

# バイラテラル制御を応用したマスタ・スレーブ・ハンドシステムの試作

戸羽 篤也, 桑野 晃希

## An application of the bilateral control method to force sensible master-slave hand.

Atsuya TOBA, Kouki KUWANO

### 抄 録

遠隔操作による加工作業システムは、一般に作業環境が良くないといわれる製造工場の作業環境改善対策の一つとして効果が期待できる。その際、従来は手作業で行われていた作業に適用することを考えると、加工時の微妙な手加減のような作業者特有の技能をそのまま生かすためには、加工反力などの力情報を作業者に返す機能が必要となる。これを実現するのがバイラテラル制御型の遠隔操作システムである。

筆者らは、これまでに簡単な装置を使用してバイラテラル制御法を応用した力覚帰還型の遠隔制御に関する実験を行い、同制御法を遠隔作業に応用した場合の有効性を確認した。今回、これら実験結果をもとに二指による把持作業を想定したマスタ・スレーブ・ハンドシステムを試作し、バイラテラル制御を応用した遠隔把持作業について実験を行った。

### 1. はじめに

遠隔操作ロボットは、水中、宇宙、高放射能など人間が直接その場で作業できないと考えられる環境下に必要な仕事をするための技術として研究が進められてきた。<sup>1)</sup>

遠隔操作を応用した作業はこうした極限環境下だけでなく、製造工場の特に危険度の高い工程や作業環境の極めて苛酷な工程に適用することが効果的であると考えられる。<sup>2)</sup>

製造ラインの中で機械化・自動化が進まない工程を分析してみると、加工対象が多品種少量であったり、予め予測のできない突発的な状況が想定されるなど、自動化そのものが難しいか、あるいは自動化してもコストに合わないことなどがその理由であろう。

人が操作する遠隔作業は、突発事態への対応や微妙な力加減のような作業者固有の技能を生かした作業が可能である。

このとき、加工時の反力などの力覚情報を作業者に返すことにより、操作性や作業品質の向上が期待できる。

“バイラテラル制御法”は、人が動作を指示する“マスタ装置”と、その指示にしたがって具体的な作業を行う“スレーブ装置”の間で運動と力とを同時並行して制御するもので、作業者はスレーブに作用する反力などを感じながら操作できるようになる。

我々は、製造工程における遠隔作業システムの導入を念頭に置きながら、バイラテラル制御を応用した力覚帰還型の遠隔操作システム制御について基礎試験を行ってきた。

これまでに簡単な装置を使用してバイラテラル制御法に関する実験を行い、遠隔作業に応用した場合の有効性を確認した。<sup>3)</sup>今回はその応用例として最も単純な二指による物体の把持作業を想定したマスタ・スレーブ・ハンドシステムを試作し、バイラテラル制御を適用した動作実験を行った。

### 2. 実験装置

#### 2.1 マスタ・スレーブ・ハンド

実験装置となるマスタ・スレーブ・ハンドの試作にあたり、

具体的な作業とそれに必要な仕様を検討した。

まず作業動作は、手作業で最も基本的な把持動作とし、力覚すなわち把持力を感じながら対象物体を把持する必要最低限の機構として、親指と人差し指の二指による把持動作を選定した。

ハンド機構の自由度は、マスタ、スレーブともに親指と人差し指を独立して制御するとともに、把持した物体を鉛直方向に上げ下げするための自由度をもつ3自由度機構とした。

動作を指示するマスタハンドは、操作者のもとに固定して用いることを想定して鋼材を用いた高剛性構造とし、平歯車による動力伝達および減速機構を採用した。一方のスレーブハンドは、マニピュレータなどの先端にツールとして取り付け一定の範囲内で移動しながら作業することを想定し、ア

