

バイラテラル方式による力覚制御技術

戸羽 篤也、桑野 晃希

Some experiments applying the bilateral control method to the force feedback technology .

Atsuya TOBA , Kouki KUWANO

抄 録

バイラテラル制御は、マスタ装置とスレーブ装置の間で姿勢と力の状態を一致させるように制御することによって、マスタからスレーブへの姿勢制御とスレーブからマスタへの力制御を同時に行う制御方法である。この制御法を応用することによって、例えば遠隔操作で作業を行うような装置で作業時の加工反力や振動などの情報を作業者が感じながら微妙な手加減を行うような作業が可能になる。

筆者らは、バイラテラル制御法の基本的な考え方にもとづいて制御系を組み立て、力感覚再生およびマスタ・スレーブ位置決めと力帰還に関する実験を行い、力覚制御の品質を確認するとともに、実用面で考慮すべき課題などを検討した。

1. はじめに

作業中、作業者は視覚、聴覚、触覚等、五感のすべてから情報を得ながら工具などの操作を行っている。「熟練」と呼ばれる一種の技能は、これらの感覚と加工具の操作加減とを経験を通して学習した成果ともいえる。

遠隔操作による作業を考えると、それまで人手によって行われている作業を機械操作に置き換える場合の作業性の視点から、何らかの形で作業の臨場感を与えることは重要である。¹⁾

我々は、加工反力など力の感覚に関する臨場感を生成する方法の一つとして、バイラテラル・マスタ・スレーブ制御手法を用いた力覚帰還型のシステムを構築することを目標に、その基礎的な要素技術となるバイラテラル制御法についていくつかの実験を行った。

2. バイラテラル制御法

バイラテラル制御は、動作に指示を与える“マスタ装置”と実際に作業を行う“スレーブ装置”を用意し、マスタからスレーブへ姿勢を指示し位置決めを行う制御系と、これとは逆向きに作業を伴う反力などをスレーブからマスタへ伝達する制御系を同時並行して制御する方式をいう。²⁾

“バイラテラル”とは、“二方向”という意味で、これまでの遠隔操作に多く用いられてきたマスタ・スレーブ位置制御型の系を“ユニラテラル (Unilateral)”と呼ぶのに対して、位置制御に力覚制御を付加してマスタとスレーブ双方を制御する系を“バイラテラル (Bilateral)”と呼んでいる。以下、バイラテラル制御系の考え方について説明する。

2.1 バイラテラル制御の原理

バイラテラル制御系は、図1に示すように、制御の対象をマスタの位置： x_m と力： f_m 、スレーブの位置： x_s と力： f_s の4つとし、マスタとスレーブ間で位置および力どうしを一致させるように制御をかける。³⁾

この制御系を実現させるための具体的な制御方法について①対称型、②力逆送型、③力帰還型など、いくつかの方式が提案されている。

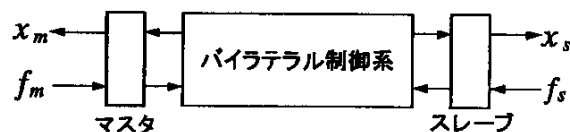


図1 バイラテラル制御の原理

a) 対称型

対称型バイラテラル制御は、図2に示すように、マスタの変位にスレーブを追従させるようにマスタ、スレーブ両者のアクチュエータを制御するものである。

すなわち、マスタに変位が生じると、マスタとスレーブ間に相対変位が生じる。その相対変位を0にするようにマスタおよびスレーブに取りつけたモータの駆動電流を制御し、両者に駆動トルク、拘束トルクを発生させるように制御するのが対称型バイラテラル制御である。

対称型は、マスタおよびスレーブに力が加わっている時には、必ず両者に相対変位が存在している。この方式は、力を検出して制御系の位置制御にフィードバックしないので、制御が単純で安定性も良いと言われている。

b) 力逆送型

力逆送型バイラテラル制御は、図3に示すように、マスタとスレーブ間の相対変位からスレーブの位置決め制御を行う一方で、スレーブに加わる力を検出して、それをマスタで再生する方式である。

