

## 複雑形状物のハンドリング作業支援システムの開発

澤山 一博, 高橋 裕之, 鈴木 慎一, 堀 武司  
戸羽 篤也, 中西 洋介, 桑野 晃希, 多田 達実

## Development of Handling-Support System for The Products with Complicated Shape

Kazuhiro SAWAYAMA, Hiroyuki TAKAHASHI, Shinichi SUZUKI, Takeshi HORI  
Atsuya TOBA, Yohsuke NAKANISHI, Kohki KUWANO, Tatsumi TADA

## 抄 録

多品種少量生産型の製品や複雑形状を有する製品の加工作業の効率化, 省力化および作業の高度化を目的として, 遠隔操作により対象物のハンドリング作業を行うシステムを開発した。本システムを「3次元視覚情報システム」、「マスタ・スレーブ・マニピュレータシステム」、「バイラテラルハンドリングシステム」という3つの要素システムから構成した。ハンドリングの対象としては中空鋳物製造用の砂型である「中子」を選定し, パレット上で把持してから主型(砂型)に設置するまでの作業を実現した。なお, できるだけ作業者が現場の状況を実感できるように, 視覚情報を提示する機能と力覚を帰還して作業者に伝える機能を付加した。

## 1. はじめに

多品種少量生産型の製品や複雑形状を有する製品の加工作業では, 人手に頼らざるを得ない, あるいは人手の方が適している労働集約型の工程が数多く見受けられる。そして, このような工程が生産性向上を計る上での大きな阻害要因となっている。そこで今後, これらの作業の効率化, 省力化(労力軽減), 作業内容の高度化, さらには製品の高度化, 高付加価値化を図っていくには, 従来とは違うアプローチでの自動化を進めていくことが重要である。

この有効な方法の一つとして, 作業状態や作業環境を仮想作業空間内に再現し, ワークのハンドリング作業を遠隔操作により行う方法が考えられる。すなわち, この方法により作業者の能力を有効に活用しながら, かつ単純作業などは自律的に行うことで労力の軽減や作業効率の向上を図ることが可能と思われる。また, 作業者の労働環境改善を図る上でも効果的と思われる。

このようなことから, 本研究ではこれまで人手に頼ってきた複雑形状物, あるいは壊れ(傷つき)易い, 変形し易い対

象物のハンドリング作業を支援することを目的として, 3次元視覚情報処理技術, マニピュレータ制御技術, 遠隔制御技術などを応用したシステムの開発を行った。具体的な作業内容としては, 鋳造工場の造型工程における「中子」のハンドリング(搬送・設置)作業を取り上げた。

なお, 本研究期間における前半の技術的な検討段階においては, 効率的に計画を推進するために次のように3つの技術分野に分けて具体的な検討と作業を進め, この中で各要素技術の確立を図った。

- (1) 3次元視覚情報システム
- (2) マスタ・スレーブ・マニピュレータシステム
- (3) バイラテラルハンドリングシステム

その後, これらの要素システムを統合化することにより「中子ハンドリング作業支援システム」を構築し, 本システムに対する評価試験を行った。以下に, 本研究の詳細を報告する。

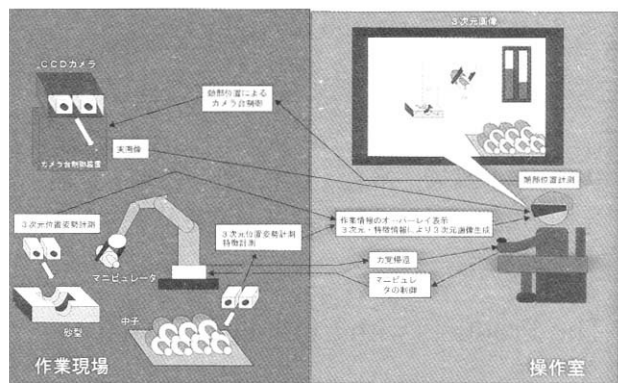


図1 中子ハンドリング作業支援システムのイメージ

## 2. 中子ハンドリング作業支援システムの概要

同1に本研究において開発の目標とした「中子ハンドリング作業支援システム」のイメージを示す。作業現場には中子ハンドリング作業用のマニピュレータが設置され、その近傍には中子を積載したパレットと中子を設置する主型（砂型）がある。マニピュレータはパレット上の中子を一個ずつ把持し、主型へ設置するまでの作業を繰り返し行う。なお、本研究では対象となる中子の形状をT型に限定した。

一方、操作室には多自由度型ジョイスティック（操作機）が設置され、操作者（オペレータ）はこれを用いて作業現場のマニピュレータを遠隔操作する。この際、できるだけ臨場感のある現場の作業情報を操作者に伝えるため、本システムでは現場に CCD カメラを設置し、得られた視覚情報を必要とされる情報に加工した後に、操作者が装着しているヘッドマウントディスプレイ（以下、HMD と言う）に表示することとした。HMD には頭部位置計測装置が装着されているため、操作者の顔の向きに対応して CCD カメラの方向を制御することができる。

さらには、マニピュレータ先端部のハンドが中子を把持した場合、その反力がジョイスティックに伝わることにより中子の堅さや大きさが把握できるように、バイラテラル制御技術を利用した力覚帰還機能を付加した。

## 3. 3次元視覚情報システム

### 3.1 必要とされる機能

遠隔操作による作業支援システムとして重要なことは、遠隔にいながら作業状態を的確に認識・判断して作業を行うことができることである。このため、3次元視覚情報システムには「作業情報提示用3次元視覚計測機能」と「作業環境提示用視覚系マスタ・スレーブ動作機能」が必要とされる。

そこで本研究では、これらの機能を実現するための要素技術の開発を行い、この結果を基に「3次元視覚計測システム」および「視覚系マスタ・スレーブシステム」から構成される

「3次元視覚情報システム」を構築した。

#### 3.1.1 作業情報提示用3次元視覚計測機能

中子および主型は、それぞれ予め決められた場所あるいは所定の範囲内にあり、操作者はジョイスティックなどによってマニピュレータを制御し中子を主型に設置する。このとき、中子および主型の位置・姿勢情報を求め、作業情報として操作者に提示する。なお、簡易作業や操作が困難な作業については、マニピュレータの自律的動作（自動制御機能）を併用する。