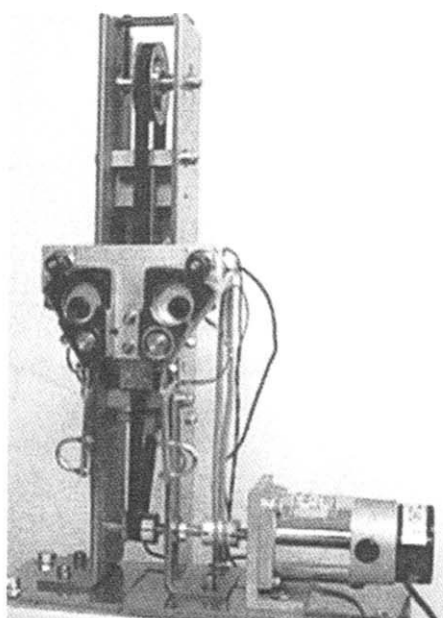


図1 マスタハンド

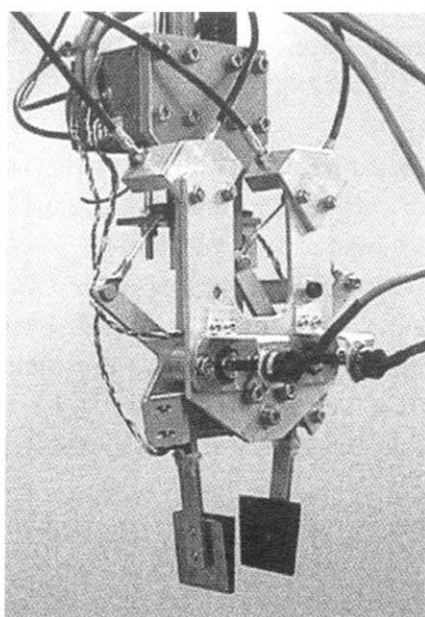


図2 スレーブハンド

ルミ合金を用いて軽量化するとともに、スチールワイヤを用いたフレキシブルな動力伝達機構を選定した。

バイラテラル制御法では、それぞれの自由度ごとに位置および荷重を計測するセンサと動作あるいは力覚を制御するためのアクチュエータを備える必要があるが、今回の試作では実用化を意識して低コスト装置指向とし、アクチュエータにはDCモータと減速機構との組合せ、力センサにはひずみゲージを直接構造部材に貼って用いた。位置センサは、マスタハンドについてはアクチュエータとなるDCモータの回転軸にロータリエンコーダを取り付けてモータの回転量から位置を換算した。スレーブハンドについてはスチールワイヤ駆動に伴う動作の時間遅れに配慮し、ハンドの動作機構に直接位置センサを取り付けた。スレーブハンドの上下動作の位置検出は、駆動機構の一部からタイミングベルトを介してロータリエンコーダを回転させて行った。また、スレーブハンドの指変位は動作範囲が小さいためポテンシオメータを用いて計測した。

指の長さは、ほぼ人の指に合わせて80mmとし、把持対象物の大きさをφ30mm程度と想定して中立状態時の2指間距離を50mmとした。ハンドの最大把持力は20N (=約2kgf)程度とし、機構の動作範囲および寸法は、マスタ、スレーブ両者で同一スケールとした。

決定した仕様に基づいてマスタハンドおよびスレーブハンドを設計し、製作を行った。試作したマスタハンドを図1に、スレーブハンドを図2に示す。

## 2.2 制御信号処理系

バイラテラル制御の信号処理には、マイクロプロセッサによるデジタル制御系を用いた。制御信号の情報処理は、図3に示すように、CPUにIntel製Pentium/133プロセッサを搭載したDOS/V仕様マザーボードを用い、マスタハンド、スレーブハンドそれぞれに用意した専用の信号処理ユニットとパラレルケーブルで接続して情報交換を行った。

専用インタフェースユニットは、各自由度について変位(位置)センサであるロータリエンコーダ出力パルスのカウンタ、ポテンシオメータ出力のA/D変換、荷重センサとして用いたひずみゲージブリッジ回路の出力増幅およびA/D変換、DCモータドライバへの指令電圧を発生させるためのD/A変換などを行う。

デジタル制御の場合、サンプリング周期を十分に短くしなければ制御が不安定になりやすいことが知られている。<sup>4)</sup> 信号処理系の中で多くの時間を要するプロセスは、電圧などのアナログ信号をデジタル化するA/D変換プロセスやその逆にデジタルデータからアナログ電圧を合成するD/A変換プロセスである。1自由度についてこれらのプロセスを複数回繰り返す必要があることから、システム全体の自由度が増加するにつれて、これらのプロセスに要する時間が長くなり、結果として制御のサンプリング周期が長くなる。

