケジューリングが同時に実施されるという利点を持つ。

### 3.2 エキスパートシステムを用いた組立手順の自動生成

前節で取り扱ったGPSは初期状態と最終状態の差異に着目した手法であるが、次に人間の経験をより自然に取り込めるエキスパートシステムを用いた組立手順の自動生成手法について述べる。

#### 3.2.1 エキスパートシステムによる組立手順の自動生成プログラム

自動組立システムを考えると、問題になることは建造作業をする機器の能力である。それに応じて組立手順の記述の仕方が変わってくる。その能力が高けれ

ば高いほど少ない命令で高度な作業ができる。

ここでは自動組立システムとして、指令された作業を自動的に行う組立機器をもつようなシステムを仮定し考察した。船舶を建造するのに必要な組立機器として、以下の3種類を考えた。

E-1) 比較的軽い部材を運ぶロボット

E-2) 比較的重い部材を運ぶクレーン

E-3) 溶接ロボット

これらの動作に伴い部材の移動、溶接といった工程が生じる。E-1)、E-2)としては目標位置を指定するだけで自律的に部材を運ぶものを、E-3)としては溶接位置を指定すれば同様に溶接するものを仮定した。

以上のこと実現するシステムは図-6のようなものである。なお、プログラミングにあたってはCommon Lispを用いた。

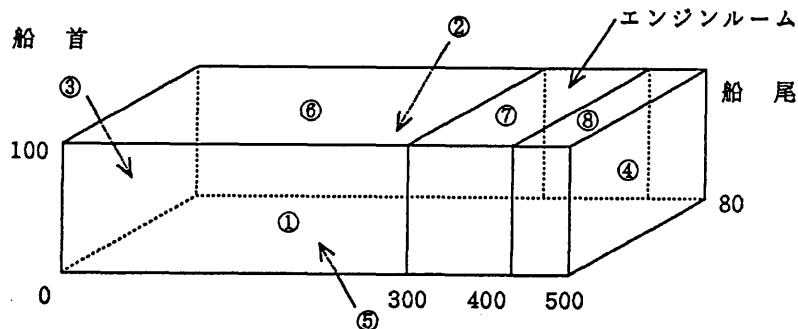


図-6 船体構造 (外部構造)

なお、完成構造物は簡単のため長方形の板の集まりでできているとし、各板は単位面積あたりの重量および4つの頂点という属性のみが与えられているとする。また、スティフナーの取り付けや配管のための穴開け

は運ばれる以前にすでに行われているとしてここでは考えない。

用いた組立手順の導出のルールとして以下のものを採用する。



R-1) 下に位置する部材から組立を始める。

R-2) 同じ高さの部材なら船体の中心軸に近い部材を優先する。

なお、R-1)、R-2)とも部材が置かれるときの重心の位置を基準にして高低、および中心軸からの距離を決めている。

機器選択のアルゴリズムとしては(板の単位面積あたりの重量を1として)、次の3つを採用する。

R-3) 比較的軽いものはロボットが運ぶ。

(e x. 重量  $\leq 10,000$ )

R-4) 重いものはクレーンが運ぶ。

(e x. 重量  $> 10,000$ )

R-5) 部材を目的位置に運んだとき既に置かれた部材と接触し、かつ溶接するよう設計書での指示があれば溶接ロボットで溶接する。

R-1) は、どのような組立をするときでも言えることであるが、ある位置に部材を置くときその支えとなる構造はすでに存在していなければならないという原則を表現している。しかし、このルールは後で述べるように、建造物が水平および垂直な長方形部材のみからなる場合には閉構造の内側の部材を外側の部材が組上がった後に組立てるという幾何学的な矛盾を排除することができるが、斜めの部材がある場合には幾何学的な矛盾を排除できない(図-11(C))。

R-2) は内部構造がある場合は内部から先に組み立てた方が安定するという原則を表現している。これは、船体の中心軸回りのモーメントを考えた場合、軸に近いところに部材を置いた方が遠くに置いた場合よりモーメントが小さくなることに基づいている。

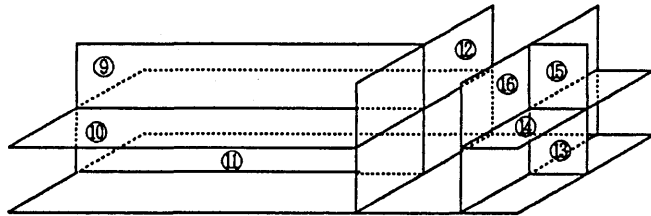


図-7 船体構造 (内部構造)

これらのルールを基に、組立手順が求められる。なお、組み立てる船体の構造としては図-6、7を仮定した。すなわち、直方体の船体にフロアが2段に、ロンジバルクヘッド(縦通隔壁)が船体内部の上部・下部に2枚ずつ、トランスが2枚、そして船体後方にエンジンルームがあるといった形である。面数は全部で16枚でface1からface16と名前をつけた。図-6は外観を、図-7は内部構造を示している。