#### 3.1.2 作業環境提示用視覚系マスタ・スレーブ動作機能

作業現場に置かれた CCD カメラからの視覚情報を HMD などを通じて得る。このとき、頭部の動作を計測しカメラ台を制御することにより視界の移動が可能となり、より多くの視覚情報が得られる。

### 3.2 3次元視覚計測システム

#### 3.2.1 ステレオ視による3次元計測

3次元計測手法にはアクティブな光源を用いずにカメラだけで計測するステレオ（両眼立体）視があり、利用の簡便さから将来のロボットビジョンとして重要な手法の一つである。そこで本研究では、ステレオ視による計測手法を中心に検討を行った。

ステレオ視による距離情報は、1枚の画像の中で観測された点と別の視点から見た画像中の点との三角測量の原理により求められる。このときの対応探索の信頼性が距離精度に大きく影響を与える。

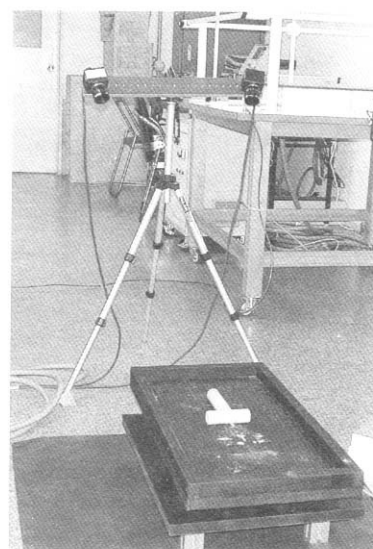
左右に配置された両像の片側（たとえば左）にある点が観測されたとき、その点に対する空間中の位置はその視線上に存在する。その視線は、もう一方（右）の画像上では画像内のある直線に当たる。この直線のことをエピポーラ線、また、左右の投影点が満たすべき拘束をエピポーラ拘束（条件）と言う。2台のカメラ間において、エピポーラ拘束条件を精度良く容易に求めることができれば、ステレオ視の対応点探索も高い精度で行うことができる。

2台のカメラによるステレオ視において、ワールド座標上の点  $M(X, Y, Z)$  とその点の画像上の座標  $(u, v)$  は、それぞれのカメラの透視投影行列を用いて直接結びつけることができる。したがって、それぞれのカメラの透視投影行列が既知であれば、それらの画像において対応する点の位置座標の組から容易に復元することができる。

ここで透視投影行列は、それぞれのカメラの焦点距離、画素サイズ、画像中心などの内部パラメータおよびワールド座標系におけるカメラの位置、姿勢によって与えられる。これは、それぞれのカメラ座標  $m_1(u_1, V_1, 1)$ ,  $m_2(u_2, V_2, 1)$  の間



(a) 計測処理システム



(b) ステレオカメラ

図2 3次元視覚計測システム全体図

に  $3 \times 3$  の基礎行列  $F$  によって

$$m_1^T F m_2 = 0 \quad (1)$$

という関係で表される。この方程式を基礎方程式と言う。基礎方程式は、2つのカメラから見た空間上の一点に対し、2つの画像上におけるすべての対応点の間で成り立つ。したがって、内部パラメータなどが不明でも、2つの画像間で多数の対応点の組が与えられれば、行列  $F$  を求めることができる。

たとえば、1枚の画像上の点の座標  $(u_1, v_1)$  が与えられたとき、この座標によって

$$m_1^T F = (a_1, b_1, c_1) \quad (2)$$

であるならば、式(1)は、

$$a_1 u_2 + b_1 v_2 + c_1 = 0 \quad (3)$$

となる。式(3)は、もう1枚の画像上での画像座標  $(u_2, v_2)$  についての直線を表す。すなわち、ひとつの画像上の点  $(u_1, v_1)$  に対応する点が、もう1枚の画像上ではこの直線上にあることを表す。この直線がエピポーラ線である。

エピポーラ線は、ステレオ画像間で互に対応する点同士を探索、決定することに役立つ。また、すべてのエピポーラ線は、お互いのカメラで見たもう一方のカメラの光学中心を通る。これは、カメラキャリブレーションを行うときに、精度を上げるための重要な条件になる。本研究では、カメラキャリブレーションを行うために8組の点の対応点を数回計測して、比較的誤差の少ない対応点から基礎行列  $F$  を求めた。

一方、画像計測においては、具体的にT型中子の2値化画像に対して微分処理を行った後、エッジ抽出を行った。また、このエッジ画像からハフ変換により2対の平行線の組を抽出した。さらに、1枚(右)の画像の線上の点において、その線に対応するもう1枚(左)の画像上の線とエピポーラ線の交点を求めて対応点とした。このようにして求めた対応点から、3次元計測値を算出した。

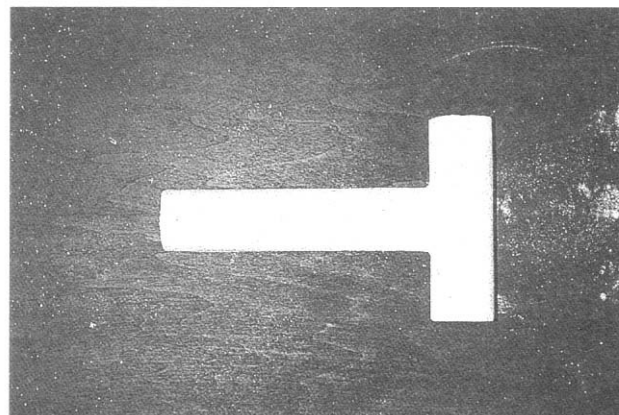


図3 計測対象のT型中子

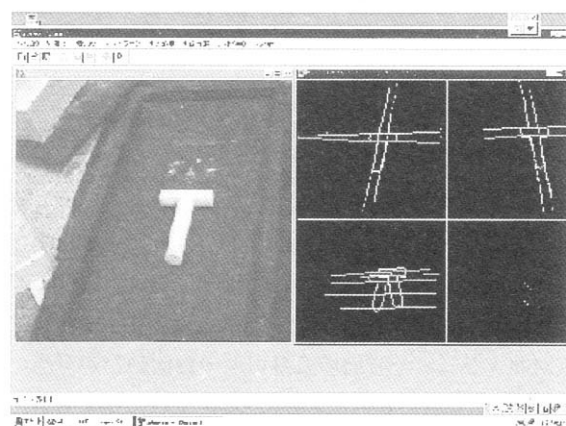


図4 3次元計測処理の結果例

### 3. 2. 2 計測試験および結果

ステレオ視による3次元計測システム(図2)の計測処理部は、作業現場などへの設置を考慮してボードコンピュータ(CPU:MMX-Pentium233MHz)を基本に構成した。図3に計測対象であるT型中子の外観を示す。また、図4に3次

