

JAERI-Tech

98-054



センサベース自律的ロボットシステムを用いた
障害物回避実験

1998年12月

藤井義雄・鈴木勝男

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

センサベース自律的ロボットシステムを用いた障害物回避実験

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部

藤井 義雄・鈴木 勝男

(1998年11月2日受理)

原子力施設の高放射線区域における作業員の放射線被曝を低減する観点から、種々の不定型作業を能率的に遂行するための遠隔ロボット技術の開発が求められている。このため、環境知覚システムと冗長マニピュレータを製作し、不定型環境下で複雑な作業に適用可能なロボットシステムを開発した。本システムは、冗長マニピュレータに環境を知覚するための各種センサを搭載し、センサから得られる信号に基づいて、自律的に作業を遂行する機能を備えている。

本報告書は、一次元X軸駆動機構に本ロボットシステムを搭載し、狭隘な壁穴を通して壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを回転させる実験とその評価結果をまとめたものである。この実験を通して、本ロボットシステムは、非冗長マニピュレータでは操作不可能な狭い空間における作業を、障害物を回避しながら自律的に遂行できる機能を備えていることを確認した。

Obstacle Avoidance Test using a Sensor-based Autonomous Robotic System

Yoshio FUJII and Katsuo SUZUKI

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 2 ,1998)

From a viewpoint of reducing personnel radiation exposure of plant staffs working in the high radiation area of nuclear facilities, it is often said to be necessary to develop remote robotic systems, which have great potential of performing various tasks in nuclear facilities. Hence, we developed an advanced remote robotic system, consisting of redundant manipulator and environment-sensing systems, which can be applied to complicated handling tasks under unstructured environment. In the robotic system, various types of sensors for environment-sensing are mounted on the redundant manipulator and sensor-based autonomous capabilities are incorporated.

This report describes the results of autonomous obstacle avoidance test which was carried out as follows: manipulating valves at the rear-side of wall, through a narrow window of the wall, with the redundant manipulator mounted on an x-axis driving mechanism. From this test, it is confirmed that the developed robotic system can autonomously achieve handling tasks in limited space as avoiding obstacles, which is supposed to be difficult by a non-redundant manipulator.

Keywords : Manipulator, Redundant Manipulator, Intelligence Robot, Obstacle Avoidance, Remote Control Robot, Autonomous Control, Environment-sensing System

目 次

1. はじめに	1
2. 自律ロボットシステム構成	1
2.1 ハードウェア・システム	1
2.2 マニピュレータ	1
2.3 マニピュレータ制御盤	2
2.4 X軸駆動装置	2
2.5 自律制御用パソコン	3
2.6 インターフェース・ユニット	4
2.7 センサ	4
2.8 映像用モニタ	4
2.9 プラント機器モックアップ	5
3. 自律的障害物回避実験	20
3.1 実験概要	20
3.2 実験方法	20
3.3 実験内容	20
3.4 障害物回避作業内容	21
3.5 自律的障害物回避プログラムの構成	24
3.6 実験結果と考察	29
4. おわりに	64
謝辞	64
参考文献	65

Contents

1. Introduction.....	1
2. Configuration of Autonomouse Robot System.....	1
2.1 Hardware System.....	1
2.2 Manipulator.....	1
2.3 Manipulator Control Unit.....	2
2.4 X-axis Drive Unit.....	2
2.5 Personal Computer for Autonomous Control.....	3
2.6 Interface Unit.....	4
2.7 Sensors.....	4
2.8 Video Monitor.....	4
2.9 Mockup of Plant Components.....	5
3. Autonomous Obstacle Avoidance Experiment.....	20
3.1 Outline.....	20
3.2 Method.....	20
3.3 Items of Experiment.....	20
3.4 Details of Obstacle Avoidance Operations.....	21
3.5 Configurations of Autonomous Obstacle Avoidance Test Program.....	24
3.6 Results and Discussions.....	29
4. Concluding Remarks.....	64
Acknowledgement.....	64
References.....	65

1. はじめに

原子力施設の高放射線区域における作業員の放射線被曝を低減する観点から、種々の不定型作業を能率的に遂行するための原子力用遠隔ロボット技術の開発が求められ、自律的知能ロボットの開発が原子力開発・利用における重要な研究課題の一つになっている¹⁾。このため、制御知能工学研究室では原子炉解体用遠隔ロボット技術に関する過去10余年の研究開発の実績²⁾³⁾を基礎に、より高度な作業機能を有する遠隔ロボットを開発するための基盤技術の研究開発を進めてきた⁴⁾⁵⁾。第1期研究計画では、各種センサから得られる信号を用いた環境知覚基本技術の確立を目指して要素技術の個別的な研究を進めた⁶⁾。平成5年度から開始した第2期研究計画では、第1期計画で得た成果を基に個別的要素技術のシステム化を順次進め、実用化を指向したシステム技術の基盤確立を目指してきた⁷⁾⁸⁾。本計画の最終段階においては、これ迄個別に開発してきたセンサ信号処理システムと平成5年に製作した7関節を有する冗長マニピュレータとを結合し、知能ロボット装置としての総合的な試験を実施した。今回実施した実験は、一次元移動機能を有するX軸駆動装置に冗長マニピュレータを搭載し、狭隘な壁穴を通して壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを回転させる作業である。壁穴やバルブ・ハンドル等の位置検出には超音波、レーザ、ITVカメラ等のセンサ信号を利用し、それらの信号に基づいて冗長マニピュレータを自律的に動作させるようにした。この実験を通して、各種センサ信号による環境知覚機能を応用することにより、障害物を回避しながら、非冗長マニピュレータでは操作不可能な狭い空間における作業を自律的に実施できることを確認した。本報告書は、この実験の結果をまとめたものである。

2. 自律ロボットシステム構成

2.1 ハードウェア・システム

今回の実験を実施するためにマニピュレータの制御系に大幅な改良を加えた。ここでは新たに改良を行ったハードウェア・システムについて重点的に述べる。改良後の冗長マニピュレータのハードウェア・システムは、マニピュレータ本体、マニピュレータ制御盤、マニピュレータを搭載してその作業位置を移動するX軸駆動装置、自律制御用パソコン及びセンサー回路等を含むインターフェース・ユニットから構成される。その他の付属機器として、障害物回避実験用に、プラントの構成機器を模擬したモックアップがある。

Fig.2.1にハードウェア・システムの構成図を示す。

2.2 マニピュレータ

冗長マニピュレータは、障害物回避等の自律制御技術の研究に使用するロボットアームであり、平成5年に製作したものである。通常のロボットアームは、6自由度までの関節を備えているも

の多いが、本冗長マニピュレータは、より複雑な遠隔作業を可能とするために腕の関節を更に1自由度多くしてある。これによって障害物の回避や、物体の裏側への回り込み、さらに狭い空間における作業等を柔軟に処理することができる。一方、アーム制御の面においては、関節が1自由度多くなったことにより、関節角を求める演算がより複雑になったが、高速演算アルゴリズムと専用のハードウェア・システムの採用により実用的な制御を実現した。冗長マニピュレータのアウトリーチは1,200mm（2軸中心～把持部中心）で、可搬重量10kgの機能を有している。アーム自重は35kgで可搬性に富む特徴を備えている。Fig.2.2に冗長マニピュレータの外観を、Fig.2.3にその主要部分の寸法図を示す。アーム先端の把持部は、平行開閉型の2本爪であり、100mmの開閉ストロークがある。把持部の片方の爪には、物体把握検出用の力センサを取り付けている。この力センサは、歪ゲージ方式のものでX・Y・2方向の分力を測定可能である。アーム先端部における合成最大動作速度は、約2m/secである。

Fig.2.4にアーム関節の構成図を示す。関節の配置はアーム取付けベース側から回転軸(S1)、旋回軸(S2)の順に繰り返し配置している。同図において各関節の動作方向を示す矢印は、正信号（正数値）入力時に動作する方向を示している。アーム取付けベースの中心位置がマニピュレータの動作基準原点である。第1軸から第7軸までの駆動には無励磁差動型ブレーキを備えたACサーボモータを使用し、アーム先端の把持部には超音波駆動モータを使用している。把持部を除いた各関節の位置検出にはブラシレス・レゾルバを使用している。把持部の開閉位置は超音波モータを駆動するパルス数をカウントする方法で検出している。

冗長マニピュレータの主要な仕様をTable 2.1に示す。

2.3 マニピュレータ制御盤

マニピュレータ制御盤は、マニピュレータ駆動用のサーボドライバや電源部等を収納した可搬式の装置である。マニピュレータ駆動用のサーボドライバは、1つの基板に2軸分の制御回路を組込んで、各軸の速度及びトルクを制御することが出来るセミデジタル方式のドライバである。マニピュレータ制御盤には、4枚のサーボドライバ基板を組み込んでいる。マニピュレータ制御盤の上部には、マニピュレータの把持部を駆動するためのハンドコントローラを配置している。マニピュレータ制御盤と冗長マニピュレータ間は、3本のケーブル（内1本は把持部の超音波モータ制御用）で接続している。Fig.2.5にマニピュレータ制御盤の構成図を示す。Fig.2.6にマニピュレータ制御盤の外観を示す。Table 2.2に把持部駆動用の超音波モータ及びハンドコントローラの性能表を示す。

2.4 X軸駆動装置

X軸駆動装置は、作業床面における冗長マニピュレータ装置の位置を一次元方向に移動するためのサーボ駆動機構である。この装置は、マニピュレータを搭載する移動テーブル、スライドレール、ACサーボモータ等から構成され、マニピュレータの作業基準位置を自動的に制御する機能を備えている。X軸駆動装置の本体部分には、キャスター及び固定用のボルトが付いており容易にその設置位置を作業目的に応じて移動することができる。X軸駆動装置を構成する主要機器の仕様をTable 2.3に示す。

2.5 自律制御用パソコン

自律制御用パソコンは、マニピュレータ制御プログラム及び周辺機器制御プログラムの開発や実行を行う部分で、CPUとして Pentium Pro 200MHz の性能を有するものを使用した。自律制御用パソコンの主要仕様を Table 2.4 に示す。パソコンの拡張スロットにマニピュレータ運動制御 CPU ボード、デジタル I/O インターフェース・ボード、A/D変換ボード、画像入力・処理ボード及びサーボモータコントロール・ボードを挿入した。冗長マニピュレータの制御用プログラムは、Cコンパイラ (VisualC++Ver4.2) を用いてコンパイルした。各種の作業プログラムやデータを障害物回避実験ソフトウェア・システムとして構築し、ハードディスクに格納した。Fig.2.7 に自律制御用パソコン、後述するインターフェース・ユニット及び映像用モニタの外観を示す。拡張スロットに挿入した各ボードについて次に述べる。

(1) マニピュレータ運動制御 CPU ボード

冗長マニピュレータの運動制御部を構成するボードであり、32ビットのCPU (486DX4) と DSP (TMS320C31) を使用しており、複雑な7軸の制御を高速に処理する機能を備えている。運動制御部とマニピュレータ・サーボドライバ間のデータ送受信は、ARCNET を介して行っている。また、このボードにはインターフェース機能として、RS232C を2CH、デジタル入出力としてそれぞれ32CHを備えている。

(2) デジタル I/O インターフェース・ボード

デジタル I/O インターフェース・ボードは、冗長マニピュレータの第4軸付近 (肘部に相当) に取り付けられた接触センサの信号を取り込むための基板であり、マニピュレータ運動制御 CPU ボードにアドオン方式でマウントされている。入出力それぞれ32CHの容量を備えている。入力のカップリングは、フォトカプラ絶縁入力方式であり、出力のカップリングは、フォトカプラ絶縁オープンコレクタ出力方式である。

(3) A/D変換ボード

A/D変換ボードは、冗長マニピュレータ先端部に取り付けられた距離センサからのアナログ電圧信号を取り込み、12ビットのデジタル信号に変換するための基板である。入力電圧レンジは、ジャンパピン方式によって4種類の中から選択可能であるが、本システムにおいては±5Vのレンジに設定した。入力CH数は、シングルエンド入力16CH及び差動入力8CHの容量を備えており、変換速度は、25 μ sec/CHである。

(4) 画像入力・処理ボード

画像入力・処理ボードは画像入力ボードと画像処理ボードの2枚の基板から構成される。画像入力ボードは、冗長マニピュレータ先端部に取り付けられた ITV カメラからの映像信号を取り込むための基板であり、画像処理ボードにアドオン方式で取り付けられている。画像処理ボードは、取り込んだ画像情報を処理し、冗長マニピュレータを制御するために必要なデータを生成出力する基板である。画像入力ボードは、RGB、PAL、NTSC、S-VHS 及びモノクロ等のカメラ入力に対応できる機能を備えたものである。本システムにおいては、NTSC方式のカメラ信号を入力した。ビデオ・デジタイザは、8ビットの分解能を備えている。画像処理ボードのデータ転送速度は、120 MB/sec の性能を備えている。

(5) サーボモータコントロール・ボード

サーボモータコントロール・ボードは、X軸駆動装置の位置制御及びハンドの開閉を制御するための基板である。この基板は、パルス制御方式による2軸制御機能を備えたもので1軸目はX軸駆動装置のACサーボモータ制御用に、2軸目はハンド開閉用超音波モータ制御用に使用した。パルス出力信号は、フォトカプラ絶縁オープンコレクタ方式である。また、この基板には、2軸のエンコーダ・インターフェース機能（A,B,Z相入力）及び原点スイッチ等のリミットスイッチ入力機能（各軸8点）も備えている。

2.6 インターフェース・ユニット

インターフェース・ユニットは、冗長マニピュレータと自律制御用パソコンとの間に設置したユニットであり、冗長マニピュレータに取り付けた各種センサ用アンプ及びX軸駆動機構モータ用のサーボアンプ等を収納した。インターフェース・ユニットに収納した各種センサ用アンプ及びX軸駆動機構用サーボアンプの主要な仕様を Table 2.5 に示す。

X軸原点センサ、接触センサ及びハンドストロークエンドセンサ信号は、このインターフェース・ユニットを経由して自律制御用パソコンに入力した。

Fig.2.8 にインターフェース・ユニットを含む冗長マニピュレータ制御系の機器間接続図を示す。

Fig.2.9 にインターフェース・ユニットの外観を示す。

2.7 センサ

狭い空間において冗長マニピュレータを用いていろいろな作業を実施する場合、その作業空間にある作業対象物や障害物の位置を検知し、障害物を回避しながら目的とする作業を自律的に遂行させるために、周辺的环境状態を知覚するための各種センサが必要である。本システムの冗長マニピュレータには、超音波センサ2個、レーザセンサ1個、ITVカメラ1式及び接触センサ8個を取り付けた。Table2.6 に使用したセンサ類の主要仕様を示す。超音波センサは、対象物までの距離測定用で、距離レンジの異なるものをマニピュレータ先端方向と逆向き方向に各1個を取り付けた。レーザセンサは、障害物となる壁までの距離及びX軸に対する壁の鉛直度（マニピュレータから見た壁との角度）を測定する目的で取り付けた。ITVカメラは、マニピュレータを挿入する壁穴の位置検出や作業対象物であるバルブ・ハンドルまでの距離や把握するハンドルの回転角度検出用に取り付けた。このITVカメラは、マニピュレータ先端付近に取り付けるため、小型軽量で、かつフォーカスやアイリスを遠隔制御できるものを使用した。カメラのレンズは近距離において広範囲の状況を捕らえる必要があるため広角レンズを使用した。

接触センサは、作業中にマニピュレータの肘部が障害物に接触したことを検知し、冗長軸機能を活用して障害物回避動作を自律的に実行させる目的で取り付けた。Fig2.10 にマニピュレータの手首付近に取り付けたセンサ類を、Fig2.11 に第3軸付近（肘部）に取り付けた接触センサを示す。

2.8 映像用モニタ

映像用モニタは、ITVカメラから取り込んだ映像を表示するためのカラーモニタであり、サ

サイズ：14インチ、水平解像度：500TV本の性能を備え、NTSC,PAL,SECAMの各カラー方式に自動対応可能である。本システムにおいては、NTSC方式のカメラ信号を入力した。

2.9 プラント機器モックアップ

プラント機器モックアップは、プラントの配管やバルブ、レバー、ネジ等の構造を模擬したものであり、冗長マニピュレータを使用した障害物回避実験に利用する目的で製作した。通常はモックアップ全体が一体形の構造になっているが、2つに分割することができる。共にキャスター及び固定用のボルトが付いており容易にその設置位置を変更することが可能である。試験できる作業の主なものは、(1) 壁の裏側のレバーを回す作業、(2) 壁の裏側のネジ回し作業、(3) 壁穴の狭い隙間から壁の裏側の位置にあるバルブ・ハンドルの回転作業、(4) 配管の下をくぐり抜けて物体の移動を行う作業等である。今回の自律的障害物回避実験では、壁穴の狭い隙間から壁の裏側にあるバルブ・ハンドルの操作を行った。

Table 2.1 冗長マニピュレータの主要仕様

項目	仕様																											
型式	垂直多関節型																											
関節数	7 + 把持部																											
関節構成	アーム取付けベース側から R-P-R-P-R-P-R-F (R:回転関節 P:旋回関節 F:開閉)																											
関節名称	アーム取付けベース側から S ₁ -S ₂ -S ₃ -E ₁ -E ₂ -W ₁ -W ₂ -F (S:肩関節 E:肘関節 W:手首関節 F:指先開閉)																											
アーム長	アーム全長 : 1,483mm (ベース面~把持部先端間) アウトリーチ : 1,200mm (S ₂ ~把持部中心間) 肩リーチ : 247mm (ベース面~S ₂ 間) 上腕 : 450mm (S ₂ ~E ₁ 間) 下腕 : 500mm (E ₁ ~W ₁ 間) 手首リーチ : 250mm (W ₁ ~把持部中心間)																											
関節動作範囲及び 最高動作速度	<table border="1"> <thead> <tr> <th>関節名称</th> <th>動作範囲</th> <th>最高動作速度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S₁ (回転)</td> <td>±180°</td> <td>± 1 rad/sec</td> </tr> <tr> <td>S₂ (旋回)</td> <td>± 90°</td> <td>± 1 "</td> </tr> <tr> <td>S₃ (回転)</td> <td>±180°</td> <td>± 2 "</td> </tr> <tr> <td>E₁ (旋回)</td> <td>±143°</td> <td>± 2 "</td> </tr> <tr> <td>E₂ (回転)</td> <td>±270°</td> <td>± 2π "</td> </tr> <tr> <td>W₁ (旋回)</td> <td>±180°</td> <td>± 2π "</td> </tr> <tr> <td>W₂ (回転)</td> <td>無限回転</td> <td>± 2π "</td> </tr> <tr> <td>F (開閉)</td> <td>0~100mm</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	関節名称	動作範囲	最高動作速度	S ₁ (回転)	±180°	± 1 rad/sec	S ₂ (旋回)	± 90°	± 1 "	S ₃ (回転)	±180°	± 2 "	E ₁ (旋回)	±143°	± 2 "	E ₂ (回転)	±270°	± 2π "	W ₁ (旋回)	±180°	± 2π "	W ₂ (回転)	無限回転	± 2π "	F (開閉)	0~100mm	
関節名称	動作範囲	最高動作速度																										
S ₁ (回転)	±180°	± 1 rad/sec																										
S ₂ (旋回)	± 90°	± 1 "																										
S ₃ (回転)	±180°	± 2 "																										
E ₁ (旋回)	±143°	± 2 "																										
E ₂ (回転)	±270°	± 2π "																										
W ₁ (旋回)	±180°	± 2π "																										
W ₂ (回転)	無限回転	± 2π "																										
F (開閉)	0~100mm																											
最大合成速度	2 m/sec																											
可搬重量	10 kg																											
駆動方式	ACサーボモータ 無励磁差動型ブレーキ付 (第1軸~第7軸) 超音波モータ (把持部)																											
センサ	出力軸ブラシレス・レゾルバ (第1軸~第7軸) X-Y・2方向力センサ (把持部)																											
本体重量	35 kg																											

Table 2.2 超音波モータ並びにドライバの主要仕様

項目	仕様
位置制御入力	2パルス入力方式(CW, CCW)
回転指令パルス入力許容周波数	0.5～5.4 kpps
供給電源	DC 12V±10%, 3A
駆動周波数	40 kHz
駆動電圧	100 V rms
超音波モータ	ロータリーエンコーダ内蔵型
定格トルク	3.8 kg·cm
定格出力	4 W
定格回転数	100 rpm
分解能	3,200パルス/回転
ロータリーエンコーダ	インクリメンタル型 A相, B相

Table 2.3 X軸駆動装置の主要仕様

名称	項目	仕様
スライドラール	型式 ストローク 駆動方式 移動ピッチ レール構成	THK社製 GL15-1240L型 1,000 mm スクリューロッド駆動方式 5 mm/ロッド1回転 2本平行型
サーボアンプ	型式 方式 制御方式 機能 最大出力 インターフェース機能 外部接点入力	三菱電機製 MR-J40A1型 AC単相サーボアンプ 正弦波PWM制御、電流制御方式 ゲインや速度などデジタル値で設定変更可能 100 V, 5.7 A 位置決めユニット接続用コネクタ 位置エンコーダ接続用コネクタ サーボON、リセット、正転逆転リミット トルク制限
サーボモータ	型式 方式 定格出力 定格回転速度 位置検出 ブレーキ機能	三菱電機製 HA-FE33型 ACサーボモータ 300 W 3,000 rpm 位置エンコーダ1,000P/rev エンコーダ信号をサーボアンプに入力 無し

Table 2.4 自律制御用パソコンの主要仕様

項目	仕様
型式	GATEWAY2000型
CPU	Intel Pentium Pro
CPU速度	200MHz
メモリ容量	64MB(標準32MB+拡張32MB)、256MB まで拡張可能
拡張スロット数	8スロット
OS	Windows95
プログラミング言語	Visual C++, Visual BASIC
ISA拡張スロット	4スロット
PCIバス拡張スロット	4スロット
I/Oポート	パラレル: 1ポート, シリアル: 2ポート

Table 2.5 インターフェース・ユニットの主要仕様

名称	項目	仕様
レーザーアンプ	方式 スポット径 測定距離 分解能 出力信号 応答性	赤外半導体レーザー 1.2×2.5mm (距離300mmにおいて) 200~400mm 0.05mm 電圧：±5VDC、電流：4~20mADC 36Hz
超音波アンプ1	測定距離 分解能 最小検出物体 出力信号 応答性	200~1300mm 1mm 20mm ² 4~20mADC 10Hz
超音波アンプ2	測定距離 分解能 最小検出物体 出力信号 応答性	60~300mm 1mm 10mm ² 4~20mADC 20Hz
サーボアンプ	型式 方式 制御方式 機能 最大出力 インターフェース機能 外部接点入力	MR-J40A1型 AC単相サーボアンプ 正弦波PWM制御、電流制御方式 ゲインや速度などデジタル値で設定変更可能 100V, 5.7A 位置決めユニット接続用コネクタ 位置エンコーダ接続用コネクタ サーボON、リセット、正転逆転リミット トルク制限