このプログラムの特徴は組立手順だけでなく、その手順を実行する時必要な機器等も記述しているということである。設計書には部材の形状や材質なども与え

られているから、これを基に部材の大きさと重量を読取ることができる。ゆえにルールを決めればそれに見合った機器を割当てることができる。また、溶接は部材を目標位置に運んだ時、既に作られた部分と接触するという関係が生じた時、設計書でその場所を溶接するよう指示されていれば行われる。

### 3.2.2 動作例

R-1)とR-2)のルールを用いた組立手順のリストを図-8に示す。

```
((face5) (face11 face13) (face3 face4 face10 face12 face14 face16 face1 face2) (face9 face15)
(face6 face7 face8))
```

図-8 組立手順リスト (R-1、R-2使用時)

図-8の同じ括弧に入っている面は同じ高さであり、その中でさらに船体の軸に近いもの順に並べ変えられている。

またR-3)、R-4)、R-5)のルールを用いた時の組立手順のリストを図-9に示す。図-9より、face10を運ぶときは(face10 move-by-arm (weld-

```

((FACE5 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING NIL)))
(FACE11 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING (((0 40 0) (300 40 0))))))
(FACE13 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((400 40 0) (500 40 0))))))
(FACE3 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((0 0 0) (0 80 0)) ((0 40 0) (040 50))))))
(FACE4 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((500 0 0) (500 80 0)) ((500 40 0) (500 40 50))))))
(FACE10 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING (((0 40 50) (300 40 50)) ((0 0 50) (0 80 50))))))
(FACE12 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((300 0 0) (300 80 0)) ((300 40 0) (300 40 50))
    ((300 0 50) (300 80 50))))))
(FACE14 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((400 40 50) (500 40 50)) ((500 0 50) (500 80 50))))))
(FACE16 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((400 0 0) (400 80 0)) ((400 40 0) (400 40 50))
    ((400 0 50) (400 80 50))))))
(FACE1 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING (((0 0 0) (500 0 0)) ((0 0 0) (0 0 100))
    ((500 0 0) (500 0 100)) ((0 0 50) (300 0 50))
    ((300 0 0) (300 0 100)) ((400 0 50) (500 0 50))
    ((400 0 0) (400 0 100))))))
(FACE2 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING (((0 80 0) (500 80 0)) ((0 80 0) (0 80 100))
    ((500 80 0) (500 80 100)) ((0 80 50) (300 80 50))
    ((300 80 0) (300 80 100)) ((400 80 50) (500 80 50))
    ((400 80 0) (400 80 100))))))
(FACE9 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING (((0 40 50) (0 40 100)) ((0 40 50) (300 40 50))
    ((300 40 50) (300 40 100))))))
(FACE15 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((500 40 50) (500 40 100)) ((400 40 50) (500 40 50))
    ((400 40 50) (400 40 100))))))
(FACE6 MOVED-BY CRANE
  ((WELDING (((0 0 100) (0 80 100)) ((300 0 100) (300 80 100))
    ((0 0 100) (300 0 100)) ((0 80 100) (300 80 100))
    ((0 40 100) (300 40 100))))))
(FACE7 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((300 0 100) (300 80 100)) ((400 0 100) (400 80 100))
    ((300 0 100) (400 0 100)) ((300 80 100) (400 80 100))))))
(FACE8 MOVED-BY ARM
  ((WELDING (((500 0 100) (500 80 100)) ((400 0 100) (400 80 100))
    ((400 0 100) (500 0 100)) ((400 80 100) (500 80 100))
    ((400 40 100) (500 40 100))))))

```

図-9 組立手順リスト (R-1、R-2、R-3、R-4、R-5 使用時)

ing(((0 40 50) (300 40 50)) ((0 0 50) (0 80 50))))となっている。これは、face10 はロボットアームによって運ばれ、空間座標で

(0,40,50)-(300,40,50), (0,50,0)-(0,80,50)

の2箇所を溶接するというをリストで表現している。

こういった情報を基に組立手順のデータベース化が図られ建造手順書が作られることになる。これらがどのように運用されるかは第4章に述べる。

また、面の移動によって生じる溶接箇所の数および溶接長の総和は表-4のようになった。

表-4 溶接数と溶接長

面番号	5	11	13	3	4	10	12	14	16	1	2	9	15	6	7	8
溶接数	0	1	1	2	2	2	3	2	3	7	7	3	5	5	4	5
溶接長 (10)	0	30	10	13	13	38	21	18	21	130	130	40	20	106	36	46