対称型バイラテラル制御では、変位と力の間に比例と見なせる関係が成立している必要があり、荷重が与えられても変位しにくい機構には適用できない。たとえば、スレーブ装置

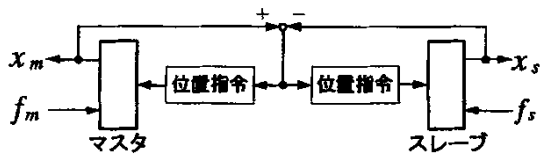


図2 対称型バイラテラル制御法

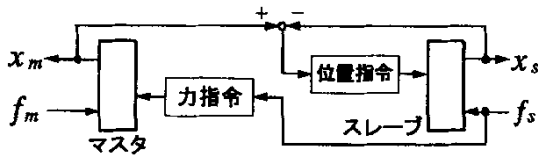


図3 力逆送型バイラテラル制御法

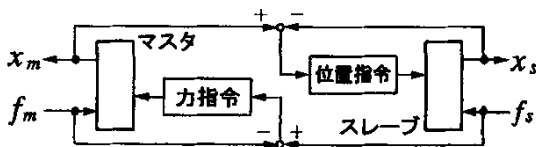


図4 力帰還型バイラテラル制御法

に高減速装置の付いたモータが取り付けられているような場合、外からモータを回転させる力を加えても、直ちにその力に応じた回転角度が得られないので適用できない。

力逆送型は、このような不具合を解決するために、直接スレーブ側の荷重を計測して、その力をマスタの拘束力に反映させるものである。

C) 力帰還型

力帰還型バイラテラル制御は、図4に示すように、マスタとスレーブ間の相対変位からスレーブの位置決め制御を行うのは同じであるが、マスタに発生させる力をマスタとスレーブに加わっている力の差を検出し、それに相当する力を再生させる方式である。

力帰還型は、マスタ、スレーブともに機構に力が加わっても直ちに変位に反映されにくい場合に用いられる。たとえば、マスタ、スレーブ装置の双方に減速装置が付いたり、摩擦が大きい場合、力逆送型制御ではスレーブから帰還された力に対抗する力をマスタ装置に加えても直ちに変位に反映されないため、必要以上にマスタ位置が戻されてしまうことになる。これに対して、力帰還型では、マスタに加えらるべき力が再現されるように位置制御が働くので、前述の不具合を回避できる。

2.2 バイラテラル制御におけるコンプライアンス制御

バイラテラル制御形態の中で力逆送型および力帰還型は、力の検出を行って位置制御に反映させる。

したがって、何らかの方法で力の情報を変位情報に変換する必要がある。この手法の一つとして“コンプライアンス制御”の考え方がある。

“コンプライアンス (compliance)”は、“追従”の意であり、外力を加えたときの物質の弾力性、たわみ性などを意味する。特に機械の制御では、運動力学的パラメータとなる剛性(バネ)、粘性(ダンパ)、慣性(質量)が機構のコンプライアンスを決定することから、これらを特に“インピーダンス (impedance)”と呼ぶこともある。

コンプライアンス制御は、これらの機械的インピーダンスと作用力との関係を定義し、力が働いたときの変位を運動力学的に予測して制御する手法である。すなわち、制御対象として質量 m の物体に粘性抵抗 d 、剛性 k が与えられ、作用力 f が加えられた場合を考えると、運動方程式より、

$$f = m\ddot{x} + d\dot{x} + kx \tag{式1}$$

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

という関係式が成り立つ。力と変位の関係を分かりやすくするために、この式をラプラス変換すると、

$$F(s) = ms^2X(s) + dsX(s) + kX(s) \quad (式2)$$

すなわち、
$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + ds + k} \quad (式2')$$

となる。これにより、力 f が加えられた場合の変位 x の制御量は、図5のブロック図に示す伝達関数の形で得られる。

遠隔作業を想定したバイラテラル・マスタ・スレーブ制御系を組み立てる場合、一般に図6に示すような力学的なモデルを考える。すなわち、マスタとスレーブのそれぞれに運動力学的インピーダンスとして、慣性質量 (m_m , m_s)、粘性抵抗 (d_m , d_s)、剛性 (k_m , k_s)、を定義する。マスタとスレーブの間は、剛性 k_p と粘性抵抗 k_v によって連結され、両者に力が伝達される。また、スレーブ側には、変位 $x_s = 0$ の位置にスレーブの動きを拘束する物体が配置されており、この物体にも、慣性 m_r 、粘性 d_r 、剛性 k_r を定義する。

マスタには、操作力 f_m とスレーブから連結のコンプライアンスを介して伝達される力 f が加えられることから、マスタのインピーダンスと力の関係は次式で得られる。

$$f_m - f = m_m \ddot{x}_m + d_m \dot{x}_m + k_m x_m \quad (式3)$$

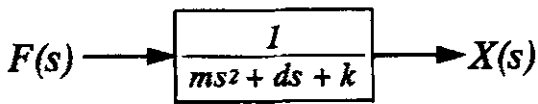


図5 力から変位への変換

一方、スレーブには直接の外力 f_s 、連結コンプライアンスを経由して加えられる力 f 、作業対象物体からの反作用力 f_r が作用することから、スレーブのインピーダンスと力の関係は次式で得られる。

$$f_s + f - f_r = m_s \ddot{x}_s + d_s \dot{x}_s + k_s x_s \quad (式4)$$

ただし、

$$\begin{cases} f_r = 0 & (x_s \leq 0) \\ f_r = m_r \ddot{x}_s + d_r \dot{x}_s + k_r x_s & (x_s > 0) \end{cases} \quad (式5)$$