Table 2.6 センサ類の主要仕様

名称	項目	仕様	用途	取付位置
レーザーセンサ	型式 方式 スポット径 測定距離 分解能 アナログ出力 応答性 重量 数量	LB-300型 赤外半導体レーザー 1.2×2.5mm(距離300mm) 200~400mm 0.05mm ±5V, 4~20mA 36Hz 約250g 1個	障害物(壁)迄の距離 及びマニピュレータ に対する障害物(壁) の角度(平行度)検出	第7軸
超音波センサ1	型式 測定距離 分解能 最小検出物体 アナログ出力 応答性 重量 数量	UD-320型 200~1300mm 1mm 20mm ² 4~20mA 10Hz 約190g 1個	障害物(壁)迄の距離 検出	第7軸
超音波センサ2	型式 測定距離 分解能 最小検出物体 アナログ出力 応答性 重量 数量	UD-310型 60~300mm 1mm 10mm ² 4~20mA 20Hz 約190g 1個	マニピュレータ後方 の距離検出	第6軸
ITVカメラ	型式 方式 イメージセンサ 有効画素数 水平解像度 垂直解像度 レンズ ワイドコンパニオンレンズ 遠隔操作機能 映像出力 重量 数量	EVI-370DG型 1/3インチCCD 410K/380K画素 460TV本以上 350TV本以上 1.2倍ズーム, f=5.4~64.8mm F1.8~2.7 37mm径, 倍率0.45倍 VISCAR/RS-232C NTSC 約230g 1式	壁穴中心位置及び距 離検出、バルブ・ハ ンドル中心位置及び 回転角度検出	第7軸
接触センサ	型式 方式 アクチュエータ強度 数量	D5B-5513型 ワイヤ・スプリング型 14.7N 8個	肘部の接触検出	第3軸

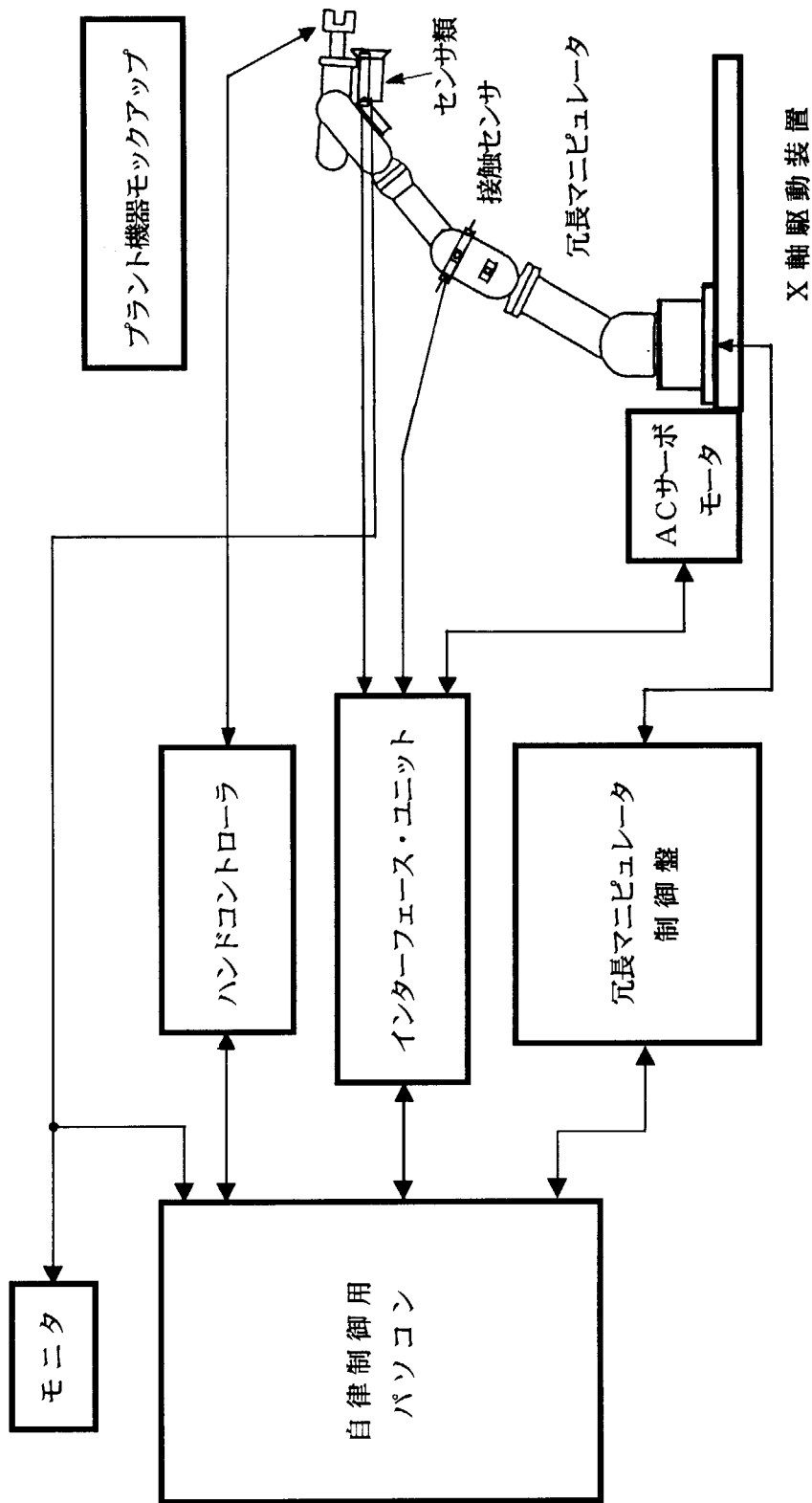


Fig.2.1 ハードウェア・システムの構成図

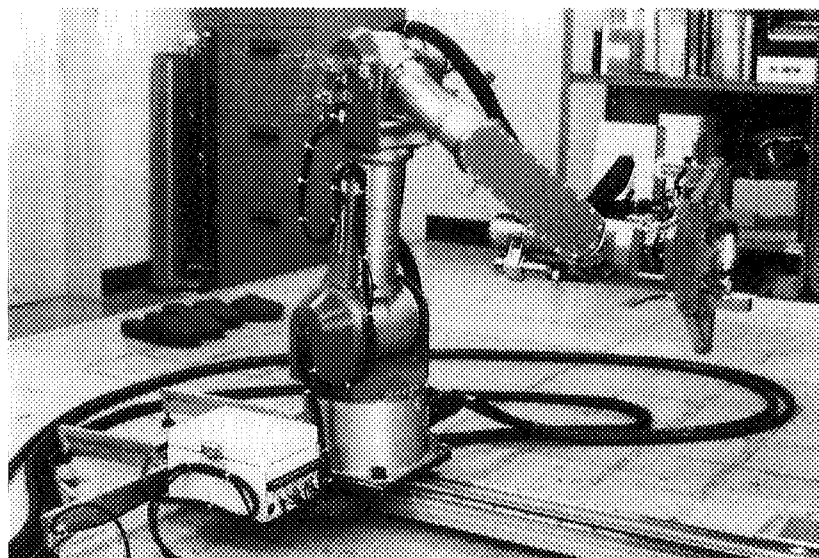


Fig.2.2 冗長マニピュレータの外観

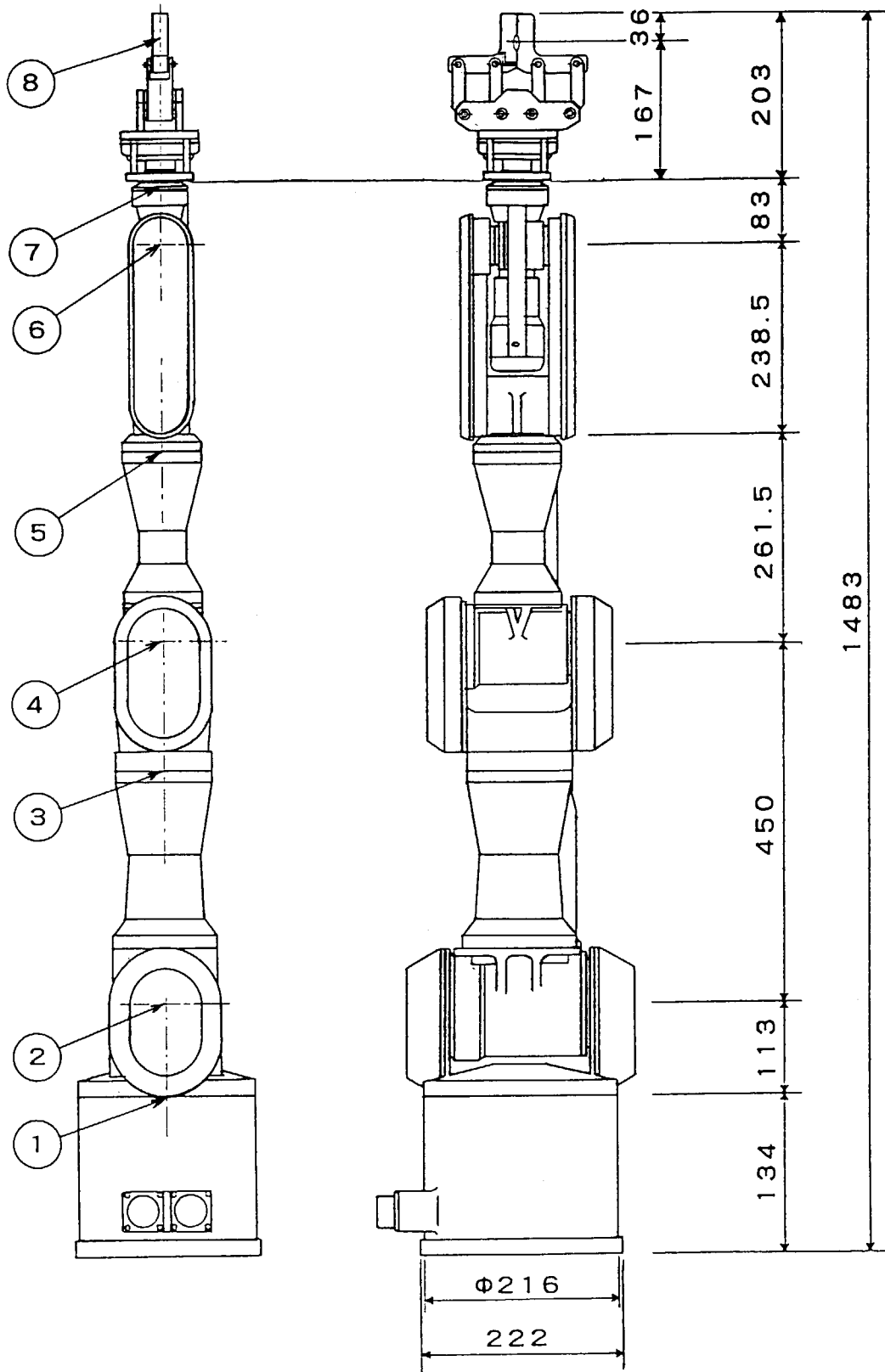
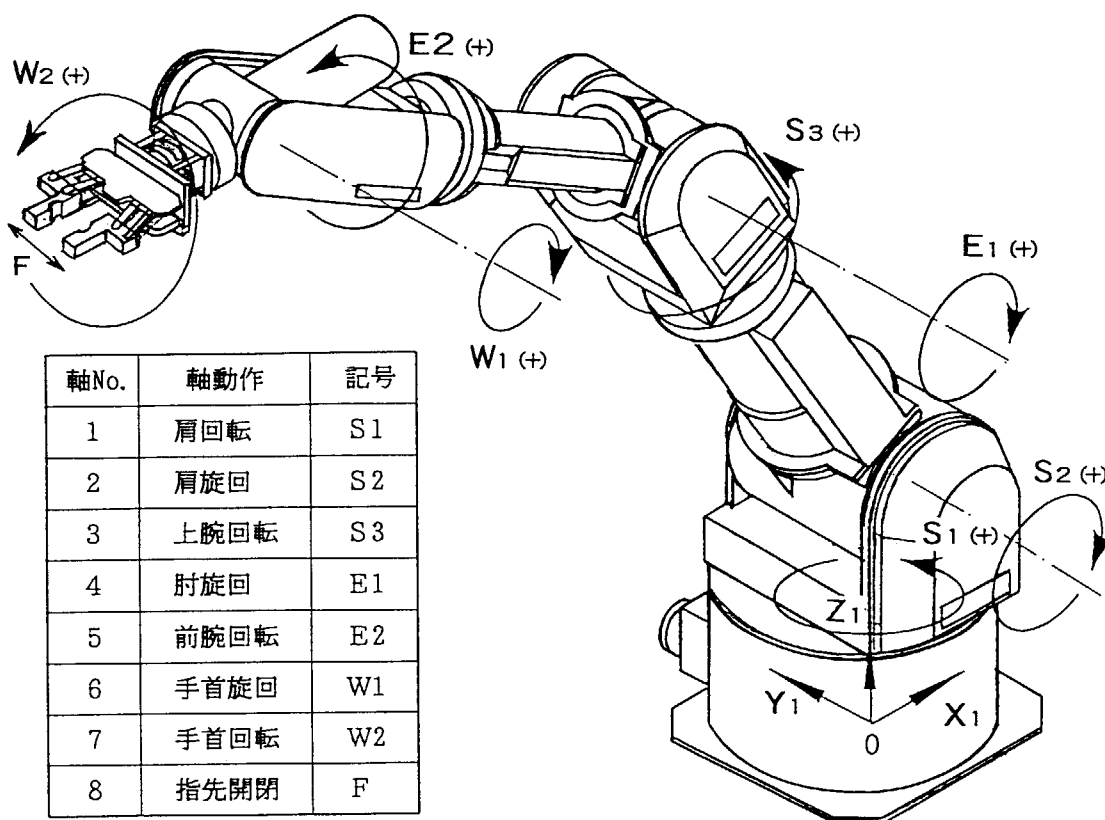