元計測処理の結果例を示す。

この図では、それぞれ左ウィンドウに原画像（640×480画素×24ビットカラー）を表示、右ウィンドウの上側に左右画像に対する処理画像、下側左に対応点探索結果、下側右に3次元計測処理結果を表示している。

このように、3次元計測処理によって左右画像の対応点が求められ、これを基に3次元位置の計測が可能であることが確認できた。しかし、中子が画像中心部からはずれて周辺部にある場合や遠方にある場合には、対応点の位置が若干ずれることが認められた。この原因は、キャリブレーションの精度やレンズの歪みの影響と考えられる。

そこで今後は、キャリブレーション精度の向上を図るとともに、対象物（中子）をモデル化し計測値と本モデルを比較することにより計測精度の向上を図っていきたい。

### 3.3 視覚系マスタ・スレーブシステム

#### 3.3.1 システムの構成

マスタ装置側の操作者の頭部の動きを検出するため、3次元位置・姿勢計測装置（ポヒマス社製 3SPACE FASTRAK：以下、FASTRAKと云う）を使用した。FASTRAKは磁場を利用した高速・高精度な位置・姿勢計測装置であり、トランスミッタで発生させた磁場をレシーバで検出することにより、レシーバの位置および姿勢の6自由度を実時間で計測することが可能である。

計測精度はトランスミッタ・レシーバ間距離によって変化するが、30インチ（約760mm）の範囲内では位置に関して0.03インチ（約0.8mm）、姿勢に関しては約0.15度の精度を有する。

HMDとしては、図5に示すようにオリンパス社製 Mediamask MW601を使用した。本HMDは2チャンネルのNTSCビデオ信号を左右の液晶ディスプレイ（51万画素）によりステレオ画像として表示することが可能である。

スレーブ装置側に設置されたカメラ台（図6）は、操作者の頭部の動きに対応したマスタ装置側からの指令に従って動作する。また、搭載した2台のCCDカメラにより作業環境のステレオ映像を撮影し、マスタ装置側のHMDに提供する。

可動機構については、2台のステップモータによりヨー方向およびピッチ方向の2自由度の旋回動作が可能である。また、モータの位置決めのため、FASTRAKから得た位置指令値とカメラ台の現在位置との偏差に対応した比例制御を行っている。

#### 3.3.2 駆動試験および結果

開発した視覚系マスタ・スレーブシステムの駆動試験を行った。この一環として、初めにカメラ台を最大速度（6000pps）で駆動した。この結果、水平方向に180度の旋

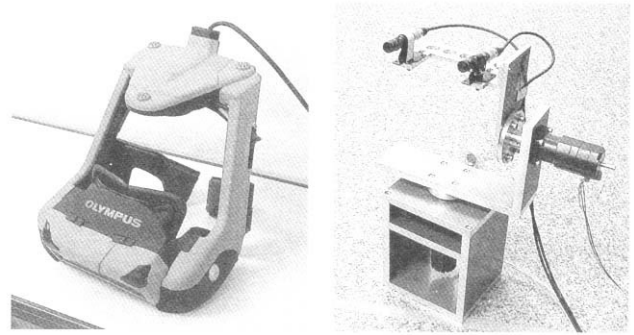


図5 ヘッドマウントディスプレイ（HMD） 図6 CCDカメラおよび可動型カメラ台

回動作を行うために約4秒を要することが分かった。

言うまでもなく、この旋回速度は人間が自然に首を振る動作速度よりも遅い。そこで、本システムの高速化については、今後の検討課題として位置づけ、今回はカメラ台が追従できる範囲の速度で操作者が首を動かすこととした。なお、この速度範囲内では制御則の適正化により追従性も良好で、滑らかな動作が実現できた。

HMDを装着した状態での使用感については、HMDで得られる視野が肉目の視野に比べ40%程度と狭いため圧迫感を感じるものの、首を動かし周囲を見回すことにより作業環境の状況を把握することは十分に可能であった。

一方、人間が細かな作業を行う場合、対象に頭部を近づけたり異なった角度から眺めたりすることによって多くの情報を得ているが、本システムのカメラ台は旋回だけのため、このような動作を実現するには不十分である。このようなことから、精密作業が必要な場合は、予め中子を接近して観察できる位置にカメラ台を設置することが必要と思われる。

また、映像の立体感に関しては、得られるステレオ映像から立体感を認識することができた。しかし、距離感については、操作者がHMD上の画像を見ながらマニピュレータを操作し目標位置へ移動させる試験を行ったところ、奥行き方向に5cm程度の誤差が生じていることが分かった。

このことから、奥行き方向への精密な位置合わせが必要な作業については、ステレオ映像の情報だけにより行うのではなく、レーザーマーカ等で手先位置を床面に投影するなどの何らかの補助的手段を併用するのが現実的と思われる。

### 4. マスタ・スレーブ・マニピュレータ（MSM）システム

#### 4.1 システムの構成

システムの高い制御性を確保するという観点から、基本となるマスタ装置およびスレーブ装置の導入について検討を行った。この結果、本研究ではマスタ装置として6軸ジョイスティック（三井造船製 JAF160）を採用することとした。図7に示すように、この装置はマスタアームとジョイスティックの利点を備えた肘掛け型の6軸操作機であり、次の特徴

がある。

- (1) スレーブ装置の動作方向とマスタ装置の操作方向が一致できるため、操作が容易
- (2) 肘掛け型のため直線指令が容易であり、手先のふらつき対策や疲労軽減にも有効
- (3) シリアル通信 (RS-485, 2.5Mbps) による高速制御が可能