一般にスレーブには重力の影響を考慮しなければならない場合を除いては直接的に力を加えることはないので、 f をそのまま f_s と考えても良い。

マスタとスレーブを連結するコンプライアンスと伝達される力との関係は、マスタとスレーブの相対位置、相対速度との関係から、次式で表される。

$$f = k_v (\dot{x}_m - \dot{x}_s) + k_p (x_m - x_s) \quad (式6)$$

いま、スレーブが作業対象と接触し、一定の作用力が加わっている状態で釣り合っているとき、スレーブ側での力の関係は、

$$f = f_r$$

であり、これがマスタ側にそのまま伝わるので、

$$f = k_p (x_m - x_s) = f_m$$

という関係が成り立つ。このことは、スレーブ側で作用している静的な力がマスタ側に伝達されることを示している。

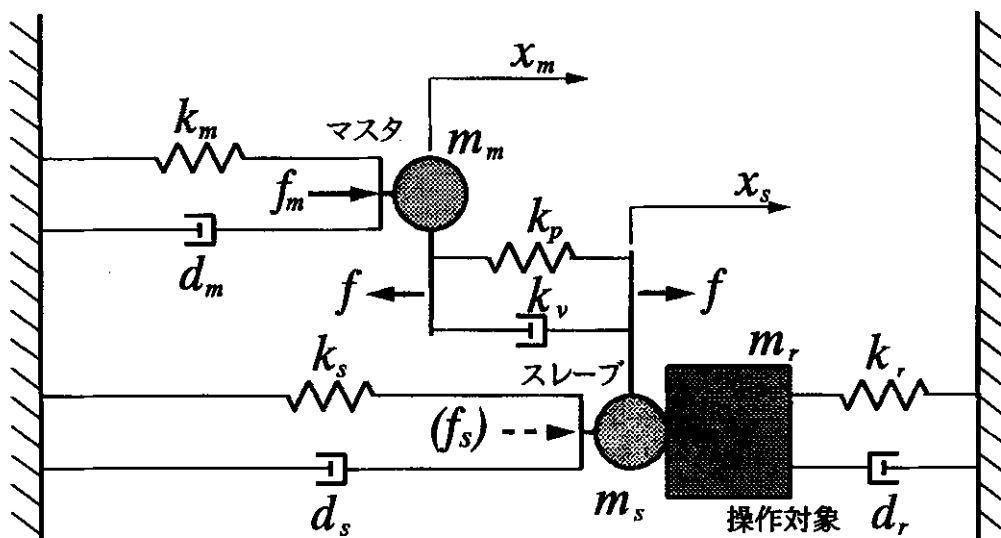


図6 バイラテラル制御の力学モデル

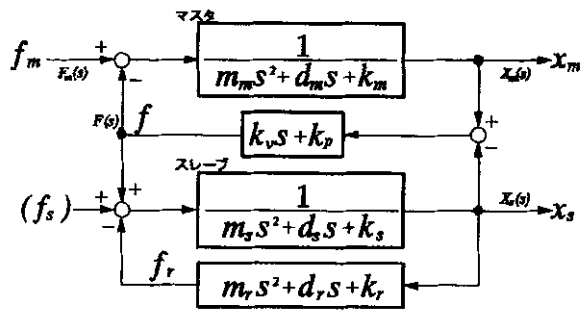


図7 バイラテラル・マスタ・スレーブ制御系

操作力および作用力の変化により、動的に系が変化するときには、時間の項をもつ慣性および粘性のインピーダンスの影響を受けることになるので、これらの値を的確に選べば、作業に伴う動的な力覚情報をマスタに再現することが可能になる。⁴⁾⁵⁾⁶⁾

前述の、式3～式6をラプラス変換すると、

$$\frac{F_m(s) - F(s)}{X_m(s)} = m_m s^2 + d_m s + k_m \quad (式3')$$

$$\frac{F_s(s) + F(s) - F_r(s)}{X_s(s)} = m_s s^2 + d_s s + k_s \quad (式4')$$

$$\frac{F_r(s)}{X_r(s)} = m_r s^2 + d_r s + k_r \quad (x_s > 0) \quad (式5')$$

$$\frac{F(s)}{X_m(s) - X_s(s)} = k_v s + k_p \quad (式6')$$

となり、これを整理すると図7のブロック図のように表すことができる。ただし、ブロック図では、式3'、と式4'、が実際の制御系において力から変位への変換であるため、分母と分子が入れ替わっている。