Fig.2.3 冗長マニピュレータの主要寸法図



→(+): 正信号 (正数值) 入力時の動作方向を示す

Fig.2.4 アーム関節の構成図

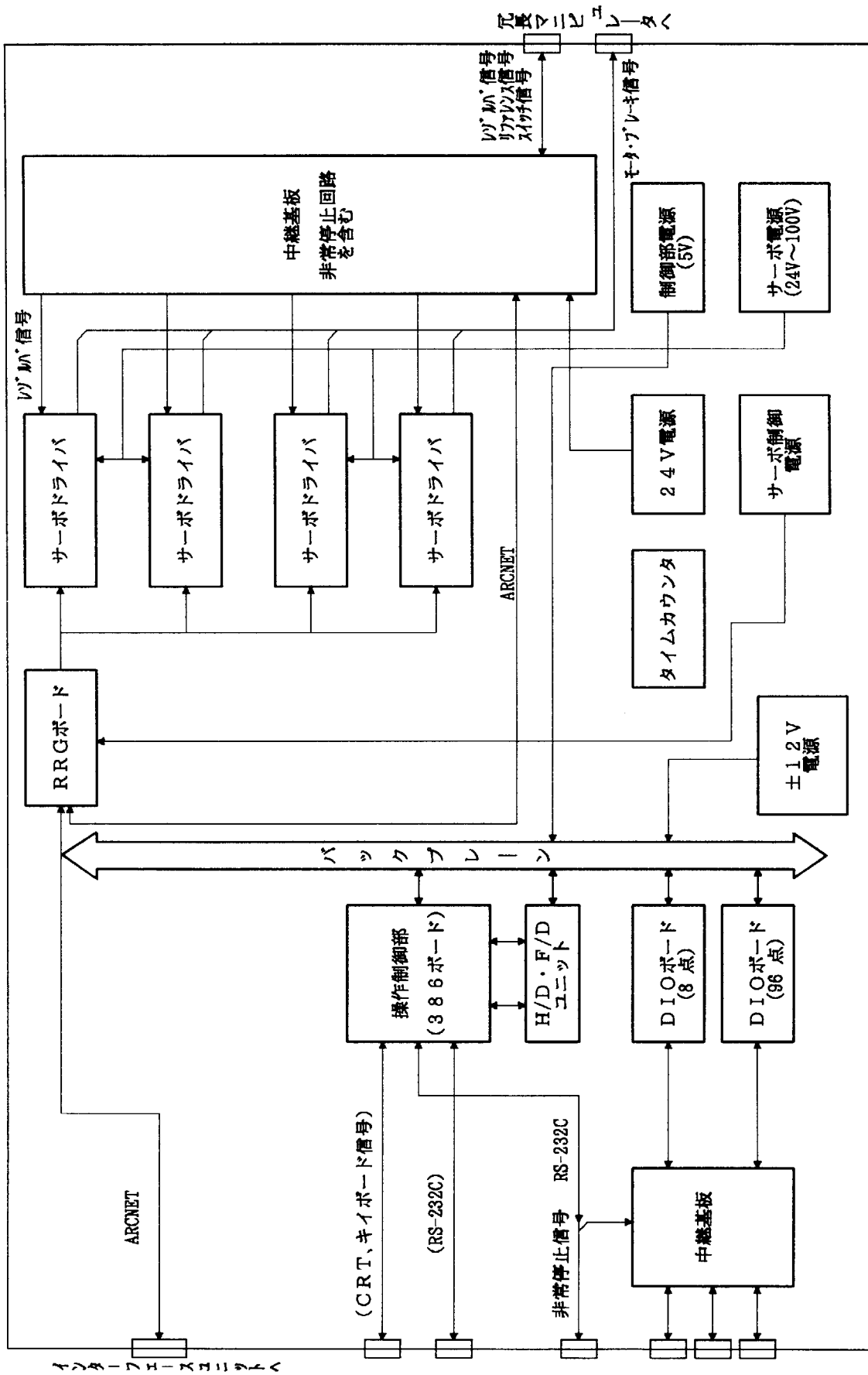


Fig. 2.5 マニピュレータ制御盤の構成図

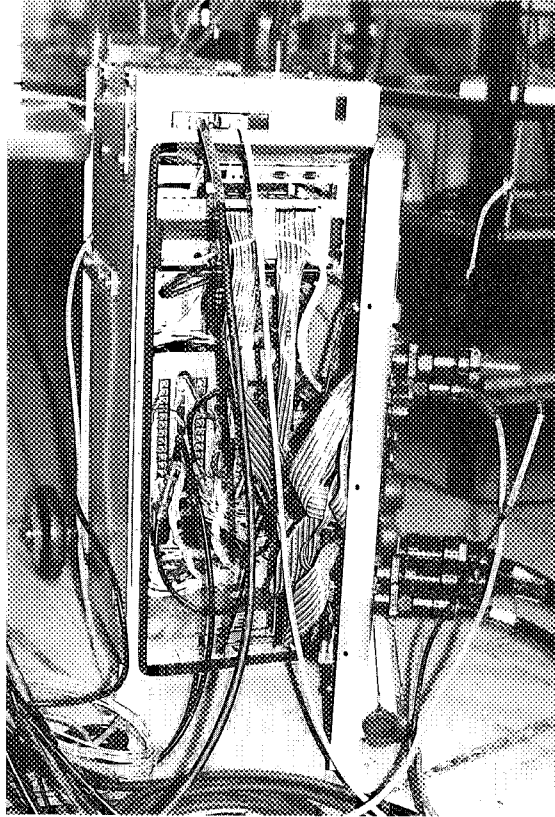


Fig.2.6 マニピュレータ制御盤の外観

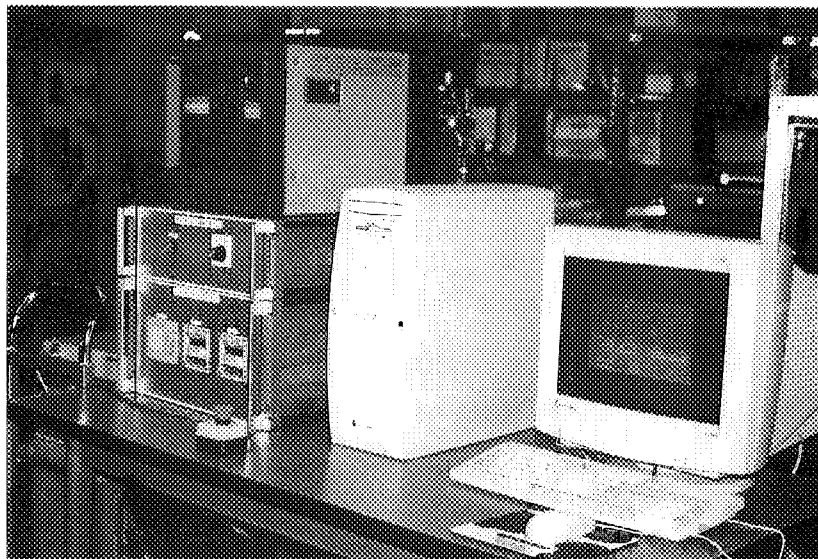


Fig.2.7 マニピュレータ制御系の外観

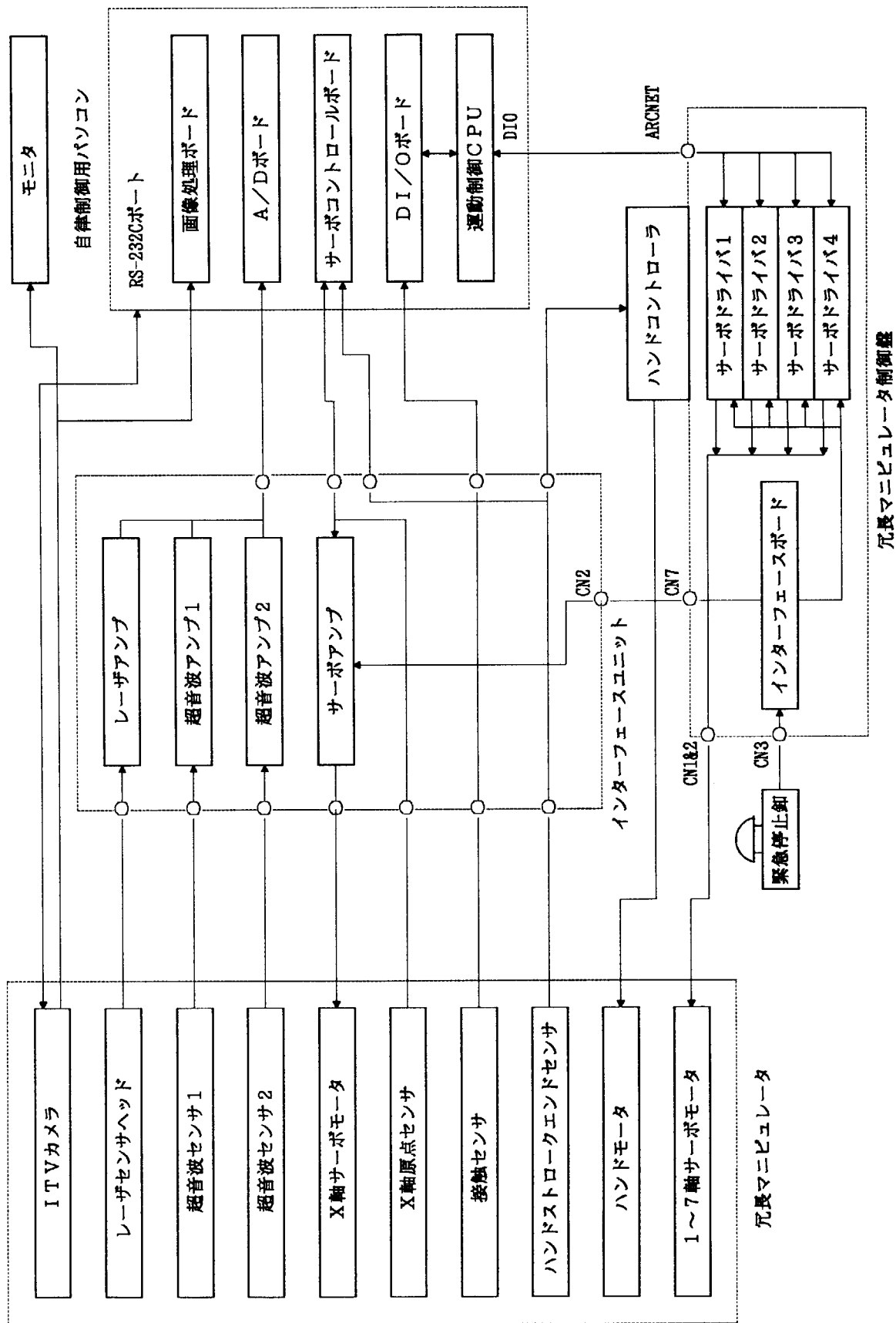


Fig 2.8 冗長マイクロレータ制御系機器間接続図

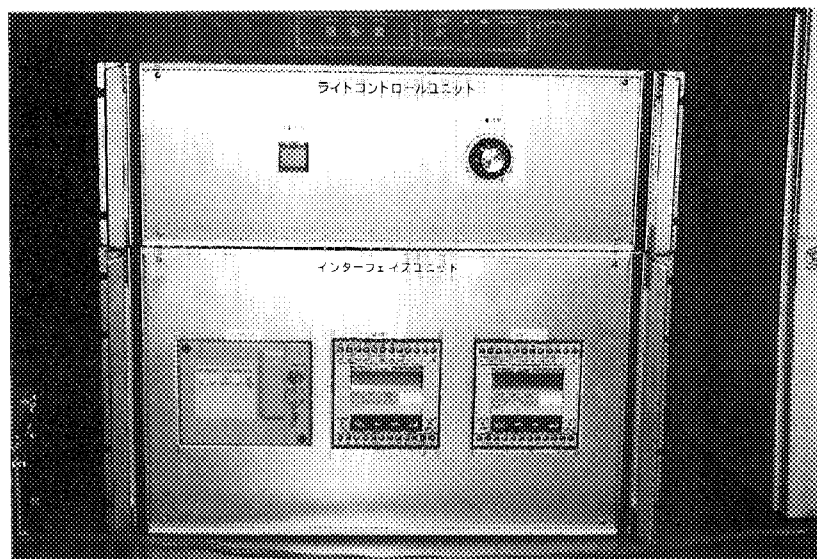


Fig.2.9 インターフェース・ユニットの外観

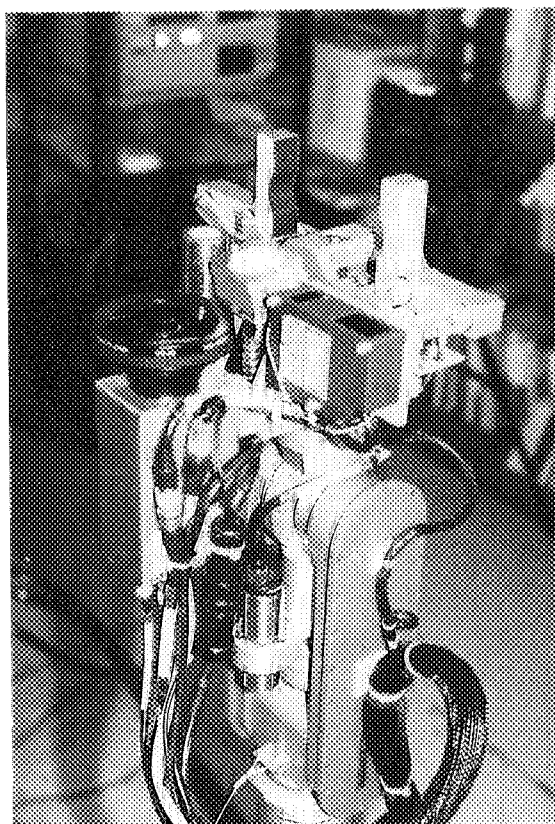


Fig.2.10 マニピュレータの手首付近に取り付けたセンサ類

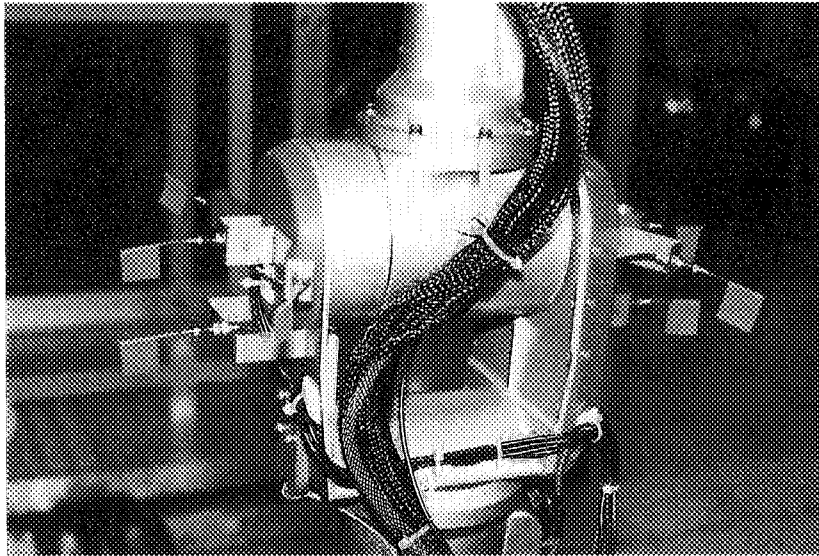


Fig.2.11 第3軸付近（肘部）に取り付けた接触センサ

3. 自律的障害物回避実験

3.1 実験概要

実験の目的は、周辺環境や操作対象物の状態を知覚する各種センサを冗長マニピュレータに取り付けてこれらのセンサから得られる信号を用いてマニピュレータが障害物を回避したり、目的とする作業を自律的に実施できることを確認すること。この実験を通して、各種センサ信号を利用した自律的障害物回避機能を有する遠隔ロボットの有効性を実証すると共に、知能ロボットとして必要な基本的技術を明確にすることである。実験で行った作業は、一次元移動機能を有するX軸駆動装置に冗長マニピュレータを搭載し、狭隘な壁穴を通して壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを冗長マニピュレータによって回転させる作業である。壁や壁穴、バルブ・ハンドル等の位置検出には超音波、レーザ、ITVカメラ等のセンサ信号を利用し、それらの信号に基づいて冗長マニピュレータを自律的に動作させた。

3.2 実験方法

冗長マニピュレータによって実施した作業は、モックアップを用いて狭隘な壁穴を通して壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを回転させたものである。冗長マニピュレータに取り付けた各種センサによって周辺環境状況を確認しながら一連の作業を実施した。冗長マニピュレータをX軸駆動装置に搭載し、そのX軸駆動装置のテーブル位置と冗長マニピュレータ姿勢をセンサ信号に基づいて自律的に調整しながら狭い壁穴に冗長マニピュレータを挿入した。マニピュレータの先端を壁穴に向かって直角に接近させるために、X軸駆動装置と壁との傾き角度(鉛直度)をレーザ・センサを用いて測定し、その傾き角の補正を行った。前面の壁や奥の壁までの距離測定には、超音波センサを用いた。冗長マニピュレータを壁穴に接触しない様に挿入するためには壁穴の中心位置を正確に知る必要がある。その壁穴の中心位置は、ITVカメラからの信号を画像処理することにより求めた。また、バルブ・ハンドルをマニピュレータの指部で把握して回転するために、バルブ・ハンドルまでの距離測定や、バルブ・ハンドルの状態確認(回転角度検出)にもITVカメラを利用した。冗長マニピュレータ並びにX軸駆動装置の制御及び各種センサの信号処理は、すべて自律制御用パソコンで行った。冗長マニピュレータの関節角動作には、冗長マニピュレータ専用で作られた制御ライブラリプログラムを用いた。バルブ・ハンドルの開閉動作は、マニピュレータ第7軸の無限回転機能を使用して連続的に操作が可能であるが、今回の実験においては、第7軸付近にセンサ類を取り付けたためそのケーブル処理に制限があり、バルブ・ハンドルの回転操作を、90°ずつに分割してハンドルのつかみ直しを行った。

Fig.3.1 にプラント機器モックアップの3個のバルブ・ハンドル位置を示す。

3.3 実験内容

プラント機器モックアップの狭隘な壁穴を通して、壁の裏側にあるバルブ・ハンドルをマニピュレータで回転させる作業をセンサ信号に基づいて自律的に実施した。冗長マニピュレータ及びX軸駆動機構の動作概要を次に示す。冗長マニピュレータの動作とX軸駆動装置の動作は、時間

的にシリーズである部分と並列に動作する部分とがある。バルブ・ハンドルの回転操作は、90°ずつ4回、すなわち合計1回転の操作を行った。

障害物回避実験を開始する際は、冗長マニピュレータが基準姿勢(各軸角度=0°)にあり、かつX軸駆動装置が原点復帰状態(X軸=0mm)にあることを初期条件とした。また、自律制御プログラムを実行する際の情報として、壁穴の寸法、バルブ・ハンドルの直径及び厚み、壁穴に対するバルブ・ハンドルの取り付け方向(左、右、上)等のデータを予め計算機に与えておいた。マニピュレータの動作状態は、自律制御用パソコンに接続したCRT上で監視が可能である。実験で行った作業は以下の一連の動作から成っている。

◆作業1：壁穴認識と奥壁との距離計測

マニピュレータの先端を壁方向に向け、壁穴認識と奥の壁までの距離を計測、画像処理により壁穴中心を求めX軸駆動装置前進、マニピュレータを壁穴に挿入する。

◆作業2：バルブ・ハンドルの認識

壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを探す。

◆作業3：バルブ・ハンドル正面へ移動

奥の壁及び手前壁穴との接触を避けるよう冗長マニピュレータを動作、マニピュレータ先端をバルブ・ハンドル正面位置に向ける。

◆作業4：バルブ・ハンドル把持位置へ移動

マニピュレータ先端の指部をバルブ・ハンドルの回転角に合せ、把持位置へ移動する。

◆作業5：バルブ・ハンドルの回転

マニピュレータ先端の指部によりバルブ・ハンドルを回転する。作業前後には、指部の開閉動作を行う。

◆作業6：作業終了位置から基準姿勢まで移動

作業終了位置からX軸駆動装置を原点復帰させると共にマニピュレータ各軸を基準姿勢まで戻す。

次に各作業の詳細を述べる。

3.4 障害物回避作業内容

3.4.1 壁穴認識と奥壁との距離計測(作業1)

自律的障害物回避実験プログラムを開始すると、先ずマニピュレータの先端を壁の方向に向け、ITVカメラで画像を取り込む。次に画像計測処理により壁穴を認識して、X軸駆動装置の移動制御を行うと共に壁穴の中心にマニピュレータを挿入する。この時、超音波距離センサにより奥壁迄の距離を計測する。

Fig.3.2に作業1の概念図を示す。作業ステップの詳細は次の通りである。

(1) 作業開始位置に移動

カメラの視野範囲に壁穴が入る位置にマニピュレータの先端(カメラ位置)を各軸制御機能を使用して移動する。

(2) 壁穴中心位置の認識

画像計測により、壁穴中心位置の認識処理を行い、中心位置とのずれ量を計算により求める。

(3) 壁穴中心にマニピュレータ先端（カメラ中心）移動

画像計測処理によって求めた壁穴中心までのずれ量（手先座標系における偏差 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ）だけマニピュレータ先端を移動。この時、壁穴迄の距離がレーザセンサの計測範囲に入る様 X 方向の位置を調節する。

(4) X軸駆動装置レールと壁穴との傾きを修正

マニピュレータ先端を Y 座標（左右）方向に移動し、計測可能な左右各一点の位置において、壁迄の距離を計測し、Y 座標移動量と壁までの距離から壁とレール方向間の傾きを求めてそれを補正する。Fig.3.3 にレール傾き補正の概念図を示す。

(5) 壁穴にマニピュレータを挿入

必要があれば(2)～(4)を繰り返し、X軸駆動装置の移動制御によって壁穴にマニピュレータを挿入する。画像処理が視野範囲外になった所から、手先座標 Z 方向の姿勢を保持し、距離センサによる奥壁迄の距離計測を繰り返しながらマニピュレータを挿入する。W1 軸原点が充分壁穴を通過した位置で作業 1 を終了する。

3.4.2 バルブ・ハンドルの認識（作業 2）

マニピュレータを壁穴に挿入した後、画像処理計測により、壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを探す作業を実施する。Fig.3.4 に作業 2 の概念図を示す。

(1) 指部先端（カメラ）をバルブ・ハンドルの方向に向ける。

マニピュレータの先端 3 軸（E2, W1, W2）を各軸制御モードで操作し、マニピュレータの指部先端をバルブ・ハンドルの方向に向ける。

(2) バルブ・ハンドルの認識と位置姿勢の補正

カメラ画像の中から、バルブ・ハンドルのみを抽出するため二値化処理を行い、背景を削除する。次に、そのバルブ・ハンドルとマニピュレータ先端との傾きを求めて、その補正を行う。バルブ・ハンドル画像の中心（重心）がカメラ画像の中心になる様マニピュレータ手先座標系に対して補正量（ $\Delta X, \Delta Y, \Delta \text{roll}$ ）分手首方向を移動する。Fig.3.5 にマニピュレータ手先方向補正の概念図を示す。

3.4.3 バルブ・ハンドル正面へ移動（作業 3）

ここでは、作業 1 と作業 2 の画像処理で得られた情報（制御目標位置及び姿勢）と予め与えたバルブ・ハンドル把持方向パラメータをもとに、マニピュレータ先端をバルブ・ハンドル正面位置へ移動。この時、センサからの各種障害物の情報に対してリアルタイムに軌道を修正する。Fig.3.6 に作業 3 の概念図を示す。

(1) バルブ・ハンドル把持準備位置姿勢を求める

バルブ・ハンドル把持方向パラメータに作業 1 及び作業 2 で得られたずれ量を加算して把持準

備姿勢を算出する。作業1で得られたずれ量は、X軸駆動装置レールと壁穴との傾き ($\Delta Roll$) であり、作業2で得られたずれ量は、前面の壁とバルブ取り付け位置のずれ量 ($\Delta Roll$) である。この情報をもとにバルブ・ハンドルとマニピュレータとの相対位置関係を計算する ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)。Fig.3.7 にバルブ・ハンドル把持準備位置関係図を示す。

(2) バルブ・ハンドル把持準備位置姿勢に移動

X軸駆動装置を制御すると共にマニピュレータ先端位置姿勢を制御することにより、バルブ・ハンドル把持準備位置姿勢に移動。この時同時に次の処理を実行する。

① E 1 軸の限界チェック及び姿勢の変更

マニピュレータの先端位置姿勢を変えない制御モードで動作するとE 1 軸が0 deg を通過するため姿勢の変更 (+ から - への変更) 処理が必要である。

② 接触センサ (左右方向) ONによる冗長軸 (S 3) の制御

右側及び左側バルブ・ハンドルを操作する場合は、動作中にマニピュレータの肘部が壁穴に接触する恐れがある。接触した場合には冗長軸 (S 3) を制御する事により、それ以上の接触を回避する。

③ 接触センサ (上下方向) ONによるベース座標系 Z 方向位置制御

上側バルブ・ハンドルを操作する場合は、動作中にマニピュレータの肘部が壁穴に接触する恐れがある。接触した場合には冗長軸 (S 3) を制御する事により、それ以上の接触を回避する。

④ W 1 軸の後部干渉におけるベース座標系 X 方向位置制御

作業1で計測した奥壁迄の距離とマニピュレータの先端位置姿勢から計算したW 1 軸の後部の位置により、干渉する可能性があれば、ベース座標系 - X 方向に回避動作を実行する。

(3) バルブ・ハンドルの中心位置を画像処理により認識

バルブ・ハンドルの中心位置を画像計測し、中心位置迄のずれ量を計算する。

(4) バルブ・ハンドルの中心位置へマニピュレータ先端を移動

バルブ・ハンドルの中心位置へマニピュレータ先端 (カメラ中心位置) を移動する。移動量は、手先座標系における $\Delta X, \Delta Y$ である。

3.4.4 バルブ・ハンドルの把持位置へ移動 (作業4)

画像処理によってバルブ・ハンドル把持位置の回転角度を算出し、マニピュレータの指部をバルブ・ハンドルの把持位置姿勢に合わせる。Fig.3.8 に作業4の概念図を示す。

(1) バルブ・ハンドルの回転角度を画像処理によって認識

バルブ・ハンドル正面の画像から把持位置のずれ角度を算出する。

(2) バルブ・ハンドル把持角度にマニピュレータW 2 軸を回転 ($\Delta W2$)

(3) バルブ・ハンドル把持位置へマニピュレータの指部を移動

カメラ中心とマニピュレータの指部先端位置のオフセット分を移動し、さらにバルブ・ハンド

ルまでの距離 (手先座標系 ΔZ) を移動させる。

3.4.5 バルブ・ハンドルの回転 (作業5)

マニピュレータ先端の指部でバルブ・ハンドルを把持し回転させる。Fig.3.9 に作業5の概念図を示す。

(1) 手先座標系において+Z移動

マニピュレータの手先座標系において ΔZ 分動作させ、把持位置に移動させる。

(2) マニピュレータの指部閉

指部を閉じバルブ・ハンドルを把持する。

(3) バルブ・ハンドルの回転 (バルブ開閉)

マニピュレータのW2軸を $\Delta(90^\circ + \alpha) \cdot \Delta(-\alpha)$ 回転して、バルブ・ハンドルの閉動作を行う。

(4) マニピュレータの指部開

指部を開きバルブ・ハンドルの把持を解除する。

(5) 手先座標系において-Z移動

マニピュレータの手先座標系において $\Delta(-Z)$ 分移動させ、把持位置から離脱させる。

(6) マニピュレータのW2軸回転

マニピュレータのW2軸を $\Delta(-90^\circ)$ 回転して、バルブ・ハンドルの把持位置に移動させる。

(1)~(6)を指定した角度 (今回の実験では 360°) に到達するまで繰り返す。

3.4.6 作業終了位置から基準姿勢まで移動 (作業6)

X軸駆動装置並びにマニピュレータを制御することにより、作業終了位置から基準姿勢まで戻す。

(1) 作業1~6を実施中に自動的に必要な帰路のデータを取得し、逆方向にプレイバック制御を実施することにより基準姿勢に戻す。また、必要であれば操作者がキー操作をすることにより任意の位置から教示データの取得を開始できる。

3.5 自律的障害物回避プログラムの構成

本ソフトウェア・システムは、X軸駆動装置並びにマニピュレータ指部を駆動する単体操作プログラム、冗長マニピュレータの各軸を駆動する冗長マニピュレータ単体操作プログラム、自律的障害物回避実験を行うための障害物回避プログラムから構成される。これらのプログラムは、それぞれマンマシン制御部、I/Fライブラリ部、ISA用ドライバ部から構成される。各プログラムはWINDOWS95対応のMS Visual C++コンパイラを用いて開発した。また、障害物回避プログラムの中で、運動制御CPUボード、A/Dボード及び指部モータコントロールボードをアクセスするためのリアルタイム・デバイスドライバとしてWinRT(ツールクラフト社製)を使用した。

3.5.1 単体操作プログラム

単体操作プログラムは、(1) X軸駆動装置の位置決め制御機能、(2) 指部開閉機能、(3) センサ値入力機能を備えている。Fig.3.10 に単体操作プログラムの構成図を示す。単体操作プログラムのマンマシン制御部は、単体操作画面をCRT上に表示し、キーボードあるいはマウスを使用して各種の数値やパラメータを入力したり、各単体動作を指令する部分である。Fig.3.11 に単体操作画面の表示例を示す。I/F ライブラリ部は、X軸駆動装置並びにマニピュレータ指部を駆動するライブラリ、距離センサ入力ライブラリ及び接触センサ入力ライブラリから成っている。ISA用ドライバ部は、ISAバスアクセス用のドライバであり、WinRTを使用した。Table 3.1 に単体操作プログラムの機能詳細を示す。

3.5.2 冗長マニピュレータ単体操作プログラム

冗長マニピュレータ単体操作プログラムは、一つの独立したプログラムであり冗長マニピュレータ単体の動作試験を実施しやすい様に、いろいろなマンマシンインターフェース機能を備えている。このプログラムは、マンマシン制御部、I/F ライブラリ部及びISA用ドライバ部から構成されている。Fig.3.12 に冗長マニピュレータ単体操作プログラムの構成図を示す。マンマシン制御部は、パラメータ設定画面、運転モード画面、教示データ編集画面から構成され、マニピュレータ各軸の制御条件をキーボードから入力したり、各軸を任意に操作することができる。Fig.3.13 に冗長マニピュレータ単体操作画面を、Fig.3.14 にパラメータ設定画面の表示例を示す。マンマシン制御部の3つの操作画面は、Visual Basic で作成されている。I/F ライブラリ部は、冗長マニピュレータ制御ライブラリ(PALIB.DLL)であり、Visual C++でコンパイルされている。冗長マニピュレータ制御ライブラリは、C言語におけるDLL(Dynamic Link Library)として作成されており、操作画面プログラムと実行時にリンクされる。

3.5.3 自律的障害物回避プログラム

冗長マニピュレータは、高度な作業性を確保するために通常のマニピュレータ（非冗長マニピュレータ）より自由度が1軸多い構造をしており、障害物を回避するのに有利な特性を備えている。この1自由度多い冗長マニピュレータを制御するために、高度な演算手法に基づく冗長軸制御アルゴリズムを使用した。周辺環境状況を把握して障害物を回避しながら目的とする作業を実施するために、マニピュレータに取り付けたセンサ信号を高速で読み込み演算処理を行った。自律的障害物回避プログラムは、クロック周波数 200MHz の性能を備えた高速度パソコンを利用して開発実行した。マニピュレータの動作とX軸駆動装置の動作は、部分的にシーケンス動作方式を採用しているが、作業環境との干渉を避けるために可能な範囲で同時制御（並列動作）を行った。Fig.3.15 に自律的障害物回避プログラムの構成図を示す。Fig.3.16 に障害物回避プログラム画面の表示例を示す。

(1) 冗長軸制御アルゴリズム

マニピュレータの周りに障害物があり、作業中にマニピュレータの先端や関節がその障害物と干渉する場合、障害物を避けた軌道を自動生成したり、マニピュレータの冗長性を利用してある程度干渉を回避することが可能である。本実験においては、マニピュレータ先端に取り付けたセ

ンサによって障害物を検出し、マニピュレータの軌道を変更して障害物を回避する方法とマニピュレータの肘の部分に接触センサを取り付け、肘の部分に障害物と干渉した場合、冗長性を利用して障害物を回避させる方法について動作試験を行った。肘の部分に障害物と干渉した場合、先端の位置姿勢の指令値を止めて、冗長性を有するS3軸を+又は-方向に回転させる。この時マニピュレータがどの方向に傾くかはその時のマニピュレータの姿勢に依存するので一概には決まらないが、各軸の変化から肘の位置を計算し障害物から離れる方向を定める。冗長マニピュレータは、ある先端位置姿勢を一定方向に保った場合でもマニピュレータ姿勢が無数存在する。マニピュレータの各軸（各関節）に対する回転速度指令は、次の計算式を解いて求めた。

$$\dot{\theta} = J^+ \dot{\gamma} + (I - J^+ * J) * \bar{\xi}(\theta) * Kp \quad (3.1)$$