この表より面1、2を溶接する作業が溶接数および溶接長とも最大となっている。また、図-6、7および

図8を参考にしてフロー線図を書くと図-10のようになる。

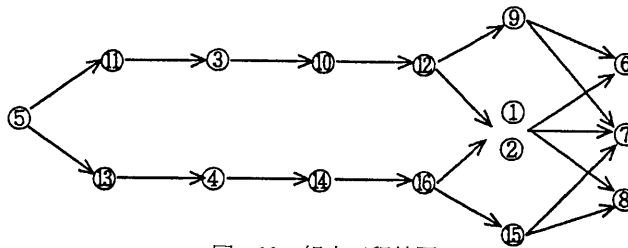


図-10 組立工程線図

3.3 考察

GPSのアルゴリズムは単純であるが、プランニングと設備・道具の移動をも含めたスケジューリングを同時に考慮ことができ、それらの移動にかなりの時間を必要とする船舶の組立の際の最適なプランニングおよびスケジューリングを実施することが原理的に可能である。しかし、部材数が増加することによる組合せの爆発の防止方法を検討することが重要である。

3.2.1のR-1)からR-5)のルールを用いて、垂直あるいは水平で長方形の部材から構成される船舶を組み立てるという簡単な例題であるが、組立工程を自動生成することができた。しかし、これらのルールでは幾何学的あるいは物理的に組立不可能な手順を生成することがあることに注意しなければならない。

以下に、垂直あるいは水平で長方形の部材から構成される船舶を組み立てる場合は、幾何学的な矛盾を排除できること、しかし、斜めの部材がある場合成り立たないこと等について述べる。

水平および垂直でかつ長方形の部材で構成される構造物の場合、閉構造を組み上げた後にその中に部材を挿入するという幾何学的な矛盾を生じさせることがないことは、以下のように示される。

図-11 (A)のように、部材⑤をその他の部材の後に挿入するという手順が生成されたすると、部材⑤は部材④より重心位置が低い場合、重心の低い部材から組み立てるというルールが無視されたことになる。したがって、図-11 (A)のような場合が成立することはあり得ない。さらに、このことは、部材⑤が閉構内のどの位置にあっても言えることであり、かつ、一

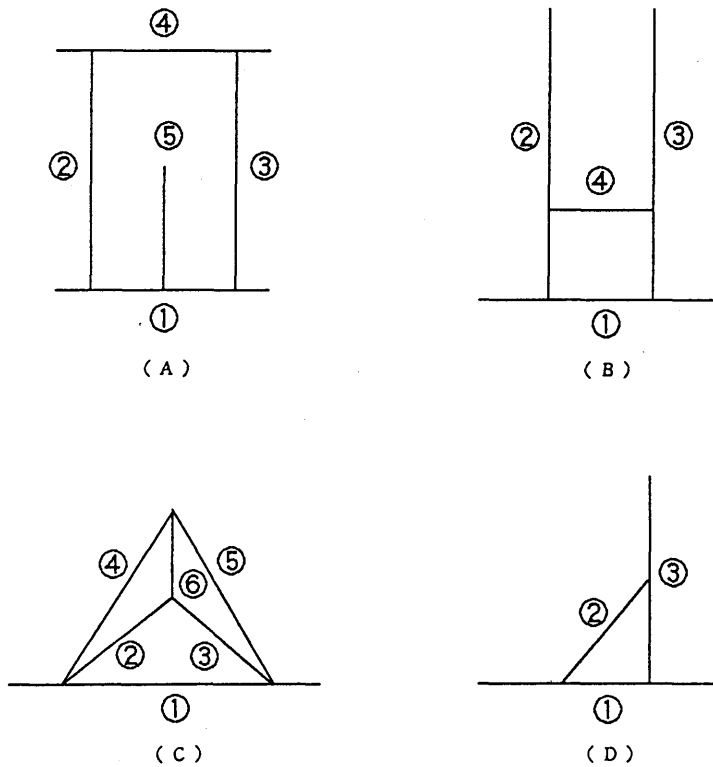


図-11 組立不能手順

一般的に垂直および水平の長方形部材で構成される構造物で閉構造が成り立つ場合、その閉構造は必ず角柱になり、閉構造の上部水平部材の重心位置はその他の部材の重心位置より高いため、上部水平部材と内部部材の重心位置の関係は図-11 (A)と同じである。よって、この証明には一般性が成り立つ。したがって、垂直および水平の長方形部材で構成される構造物を重心の低い部材から組み上げる場合、幾何学的な矛盾は生じない。

しかし、図-11 (B)のように側板の上端が閉構造の水平部材より上にあり、かつ側板の重心が水平部材より上にある場合は、幾何学的な矛盾は生じないが、水平部材を側板となる垂直部材より先に組み立てるという物理的に不可能な組立手順が作成される。したがって、このルールは、垂直および水平の長方形部材で構成される構造物の組立てのルールとしては不十分である。