実験では、このブロック図を基本としながら、適宜制御系のモデルを考えて制御プログラムを組み立てた。

3. 実検

3.1 実験の目的

バイラテラル制御に関する研究は、既に多くの研究者らによって多面的に実施されてきたが、これまで具体的な製造工程への適用を想定した研究例は多くない。

その理由の一つに、ヒトの触覚という極めて微妙な感覚を

機械で再生することの難しさがあるようだ。このため、制御品質を優先とすると制御系の装置コストが高くなり、逆に実用化を考えて装置コストを抑えると制御品質も劣化するというように、制御品質と装置コストは両立し難い関係にある。

そこで今回の実験は、バイラテラル・マスタ・スレーブ制御に関する基礎的な要素技術を確認するとともに、装置コストを抑えることを優先した場合にどの程度までの制御品質が得られるかを確認することを実験の目的とした。

3.2 実験方法および実験装置

3.2.1 シミュレーションによる力覚再生実験

バイラテラル制御における主要な要素技術としてマスタ側での力覚再生に注目し、物を把持する際の把持力をマスタで再現することを想定し、仮想スレーブを用いた二指把持制御試験を行った。

二指把持動作における力覚再生に用いた実験装置の概要を図8に示す。この実験では、スレーブハンドが計算処理によるシミュレーションであることから、実験に使用する装置はマスタ側のみである。

マスタ装置は、2枚のステンレス板 (t = 0.8mm) を DC モータ (最大トルク 0.1N・m) の回転軸と本体に取り付け、これら2枚で把持動作が出来る状態にする。これらステンレス板には、把持力が測定できるようにひずみゲージ (ゲージ長 5mm、350Ω) を貼り付けた。また、DC モータの軸回転角度を計測するため、ポテンシオメータを取り付けた。

制御はデジタル制御とし、数値処理には NEC 製パーソナルコンピュータ PC-9801FA (マイクロプロセッサ=インテル 80486SX、16MHz) を使用した。

ポテンシオメータとひずみゲージの出力は、増幅器によって ±10V に増幅した後 12 ビットの A/D 変換器で量子化した。DC モータは、トルク制御型ドライバで制御し、制御電圧は 12 ビット D/A 変換器を介して与えた。

一方、スレーブ装置は、計算機内に仮想的に存在させ、予め設定した物体の大きさに相当する幅に二指の幅が到達したら発生すると考えられる把持力を計算し、モータドライバを介して発生させる。図9に実験で使用したマスタ装置の写真を示す。

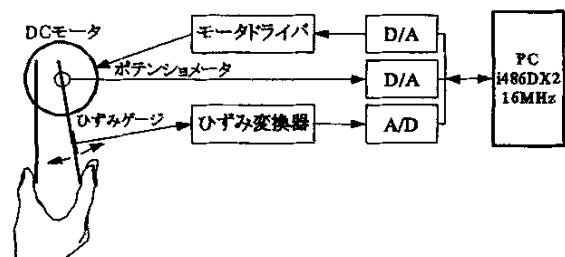


図8 二指把持力制御試験装置

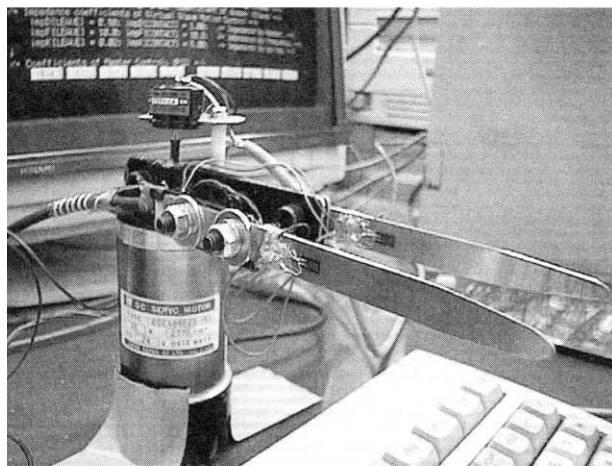


図9 二指把持力制御実験で使用したマスタ装置の外観

3.2.2 実機構マスタ・スレーブによる力覚制御実験

具体的にマスタ装置とスレーブ装置を使用して、マスタ・スレーブ・バイラテラル制御の実験を行った。実験に用いた装置の概要を図10に示す。

装置は、水平、平行に2本配置されたガイドバーに沿って移動するブロックを、ボールネジの回転によって水平方向に直線運動させる機構を有する。この機構をもつ装置を2台用意し、一方をマスタ、他方をスレーブとして制御系を組み立てて直動運動におけるバイラテラル・マスタ・スレーブ制御の実験を行った。実験に用いた装置の外観写真を図11に示す。