但し、 $\dot{\theta}$: 関節角速度の一般解 J : ヤコビ行列
 J^+ : 擬似逆ヤコビ行列 $\dot{\gamma}$: 先端位置姿勢速度
 $J^+ \dot{\gamma}$: 特殊解 $(I - J^+ * J)$: 同次解
 $\bar{\xi}(\theta) * Kp$: 評価関数 $(I - J^+ * J) * \bar{\xi}(\theta) * Kp$: 同次項

$\dot{\gamma}$ が与えられた軌道から求められる先端位置姿勢速度で、その値と擬似逆ヤコビ行列 J^+ との積 $J^+ \dot{\gamma}$ が特殊解であり、マニピュレータにとって最も動き易い $\dot{\theta}$ が求められる。右辺第1項のこの特殊解により先端の位置姿勢が一意に定まる。冗長マニピュレータは、先端位置姿勢を一定に保ったままマニピュレータの姿勢を変化させることができる。右辺第2項がマニピュレータ姿勢を変化させる部分である。同次解は一定であるため、実際には7要素のベクトル $\bar{\xi}(\theta)$ と正のスカラ変数 Kp との積で表わされる評価関数が重要な働きをする。ベクトル $\bar{\xi}(\theta)$ は、マニピュレータ姿勢の方向性を表す。例えば全関節をプラス方向に寄ったマニピュレータ姿勢を実現させたい場合には、ベクトル $\bar{\xi}(\theta)$ にプラスの数値を入れれば良い。スカラ変数 Kp は、その方向性に対する倍率を決める数値であり、大きければ大きいほどマニピュレータ姿勢をこの場合プラス方向に大きく変移させる。冗長マニピュレータの制御においては、Fig.3.17に示すように各関節ごとに横軸が軸角度を表わし、高さ1で上に凸形の2次関数を描き、現在角度における曲線の傾きを $\bar{\xi}(\theta)$ としている。第3関節の2次曲線の中心軸を移動させることによりマニピュレータの姿勢を望む方向に向けて障害物回避動作を行っている。具体的には、障害物の方向を知覚するために、第3関節の2次曲線の中心軸を徐々にプラス方向に移動し、障害物までの距離変化を観測する。この時観測距離が広がる場合には、そのまま第3関節の2次曲線の中心軸を干渉しなくなるまでプラス方向に移動し続ける。もしも、観測距離が縮まる場合には、第3関節の2次曲線の中心軸をマイナス方向に干渉しなくなるまで移動し続ける。

(2) 画像処理アルゴリズム

今回の実験において障害物や作業対象物を明確に判別するために、色彩によって物体の識別を行った。すなわち、物体の検出精度を向上させるために、ITVカメラからの映像信号を画像処理し、色調差を利用して物体を識別する方法をとった。物体の識別を明確にするため、狭い壁穴の周辺には、赤色のテープを、バルブ・ハンドルには緑のテープを貼り付けた。実験の開始に際しては、その着色部分に対して色相の特徴データを求め、それを標準サンプル・データとした。

a) 色相キャリブレーション (色相分布の計算)

ITVカメラで画像を取り込み、色調の標準サンプルを求めたい範囲をCRT画面の上でマウスを使って指定する。その範囲について色相分布を求める。Fig.3.18 に色相分布を求める場合の概念図を示す。ピーク位置を基準とし、連続して頻度がN以上である範囲の色相データについて平均値 μ 、標準偏差 σ を求め、抽出する色の特徴データとする。平均値 μ が指定色の基準色相値から大きく外れている場合は、画像の取り込みや、範囲の設定をやり直す。

b) 壁穴の検出

① 壁穴の認識方法

ITVカメラにより壁穴の画像を取り込み、標準サンプル・データに対する比率 h' を(3.2)式によって求めた。

$$h' = \exp \left[- \frac{(h(i, j) - \mu)^2}{2 \sigma^2} \right] \dots\dots\dots (3.2)$$

$$[0 \leq h' \leq 1]$$

但し $h(i, j)$: 色相データ
 μ : 色相
 σ : 標準偏差

h' が1.0に近い程、すなわち平均値に近い程、取り込んだ色相データは、標準サンプルの色に近いことを意味する。したがって、あるしきい値 th を設定し、それ以上の比率 h' を持つ色相データを有効データとすることによって、指定した色の部分のみを抽出することができる。

② 画像ノイズの除去

(3.2)式によって求めた色相画像に対して画像ノイズの除去を行い、認識精度をさらに向上させた。その方法は、孤立点除去処理と穴埋め処理であり、前者は、周囲8近傍の処理データを検索し、1つも有効データが見つからない場合にはそのデータをノイズとして消去した。後者は、(3.2)式の処理で無効となったデータに対して、その周囲8近傍を検索し、すべてが有効データであった場合に、そのデータを有効データとする。なお、色相値は、周囲8データの平均値で表わしている。

③ オブジェクトの抽出

ノイズ除去を行った画像に対してラベリング処理を行い、各オブジェクトの面積及び重心を計算した。次に、ある定めたしきい値以上の面積をもつオブジェクトを有効データとして抽出した。壁穴を検出している場合には、この時点でFig.3.19に示すような画像が得られる。

④ 壁穴位置の検出

ラベリング処理を行って得られた画像に対して壁穴データとのテンプレートマッチングを行い、壁穴の位置を決定した。まず、有効データ全てに対する重心位置を計算し、この位置を基準としてFig.3.20に示すようにテンプレートマッチングを行う処理領域を4箇所設定した。各処理領域で対応するテンプレートとの積和演算を画素単位で行い、それぞれの領域内で最大と

なるデータを壁穴の4隅の位置として決定する。壁穴の中心位置は、Fig.3.21に示すように4隅の対角線の交点位置と見なした。なお、壁面までの距離は、検出された壁穴の画像座標上での対角線の長さの平均値を用い、距離変換テーブルを参照して算出した。距離変換テーブルは、異なる距離（2点）において壁穴の画像を取り込み、画像上における壁穴の大きさと壁穴までの距離との相関関係を予め実験的に求めたキャリブレーション用のデータ・テーブルである。

c) バルブ・ハンドルの認識

バルブ・ハンドル操作を行うため、バルブ・ハンドルの位置及びその状態を検出する。

① バルブ・ハンドル側面からの認識

バルブ・ハンドル側面からの距離、高さ及び姿勢のずれ（カメラ光軸まわりの回転ずれ）を求める。まず、壁穴の検出と同じ方法により画像を取り込み、オブジェクトの抽出を行い Fig.3.22に示すような画像データを求めた。同図は、バルブ・ハンドルを真横ではなく、僅かに斜めから観測した場合の例を示しているが、得られた画像の有効データからその重心位置を求め、それをハンドル位置とする。カメラとバルブ・ハンドル位置とのずれ量は、カメラからバルブ・ハンドルまでの距離をある一定距離と仮定し、距離変換テーブルを用いて算出した。ここで算出した距離のずれ量に応じてマニピュレータ先端を移動する。こうして仮定した距離を修正しながら画像処理を繰り返し Fig.3.23に示すようにバルブ・ハンドルが中心となるカメラ位置を求めた。次に、得られた画像に対してバルブ・ハンドル・データのモーメント特徴を (3.3)式により求め、バルブ・ハンドルの傾き角度 θ を (3.4)式で求めた。

$$M(p, q) = \sum_i \sum_j (i - i_g)^p (j - j_g)^q f(i, j) \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

ここで、 M : モーメント
 $f(i, j)$: 2値化(0,1)画像
 i_g, j_g : 重心座標

$$\theta = (1/2) \tan^{-1} \{ 2 M(1, 1) / M(2, 0) - M(0, 2) \} \quad \text{-----} \quad (3.4)$$

ここで、 $\tan \theta$: 主軸方向

主軸方向にバルブ・データを Fig.3.24に示すように投影し、バルブ・ハンドルの幅Wを求める。このWから距離、変換テーブルを用いてバルブ・ハンドルまでの距離を算出した。

② バルブ・ハンドル正面からの認識

バルブ・ハンドル正面の中心位置のずれ及びハンドルの回転角度を求めた。まず、壁穴の検出と同じ方法により画像を取り込み、オブジェクトの抽出を行い Fig.3.25(a)に示すような画像データを求めた。ラベリングしたデータのうち、面積の大きい上位4つまでの画像を有効データとし、この4つの有効データの重心をハンドル中心位置とした。カメラとバルブ・ハンドル中心位置とのずれ量は、距離変換テーブルを用いて算出した。次に Fig.3.25(b)に示すようなテンプレートを用いて入力画像とのパターン・マッチングを行い、ハンドルの回転角度を求めた。画面の歪によ

る計算結果のばらつきを少なくするために、テンプレートの有効データ領域を2個にした。バルブ・ハンドルを正面から認識した場合、角度を求める段階では、中心位置は既に判っているので、それを中心にテンプレートを0°から90°まで回転させて、N°ピッチ毎にアフィン変換を用いて入力画像との積和演算を行った。そして、その相関値が最大となった角度をバルブ・ハンドルの回転角度 θ とした。但し、取り込んだ画像は、横方向に圧縮されているため、(3.5)式でその補正を行った。

$$\theta = \tan^{-1} (n \cdot \tan \theta' / m) \quad \text{..... (3.5)}$$

ここで $m : n$: 縦横の圧縮比
 θ' : マッチングで得られた回転角度
 θ : 補正後の回転角度

Fig.3.26 に相関値（積和値）からバルブ・ハンドル回転角度を求める方法の概念図を示す。

3.5.4 ソフトウェア・システムのディレクトリ構造

障害物回避プログラムを開発した環境及びそのプログラムを動作させた環境を Table3.2 のディレクトリ構造に示した。障害物回避プログラム、単体操作プログラム及び画像処理プログラムは、Microsoft Visual C++を用いてコンパイルした。、実行に際しては、センサ信号やデジタルI/O信号処理に WinRT 等のリアルタイム処理用のデバイス・ドライバを使用した。これらのプログラム開発実行は、すべて Windows95 の制御下で行った。画像入力プログラムには、ITEX-IC for IC-PCI (Ver.2.7.2.0) for Windows ライブラリを使用し、画像処理プログラムには、Aphelion (Ver.2.2)ライブラリを使用した。

3.6 実験結果と考察

冗長マニピュレータを壁穴の狭い隙間から挿入し、自律的に障害物を回避しながら壁の裏側にあるバルブ・ハンドルを操作する実験を行った。Fig.3.27~Fig.3.34 に実験中のマニピュレータの様子を写真で示す。Fig.3.27 は、X軸移動装置のレールと壁穴を検出中の冗長マニピュレータの外観を、Fig.3.28 は、マニピュレータを壁穴に挿入して行く様子の写真である。Fig.3.29 は、バルブ・ハンドル(No.2)の位置を真横から検出中の写真であり、Fig.3.30 は、奥の壁との距離を計測し壁との接触を避けながら肘部をうまく壁穴に挿入したところである。Fig.3.31 は、マニピュレータの手首を左側のバルブ・ハンドル(No.2)に近づけた写真である。この位置へ移動する際マニピュレータの肘部に取り付けた接触センサが何らかの障害物に接触した場合には、その障害物を避ける方向に肘を移動させる。Fig.3.32 は、肘部が障害物に接触した場合の障害物を回避する様子を連続的に示した写真である。Fig.3.32(a)は、マニピュレータの動作範囲内に予期せぬ障害物（この場合移動式板状の障害物）が侵入し、接触直前の状態であり、Fig.3.32(b)は、接触センサがこの障害物に接触した瞬間の写真である。Fig.3.32(c)は、接触センサからの信号を受け、冗長軸制御機能を利用して肘部を障害物から遠ざける回避動作を行った場合の写真である。Fig.3.33 は、バルブ・ハンドルの中心位置やハンドルの角度を検知しているところであり、Fig.3.34 は、バルブ・ハンドルを把握して回転動作を行っている写真である。

この実験の結果、冗長マニピュレータの使用によって、狭い空間を通して通常のマニピュレータ（関節構成6軸以下のもの）では操作不可能な位置の作業をセンサ信号に基づいて自律的に実施できることが確認できた。今回の実験において、システム全体の動作の再現性は極めて高く、かつ安定に動作した。しかし、実験初期においては、I T Vカメラの画像入力処理段階において、照明の条件などにより、取り込んだ色調画像にばらつきが生じ、位置制御に数 cm 程度の誤差を生じる場合があった。これに対しては、色相ティーチングを厳密に行うとともに、計算に使用する色相データ範囲を決めるしきい値を調整することにより、ばらつきを抑え検出位置精度を向上させることができた。最終段階における平均的な検出位置精度は、 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内であった。

冗長マニピュレータの関節は、第5軸 (E2) の前腕回転動作に冗長性を持たせている。Fig.3.32 に示した様に、バルブ・ハンドル (No.2) の中心にマニピュレータ先端を接近させる動作中に、肘の部分が障害物に接触した場合は、この冗長軸の特性を生かし先端位置姿勢を変化させないで肘部を障害物から遠ざける回避動作が自律的に行われることを確認した。

実験において、マニピュレータ作業位置の移動用にX軸駆動装置を使用した。この一次元の移動機能により、マニピュレータの広範な動作範囲が確保され優れた作業性を発揮することができた。このハードウェア・システム全体では、先端の把握部を含めると9自由度の動作機能を有するマニピュレータ・システムであると言える。壁穴にマニピュレータを挿入して行く場合、壁穴や壁穴奥にある壁との距離を計測し、干渉を避けながらマニピュレータを操作する必要があり、X軸駆動装置との連係動作が不可欠である。この点においても、センサ信号を有効に利用し、障害物に接触することなく作業を遂行することができた。

壁穴やバルブ・ハンドルの位置検出に、I T Vカメラと画像処理回路を使用した。1回の画像処理に、作業内容によってばらつきがあるが13~40秒程度の時間を必要とした。今後、いろいろな作業に現実的に適用するためには、更にこの処理時間を短縮する必要があり、画像処理手法やそのハードウェア・システムについて更に技術的な検討を加える必要がある。また、壁穴やバルブ・ハンドル形状の検出精度を高めるために今回は、赤と緑のテープをそれぞれの物体に貼り付けた。これは、物体を確実に検出するためには極めて有効な方法であった。しかし、プラント機器のおかれている現実的な環境条件を考慮すると、テープ等を貼らなくとも確実に物体の存在やその形状を認識できるような優れたセンサ・システムの開発を行う必要がある。そして、各種の環境知覚センサ信号処理システムと融合させることにより、さらに高度で現実的な作業機能を有する自律的知能ロボットを構成することが可能であると考えられる。

Table 3.1 単体操作プログラムの機能

項 目	機 能
X軸駆動装置位置決め制御機能	<p>基本動作 原点復帰動作 移動速度の設定 (mm/s) 位置制御 (指定した移動量に基づき動作)</p> <p>状態表示 X軸駆動装置の制御状態 X軸駆動装置の位置 X軸駆動装置原点位置信号のON/OFF状態</p>
指部制御機能	<p>基本動作 原点復帰動作 移動速度の設定 (mm/s) 位置制御 (指定した移動量に基づき動作) 開/閉制御 (指定した方向に動作)</p> <p>状態表示 指部の制御状態 指部の開閉位置 (mm) 指部原点位置信号のON/OFF状態</p>
センサ値入力機能	<p>基本動作 距離センサ、接触センサの信号取り込み</p> <p>状態表示 レーザ式距離センサの測定距離 (mm) 超音波式距離センサ1の測定距離 (mm) 超音波式距離センサ2の測定距離 (mm) 接触センサのON/OFF状態</p>

Table 3.2 ソフトウェア・システムのディレクトリ構造

ディレクトリ構造	開発環境・プログラム名
<pre> C:¥ ├── WinRT ├── Msdev ├── WinPA │ ├── Src │ │ ├── lib │ │ ├── Wr un │ │ ├── Wpr m │ │ └── Warg │ └── include ├── Windows │ ├── system │ │ ├── PALIB.DLL │ │ ├── PALIB.LIB │ │ ├── SCLIB.DLL │ │ └── ADLIB.DLL ├── Ar │ ├── Projects │ │ ├── AUTO │ │ ├── MANUAL │ │ └── LIB │ │ ├── AUTO.EXE │ │ ├── MANUAL.EXE │ │ ├── SC │ │ ├── AD │ │ ├── IM │ │ └── imteach │ └── inc ├── Icp ci │ ├── Devhost │ └── Win95 │ ├── Bin │ └── Aph ├── Aphelion │ ├── Developer │ └── include │ └── lib ├── PA └── ARM </pre>	<p>リアルタイム・デバイス・ドライバ Microsoft Visual C++コンパイラ WinPAライブラリ 冗長マニキュレータ単体操作プログラム 冗長マニキュレータパラメータ設定プログラム 冗長マニキュレータ教示データ編集プログラム WinPAライブラリ・ヘッダファイル</p> <p>PAライブラリ(動作時必要) PAライブラリ(開発時必要) SCライブラリ ADライブラリ</p> <p>障害物回避プログラム開発・実行ディレクトリ 単体操作プログラム SCライブラリ ADライブラリ 画像処理アルゴリズム開発ディレクトリ 色相テーパーチング インクルードファイルディレクトリ (システム共通ヘッダファイル) 画像入力ライブラリ</p> <p>画像処理ヘッダ 画像処理ライブラリ PAライブラリ(DOS版,ISAバス対応) 操作支援プログラム(DOS版,ISAバス対応)</p>

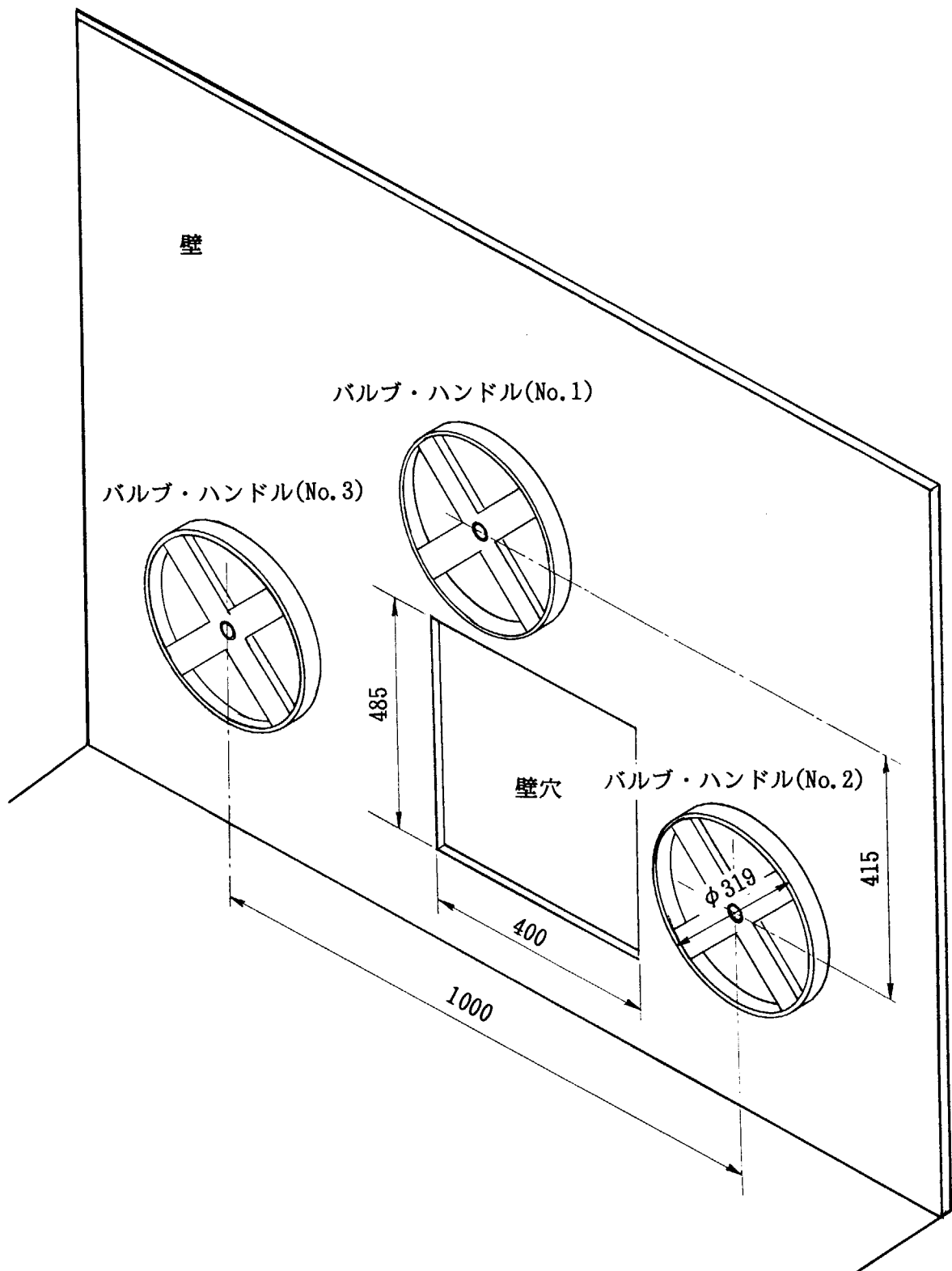


Fig.3.1 プラント機器モックアップのバルブ・ハンドル位置

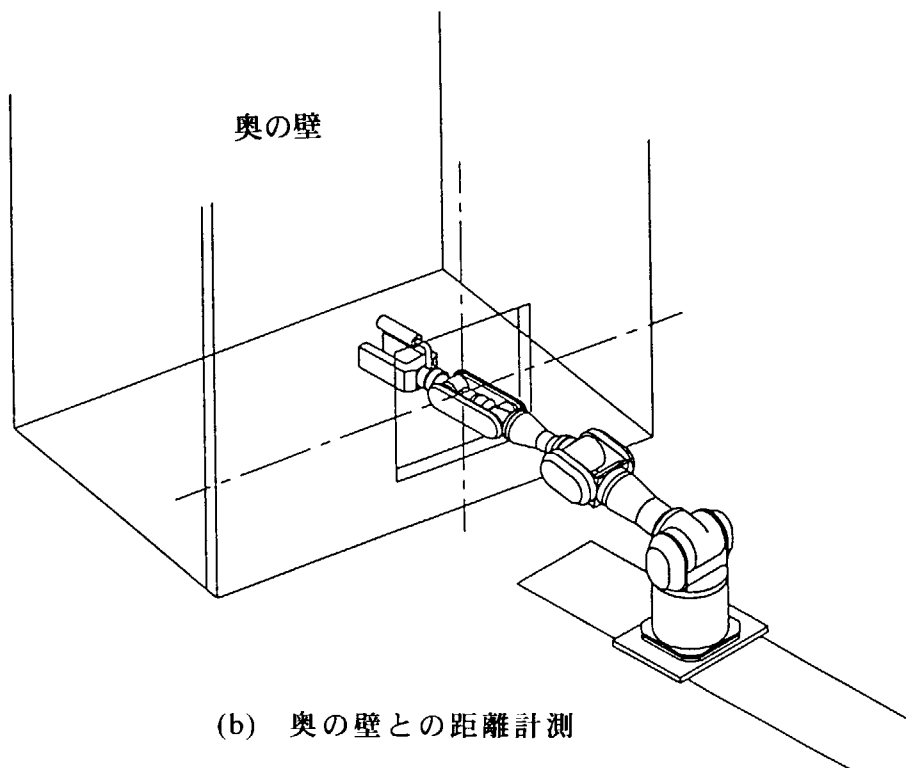
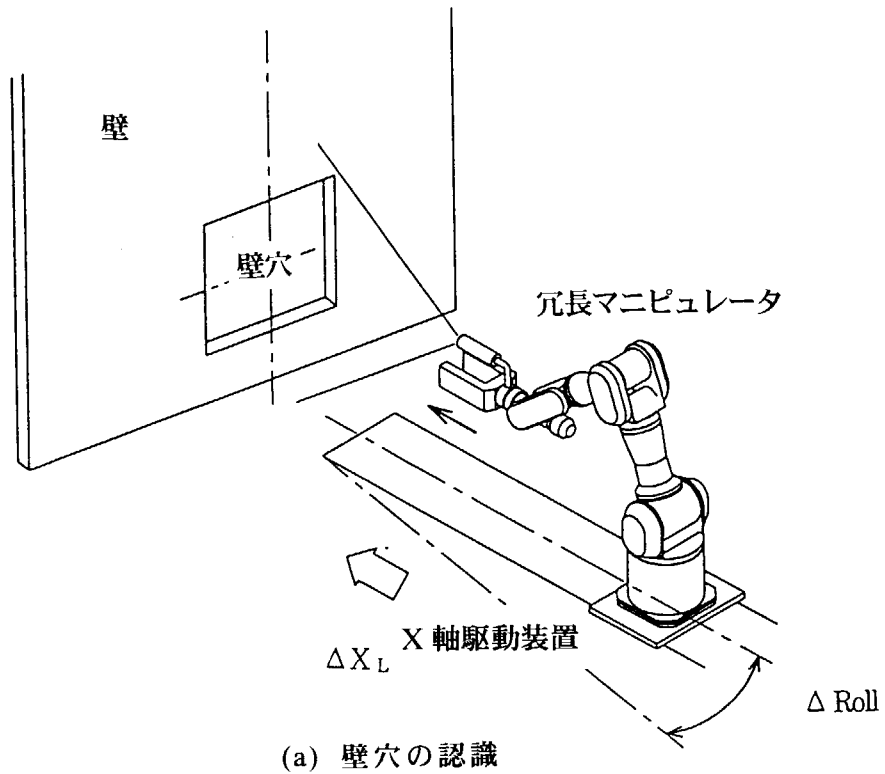