斜めの部材がある場合には、重心が低い部材から組み上げるというルールだけでは幾何学的な矛盾を排除

できないことは図-11 (C) から明かである。この例で、部材⑥の重心は部材④および⑤の部材の重心より高く、したがって部材⑥は部材④および⑤の部材が組立てられた後に組立てられることになり、幾何学的な矛盾をもたらす。

また、図-11 (D) では、重心が低い部材から組み上げるというルールだけでは、斜めの部材②がそれを支える垂直部材③が組立てられる以前に組立てられることになり、構造的に不安定になる。

それで、今後の課題としては、垂直あるいは水平部材だけで構成される構造だけでなく、より一般的な構造に通用するアルゴリズムの導出、さらに、効率的に機器を運用するため組立手順のリストから図-10のようなフロー図を導出し自動的に並行して行える作業を見つけるといったこと等があげられる。

また、今回の例では触れなかったが、組立機器に作業させる場合その前提条件として組立機器の作業空間および移動経路を確保する問題もある。つまり、組立機器が作業するのに十分な空間が常に確保されている

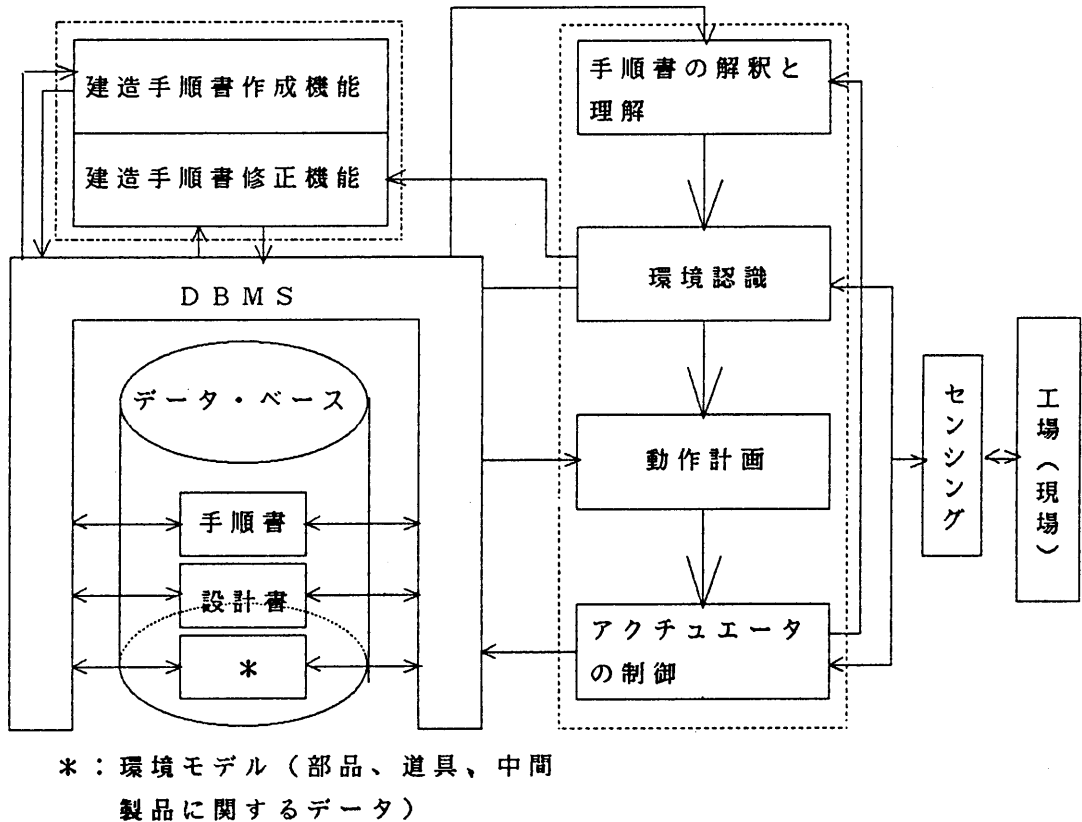


図-12 オペレーション部分の基本構成

のか、またある作業を終了した機器が次の作業場所に移動するときの経路が存在しているかといったことを組立手順を導出するとき考慮する必要がある。

#### 4. オペレーション部分

##### 4.1 概要

船舶の建造の自動化を図るに当り、先にも述べたように、手順書の作成から実際の組立に至る船舶の建造を閉じた一つの系と捉えた場合の機能図を図-12に示した。この図の中で実際に組立を担う機能（オペレーション部分）を破線の枠で囲って示した。先に述べた手順書に記述された作業は、破線の枠の中に示した一連の機能の実行で実現される。以下に、オペレーション部分の詳細について述べる。