マスタ・スレーブともにボールネジのピッチは、1回転当たり10.0mmであり、これをDCモータで回転させる。DCモータの軸には回転角度を検出するためのロータリエンコーダ(500pulse/R)が取り付けられており、その出力信号により移動ブロックの変位量を知るとともに、モータ制御ドライバーのフィードバック信号にも用いる。移動ブロックの移動変位量は、エンコーダの出力信号が1回転あたり500パルスであることから、20 μ mの精度で検出することができる。

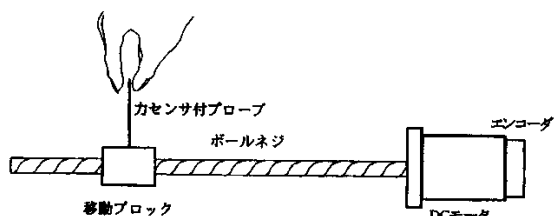


図10 直動バイラテラル制御試験装置 (マスタ)

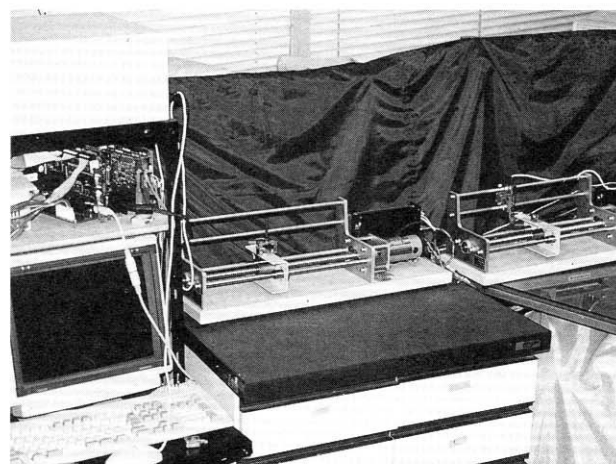


図11 直動バイラテラル制御実験装置の外観

マスタの移動ブロックには、図12に示すように、力センサ(ひずみゲージ)によるセンサプローブを取り付け、作用する外力の計測に用いた。

スレーブ装置には、図13に示すように、作業対象を想定した移動拘束装置を用意し、移動範囲の任意の位置に設置できるようにした。移動ブロック上には力検出用のロードセルを取り付けた。移動拘束装置は、バネ剛性の調整も可能である。

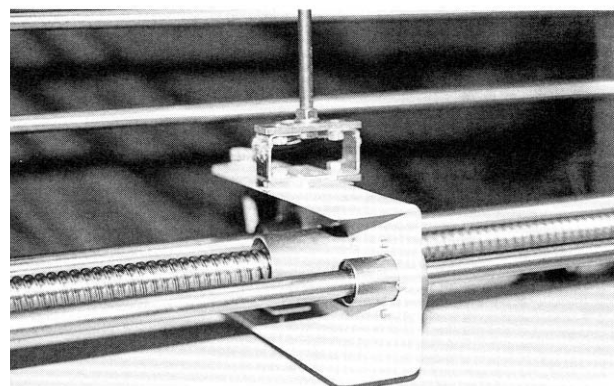


図12 作用力検出プローブ (マスタ)

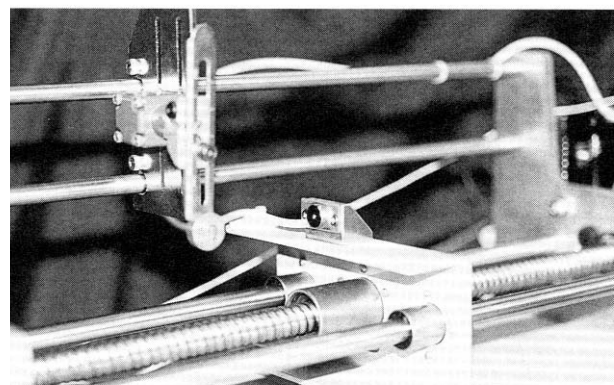


図13 移動拘束装置とロードセル (スレーブ)

4. 結果および考察

4.1 シミュレーションによる力覚再生実験

4.1.1 カフィードバック型による制御試験

二指把持力再生制御の考え方については、いくつかの方法を試験した。特に、唯一のアクチュエータである DC モータの制御を力制御型とするか、位置制御型とするかで大きく 2 つの考え方がある。図 14 は、力制御型で考えた制御プログラムのブロック図である。