Fig.3.2 作業1の概念図

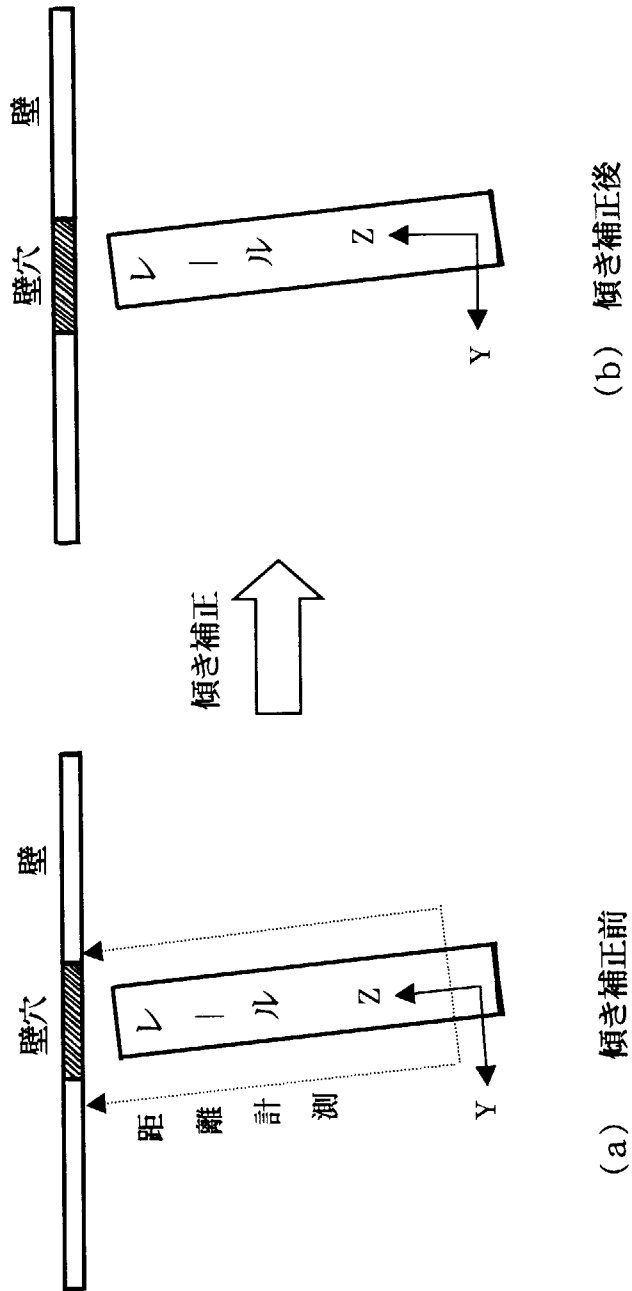


Fig.3.3 レベル傾き補正の概念図

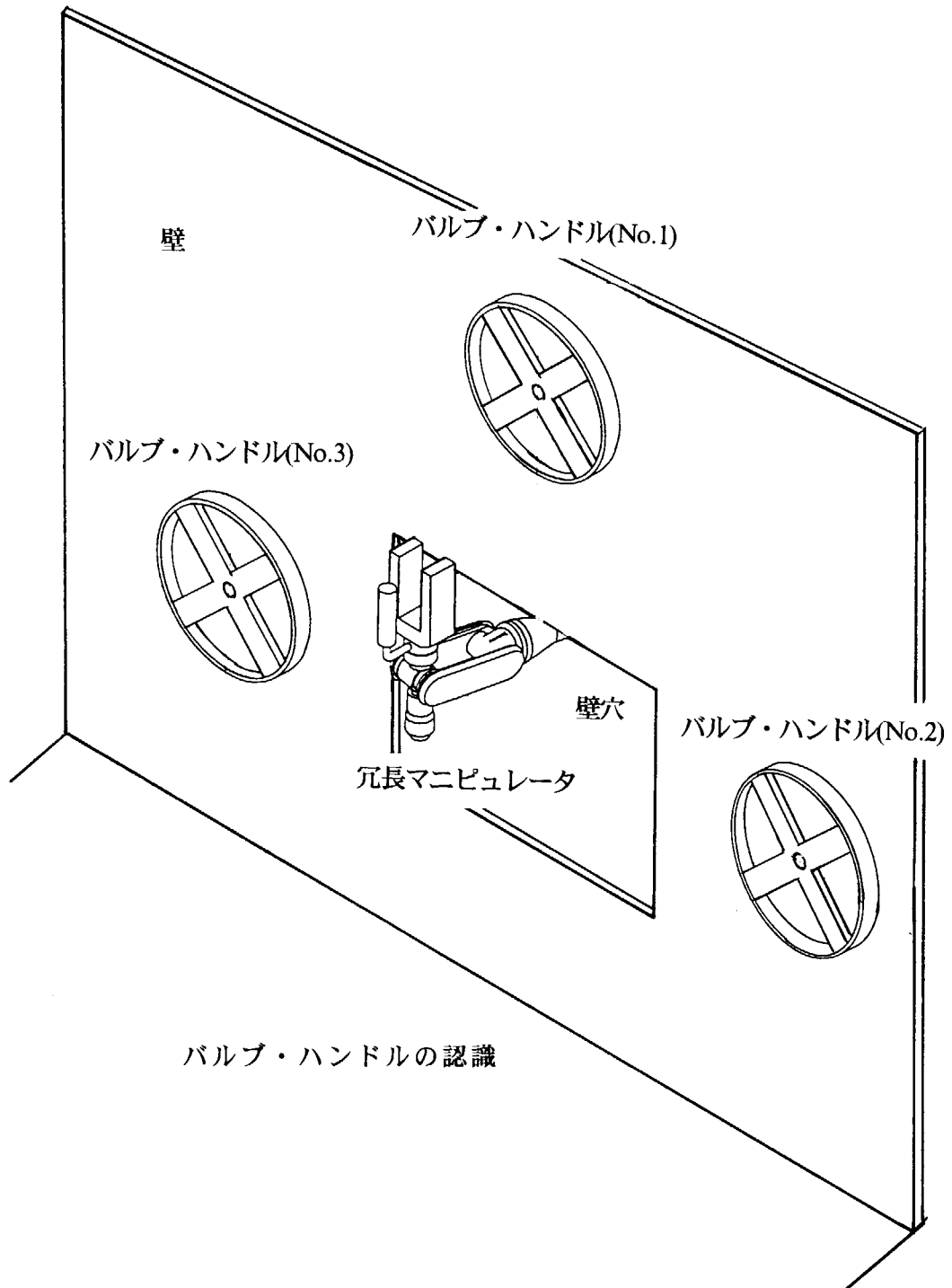


Fig.3.4 作業2の概念図

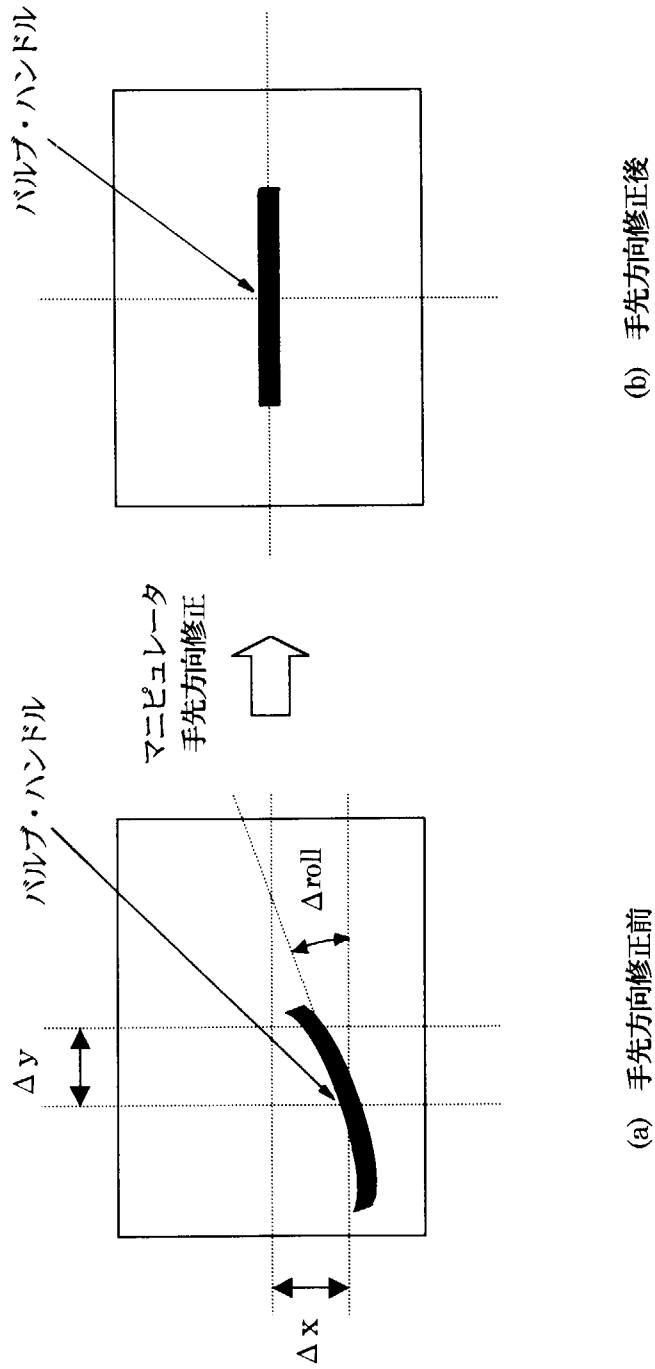


Fig.3.5 マニピュレータ手先方向補正の概念図

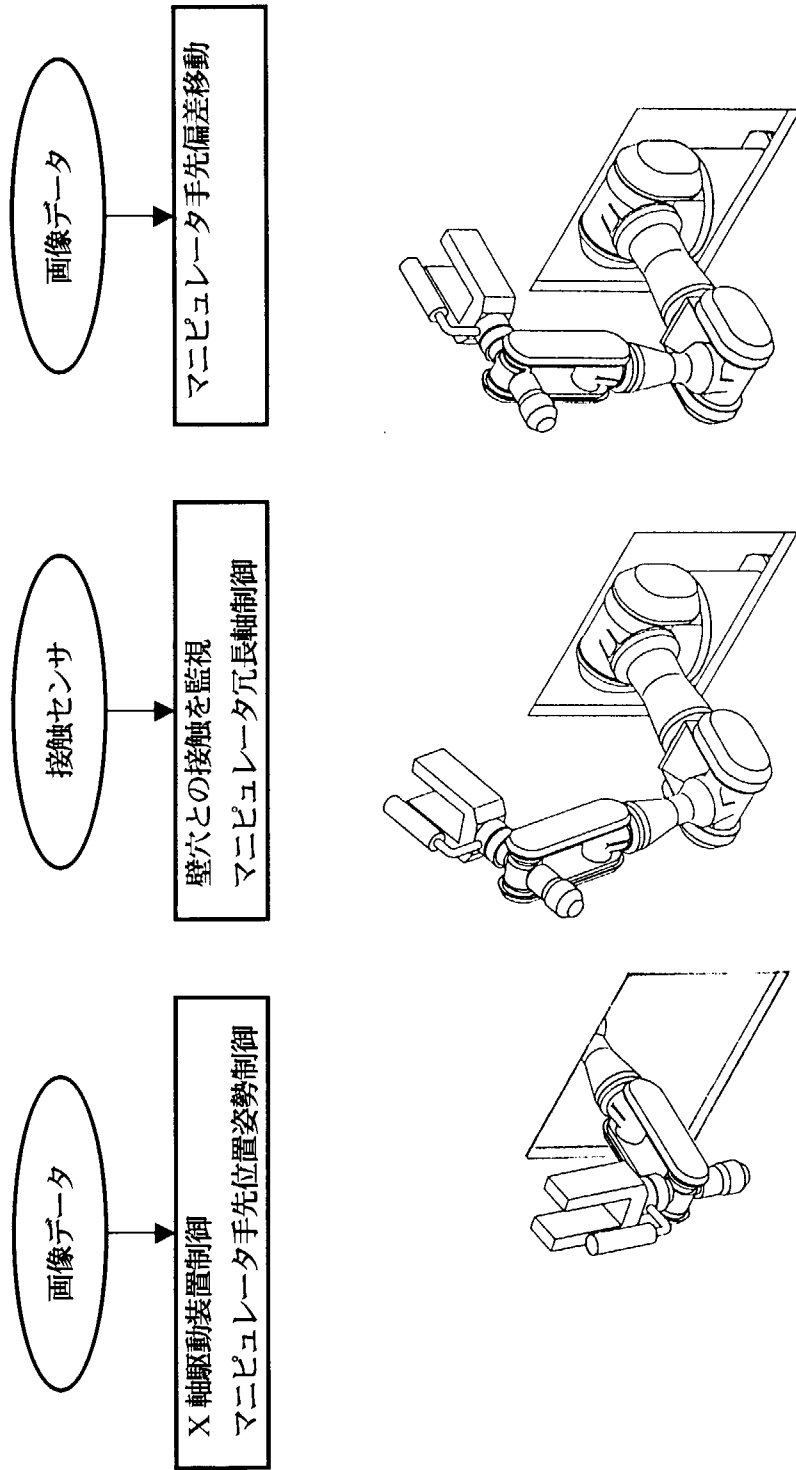


Fig.3.6 作業3の概念図

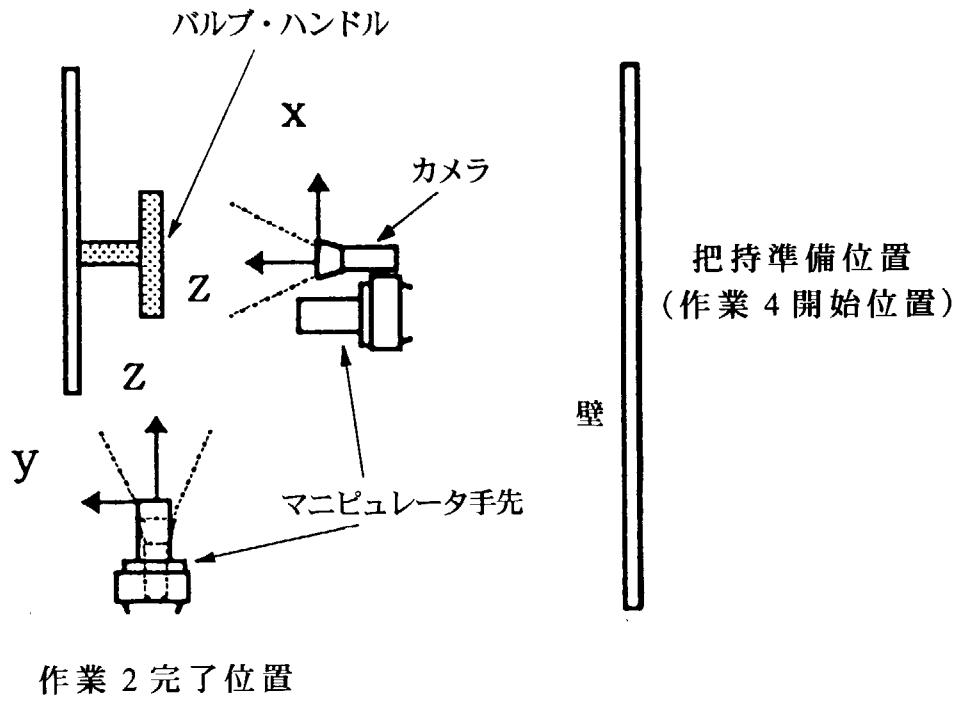


Fig.3.7 バルブ・ハンドル把持準備位置関係図

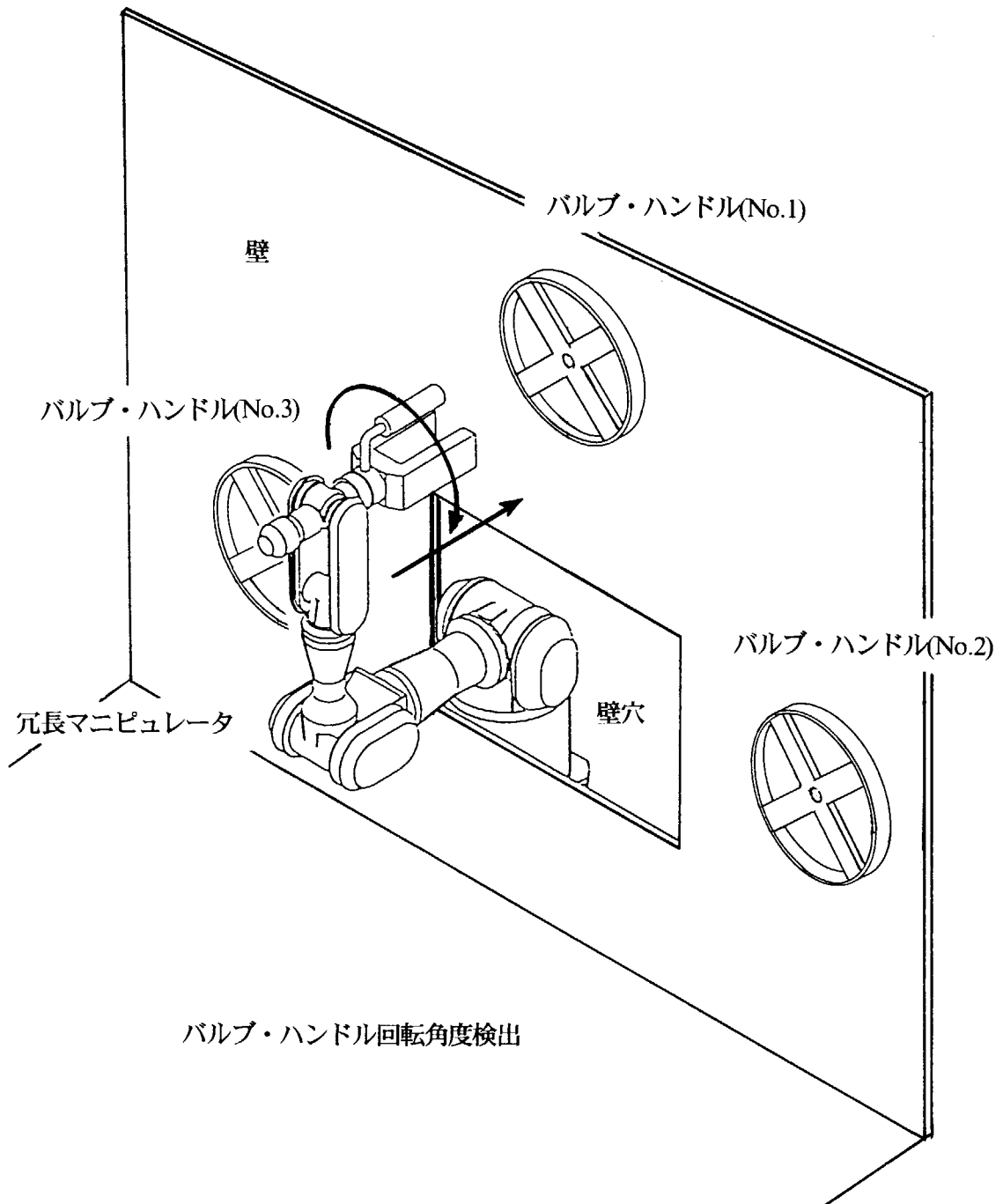


Fig.3.8 作業4の概念図

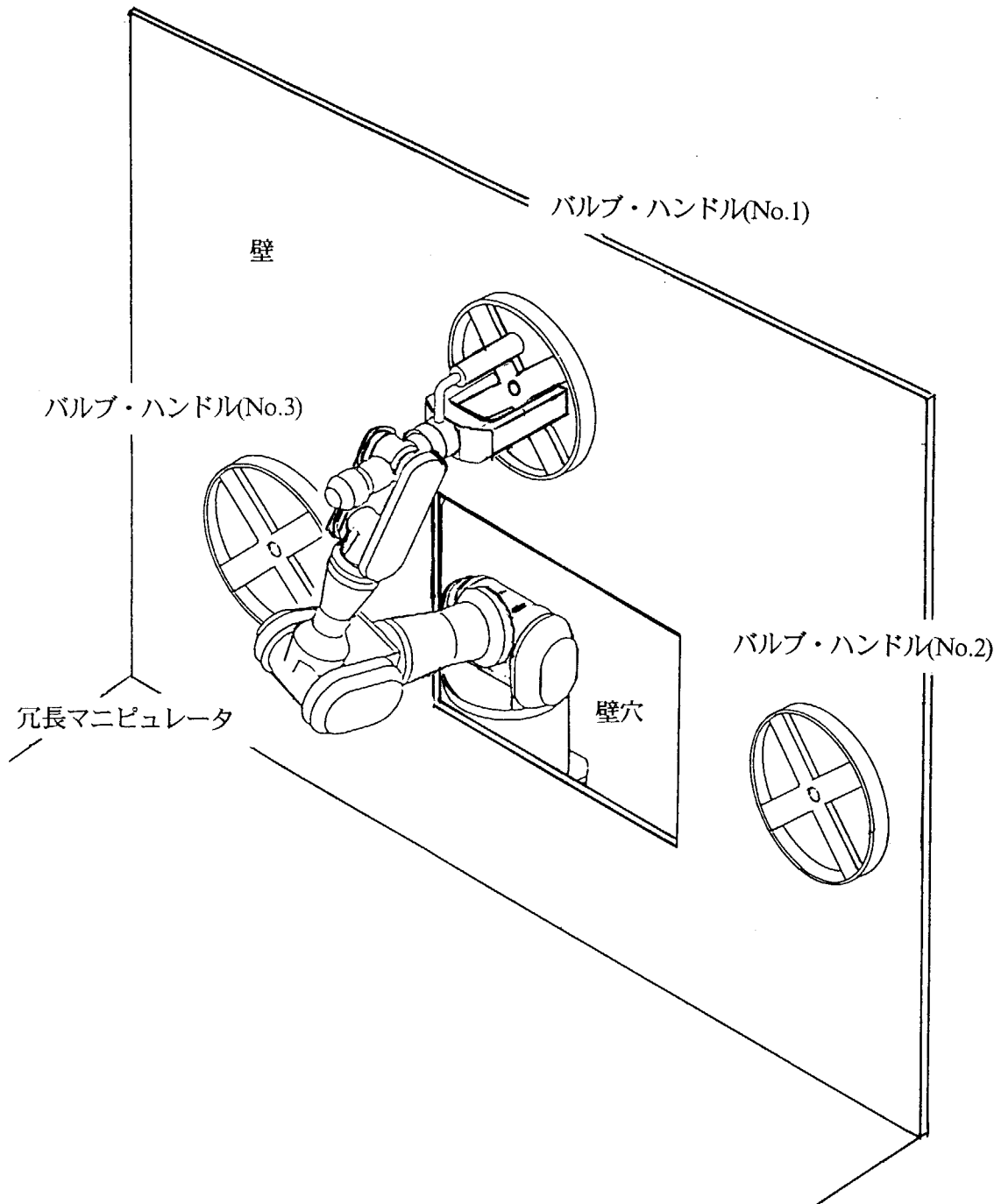


Fig.3.9 作業5の概念図