一方、スレーブ装置としては7軸垂直多関節型ロボット(三菱重工製 PA-10)を採用することとした。このロボットには次の特徴がある。

- (1) 制御系が階層構造
- (2) コントローラがオープンコントローラ方式であり、市販のPCが使用可能
- (3) 大きな可搬重量 (98N : 10kgf)
- (4) リアルタイムネットワーク ARCNET (5Mbps) に対応

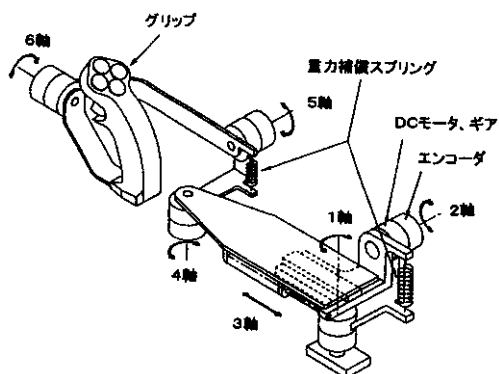


図7 6軸ジョイスティックの構造<sup>2)</sup>

#### 4. 2 制御システムの開発

表1にマスタ装置およびスレーブ装置のおもな仕様を示す。

また、図8にMSMシステムの構成を示す。本システムは、マスタ装置とスレーブ装置の機構が違う異構造型MSMシステムとなっている。このため、座標値や動作範囲の等価変換機能が必要となる。そこで、具体的な中子ハンドリング作業の実現に必要な動作について検討を行うとともに、このような変換機能を実現する制御ソフトウェアの開発を行った。

表1 マスタ装置およびスレーブ装置の主な仕様

項目	諸元
基本構造	極座標型関節配置
軸数	6
変位検出方式	インクリメンタルエンコーダ
スイッチ入力数	押しボタン:6、トリガスイッチ:1
表示方式と数	LED:4
上位PCとの接続	シリアル通信 (RS-485)
シリアル通信速度	2.5 Mbps
本体重量	69 N (7 kg)
形式	垂直多関節型
関節数	7
アーム長さ	950 mm
最大合成速度	1550 mm/sec
可搬重量	98 N (10 kg)
繰返し精度	±0.1mm
システム構成	オープンアーキテクチャ
駆動方式	ACサーボモータ
本体重量	343 N (35 kg)

初めに、以下の3種類の動作を中心にマスタ装置の操作軸とスレーブ装置の動作座標の対応作業を行った。

- (1) アプローチ動作：ワークのピックアップおよびプレイス位置近傍への移動
- (2) 姿勢合わせ動作：手首軸の回転動作
- (3) デパート動作：ピックアップ、プレイス位置から離れる動作

ここで、アプローチ動作およびデパート動作については、操作者が感覚的に最も分かりやすい直交座標軸(X, Y, Z)に沿った方向にマスタ装置から指令を与えることとし、それぞれマスタ装置の第3軸をX軸方向、第4軸をY軸方向、第2軸をZ軸方向の移動指令に対応させた。

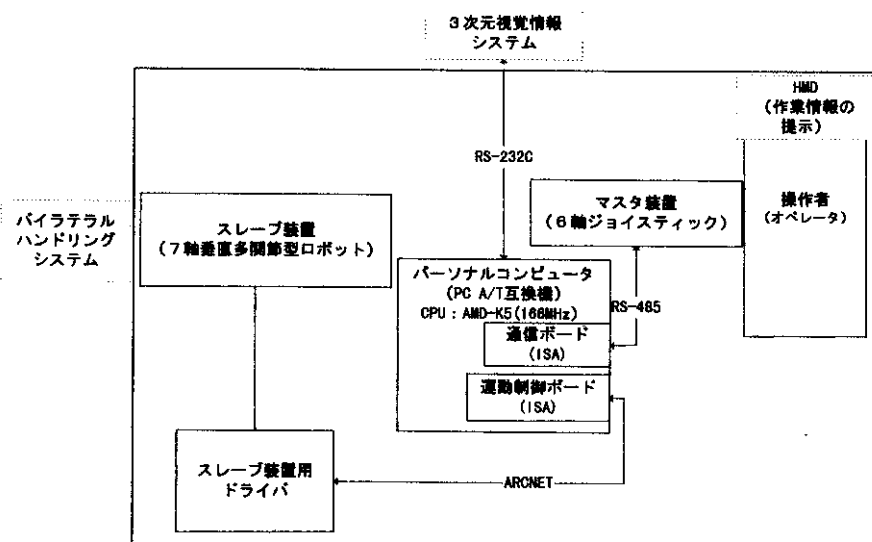


図8 MSMシステムの構成

なお、このスレーブ座標値はマスタ装置の座標に対して Z 軸周りの回転で表され、次式で求められる (図 9)。

$$X_s = X_m \cos \theta - Y_m \sin \theta \quad (4)$$

$$Y_s = X_m \sin \theta + Y_m \cos \theta \quad (5)$$

ここで、 $X_s$  : スレーブ装置の X 座標値  
 $Y_s$  : スレーブ装置の Y 座標値  
 $X_m$  : マスタ装置の X 座標値  
 $Y_m$  : マスタ装置の Y 座標値  
 $\theta$  : Z 軸周りの回転角度

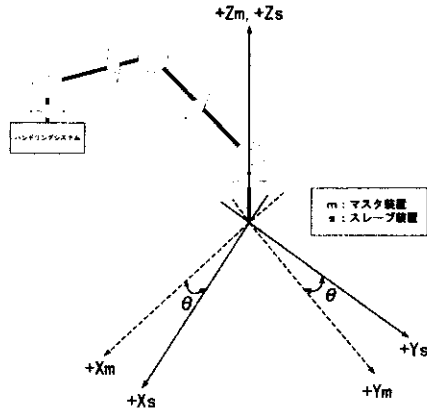


図9 マスタ座標とスレーブ座標の関係

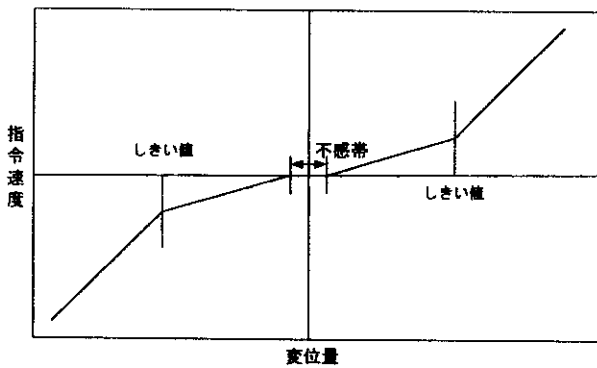


図10 マスタ操作変位置とスレーブ指令速度の関係

一方、姿勢合わせ (Z 軸に平行な軸の回転) には第 6 軸を対応させることとした。このことにより、操作者の手先操作だけでスレーブ装置を動作させることが可能となった。