操作者が把持操作により x_m を変化させると仮想スレーブとの位置関係により仮想スレーブに力が作用して仮想空間の中で移動する。その際、仮想空間に配置した把持対象に接触すると、その剛性 k_r より反作用力 f_r が生じる。これがスレーブの移動を拘束することからマスタとスレーブの変位差が生じ、これに応じた反力を再現する方法である。

実験では、トルク制御型の DC モータドライバを使用した。微妙な調整が出来るように PID 補償器を設け、カセンサで計測した操作力をフィードバックして制御を行った。

一方、位置制御型で考えた制御系のブロック図を図 15 に示す。図 7 で示したブロック図とほぼ同じであるが、DC モータによる位置決めをマスタの変位でフィードバックして制御する。この制御系では、仮想物体に接触していないときはマスタに加えられた操作力を打ち消すように制御し、接触後

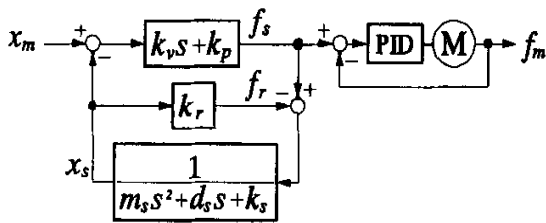


図14 カフィードバック制御系のブロック図

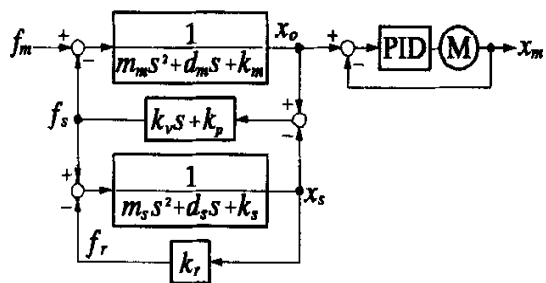


図15 位置フィードバック制御系のブロック図

は接触位置を保持するように DC モータの位置決め制御を行う。

これらの考え方に基づいて制御プログラムを作成し、把持力の再生制御の効果を実験した。その結果、これらの制御系による動作試験では、スレーブが対象に接触していないときは、マスタ、スレーブともに大きな力が発生しないので円滑に操作できたが、スレーブが対象に接触した瞬間に大きな反発力が生じ、制御系が発散してその後の制御が利かなくなることがしばしば起こった。

これは、デジタル制御特有の現象であると考えられる。すなわち、スレーブが仮想対象に接触する前後の位置および作用力の関係は、図 16 に示すように、まずマスタに力を加えて把持対象側に接近させるが、仮想スレーブが対象に接触時には、把持に伴う反作用力とスレーブの移動速度が急にほぼ 0 になるので、大きな慣性力が働くため、瞬間的に大きな反力を受けることになる。しかし、次の瞬間には把持力と反作用力が釣り合って一定の把持力で安定する。マスタが把持した対象を離す時は、慣性力よりも対象の剛性から受ける反作用力のほうが十分に大きいため、接触時のような動的な力は小さい。

このプロセスをデジタル制御によって離散時間系で処理する場合、変位および力の計測は図 17 に示すようにサンプリング周期 d_t ごとに行われる。このため、対象に接触してから次のサンプリングまで、系は対象に接触したことを認識することが出来ず、空間を移動してきたそのままの速度で対象物体内に突入し、次のサンプリングでは実際にあり得ないほど大きな反発力を計測することになるので、場合によってはその後の制御が利かなくなる。

これを回避するには、対象物からの反作用が極端に大きくならないようにしなければならない。具体的には把持対象の剛性を小さくするかサンプリング周期ごとの変位を小さくするかのどちらかとなる。対象の剛性を小さくすると、触った