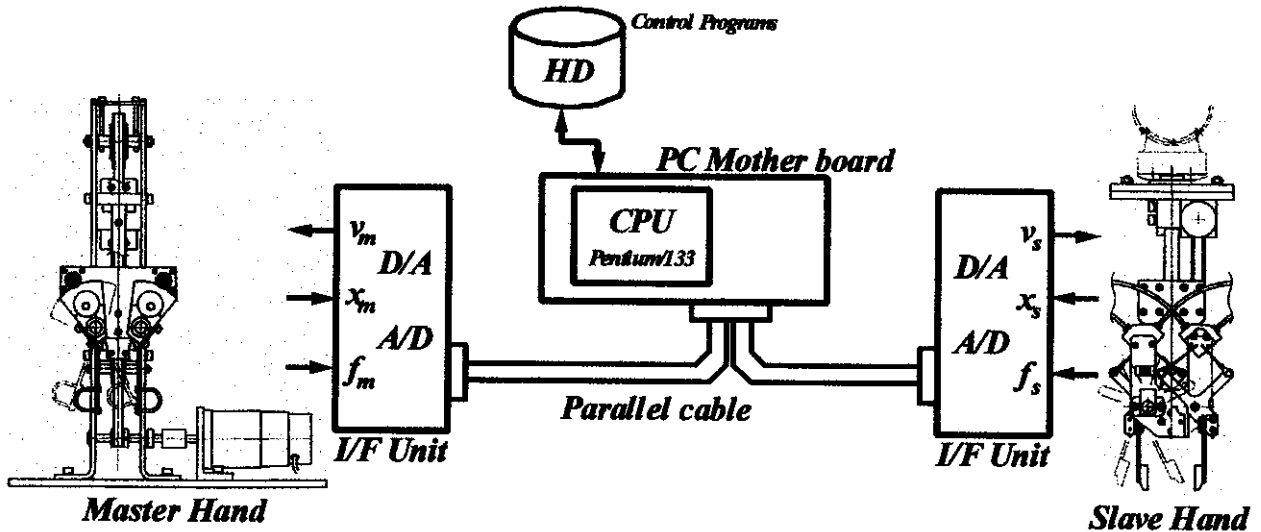


図3 バイラテラル制御系の構成図

専用インタフェースユニットは、A/D変換、D/A変換プロセスを独立して常時実行しており、CPUはこれらプロセス制御のための負担から解放されるため、動作制御のサンプリング周期を短くすることができる。

専用インタフェースユニットは50kHzの頻度でA/D変換、D/A変換を実行する。これにより、試作したマスタ・スレーブ・ハンド制御系では合計36回(=6自由度×3入出力×2バイト)の変換プロセスを1m秒間以内で完了する。したがって、マスタ・スレーブ・ハンド制御系のサンプリング周期は、1m秒程度まで短くすることが可能となる。

専用インタフェースとCPUシステム間の情報交換は高速かつ耐ノイズ性の高い通信経路が必要である。今回の制御系では通信容量の大きい平行ケーブル用い、データ交換のインタフェースに高速光アイソレート素子(TLP513, TLP552, TLP2630など)を採用することで約8.5Mbpsの通信速度が得られた。

また、バイラテラル制御のための正確なサンプリング周期を生成するために、水晶発振素子を使用した発振回路から出力される基本クロックをカウンタIC(i8253)で分周し、一定時間ごとにCPUシステムに対してハードウェア割り込みを発生させる回路を用意した。サンプリング周期はカウンタICのプログラミング機能を利用することでソフトウェア設定が可能である。今回の制御実験では、サンプリング周期を5m秒とした。

また、制御プログラムは、オペレーティングシステム(MS-DOS v6.20)で動作する実行ファイルの形式でハードディスクに保存し、適宜実行して制御実験を行った。

### 3. 実験および考察

#### 3.1 位置決め制御

マスタハンドおよびスレーブハンドの位置決め制御は、各自由度ともアクチュエータに使用したDCモータとそのドライバが速度制御型であるため、位置指令と位置センサ出力のフィードバックとの差からPID補償器を介してDCモータに速度指令を与える制御方式とした。

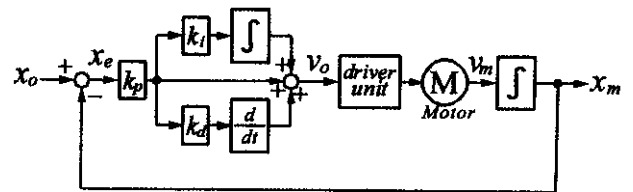


図4 PID方式による位置決め制御

PID制御方式による各自由度の位置決めは、図4に示すような制御系を考え、目標とする変位 $x_0$ が与えられたときに、実際に変位センサで検出した制御対象の変位 $x_m$ との差 $x_e$ に対する比例ゲイン $k_p$ 、 $x_e$ の積分量に付する積分ゲイン $k_i$ 、 $x_e$ の微分値に対する微分ゲイン $k_d$ の3つを適当に選ぶことにより最適な位置決めを行うものである。PID補償器によりDCモータのドライバに対する速度指令 $v_0$ は、

$$v_0 = k_p \{ x_e + k_i \int x_e dt + k_d \frac{d}{dt} x_e \} \quad (式1)$$

ただし、 $x_e = x_m - x_0$

で与えられるが、機構の機械的な抵抗などの条件に対して最適な応答動作となるようにパラメータ $k_p, k_i, k_d$ で調整する。

PID補償器の各ゲインパラメータは、位置指令としてステップ入力を与え、それに対する機構の応答動作から決定した。ステップ入力は、1秒ごとに中心から2.5mmの振幅で矩形波状の位置指令 $x_0$ を与えた。

図5は、マスタハンドの指自由度のステップ入力に対する応答である。比例ゲインを  $3.6 \times 10^5$  としたときは約0.2秒後に目標変位に達しているのに対して、比例ゲインを  $5.0 \times 10^5$  と高くしたときは0.17秒と少し応答性が良くなるがわかる。しかし、あまり比例ゲインを高くすると、振幅を大きくしたときに制御が不安定になることが確認された。

マスタハンドの位置決めでは、微分ゲインを高くしても応答性が若干よくなるだけで効果的な制御性の改善に寄与しないことがわかった。また、積分ゲインを小さくしすぎると目標変位まで達しないことがあるが、ある一定値以上大きくすると目標位置を通りすぎてしまう現象(=オーバーシュート)が発生することが認められた。