次に、マスタ装置の操作パラメータおよびスレーブ装置への動作パラメータの調整を行った。本システムではマスタ装置の操作変位置に対応してスレーブ装置ハンド部の移動速度が変化する「速度制御モード」を採用している。

このため、特にマスタ装置の操作変位置に対する中立点の不感帯幅の設定が大きな課題であった。すなわち、中立点の不感帯幅を大きくすると、スレーブ装置の応答動作が遅れてしまい、狭い場合にはスレーブ装置の停止状態を保持することが困難になる。

そこで、単にマスタ装置の変位置を動作速度に変換して指令するのではなく、図 10 に示すように不感帯近傍では速度変化率を小さくし、設定したしきい値を越える範囲においては変化率を大きくするような対策を施した。さらに、マスタ装置の各軸の変位置に比例して反力が大きくなるようにパラメータを設定し操作感を高めるようにした。

#### 4.3 動作試験および結果

開発した MSM システムの動作試験を行い、目標値への移動、経路に沿った移動などに関する性能の評価を行った。この結果、以下のことが分かった。

- (1) オープンコントローラ方式により、スレーブ装置の追従性、制御性が高い。
- (2) マスタ装置側の操作パラメータの適否が、操作性に大きく影響する。
- (3) 操作者は、短期間の練習によりピックアンドプレイス操作を習得できる。
- (4) 操作においては、個人差や慣れによる影響が無視できない。よって、人が介在するシステムでは、これらを考慮した操作パラメータの設定が必要である。

### 5. バイラテラルハンドリングシステム

遠隔作業の中でも微妙な力の加減を要する作業を想定し、操作側 (マスタ装置) と作業側 (スレーブ装置) が力覚情報を共有できる制御法である「バイラテラル制御」を応用したバイラテラルハンドリングシステムの開発を行った。

#### 5.1 バイラテラル制御とその効果

バイラテラル制御は、マスタ装置によりスレーブ装置を制御する際、マスタ装置の動作に追従させてスレーブ装置の動作を制御する一方で、これとは逆向きにスレーブ装置で発生する作業反力等の力覚情報をマスタ装置で再生させる制御を同時並行して行う制御法の一つである。

遠隔操作による中子のハンドリング作業を想定した場合、単にマスタ装置からスレーブ装置へ姿勢あるいは動作を追従させる制御 (ユニラテラル制御) だけでは、操作者に作業時の力覚情報が伝わらない。このため、操作者が作業時に五感から得ている作業環境の認識が難しくなる。

これに対しバイラテラル制御では、現場で作業しているような臨場感を操作者に与えることが可能なため、操作者の技能を活かすことによる品質の良い加工作業の実現ばかりではなく、作業者のストレスを低減させる効果も期待できる。

## 5.2 システムの開発

### 5.2.1 バイラテラルハンドの設計

#### (1) 機構および自由度

中子の把持・設置動作を実現するためには、2指以上を有するハンドが必要となる。また、中子が設置される主型は製造ラインのコンベア上で上下に移動しないことから、ハンドが上下動できる機構が必要である。したがって、把持および設置作業を行うには、最低限2自由度の位置制御機構が必要である。

そこで本研究では、2指をそれぞれ独立に制御することにより、指の開閉方向に若干の位置合わせが可能となるような機能を付加するとともに、上下動の1自由度を加えることにより、マスタ装置、スレーブ装置とも3自由度とした。また、機構の動作範囲および寸法も両者で同一スケールとした。

一方、把持、設置作業に伴う反力が10N(約1kgf)程度と想定されることから、把持機構に加わる荷重はこれに若干の安全率を乗じた程度で良いと考えられる。しかし、鉛直動作機構あるいは水平方向の位置合わせ機構には、静的な力だけでなく慣性力や弾性あるいは衝突などによる動的な力が加わることが予想される。このため、後者の強度設計の際には大きな安全率を設定するとともに、これに対応した力センサのレンジ設定を行った。

#### (2) アクチュエータおよび動力伝達機構

アクチュエータとしては、すべての自由度について低トルクのDCモータと速度制御型モータドライバを組み合わせ使用した。ここで、アクチュエータには動力性能が優れていること、位置決めが容易であることに加え、特にスレーブ装置のハンド(以下、スレーブハンドと言う)の場合はマニピュレータの先端に取り付けられることから、軽量であることが要求される。

そこでスレーブハンドでは、動力を外部からスチールワイヤで伝達する方式を採用し軽量化を図ることとした。一方、鉛直動作に関しては、重力の影響も考慮するとカウンタバランスの取り易いベルト駆動による機構が有利である。このため、マスタ装置のハンド(以下、マスタハンドと言う)ではDCモータを直接配置し、タイミングベルトあるいは平歯車で動力を伝達する方式を採用した。

#### (3) 位置および力の検出

マスタハンド、スレーブハンドそれぞれの位置決め制御を行うためには、これらの位置をリアルタイムで検出する必要がある。そこで本研究においては、減速装置を伴うモータの回転角検出用にロータリエンコーダを積極的に用いるとともに、軽量化や小回転角度の検出が要求される箇所ではポテン

シヨメータを使用することとした。

また、作業反力等の力の検出には、コストを考慮し歪ゲージを主体としたセンシングシステムを採用することとした。なお、歪ゲージからのアナログデータについては、一定期間毎に自動的にA/D変換を行うことにより、常にそれぞれの自由度についてデータが読み取れるように工夫した。