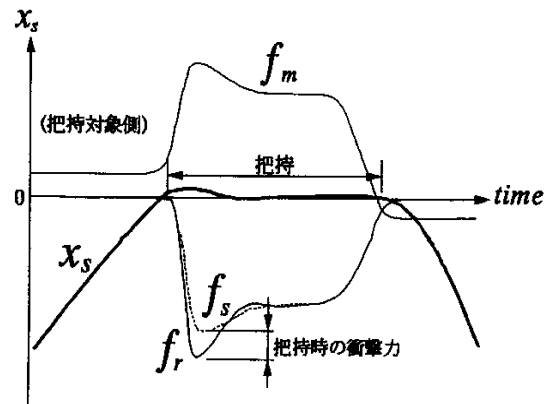


図16 仮想スレーブの動作と把持反力

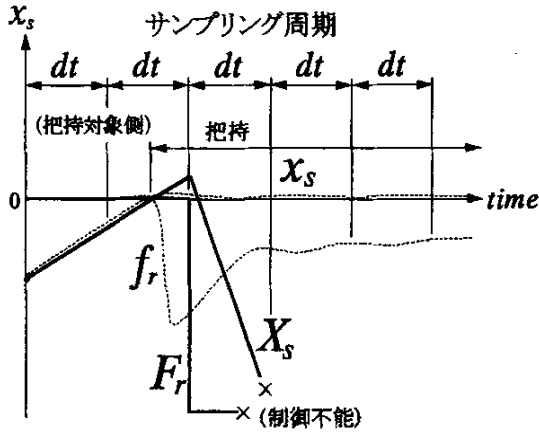


図17 離散系におけるサンプル周期の影響

感じが柔らかい感触になり、対象の質感を大きく変えてしまうので好ましくない。一方、サンプリング周期ごとの変位を小さくするには、対象に設定した機械的なインピーダンスを大きくして、動作を鈍くするかサンプリング周期を短くするかのどちらかとなる。機械的なインピーダンスを大きくすると、強粘性の流体中を運動しているような感触になり、非接触時の運動環境が変わってしまう。したがって、マイクロプロセッサの能力の許す限り、サンプリング周期を短くするのが最も有効な対策である。今回の実験では、10ミリ秒の周期でサンプリングを行ったが、今後は1ミリ秒程度まで短縮する必要があると考える。

実験では、この他の対策として、図18のブロック図に示すように、対象に非接触の場合と接触している場合で、仮想スレーブのインピーダンスを切り替えるように制御プログラムを工夫してみた。すなわち、仮想スレーブに対して、把持対象に非接触時は小さいインピーダンスを設定してスレーブを移動させ、接触した段階で大きいインピーダンスに切り替える方法である。

スレーブのインピーダンス切替えは、サンプリングごとに次サンプルまでスレーブの移動速度が変化しないと仮定して、次サンプル時のスレーブ位置を予測し、対象に接触すると判断した場合にはその時点まで時間を調整してスレーブを接触位置まで移動した後にスレーブのインピーダンスを切り替える。対象を離す時も同じ要領であるが、把持の時と同じ位置で切り替えを行うと、スレーブインピーダンスが大きい分だけ引き戻しに力を要するため、粘着材で貼り付いたような感触が残ってしまうことが分かった。これに対して、離す時に対象表面より若干内部に入ったところで切替を行うようにプログラムを工夫してみたが、あまり有効な対策とはならなかった。これらについては、今後の検討が必要である。

4.2 実機構マスタ・スレーブによる力覚制御実験

マスタ・スレーブがともに存在する場合、先の仮想スレーブ

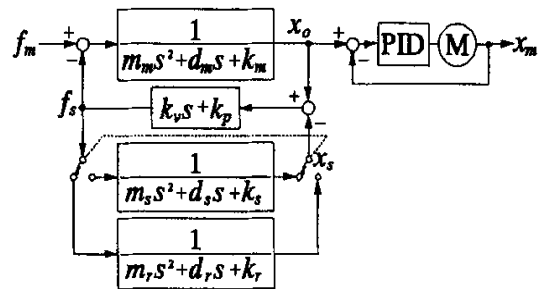


図18 インピーダンス切替型制御系のブロック図

のようにスレーブの位置、速度、加わる荷重などは、計算で算出しなくともセンサを使って計測することが出来る。したがって、サンプリング周期が長めであっても、正常な操作を行っている限りマスタとスレーブに加わっている力は常にほぼ釣り合っており、制御を発散させることはない。

図19に、実験で用いた制御ブロック図を示す。制御形態の基本的な考え方は、マスタ、スレーブともにボールネジによる減速機構を含んでいることから、力帰還の制御形態とした。

一般に力帰還型は、図4で示したように、マスタとスレーブの変位差でマスタ位置を制御し、マスタとスレーブの作用力差でスレーブの力制御を行う。図19で示した制御形態は、これとは若干異なっている。これは、今回実験で用意した装置にはボールネジによる減速機構があるため、操作力によ