遠隔作業システムの位置決めにおけるオーバーシュート現象は、特にスレーブハンドが対象物を把持している場合に対象物に必要以上の力が加わり、対象物かハンド機構のどちらかを破損させてしまう可能性が高いので避けなければならない。

図6は、スレーブハンドの指自由度のステップ入力に対する応答である。スレーブハンドのワイヤ駆動では、積分ゲインによる位置決め性の改善は見られなかった。比例ゲインもマスタハンドに比べてかなり小さいが、比例ゲインを大きくしすぎるとオーバーシュートが大きくなるだけでなく、制御そのものが不安定になってしまうことがわかった。一方、微分ゲインが小さい場合に目標位置を大きく通り過ぎる現象が微分ゲインを大きくすることで抑えられることを確認した。しかし、微分ゲインを必要以上に大きくすると応答性が悪化する傾向も認められた。

スレーブハンドの応答性は、マスタハンドに比べて非常に悪くまた、安定して目標変位に達するまでに約1秒程度要する。この原因として、スレーブハンドについては軽量化を優先して剛性を小さくしたことに加え、駆動力伝達に用いたスチールワイヤとその保護チューブとの摩擦などが大きく影響していると考えられる。

これらの試験結果から、マスタハンドの位置決めはPI制御、スレーブハンドの位置決めはPD制御とし、表1に示すPIDパラメータを選定して制御実験を行った。

### 3.2 周波数特性

マスタハンドおよびスレーブハンドの動的制御特性を周波数応答によって評価した。入力する位置指令信号は、振幅2.5mmの正弦波とした。

図7は、マスタハンドの指に位置指令として周波数を変化させた正弦波を入力したときの応答の様子を示す。周波数が高くなるにつれて振幅が減衰し、位相遅れが大きくなることが確認できる。これらをボード線図で整理すると図8のようになるが、 $\omega = 12.5 \text{ rad/秒}$  付近に折点角周波数をもつ1次遅れ要素の伝達関数に近い特性があることが認められた。こ

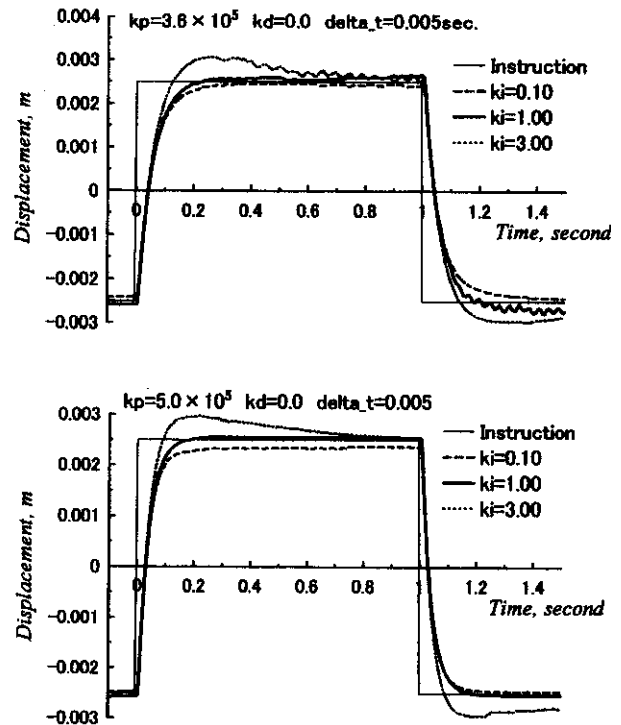


図5 マスタハンドの位置決め制御

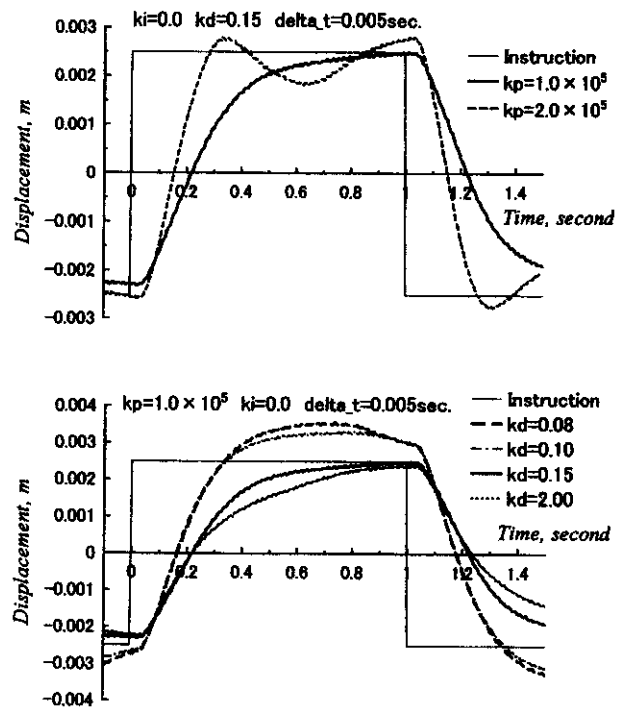


図6 スレーブハンドの位置決め制御



表1 位置決め制御のPIDパラメータ

ハンド	自由度	$k_p$	$k_i$	$k_d$
マスタ	指	$3.6 \times 10^5$	1.00	—
	上下	$2.5 \times 10^5$	0.80	
スレーブ	指	$1.0 \times 10^5$	—	0.10
	上下	$3.0 \times 10^5$		0.01