手順書解釈機能は、手順書に記述されている内容を解釈・理解し、次のステップのための入力を作成する機能である。この手順書に基づいて、工場の中から、

ある指定された道具、部品を見つけ、この道具を用いてこの部品を指定された場所へ移動するために、その内容を現在の状態量を示す変数へ置き換える。以下の機能は、この状態量を基に実行される。

環境認識機能は、工場内等の作業環境を理解・認識するための機能である。工場内には種々の部品、道具、組立途中の部品（中間製品）等が置かれており、これらの位置、関係は時間とともに変化するが、それらは、環境モデルとしてデータベース上に構築されている。この機能は、手順書に基づいて具体的に物を動かす以前に、実際の環境がデータベース通りの環境であるかどうかを、テレビカメラから入力した情報を画像処理し、これを基に画像認識、画像理解を行って判断する機能である。もし、実際の世界が環境モデル通りでなかった場合には、そのことを手順書作成機能へフィードバックするとともにデータベース上にある環境モデルを修正し、新たな手順書を待つ。

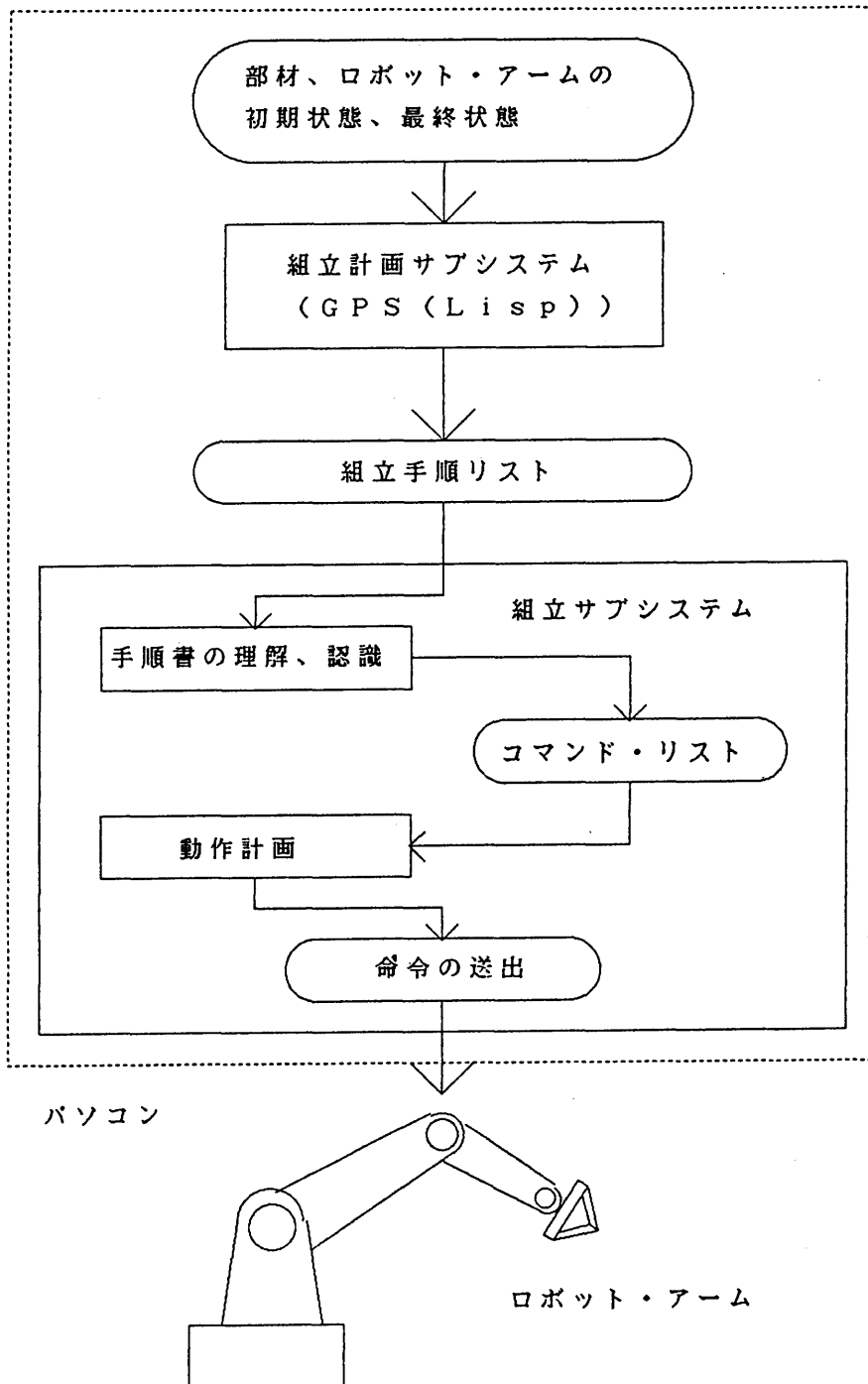


図-13 試作システムの構成