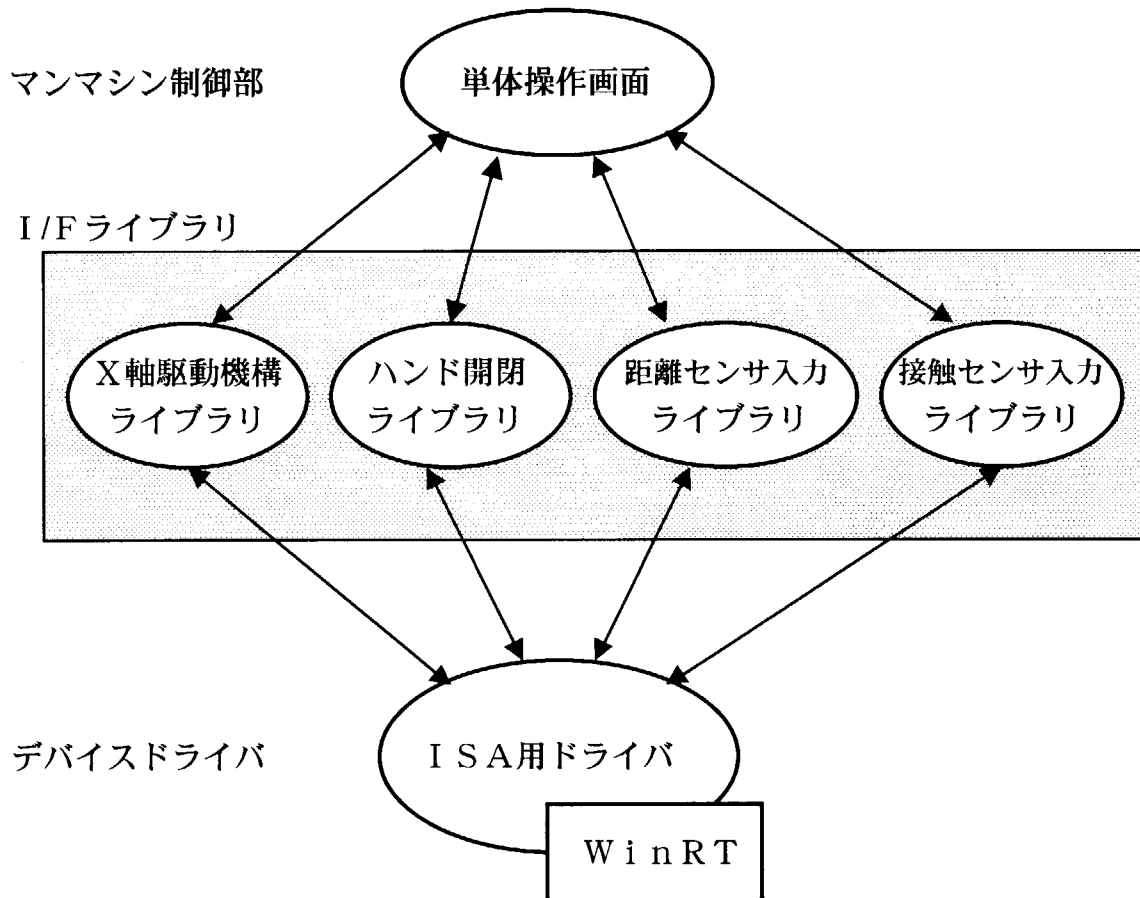


Fig.3.10 単体操作プログラムの構成

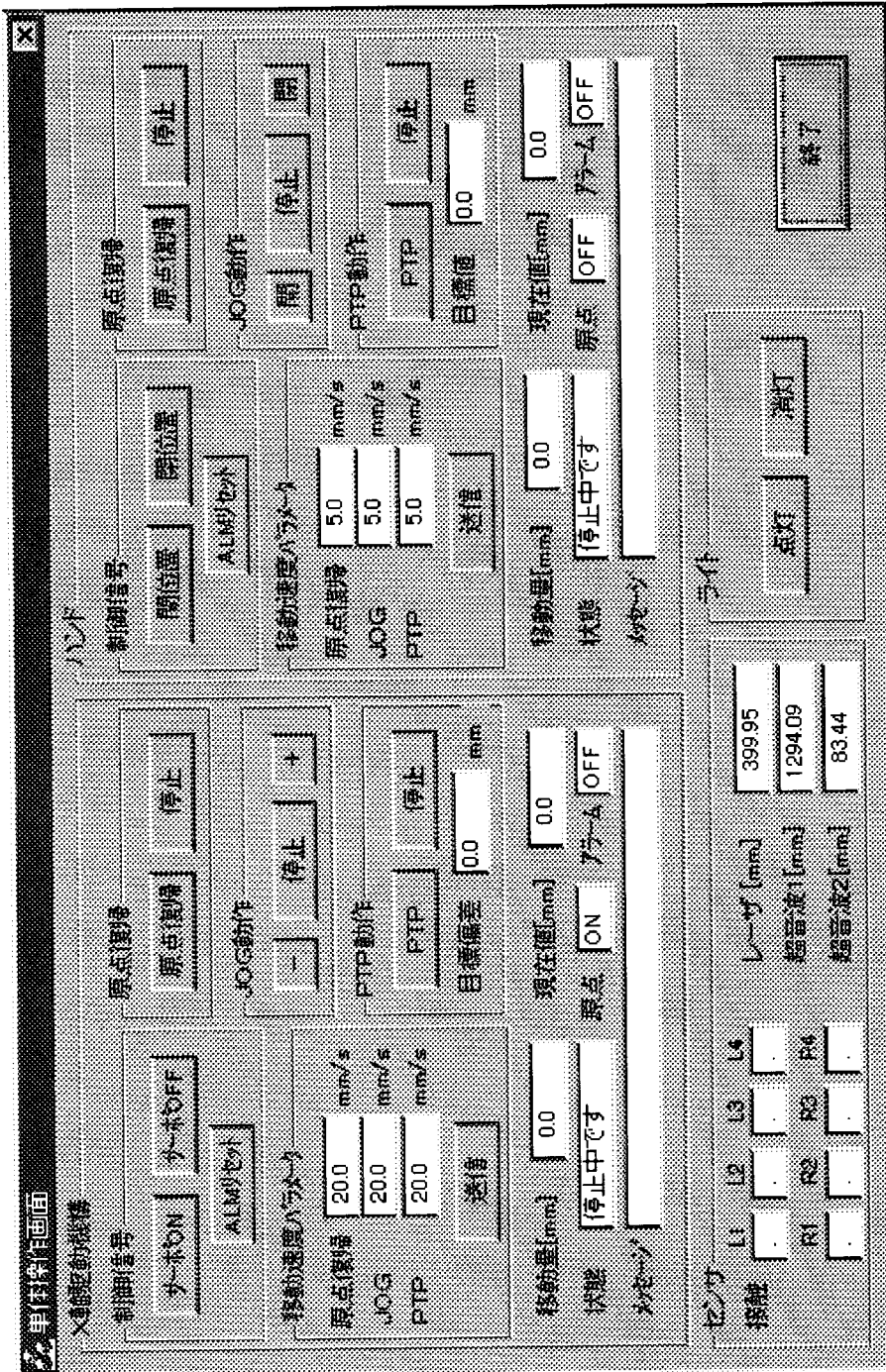


Fig.3.11 単体操作画面の表示例

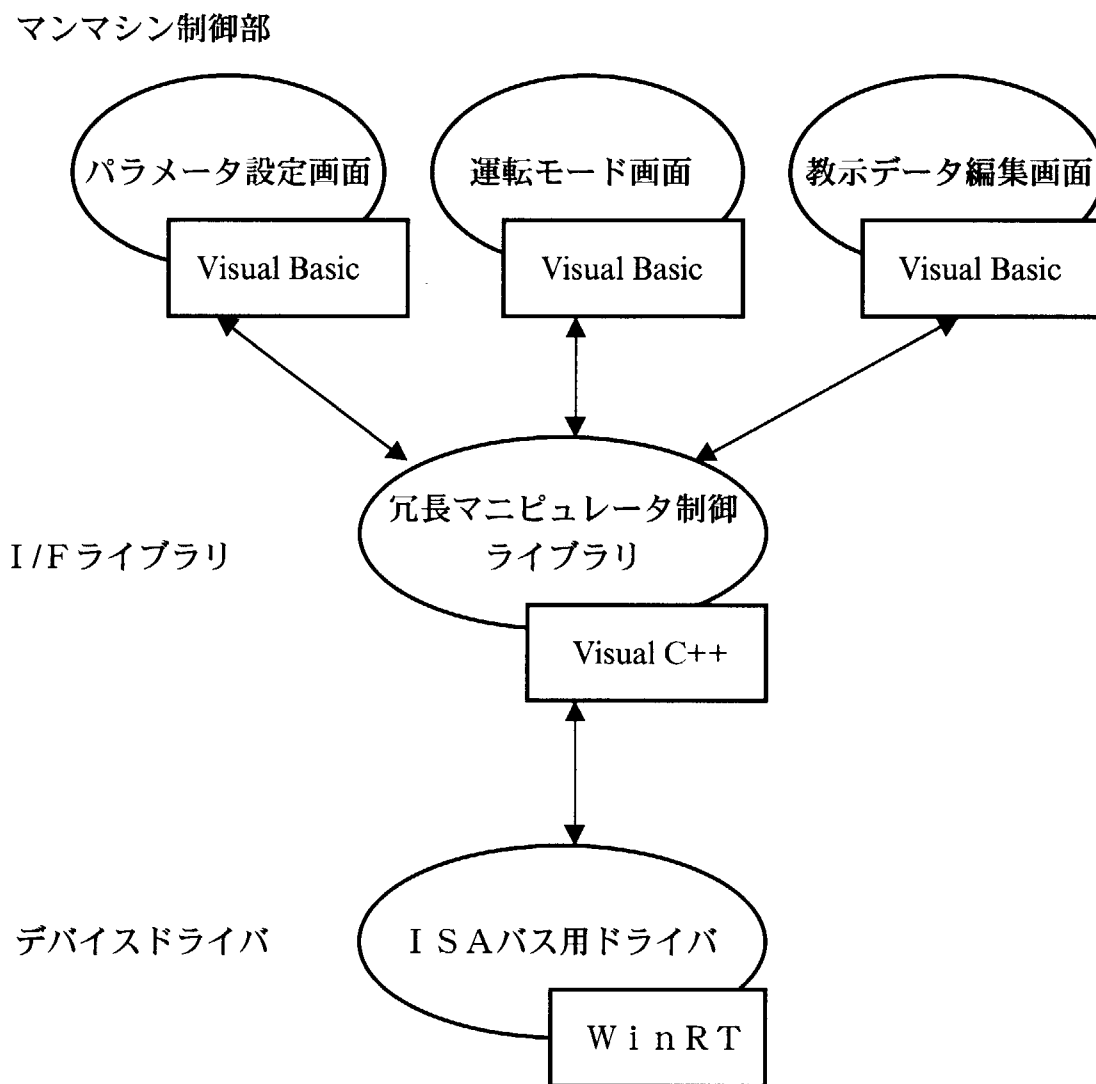


Fig.3.12 冗長マニピュレータ単体操作プログラムの構成



Fig3.13 冗長マニピュレータ単体操作画面

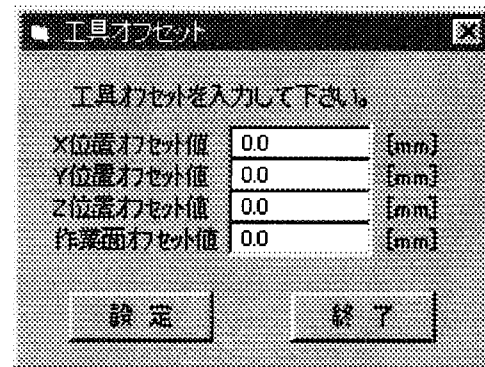
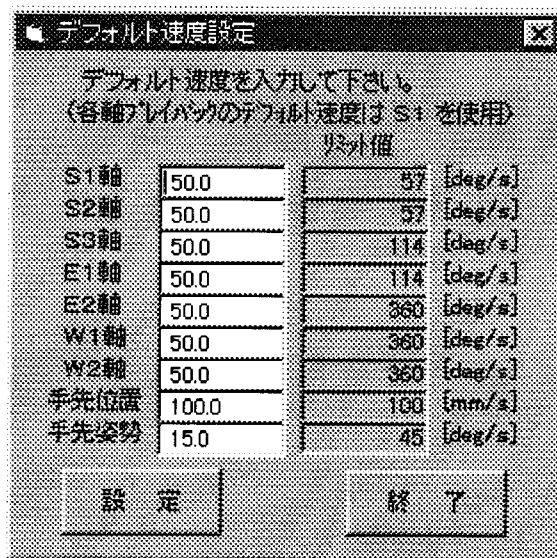


Fig.3.14 パラメータ設定画面の表示例

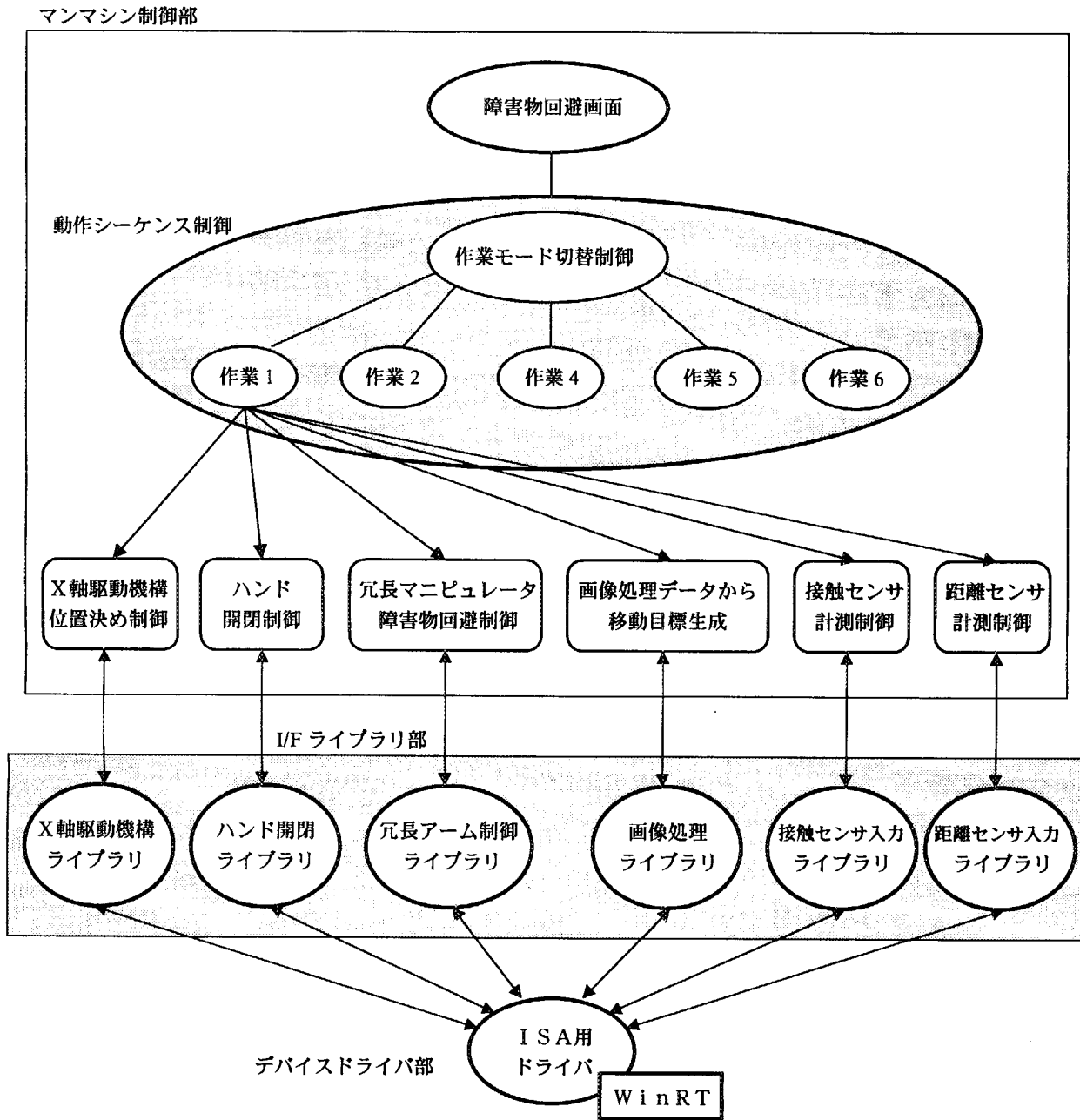


Fig.3.15 自律的障害物回避プログラムの構成

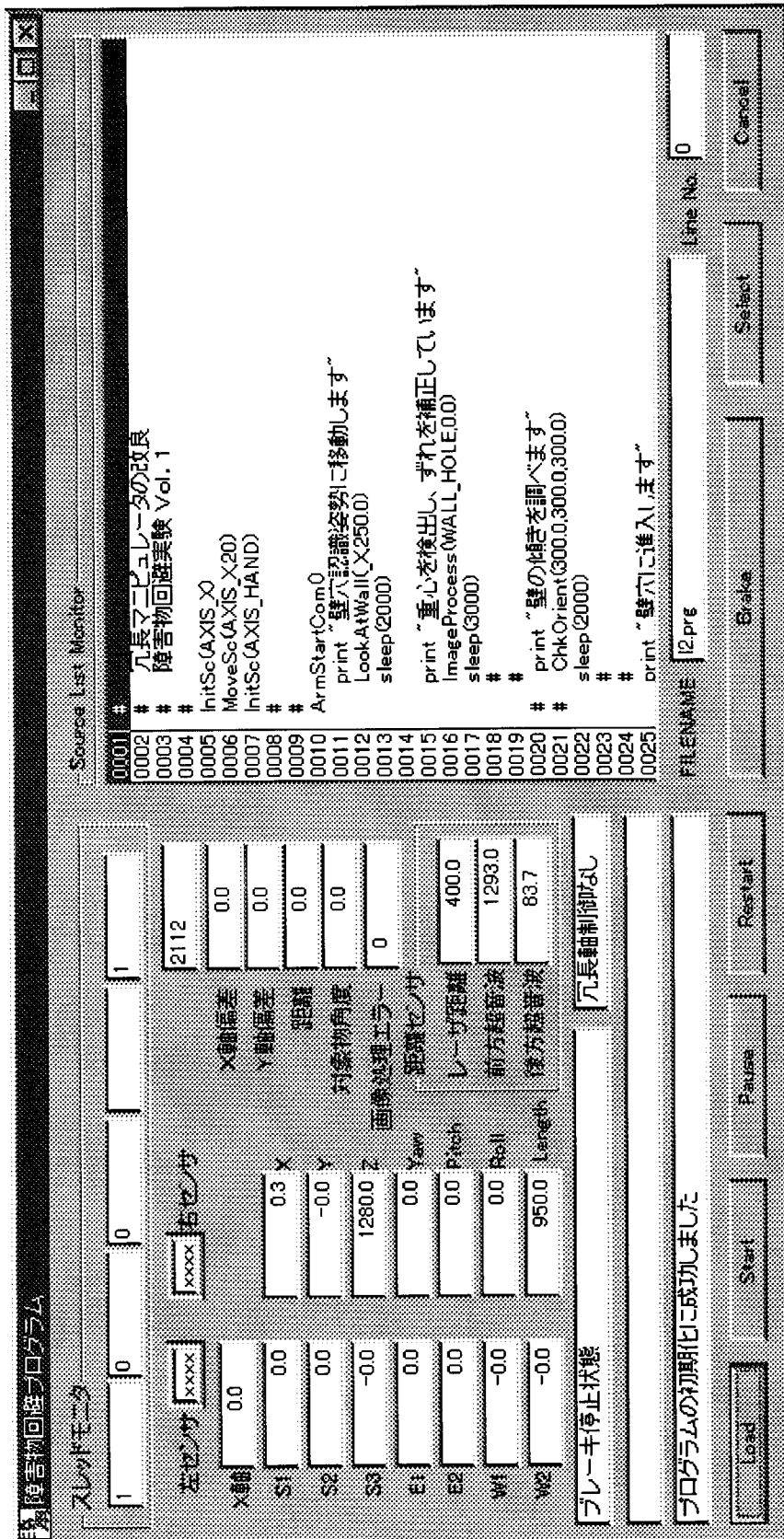
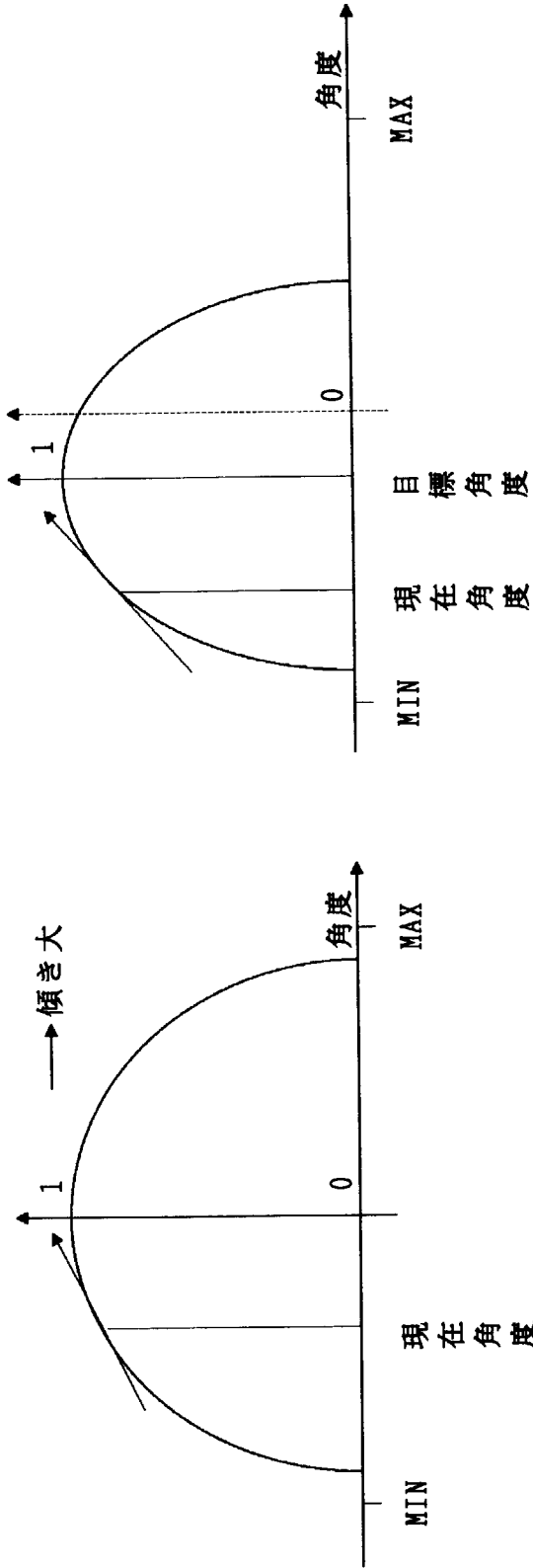