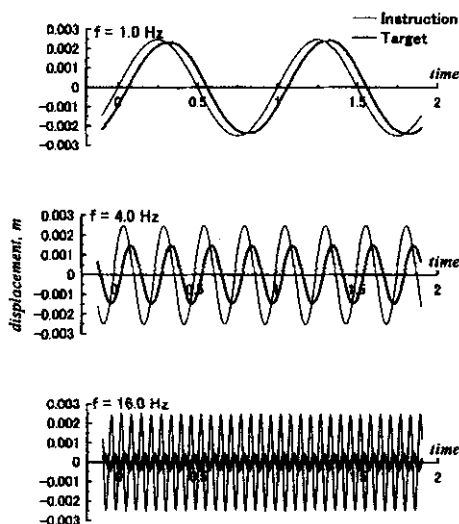


図7 マスタハンドの周波数応答

のときの伝達関数は、折点各周波数の逆数が時定数となるので、

$$G(s) = \frac{k}{1+0.08s} \quad (式2)$$

であらわされる。この時定数 0.08 [秒] は図 5 で示したステップ応答の時定数 0.09 と近い値であることが確認された。

これに対し、スレーブハンドの周波数応答は、同 9 に示すボード線図から高次遅れ要素を含む複雑な応答であることが予測される結果が得られた。また、入力に対する応答の振幅減衰率、位相遅れともにマスタハンドに比べてかなり大きく、スレーブハンドが素早い動きに追従できないことがわかる。

これもまた位置決め特性のときと同様に、マスタハンドが高剛性構造であるのに対してスレーブハンドの剛性が小さく、動力伝達に用いたスチールワイヤとその保護チューブとの摩擦、モータの回転からワイヤの張力を発生させるための機構などが複雑に影響しているものと考えられる。

特に低い周波数の応答では、図 10 に示すように正弦波の極値となる部分で応答波形が大きく歪んでしまい、入力波の振幅よりも応答波の振幅の方が大きくなる現象が発生した。これは駆動用ワイヤの緩みが主たる原因であると考えられる。

保護チューブを使用したワイヤ駆動方式は、任意の経路で動力伝達が可能となる反面、常にワイヤの曲率が変化してワイヤと保護チューブとの摩擦力は不定となる。ワイヤに加わ

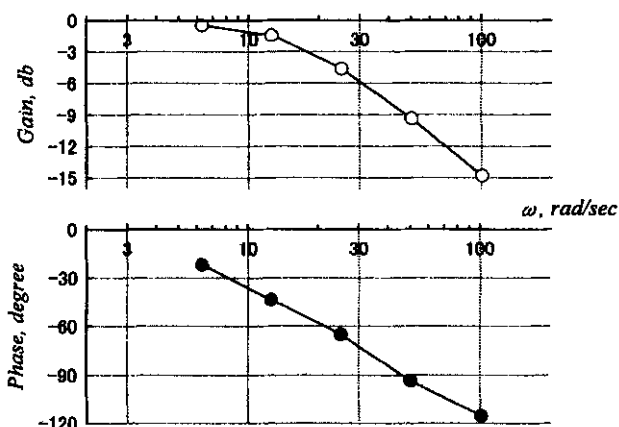


図8 マスタハンドの周波数特性 (ボード線図)

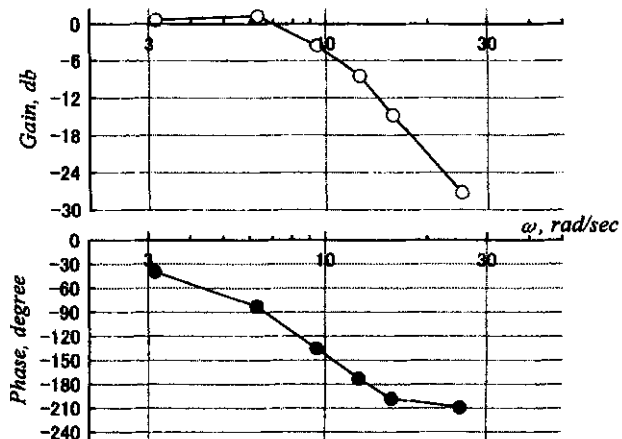


図9 スレーブハンドの周波数特性 (ボード線図)