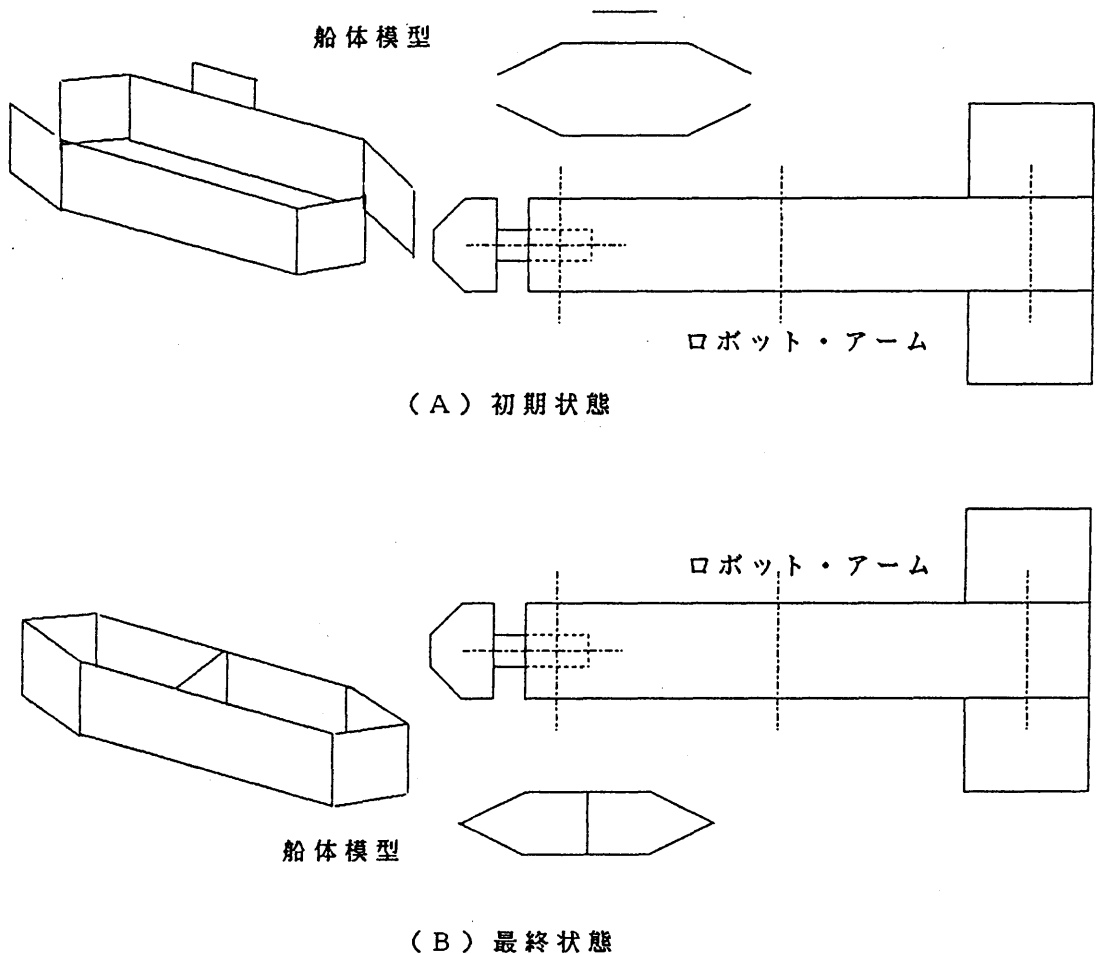


図-14 組立の初期状態および最終状態

動作計画機能は、手順書の解釈と理解、環境認識の結果を基に、部品を現在の位置から目的とする位置まで、安全に、効率よく動かすための道具の軌道、姿勢等の計算を行う機能である。この機能のためには、運ぶ部品の重さ、大きさ等の情報とともに、環境に関する情報が重要な意味を持つ。具体的に部品を移動する道具として、治具、クレーン、移動ロボット、マジックハンド（マニピュレータ）等が上げられる。

アクチュエータ制御機能は、先に決められた軌道、姿勢を満足するために、各道具の駆動量を決定する機能であるとともに、実際に道具を用いて部材、部品を移動して建造を実現する機能である。さらに、建造の

進行に伴い、データベースの情報の変更を行う。

#### 4.2 ロボット・アームを用いたオペレーション部分の実例

##### 4.2.1 システムの概要

3.1に述べたGPSによる方法で作成された、建造手順書に相当する組立手順リスト（図-5）に基づき、ロボット・アームを駆動して組立を実行するシステムを作成し、実験を行った。