Fig.3.16 障害物回避プログラム画面の表示例



(1) 目標角度を軸として拘束しない場合

(2) 目標角度を軸として拘束した場合

Fig. 3.17 冗長軸による障害物回避手法の概念図

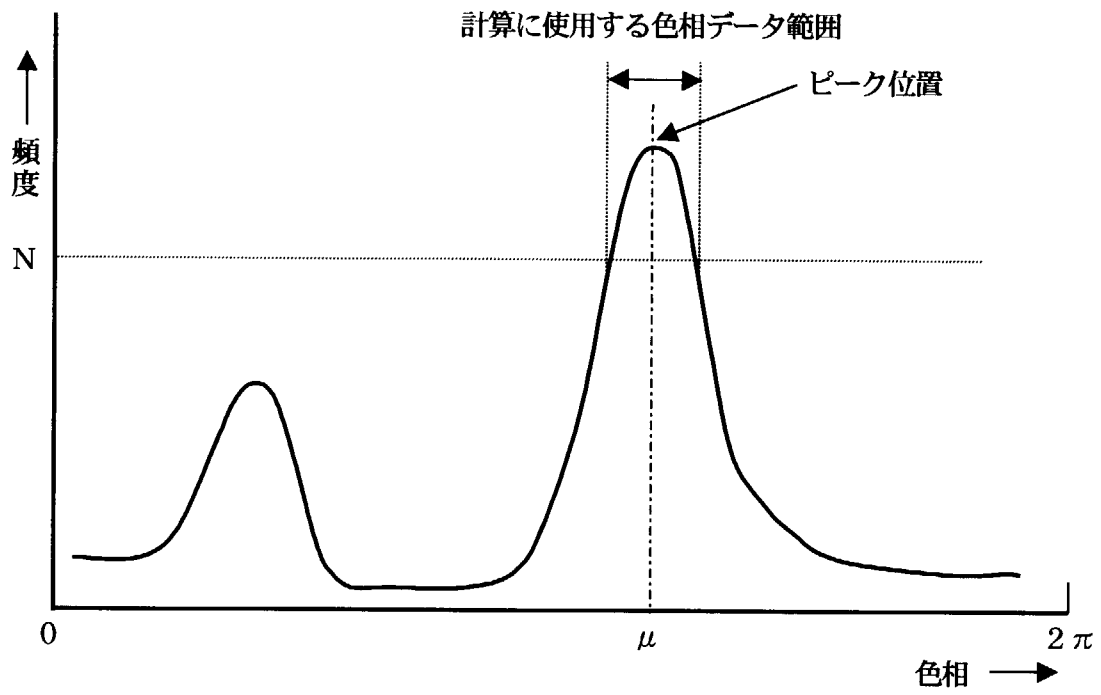


Fig.3.18 色相分布計算の概念図

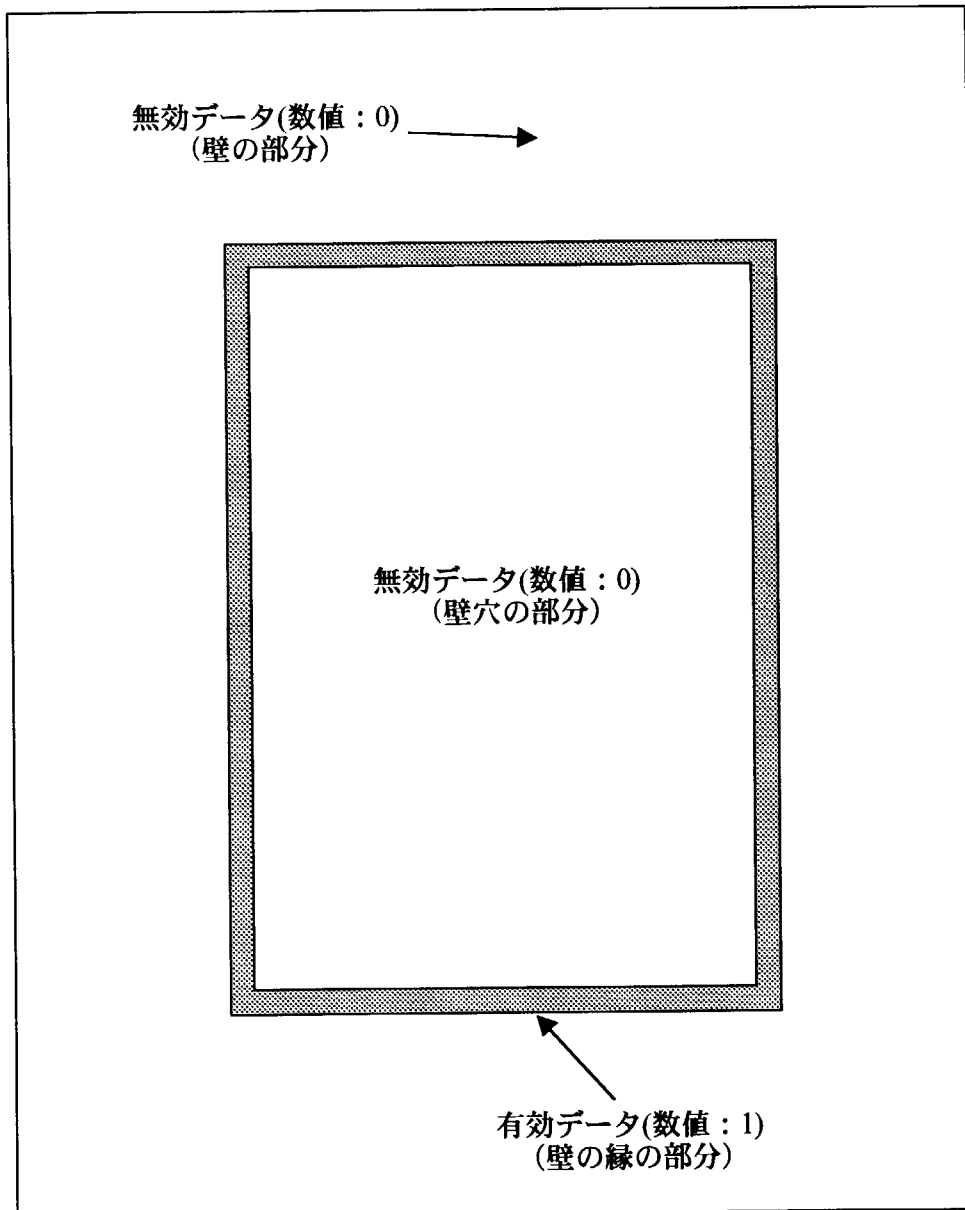


Fig.3.19 壁穴のデータ画像

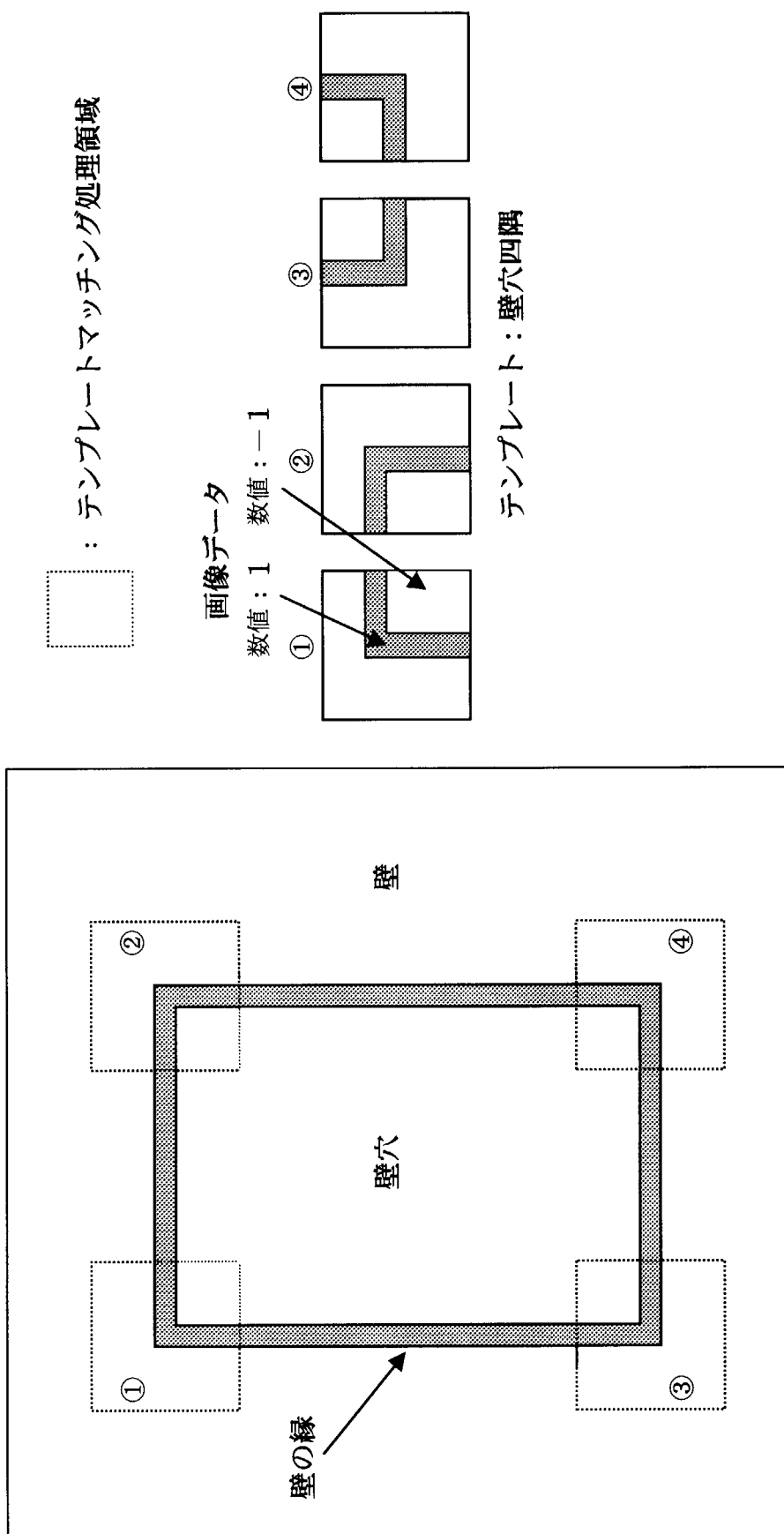


Fig.3.20 テンプレートマッチング処理領域

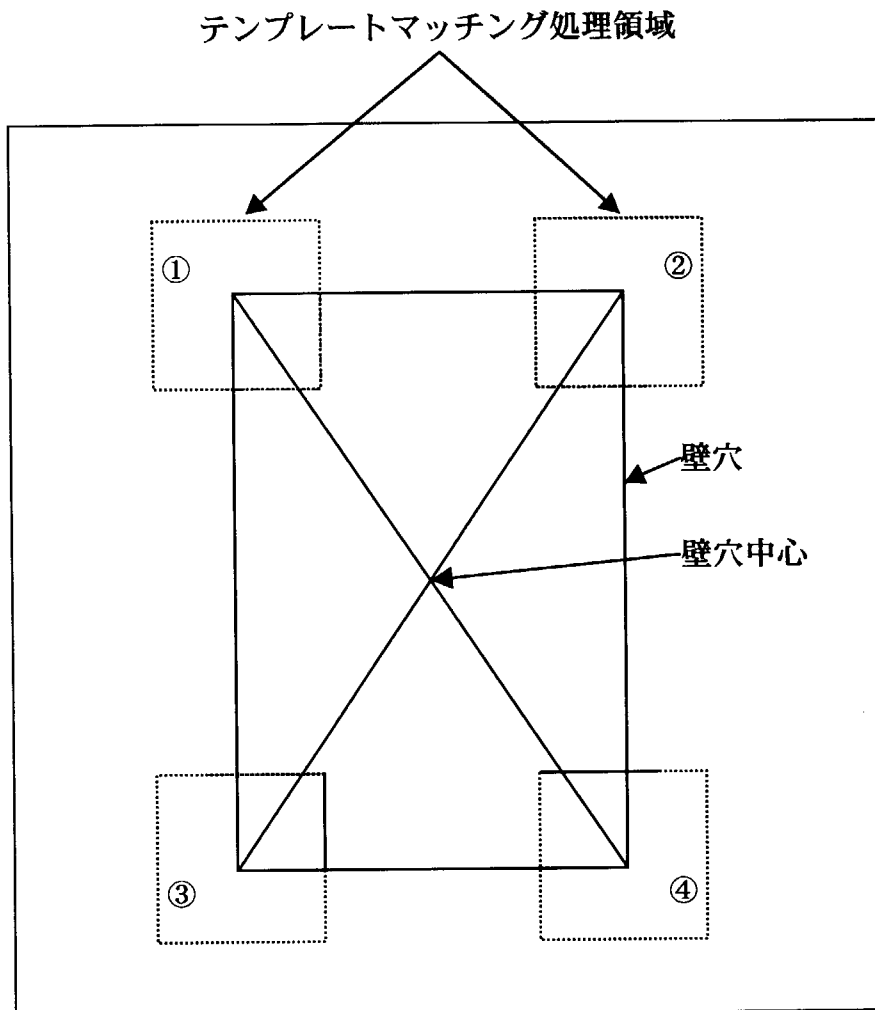


Fig.3.21 壁穴中心位置の検出

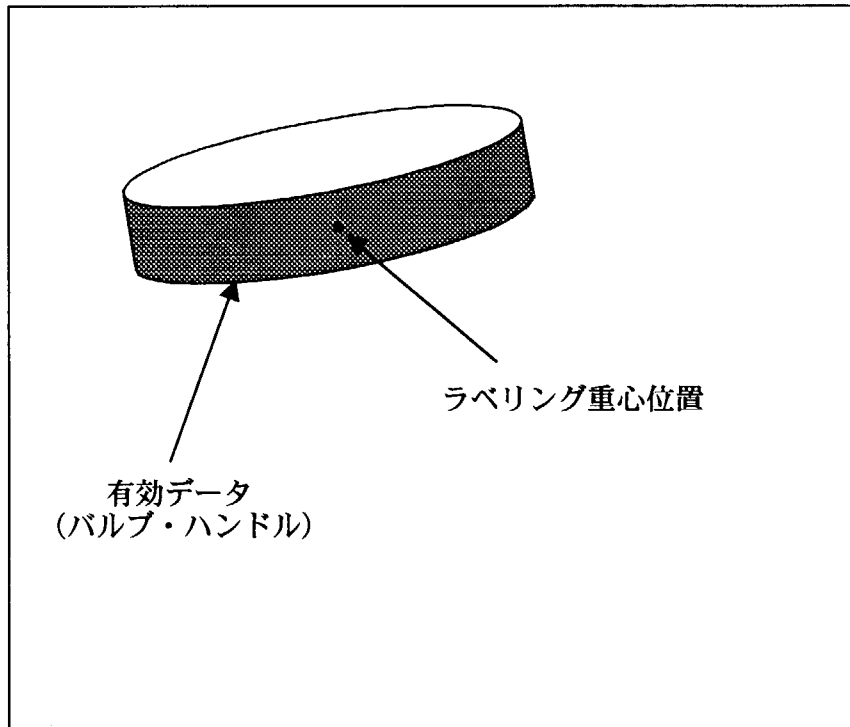


Fig.3.22 側面から見たバルブ・ハンドル・データ画像

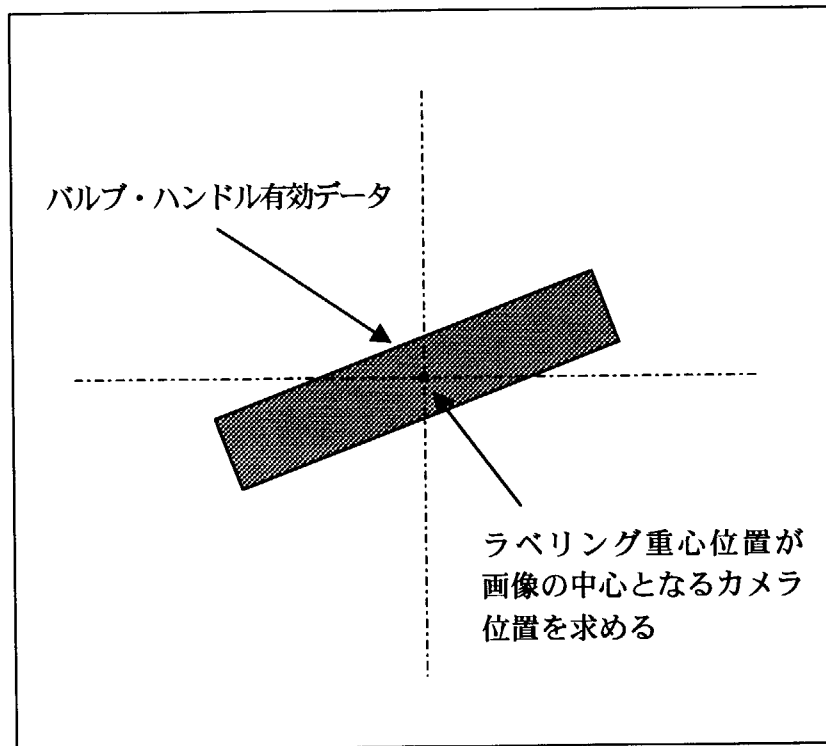


Fig.3.23 バルブ・ハンドル側面中心位置検出

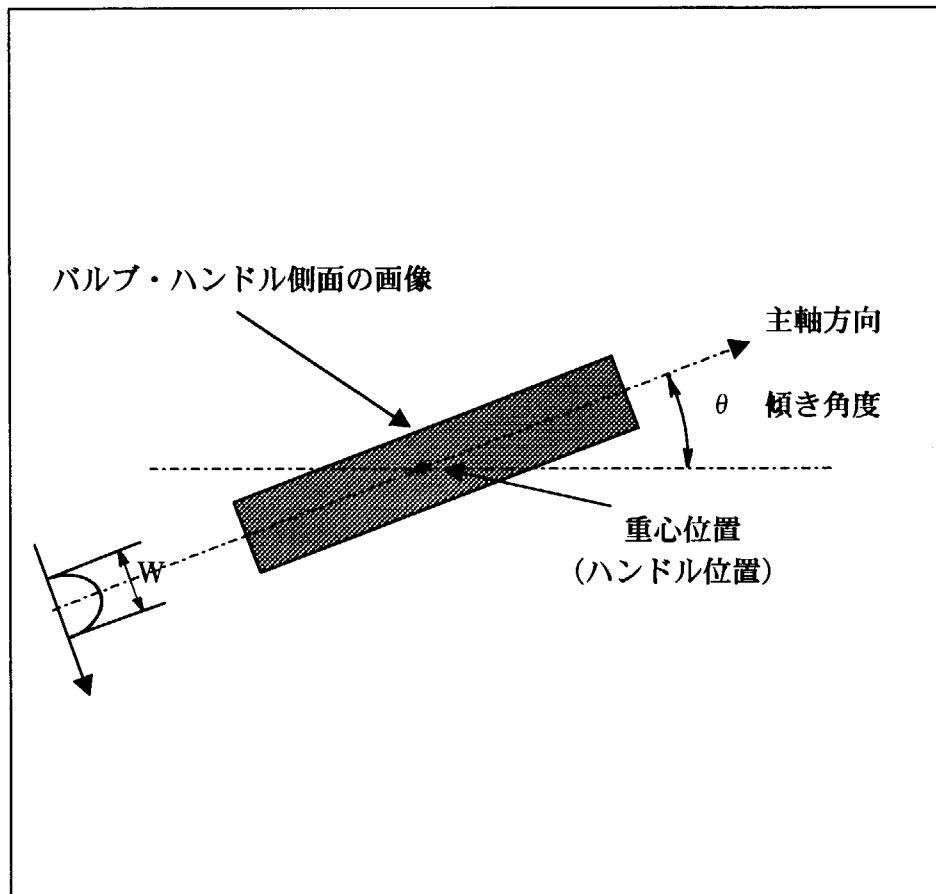
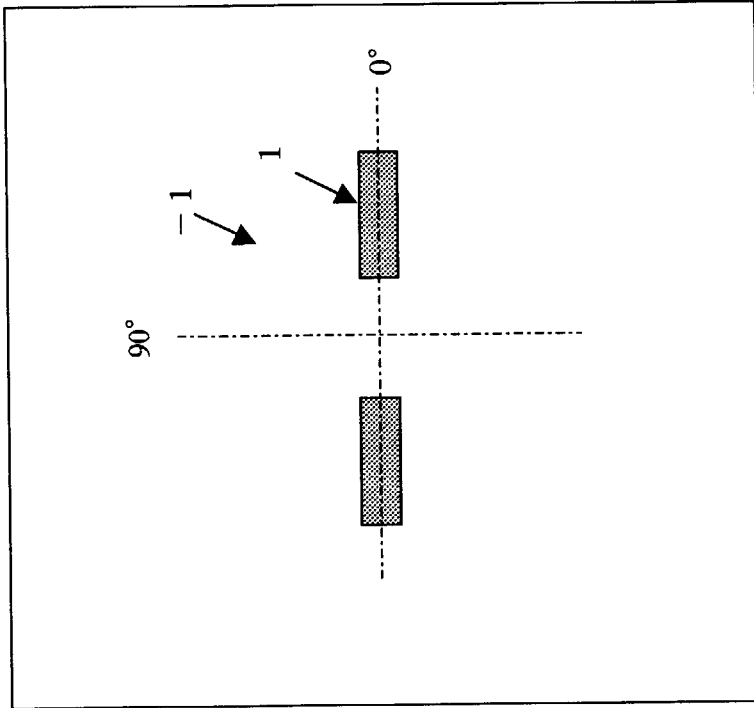
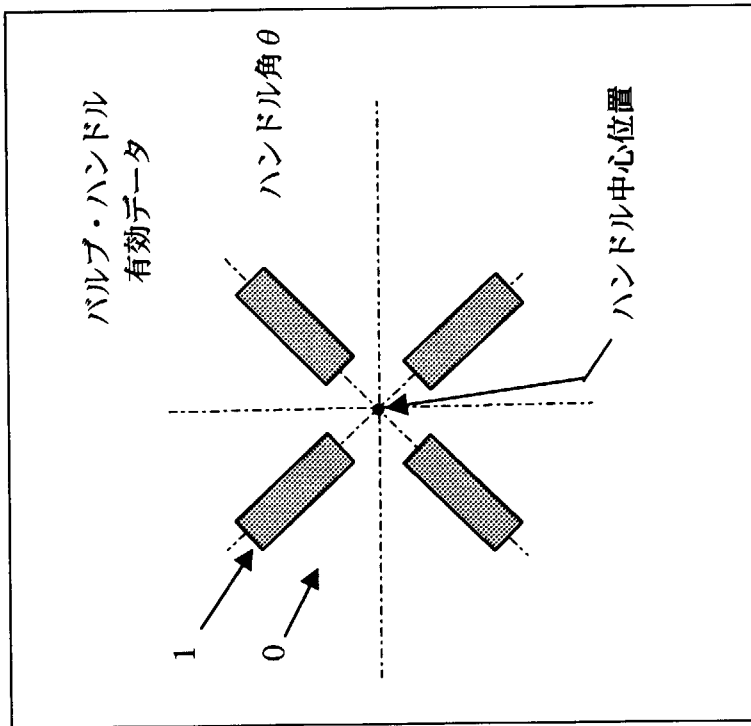