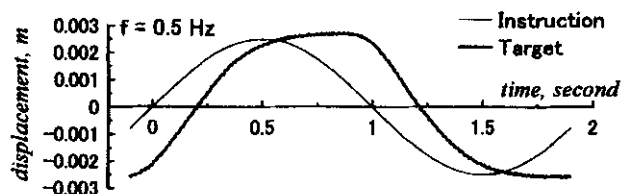


図10 スレーブハンドの周波数応答

る張力が小さいときは保護チューブとの摩擦も小さいが、ワイヤに幾分かの張力が加わって一定以上の曲率があると、ワイヤが曲率の中心方向に保護チューブを締め付ける状態になって急激に摩擦力が増大する。

したがって、スチールワイヤによる動力伝達では、十分に大きなトルクを出力できるモータを使うか、動力伝達経路を予め決めてしまわない限り、ワイヤに一定の緩みを持たせておかなければならず、このことが動作制御を難しくする要因となっている。

3.3 バイラテラル制御

マスタハンドとスレーブハンドのバイラテラル制御アルゴリズムは、マスタとスレーブで自由度系が同一であることから、前年の実験でその有効性が確認されている方式を採用した。<sup>4)</sup>

すなわち、図 11 のブロック図に示すように、マスタとスレーブとの対応する自由度ごとにマスタおよびスレーブに作用している力を検出し、それらの差をもとに予め設定した仮想インピーダンスにより 1 サンプリング周期後の変位計算した結果をマスタ、スレーブの両方に位置指令として与えるものである。

作用力と変位との関係を決する仮想インピーダンスとして、慣性抵抗  $m$ 、粘性抵抗  $d$ 、剛性抵抗  $k$  を与えるが、スレーブハンドが素早い動作に対応できないことを考慮して粘性パラメータを大きめにとることとした。

粘性パラメータを大きくすると、機構動作を与えるために比較的大きな力を加える必要があり、微妙な力加減や接触感覚が得られずらくなる。しかし、これを小さくすると、スレーブハンドの位置決め制御が追従できなくなりシステム全体の制御が発散する可能性が高くなる。

適切な仮想インピーダンスの決定は、始めに大きめの各パラメータ値を設定し、動作試験を行いながら制御が安定する範囲内で次第にこれらの値を小さくしていく方法で行った。表 2 に設定した仮想インピーダンスを示す。

バイラテラル制御プログラム作成にあたり、前年までの実験の結果を踏まえ、以下の事項に配慮した。

a) カセンサ出力の平滑化

作用力の検出は直接構造部材に貼ったひずみゲージによる

表2 バイラテラル制御の仮想インピーダンス

自由度	$m$ [kg]	$d$ [Ns/m]	$k$ [N/m]
指	5.00	100.0	20.0
上下	5.00	200.0	20.0

簡易なセンサを使用したことからノイズの影響を非常に受けやすい。図 11 で示したように、力センサの出力が全体の動作系制御の根拠となるため、力センサにノイズがのると全体の動作が不安定となる。

この対策として、専用インタフェースユニットのカセンサ出力増幅回路に低周波数域通過フィルタ回路を設けて高周波ノイズ成分を除去するとともに、A/D 変換データも数回読み取った平均値を用いるなどして作用力検出値の平滑化を図った。

b) カセンサの感度調整

ハンドの動作は、マスタハンドとスレーブハンドに作用する力の差を検出して移動すべき変位を決定するが、スレーブハンドに作用する力の水準はスレーブハンドが対象物に接触せずに動作する場合と対象物に接触している場合とで大きく異なる。すなわち、対象物を把持するためにスレーブハンドの指が対象物に触れる瞬間にスレーブハンド指のカセンサ出力は突然大きな値となる。

このことは、スレーブハンドが対象物を把持した瞬間にスレーブ指で検出された大きな荷重によりマスタの指が弾かれてしまう現象を引き起こし、目的とする把持作業が適切に行えない状況となる。

この対策として、仮想インピーダンスを適切に選定することで急激な動作を抑制する一方、スレーブ側の力センサの感度を故意に低くして、スレーブが対象物を把持して若干の把持力が加わった状態でマスタとスレーブのカセンサ出力がバランスするように設定することで、把持の瞬間の反発動作を回避した。

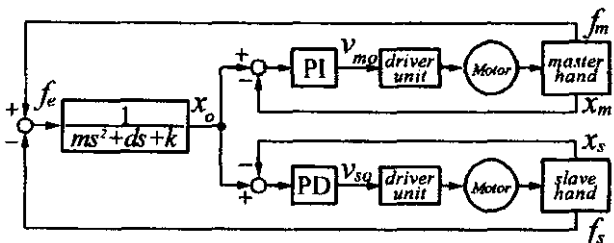


図11 バイラテラル制御ブロック図

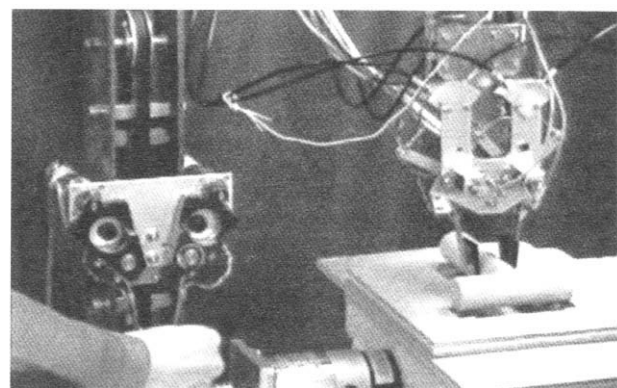


図12 バイラテラルハンドの動作試験

図12に具体的な対象物(直径が約30mmφの丸棒)を把持し摘み上げる作業を想定した実験の様子を示す。仮想インピーダンスの粘性成分を大きく取っているため、強粘性流体の中で動作させているような感じを受けるが、マスタハンドの操作に追従してスレーブハンドが動き、スレーブハンドが対象物を把持あるいは静置したときにはその反力を感じることを確認した。