ロボット・アームを用いた模型船自動組立システムの作成にあたり、図-12に示した自動組立の機能図の中から、組立に必要な基本的な機能である建造手順書

```

(MOVE-ARM HOME S1) (GRASP)
(MOVE-ARM S1 G1) (LOOSE)
(MOVE-ARM G1 S2) (GRASP)
(MOVE-ARM S2 G2) (LOOSE)
(MOVE-ARM G2 S3) (GRASP)
(MOVE-ARM S3 G3) (LOOSE)
(MOVE-ARM S3 HOME)

```

図-15 オペレーション部分組立手順リスト

作成、手順書、手順書の解釈と理解、動作計画、アクチュエータの制御の5つの機能を選び、これらの機能とデータベースを基に、PC-9801上に、GPSに基づく組立手順を出力する組立計画サブシステムと、ロボット・アームの動きを指令し船体模型を組み立てる組立サブシステムとから成るシステムを構築した。図-13にこのシステム構成を示した。この図において、PC-9801上に構築した機能を破線で囲って示した。

船体の模型は、船側板2枚、バルクヘッド1枚の計3つの部品で構成される。図-14(A)に模型船の部品の初期状態および、図-14(B)に完成状態を示した。

ロボット・アームは太平洋工業(株)製のもので、6自由度のロボット・アームである。最もプリミティブな動作指令は、各モータ(ステッピングモータ)のステップ数を指示するものである。このロボット・アームは、プリンター・ケーブルでPC-9801に接続される。

#### 4.2.2 システムの機能

このシステムにおける各機能は、4.1で示した各機能をそのまま実現したものでなく、システム全体として処理の流れを確実にして、各機能同志の関係を明確にするために、簡易モデルを用いた。

3.1.2で説明したように、建造手順書作成サブシステムでは、データベースに登録してある部材、ロボット・アームの初期状態、最終状態を表すデータを入力として、GPSに基づいて組立手順リストを生成し、これをデータベースに登録する。オペレーションサブシステムでは、そのリストに基づきロボット・アームの駆動命令のリスト(オペレーション部分の組立手順リストと呼ぶ)を作成し、ロボット・アームを駆動する。

図-15にオペレーション部分の組立手順リストを示す。ここでは、問題を単純化するために、環境モデルとして、個々の部品の位置データのみを用いた。

オペレーションサブシステムでは、まず、手順書の解釈と理解機能は、データベース上の組立手順リストから、ロボット・アームの指令に対応するオペレーション部分の組立手順リスト(図-15)を生成する。環境認識機能は、テレビカメラ等のセンサーによる情報に基づき外界を認識し、環境モデルのチェックを行うことになるが、ここではこの機能を省略した。動作計画機能は、ロボット・アームが部品を掴む場合、また掴んだ部品を移動する場合、一度、一定の高さにアームの先端を上下させ、他の部品との衝突を回避するような経路を作成する。アクチュエータ制御機能は、これを基にロボット・アームの各リンクの制御量を求め、これを送出し実際にロボット・アームを駆動する。この手続きを組立手順リストの最終項まで実施することにより、船舶が完成する。写真-1に組立途中の様子を示した。

#### 4.3 考察

2章で提示した船舶の建造自動化手法に基づき、建造手順書作成部分とオペレーション部分とをそれぞれ担当する簡易なサブシステムをパーソナルコンピュータ上に構築し、簡単な例であるが、GPSにより少数の部材で構成される船体の組立手順(部材の運搬手順)を求め、これに基づいてロボット・アームを駆動して船舶の組立実験を行った。この例題より、2章で提示した船舶の建造自動化手法の有効性を確認できた。

ここで扱った例題では、環境認識機能を省略したが、現実問題では、部品の数が多く、それらの相対関係は複雑であるため、精度良く環境を認識する必要がある。



そのためには、環境を表現するためのモデル、画像認識技術、物体のセンシングの技術等が重要な要素となる。これらについては、今後の検討課題である。

## 5. 考察

### 5.1 プランニングについて

構造物が水平および垂直の部材で構成される場合は、部材の重心を用い、下から組み上げることにより、同時に幾何学的な矛盾を排除することが可能であるが、物理的に組立不可能な組立手順を作成する可能性があること、また、斜めの部材があるこの方法では幾何学的矛盾、さらに構造不安定な組立手順を作成する可能性がありうることが示された。そのような幾何学的な矛盾、物理的な組立不可能性を排除しつつ組立てを可能にする手法を考案することは重要であり、今後の主要な検討課題の一つと考えられる。エキスパートシステムではルールという形で建造手順を作成する指針を与えることができ、非常に柔軟なシステムを構成することが可能であるが、3章に例示したように、ルールが示す命題が正しいことがすべての場合について言えない場合、あるいはルール間に矛盾がある場合等には、出てきた結果を信用することができないため、ルールの設定には十分注意することが必要である。