### 5.2.2 バイラテラルハンドの試作

設定した仕様を基に、マスタハンドおよびスレーブハンドを試作した。図11に試作したマスタハンドの外観を、図12にスレーブハンドの外観を示す。据え置き型となるマスタハンドは、剛性を高めるために鋼材を中心に使用した構造とな

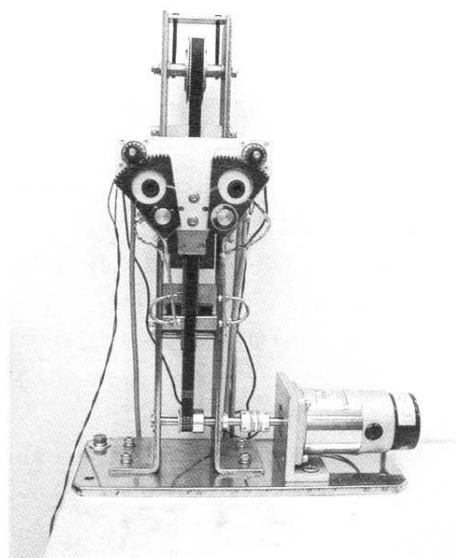


図11 試作したマスタハンド

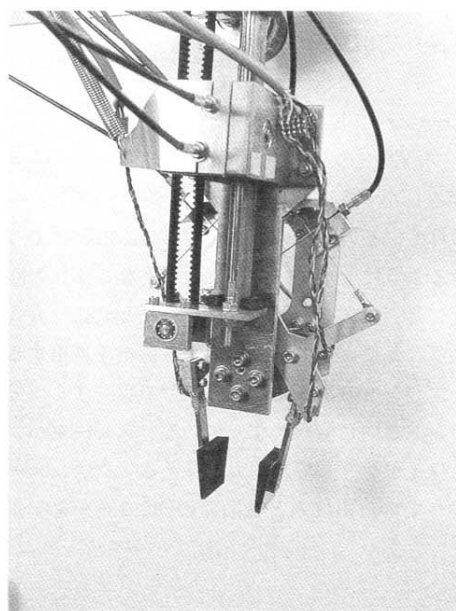


図12 試作したスレーブハンド

表2 マスタハンドおよびスレーブハンドの主な仕様

項目	諸元	
	マスタハンド	スレーブハンド
動作範囲	各 50 mm (閉閉: 0 ~ 100 mm)	
位置検出方式	2指	ポテンショメータ
	上下	ロータリエンコーダ
アクチュエータ	2指	DC モータ (13W)
	上下	DC モータ (20W)
動力伝達方式	2指	平歯車
	上下	タイミングベルト
最大許容加圧	29 N (3 kgf)	
	上下	49 N (5 kgf)
力検出方式	歪ゲージ (350 Ω 4枚ゲージ方式)	
制御方式	デジタル制御方式	

っているのに対し、スレーブハンドは軽量化を図るため構造部材の大部分にアルミ合金を使用した。表2にマスタハンドおよびスレーブハンドのおもな仕様を示す。

(1) マスタハンド

マスタハンドの2指の駆動機構では、操作者が2つのレバーの開閉部に指を入れて開閉操作を行う。DCモータの回転角度が平歯車式減速機構を介してレバーに伝えられることにより、レバーは開閉動作をする。

回転角度の検出には、DCモータに取り付けられたロータリエンコーダ(1000pulse/rot.)を用いた。また、力の検出にはレバーの回転軸付け根付近の裏と表に2枚ずつ歪ゲージ(350Ω, ゲージ長2mm)を貼り、ホイートストンブリッジ回路を構成して用いた。

マスタハンドの上下動機構としては、DCモータの回転軸にスプロケットを取り付け、機構上部のタイミングベルトアイドラとの間にリニアガイドを配置した。さらに、リニアガイド上の移動ブロックに力検出ブロックを介してハンド部を取り付けた。この力検出ブロックは鋼材を角パイプ状に加工したものであり、対向する2辺を厚さ約1mmに研削し、これに歪ゲージ(350Ω, ゲージ長2mm)を貼っている。

(2) スレーブハンド

スレーブハンドの2指駆動機構は、Y字型レバーの1箇所指となるレバーを取り付け、残り2箇所スチールワイヤを取り付けて、そのうちの一方を引っ張ることによって指を動作させるようになっている。この指となる部材の回転軸付け根付近には、マスタハンドの指レバーと同様な方式で歪ゲージを貼ることによって指に作用する荷重を検出する。

スレーブハンドの上下動は、ワイヤで駆動する以外はほぼマスタハンドと同じ機構となっている。スレーブハンドの機構に対しワイヤを介して駆動力を与えるアクチュエータとしては、すべての自由度系とも同等のDCモータを配置している。

(3) 信号処理系

制御信号の処理は、各自由度とも専用のインターフェイスコントローラ(早坂理工製HVC-BLCH)を用いた。制御信号処理ユニットは、各々の自由度ごとに独立しており、入力として位置検出入力(ポテンショメータ対応型あるいはロータリエンコーダ対応型)、力センサ入力(共和電業ロードセルインターフェイス準拠)の2つと、出力としてモータ速度制御指令出力(アナログ±10V DC max.)を備えている。これらの制御信号情報は、専用の8ビットデジタル入出力インターフェイスを介して読み書きが可能となっている。

5.3 バイラテラルハンドリング試験および結果

試作したマスタハンドおよびスレーブハンドを用いて、バイラテラル制御による動作試験を行った。バイラテラル制御では、これまでの検討結果からアクチュエータ系の駆動能力が高い場合はマスタ・スレーブ間の機械的連結インピーダンスを十分に高く設定し、さらにマスタハンドとスレーブハンドに加えられている作用力の差から両者に同じ変位量を与える方法により良好な制御が実現できることが確認できている。よって、この方法をそのまま応用することとした。

この考え方の概略を示す。ここでマスタハンドに加えられる力を  $m$ 、スレーブハンドに作用している力を  $s$  とする。 $m$  はオペレータの操作力であり、 $s$  は把持している対象から受ける反力と考えてよい。