また、前年の実験で課題となっていた把持力を付加している特に振動が発生する現象(接触安定性問題)は、制御プログラムに前述の工夫を施した効果によりマスタ・スレーブハンドの実験では発生せず、極めて安定した把持作業を行うことができた。

3.4 接触安定性の検討

インピーダンス制御法を応用した制御系で、剛性の高い系に力が加わると制御が不安定になりやすくなることが知られている。試作したマスタ・スレーブ・ハンドでも、スレーブハンドが硬い対象物を把持する場合にこれが問題となる。<sup>5)6)</sup>

試作したマスタ・スレーブ・ハンドについてナイキスト判別法により制御系の評価を行った。ナイキスト判別法は、系の伝達関数を求めて変数sを変化させたときの複素平面上の軌跡から安定性を判別する手法である。<sup>7)</sup>

まず、バイラテラル・マスタ・スレーブ・ハンド制御系全体を図13のブロック図のように定義して制御系の伝達関数を求めた。破線で囲んだ部分はマスタとスレーブに定義した仮想インピーダンスや制御プログラムなどで定義した定数などから既知の伝達関数として得られる。これにマスタ、スレーブの機械的な特性などからなる伝達特性を調べて  $G_m(s)$ ,  $G_s(s)$  を求める。

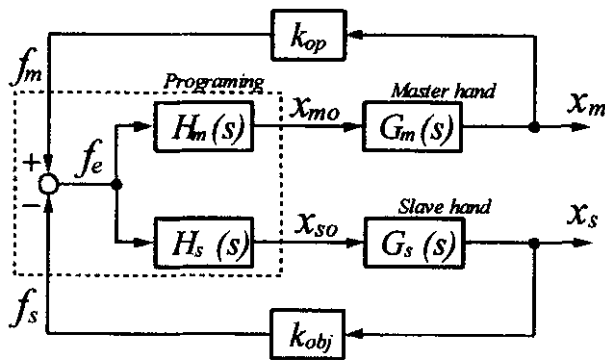


図13 バイラテラル制御系のブロック図

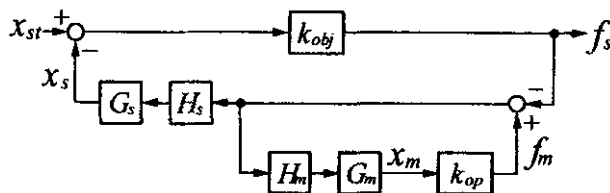


図14 スレーブの位置決め注目した制御系ブロック図

伝達関数  $G_m(s)$ ,  $G_s(s)$  を、それぞれ、

$$G_m(s) = \frac{b_m}{s^2 + a_m s + b_m} \quad (式3)$$

$$G_s(s) = \frac{e^{-Ls} b_s}{s^2 + a_s s + b_s} \quad (式4)$$

と定義し、ステップ応答、周波数応答を調べて計測値と最も符号するように係数を求めた。試験の結果、

$$G_m(s) = \frac{1225}{s^2 + 140s + 1225} \quad (式3')$$

$$G_s(s) = \frac{16e^{-0.1s}}{s^2 + 6.8s + 16} \quad (式4')$$

としてマスタハンド、スレーブハンドの伝達関数を得た。

制御系全体の伝達関数を求めるために、図13のブロック図をスレーブハンド位置決め入出力に注目し、図14のように展開して一巡伝達関数  $W(s)$  を式5のように求めた。

$$W(s) = \frac{k_{obj} \{ H_m(s) G_m(s) k_{op} - 1 \}}{G_s(s) H_s(s) k_{obj} - (s) G_m(s) k_{op} + 1} \quad (式5)$$

ナイキスト安定判別法は、 $s=j\omega$  とおいて角速度  $\omega$  を次第に増加させていった時の  $W(s)$  の実数部と虚数部の軌跡が実軸と  $(-1, j0)$  よりも左 ( $\text{Re}(W) < -1$ ) で交われば不安定、右 ( $\text{Re}(W) > -1$ ) で交われば安定と判断する。

図15は、動作が不安定となる場合のマスタスレーブ動作の状態を示している。スレーブが対象物に触れたときに、マスタが弾かれて大きく振動していることがわかる。このときのナイキスト線図は図16のようになっており、実軸と  $(-3, j0)$  付近で交わることから制御系が不安定であると判断される。