Fig.3.24 バルブ・ハンドルの傾き角度検出



(b) テンプレート



(a) 画像データ

Fig.3.25 バルブ・ハンドルの回転角度検出

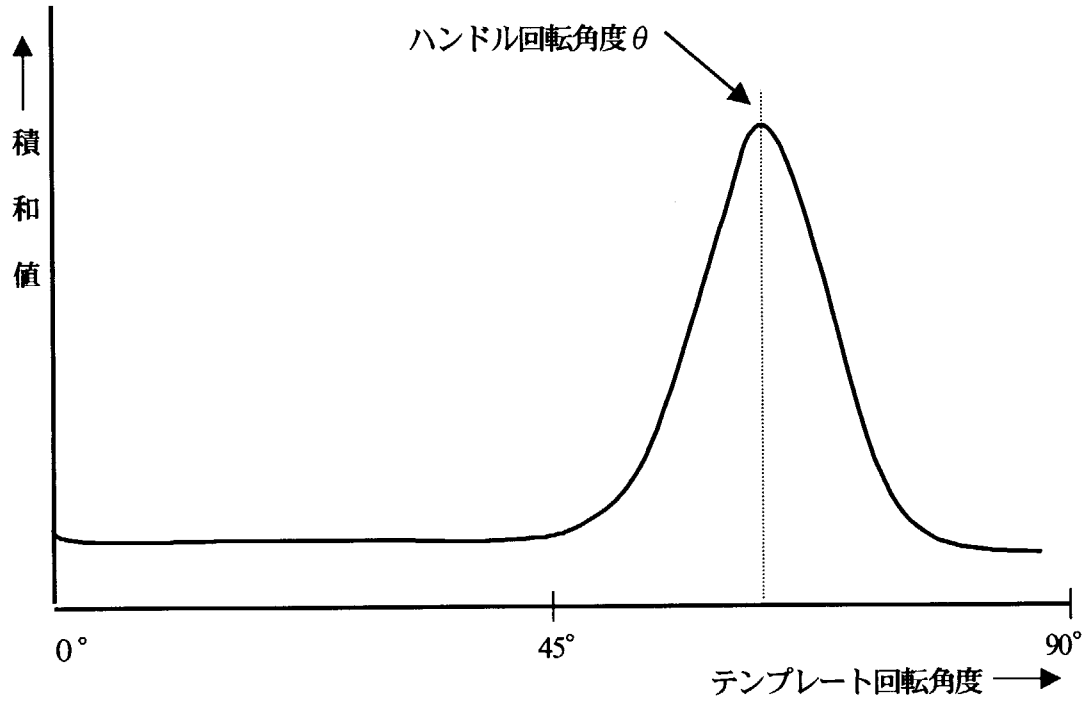


Fig.3.26 バルブ・ハンドルの回転角度検出

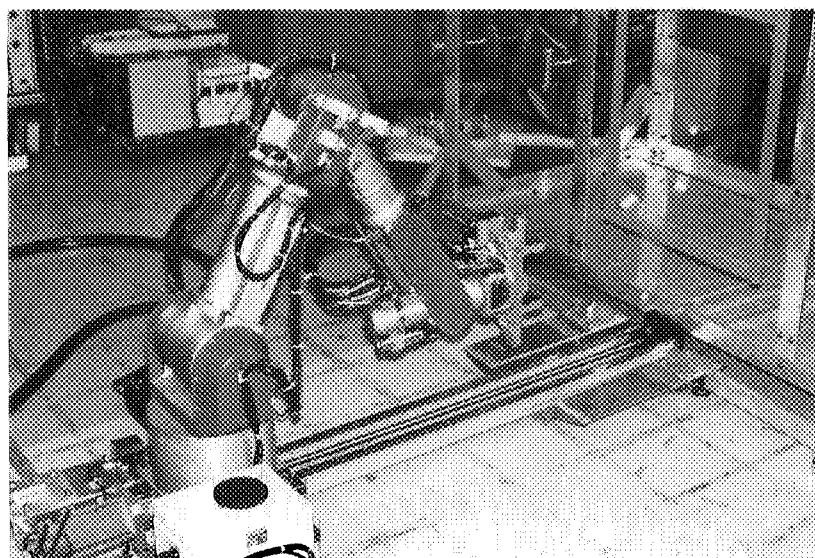


Fig.3.27 壁穴検出中の冗長マニピュレータ

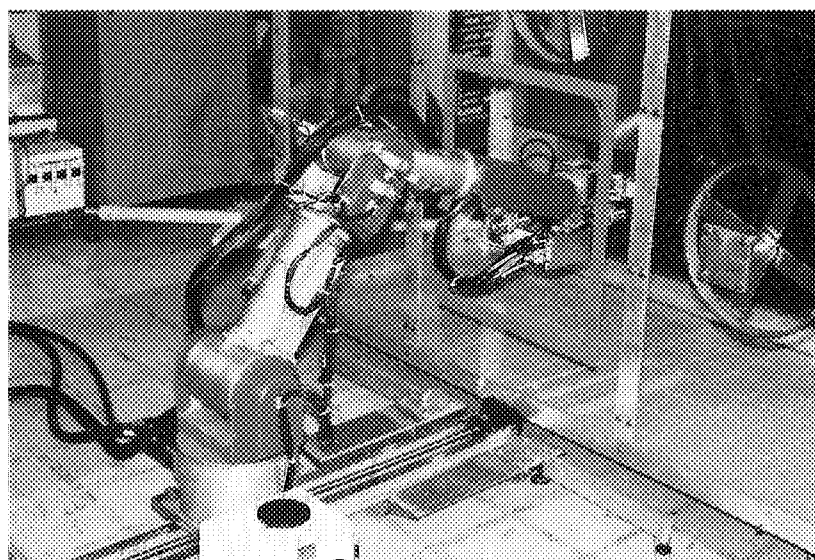


Fig.3.28 壁穴挿入中の冗長マニピュレータ

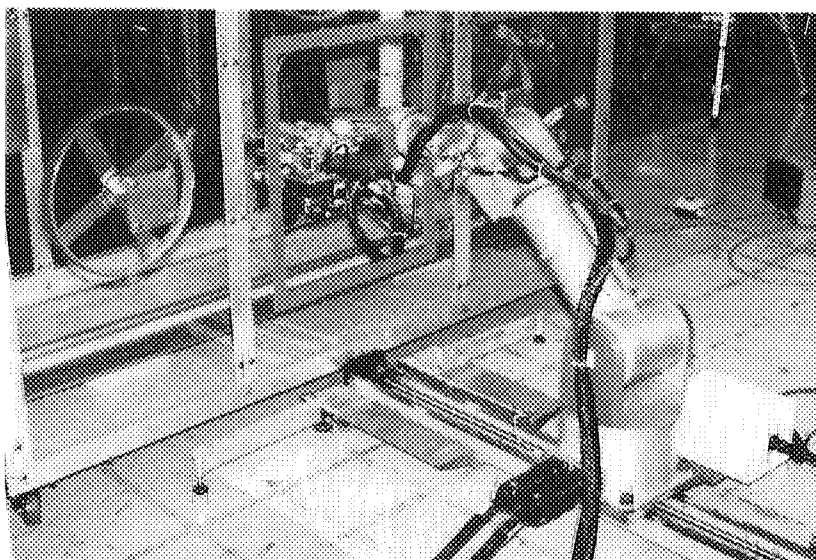


Fig.3.29 バルブ・ハンドル位置を真横から検出中の冗長マニピュレータ

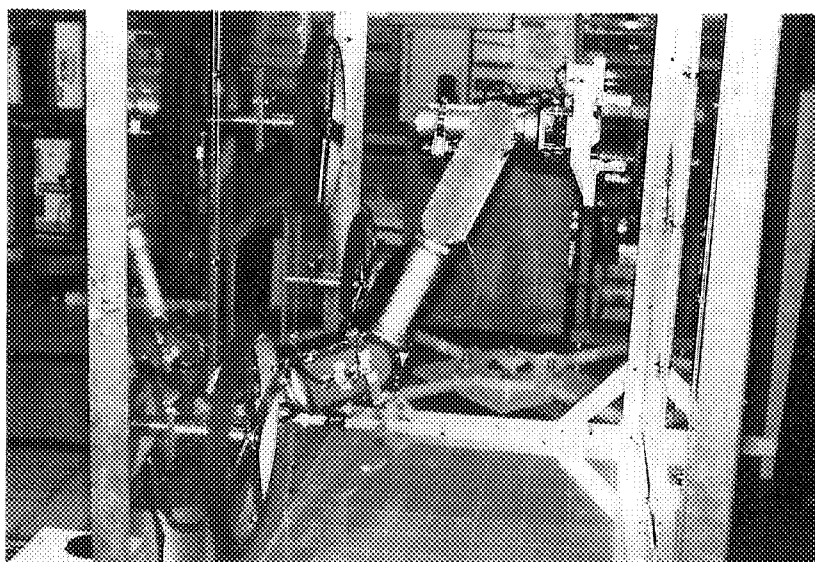


Fig.3.30 肘部を壁穴に挿入した冗長マニピュレータ

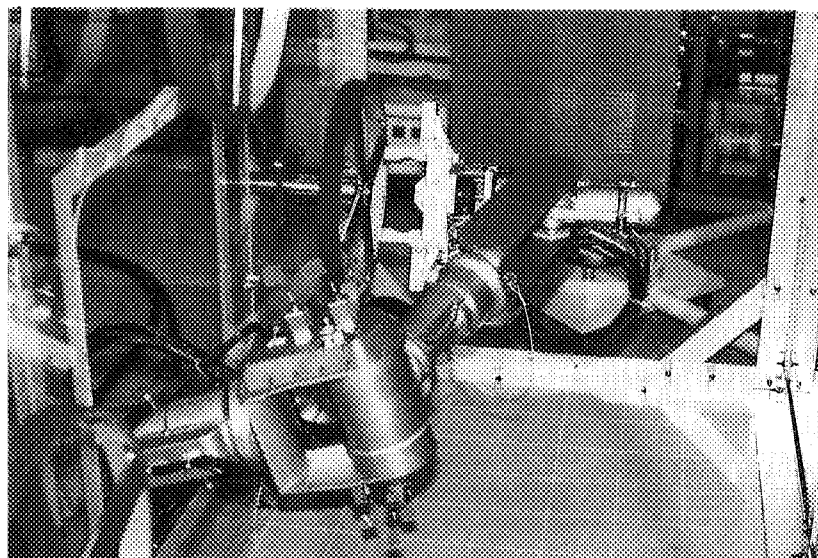
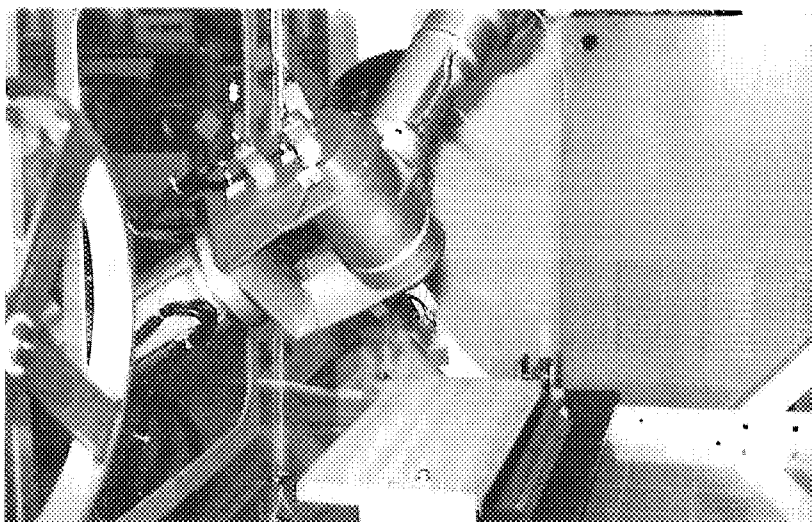
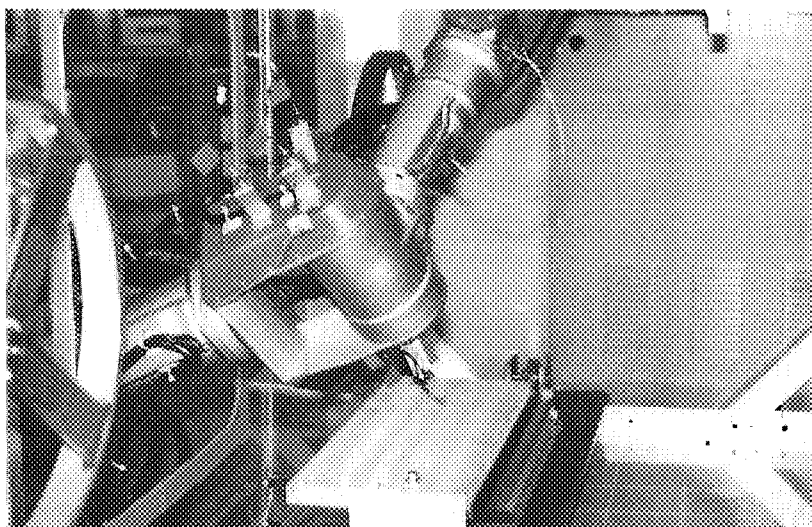


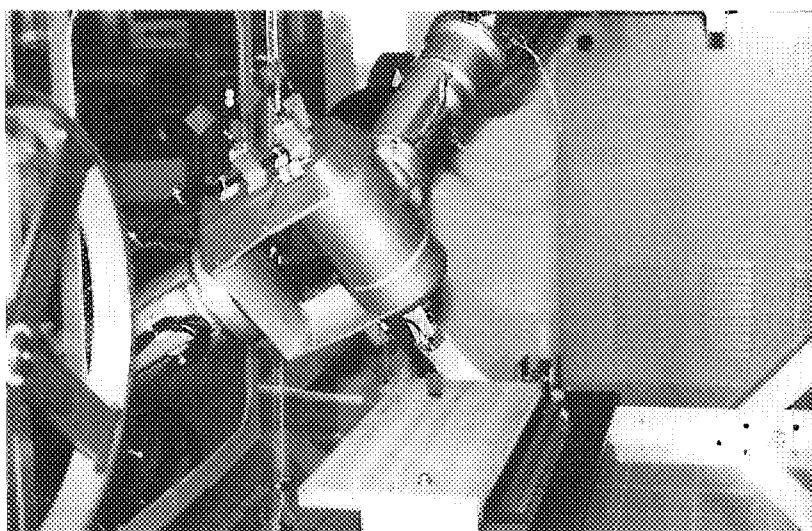
Fig.3.31 バルブ・ハンドルに接近中の冗長マニピュレータ



(a) 接触直前



(b) 接触の瞬間



(c) 回避動作

Fig.3.32 障害物回避動作の連続写真

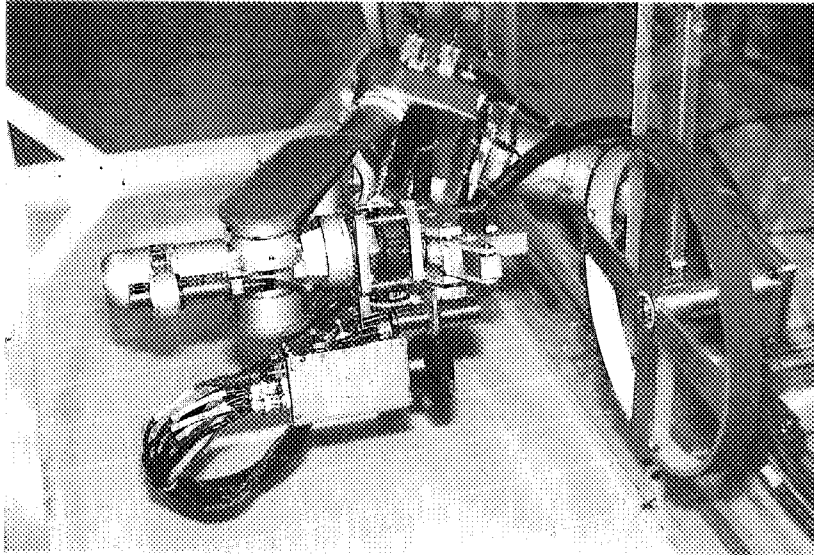


Fig.3.33 バルブ・ハンドル中心および回転角度の検出

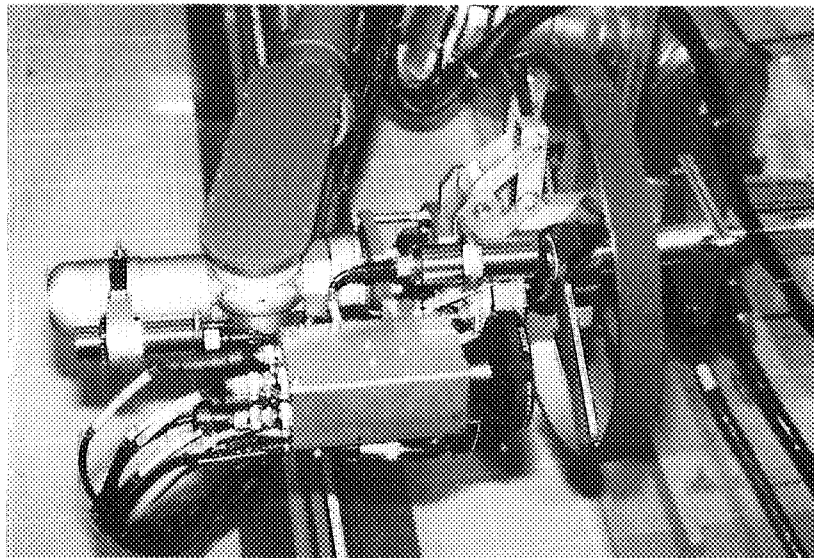


Fig.3.34 バルブ・ハンドルの回転

4. おわりに

今回実施した実験は、一次元移動機能を有するX軸駆動装置に自律的処理機能を有する冗長マニピュレータを搭載し、狭隘な壁穴を通して壁の裏側に位置するバルブ・ハンドルを操作する作業である。壁穴や壁及び作業対象物のバルブ・ハンドル等の位置／状態検出には、冗長マニピュレータに取り付けた各種センサからの信号を利用した。この実験の結果、各種環境知覚センサと組み合わせた冗長マニピュレータの使用によって、狭い空間を通して非冗長のマニピュレータ(関節構成6軸以下のもの)では操作不可能な位置の作業を自律的に実施できることが確認できた。これまでの一連の実験を通して、各種のセンサ信号による環境知覚機能を応用することにより、ロボットの自律的知能化を図ることが可能であることが実証できた。これらの実証試験を積み重ねることにより、原子力プラントのような複雑な環境において、放射線被曝の低減や異常時のプラント状態の計測などに有効に活用できる更に高度でより実用的な知能ロボットが開発できるものと考えられる。

謝 辞

本実験の遂行にあたり、種々の協力をして頂いた制御知能工学研究室室員各位並びに冗長マニピュレータ制御系の改良や制御ソフトウェアの作成に協力して頂いた三菱重工業株式会社の技術陣に対して、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 篠原慶邦：“原子力施設におけるロボット技術の必要性”, ロボット, No.23, (1979).
- 2) 篠原慶邦他：“原子炉解体作業用ロボットマニピュレータの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.3, 323, (1991).
- 3) Fujii Y., et al. : “Development of Multi-functional Telerobotic Systems for Reactor Dismantlement”, J.of Nucl.Sci.Tech. Vol.29, No.9, 930, (1992).
- 4) 佐々木 忍：“最適化手法を用いた6リンク・マニピュレータの逆問題に関する新しい方法”, JAERI-M 89-067, (1989).
- 5) 佐々木 忍：“6リンク・マニピュレータの機構表現について”, JAERI-M 90-227, (1990).
- 6) 石川信行他：“逆フィルタリング手法による超音波信号の前処理に関する基礎実験”, JAERI-M 92-171, (1992).
- 7) 藤井義雄他：“超音波応用による位置同定方法の基礎実験”, JAERI-M 92-112, (1992).
- 8) 藤井義雄他：“冗長マニピュレータを用いた障害物回避実験”, JAERI-Tech 97-071, (1998).

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表 1 SI 基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表 3 固有の名称をもつ SI 組立単位

量	名称	記号	他の SI 単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表 2 SI と併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表 4 SI と共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表 5 SI 接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表 1 - 5 は「国際単位系」第 5 版, 国際度量衡局 1985 年刊行による。ただし, 1 eV および 1 u の値は CODATA の 1986 年推奨値によった。
- 表 4 には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は, JIS では流体の圧力を表わす場合に限り表 2 のカテゴリーに分類されている。
- EC 閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHg を表 2 のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

センサベース自律的ロボットシステムを用いた障害物回避実験