マスタハンドとスレーブハンドは高い剛性で連結されると仮定するので、マスタハンド、スレーブハンドの移動あるいは運動の変化は、この2つの力のバランスによって決定される。いま、マスタハンドおよびスレーブハンドの系に仮想的に機械的インピーダンスとして、剛性抵抗( $k$ ; パネ定数)、粘性抵抗( $b$ ; 粘性係数)、慣性抵抗( $m$ ; 質量)を与えると、2つの力と機械的仮想インピーダンスから、次の運動方程式が成り立つ。

$$f_m + f_s = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx$$

ただし、 $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ 、 $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$  (6)

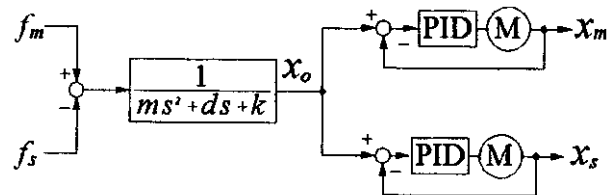


図13 直動系バイラテラル制御のブロック図



制御アルゴリズムは、図 13 のブロック図に示すように、この連動方程式から次の微小時間後の変位を計算し、マスタハンドとスレーブハンドの両方に同じ変位を指令し、位置合わせのための制御を行う。

ここで、アクチュエータとして用いている DC モータおよびドライバは速度制御型であるため、これを用いて位置決めを行うにはマスタハンドおよびスレーブハンドの実際の位置を検出し、位置指令との偏差からモータの速度を決定する仕組みが必要である。そこで本制御系では、予めソフトウェア上で PID 制御理論に基づいて係数を決定することにより位置決め制御を行った。

本システムによる制御試験の結果を以下に報告する。

#### (1) 接触安定性

中子を把持する際、スレーブハンドが中子に触れた途端にマスタハンドの指がはじかれるという状況が生じた。これは、中子からの反力と無荷重状態で姿勢を変えるための力のレベルに大きな差があることが原因と考えられる。そこで、接触しても直ちに大きな反力を返さないようにする対策を施した。

具体的には、力検出のレベルをスレーブハンドの方だけ縮小し、スレーブハンドが中子に触れてから把持力が少し生じたところで初めて、両者の力関係が釣り合うようにした。この結果、脈動が少し抑えられることが判明したため、さらに、機構に与える仮想インピーダンス、特に粘性を増加させる対策を施すことによって、把持に支障を来たさない状態を実現した。

#### (2) ワイヤ駆動に伴う機械的制御性

スレーブハンドの駆動用としてワイヤによる動力伝達を採用したが、ワイヤ経路の変化によりワイヤ駆動に伴うすべり抵抗とワイヤの緩みによるむだ時間発生とのトレードオフ設定の問題があることが分かった。特に、経路の不確かさがそのまま機械的な状態の再現性の悪さに直結するため、制御パラメータの設定が非常に難しいことが分かった。

また、これらを吸収するために仮想インピーダンスを大きく取らねばならず、操作性は若干犠牲にせざるを得なかった。すなわち、各自由度を操作するためには大きな力を要することになるので、粘性の強い流体中に機構を置いて操作しているような感覚となった。

これにより、安定した位置の追従性は実現できたが、スレーブが中子に接触した際の反力の帰還に関しては機構の移動と反力の力のレベル差が狭まったことから、明快な感覚を得るには至らなかった。

一方、同じくワイヤ駆動に伴うワイヤとガイドチューブとの摩擦により、精度の高い位置決めは実質的に困難であったが、バイラテラル制御による力覚帰還を利用すると位置決め

誤差をある程度吸収する効果があり、単に力覚を返すだけでなく場合によっては機械的な制御にも有効な手段であることを確認した。

#### (3) 力帰還の有効性

バイラテラル制御を応用する目的は、スレーブハンドに作用する力覚をマスタハンドで感じ取って作業の臨場感を高めることによる作業支援効果を得ることである。本研究のシステムでは、中子を把持する際の把持力や設置する際の反力を得ることが主目的であるが、その他にも設置の際の接触反力を利用して位置合わせを行うことについてもその効果を期待していた。

しかし、系の位置決め制御安定化のために力覚情報の帰還性能を犠牲にせざるを得なかったため、期待した効果は得られなかった。特に、設置の際の位置合わせは非常に難しいものであった。その反面、把持の際の感覚や設置の際の反力についてはマスタハンドで感じ取ることができたため、把持力の調整や設置面に損傷を与えずに中子を置くなどの作業には力覚帰還の有効性を確認することができた。

## 6 . 中子ハンドリング作業支援システム

要素システムである 3 次元視覚情報システム、マスタ・スレーブ・マニピュレータシステムおよびバイラテラルハンドリングシステムが構築された段階で、中子ハンドリング作業支援システムとしての統合化（以下、統合化システムと言う）を図り、システムの調整と評価試験を行った。

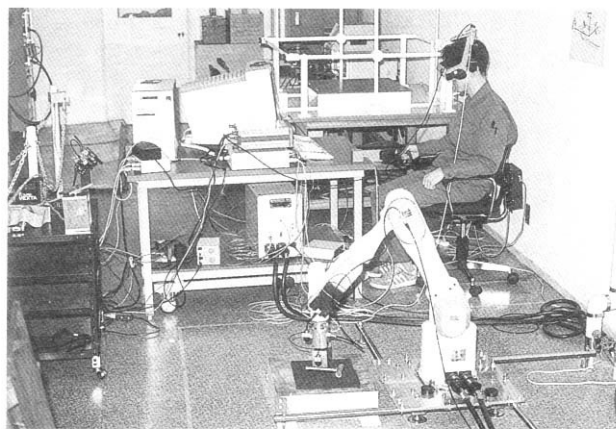


図14 統合化システムの評価試験の様子

### 6. 1 統合化システムの評価試験および結果

システムの評価試験では、遠隔操作により下記の動作フローを実現することとした。図 14 に統合化システムの評価試験の様子を示す。

- (1) スレーブハンドを初期位置からパレット上の中子上部に移動

- (2) ハンドの位置および2指開閉度を微調整しながら下降
- (3) 中子を把持し、ハンドを上昇
- (4) 主型上部にハンドを移動（自動位置決め）
- (5) ハンドの位置を微調整しながら下降
- (6) ハンドの2指を開き、中子を主型に設置
- (7) ハンドを初期位置に移動