制御系を安定化するために、マスタスレーブに設定した仮想インピーダンスの粘性係数を増加させる修正を行って再度ナイキスト線図を調べると、図17のように軌跡が実軸と  $(-0.7, j0)$  付近で交わるようになることから、この修正に

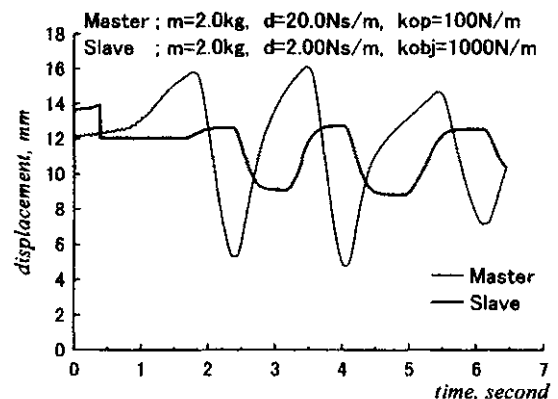


図15 不安定になる場合のマスタスレーブ動作

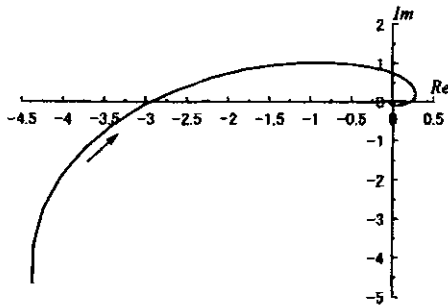


図16 不安定になる場合のナイキスト線図

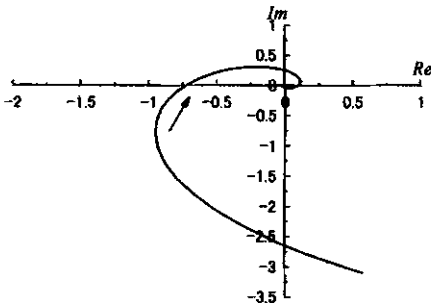


図17 安定になるように修正した場合のナイキスト線図

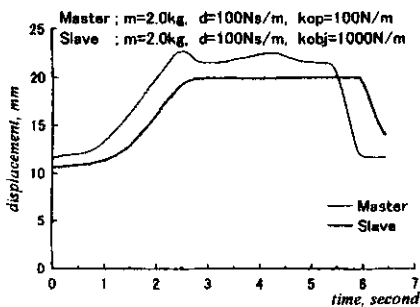


図18 安定状態でのマスタスレーブ動作

より制御系の安定化が図られたことを示している。

安定化の修正を行った後でマスタスレーブの動作状態を試験すると、図 18 に示すように、非常に安定した動作となることが確認された。

#### 4. まとめ

製造工程の軽作業化，作業環境改善を目的としてバイラテラル制御を応用したマスタ・スレーブ・ハンドを作製し，制御プログラムによるバイラテラル遠隔操作実験を行った。

装置コストを低く抑えることを目標にセンサ，アクチュエータなどを選定して制御系を構築したが，制御プログラムの工夫などにより目標としていた二指把持作業を遠隔操作で行うことができた。

実験で使用したスチールワイヤによる自由経路型の動力伝達は，動力の伝達の状態によってワイヤと保護チューブとの摩擦が大きくなったり，摩擦力の大きさに再現性がないなど，

制御条件として非常に難しい問題があることがわかった。

バイラテラル制御では，微妙な力情報を再生するための応答性と，制御が発散しないようにするための安定性との相矛盾する特性を満足させなければならない。これを実現するためには，さらに高度な制御アルゴリズムの検討が必要である。

実験では極めて単純な制御手法に基づいた制御アルゴリズムによる制御プログラムとなっており，より高度な制御手法を採用する場合には動作機構の伝達関数などを正確に把握する必要がある。

力帰還型遠隔作業システムの実用化を想定した場合，装置コストへの配慮は重要な要素と考えるため，今後も安価な制御機構によるシステム構築を基本とし，さらに基礎的な要素技術に関して試験を重ねつつ検討を進めていきたい。

#### 参考文献

- 1) 新井健生；ロボットの遠隔制御；精密工学会誌 Vol.54 No.5 (1988)
- 2) 井越昌紀；人工現実感の製造業への応用；精密工学会誌 Vol.57 No.8 (1991)
- 3) 戸羽篤也，桑野晃希，中西洋介 他；複雑形状物のハンドリングシステムの開発；平成 11 年度事業報告書 (1998)
- 4) 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 Vol.297 (1998)
- 5) 高橋裕人，福沢修一郎；力制御技術の研究；北海道電力総合研究所 (1996)
- 6) 榊 泰輔，館 暲；インピーダンス制御の接触安定性についての一考察；日本ロボット学会誌 Vol.12 No. 3 (1994)
- 7) 中野道雄，美田 勉；制御基礎理論；昭晃堂 (1993)