また、部材数が多くなると、GPSのような総当たりの方法では、組合せの爆発が起こって解をもとめることが不可能になってしまう。したがって、何らかの方法により、それを防止することが必要とされる。

さらに、構造物の幾何学的あるいは物理的な組立不可能性の考慮だけでなく、設備あるいは道具に関しても同様の不可能性を考慮することが必要である。

### 5.2 スケジューリングについて

前にも触れたが、最適な組立手順を作成するためには、プランニングの際にスケジューリングを考慮しなければならない。この点でGPSは、これら2つを同時に考慮できるという利点を持つ。また、PERTでは、作業間で、設備および道具の移動がある場合の最適化を考慮することができない。GPSではそれらの移動が自然に作業として考慮できるため、設備および道具の移動の量が大きい造船においてはGPSによるスケジューリングが有効と言える。今後は、ルールベースシステムによりGPSによる手順探索の際の組合せの爆発を防ぎ、同時並行の可能な作業を考慮できる手法を作成することが良いと考えている。

### 5.3 オペレーションについて

何をどうするという指示だけを建造手順書作成部分から受けて実際にどのように行動するかはオペレーションを担当するシステムが行うという方式は、建造自動化システムの構成要素間の負荷の分散を行い、かつ柔軟なシステムにすることが可能である。今後はこの方式が主流となると思われる。実際にロボット・アームを用いた試作システムにより、この方式が有効であることが確認できたと思われる。次に実施すべきことは、画像認識を行い外界を認識して行動計画を立てる手法を作成することである。

## 6. おわりに

以上の検討により、以下の結論が得られた。

- (1) 建造自動化システムを、建造手順書作成部分とオペレーション部分の2つの部分で構成し、それらのインターフェースを建造手順書にする方式が最適と思われる。
- (2) 設計、建造の共通データベースを作成し、このデータベースに工場環境モデル、建造手順書等のデータを入れておき、このデータベースを通じて建造自動化システムの構成要素が情報を伝達する構成にすると見通しのよい建造自動化システムを構築できる。
- (3) プランニングおよびスケジューリングの方法についてGPS、エキスパートシステムの応用可能性について検討した。その結果それぞれの長所を生かしてそれら2つの方法を組合せることにより、矛盾がなくかつ最適な組立て手順を作成する可能性があることが示唆された。
- (4) オペレーション部分の自動化のためのシステム構造が明かになった。
- (5) ロボット・アームを用いる、部材の自動運搬システムのモデルを試作し、ここで提案したオペレーション部分のシステム構造の有効性が確認された。

### (参考文献)

- 1) 小山他：構造物建造のためのプロセスプランニングの研究、日本造船学会論文集、第166号、1989年
- 2) 小山他：造船CIM構築のための工程管理システムに関する研究、日本造船学会論文集、第166号、1989年
- 3) 小山他：プロセスプランニングエキスパートシステムの研究、日本造船学会論文集、第168号、1990年

- 4) 雨宮：造船CIM構築のための工程設計システムの構築、日本造船学会論文集、第168号、1990年
- 5) 峯村他：造船CIMSのための工程管理システムの構築、日本造船学会論文集、第170号、1991年
- 6) 雨宮：造船CIMSのための工程管理システムの構築(第2報；近代化工場への適用)、日本造船学会論文集、第170号、1991年
- 7) シップ・アンド・オーシャン財団：平成3年度造船CIMSパイロットモデルの開発研究報告書、1992年
- 8) A. Barr, E. A. Feigenbaum編：人工知能ハンドブック、共立出版
- 9) 和多田作一郎：人工知能の理解を深める本、実務教育出版

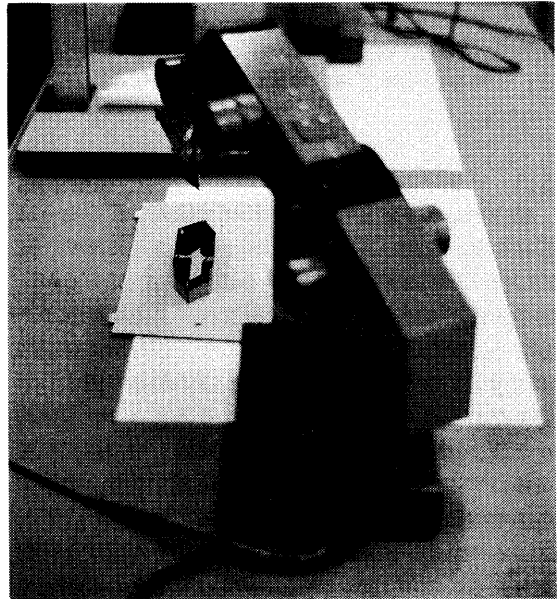


写真-1 ロボットアーム動作例