以下に、評価試験の結果について報告する。

### 6.2 3次元視覚情報システム

中子の位置計測については、2台の固定カメラを用いたステレオ視による3次元計測を行った後、マニピュレータ座標系における中子の位置計測精度について評価を行った。この結果、本座標系においてはカメラからの距離により相違はあるが、計測精度はほぼ数mm～十数mmの範囲にあることが分かった。

これに対し、中子を的確に把持し主型へ設置するには、1mm程度の位置決め精度が必要とされている。このため、3次元位置計測情報だけで本作業を行うのは困難である。よって今回は、視覚系マスタ・スレーブシステムに設置した2台のカメラからの実画像をHMD上に表示するとともに、3次元位置計測情報を基にマニピュレータ、ハンド先端部、中子、主型それぞれの位置をHMD上にマーカ（●印）としてオーバーレイ表示することにより、微妙なハンドリング操作を実現することとした。

さらに位置決め精度を向上させるため、ハンド端部に2個のレーザマーカを取り付け、レーザスポットの位置を実画像上で確認しながら操作を行うこととした。

この結果、操作者はHMD上に投影されたマーカにより中子とハンド間の相対位置を視覚的にとらえることができ、概ね中子把持位置へハンドを移動することができた。さらに詳細な把持位置への移動には、レーザスポットと視覚系マスタ・スレーブシステムからの視覚情報を利用した。このことにより、的確な中子の把持操作が可能となった。

なお、HMD上に装着した頭部位置検出用のFASTRAKから得られる6軸の計測データを基にカメラ台の駆動を行った結果、頭部の動きに追従した効果的なカメラ台の制御を実現することができた。

### 6.3 マスタ・スレーブ・マニピュレータシステム

統合化システムにおいては、次のような機能を付加した。

- (1) レーザマーカ設置による視認性の向上  
(中子あるいはその近傍を照射)
- (2) 切り替えスイッチ操作によるパレット上から主型近傍への自動位置決め機能
- (3) 3次元覚情報システムとの通信機能  
(RS-232C, 9600bps)

- (4) 各軸ベース速度の切り替え機能  
(概略移動：100mm/s, 精密位置決め：10mm/s)

中子の把持および主型への設置操作における操作性については、操作者は初期段階で戸惑いを感じる場面も見受けられ、当初はハンド位置の微調整などに時間を要した。しかし、操作の回数を重ねることにより習熟度が向上し、容易に円滑なハンドリング操作を行うことが可能となった。

その反面、マスタ装置側の操作パラメータが操作性に大きく影響を与えることが分かった。このことから、本システムのように人が介在するシステムでは、個人差や慣れなどの人的要因についても十分考慮した適正なパラメータの設定が望まれる。

今後は、適切な操作パラメータの設定に関してさらに検討を進めるとともに、臨場感を高める意味から力覚フィードバック機能を付加していきたい。

### 6.4 バイラテラルハンドリングシステム

#### 6.4.1 スレーブハンドに加わる慣性力の制御系への影響

当初、スレーブハンドを取り付けた状態でマニピュレータが動作する際、バイラテラル制御系が不安定になることが心配された。すなわち、バイラテラル制御系は力の検出から制御ルーチンが発火するため、力検出の際に大きな外乱を受けると制御系の安定性が失われる可能性がある。

マニピュレータの動作によってスレーブハンドに作用する力学的な外乱としては、静止状態から動き出すときや動作時の速度の急激な変化に伴う慣性力の影響などが考えられる。しかし、今回の試験ではマニピュレータの動作速度が極めて小さかったため、これらの影響については検証することができなかった。

今後は、マスタハンドで再生される力覚の品質（実感性）向上の方策として仮想インピーダンスを小さくして力センサの感度を向上させる場合には、スレーブハンドに作用する動的荷重の影響を十分考慮しなければならないと思われる。

#### 6.4.2 作業時の操作性

今回の統合化においては、マニピュレータ制御系とハンド制御系とが互いに独立していたため、それぞれの操作システムも別個のものとなった。このため、操作者はマニピュレータの操作を右手および右腕で、スレーブハンドの操作を左手で同時に操作しなければならなかった。

そこで、操作者の負担を軽減する意味から、今回の試験では把持操作を固定してしまう機能を付加した。これにより、中子を把持して固定モードに移行すると、把持力がある程度変動しても中子の把持状態を維持できるようになった。具体的には、制御の元として位置付けられる力センサの感度を

1000分の5程度まで小さくし、把持のためのバイアス力を計算してそれに加えるという方法でこの機能を実現した。

また、固定モード、通常モード間の移行には、約2秒間で感度を段階的に変動させ、作業者への違和感を和らげる工夫も施した。これにより、実際に中子を把持した後に固定モードに移行した場合、適切に把持状態を維持することが可能となった。

## 7.まとめ

3次元視覚情報システム、マスタ・スレーブ・マニピュレータシステムおよびバイラテラルハンドリングシステムを開発し、これらを統合化した「中子ハンドリング作業支援システム」を構築した。また、本システムに対する評価試験を行った。この結果、概ね良好な中子のハンドリング作業を実現することができた。

このようなことから、今後は実際に鋳物工場において稼働可能なシステムとすべく、機能および性能の改善を図ってきたい。

最後に、本研究開発は中小企業庁の「地域産学官交流促進事業」として実施されたことを付記する。

## 謝辞

本研究開発の遂行にあたり、コーディネータとして熱心にご指導頂きました北海道大学の和田充雄教授および工業技術院機械技術研究所の谷江和雄部長、さらには、有意義な研究交流をさせて頂きました北海道電力(株)総合研究所の福澤修一朗研究員および鶴巻工業(株)の大西義博課長代理に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 出口光一郎, ステレオの仕掛けを解き明かす, 情報処理学会誌, vol 137, No.7, p662-670, 1996
- 2) 三井造船(株), ffJOYARM ユーザーズマニュアル
- 3) 三菱重工(株), 可搬式汎用知能アーム取扱説明書, Rev.2.0
- 4) 松日楽信人, マスタスレーブマニピュレータの実操作性向上に関する研究, 1996
- 5) 戸羽篤也, 桑野晃希, バイラテラル方式による力覚制御技術, 北海道立工業試験場報告, No297, 1998.