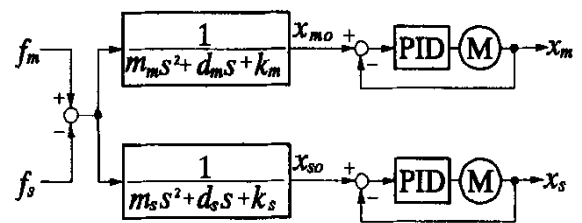


図19 直動装置によるバイラテラル制御ブロック図

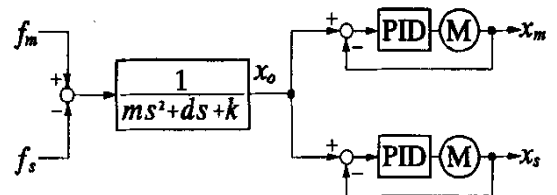


図20 単純化したバイラテラル制御ブロック図

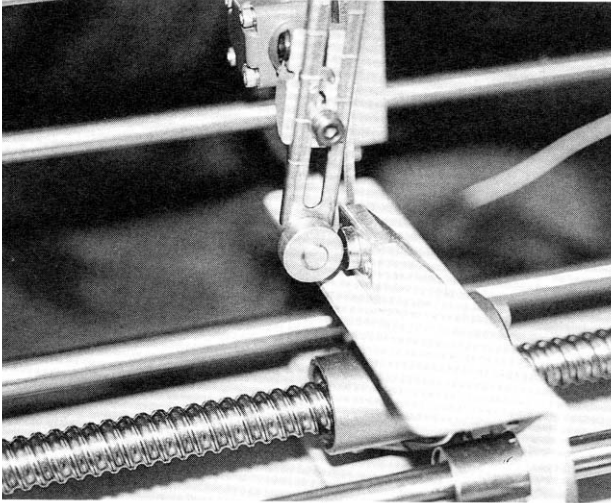


図21 拘束装置によるスレーブの運動拘束の様子

て直接的に変位を生じさせることは難しく、むしろ変位は制御された結果であると考えたからである。

当初、マスタとスレーブは、厳密には機構が別であるから、それらに仮定すべきコンプライアンス特性も別に考えた。それによってマスタとスレーブに位置および速度の差が生ずれば、連結のコンプライアンスによる力が発生しマスタスレーブへの抵抗力として計算した。

しかし、制御実験を進める中で、ほとんど機構と性能が同じマスタとスレーブを用いた場合、コンプライアンス特性を別のもんとして考えることに特別な意味はないことが判った。そこで、マスタとスレーブを連結する部分のインピーダンスを十分大きく、すなわちマスタとスレーブは高剛性の材料で連結され、マスタの動作は直ちにスレーブに時間差なしで伝達されると仮定して、制御系を図 20 のブロック図のように変更した。

実験では、位置決め用のモータドライバが速度制御型であったため、PID 補償器による調整を十分に行ったところ、運動を拘束されない場合のマスタ・スレーブの連動制御においても、図 21 の写真に示すように拘束装置によって障害物に接触した場合の感覚においても、かなり良好な制御品質を実感することが出来た。

また、図 20 のブロック図を見ても分るように、マスタとスレーブは、全く同じ状態にあるので、それぞれの立場を入れ替えて、スレーブ側の力センサを押して作用力を与えるとマスタがそれに追従して移動することも確認した。

ただし、スレーブが障害物に接触して力が加わった状態で、力の制御に細かい脈動が発生し、振動しているような感触が得られた。これは、サンプリング周期が十分に短くなかったこと他に、ボールネジなどの機構部の不連続要素（ガタつき）などの影響があると指摘する文献もある。⁷⁾

また、力の検出についても、荷重を加えない状態でセンサの出力が 0 にならなったり、力検出信号のノイズ成分の影

響を受けやすいなどの問題についても対策が必要であろう。これらは今後解決すべき課題としたい。

5. まとめ

遠隔作業を想定した力情報の帰還による作業の臨場感の付与を目的とし、バイラテラル制御を利用したマスタ・スレーブ制御に関する基礎的な試験を行った。

バイラテラル・マスタ・スレーブ制御のメカニズムとその制御系ブロック図の形態を整理し、スレーブが仮想的に存在する場合の仮想力覚再生技術と、同機構のマスタ、スレーブ装置を用いた制御実験を行い、理論と制御性の関係を確認した。制御に関する課題については、数値処理の高速化とサンプリング周期の短縮、また機構においては機械的不連続要素に対する対策などの検討課題を確認した。これらについては、今後の実験を通して検討を重ねて行きたい。

参考文献

- 1) 井越昌紀；人口現実感の製造業への応用；精密工学会誌 Vol.57 No.8 (1991)
- 2) 新井健生；ロボットの遠隔制御；精密工学会誌 Vol.54 No.5 (1988)
- 3) 杉本浩一；位置と力のハイブリット制御に関する理論的考察；日本ロボット学会誌 Vol.11 No.3 (1993)
- 4) 松日榮信人；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；東京工業大学 (1996)
- 5) 高橋秀智；人工現実感を用いた自由曲面形状の設計・承認・加工作業の支援に関する研究；東京工業大学 (1996)
- 6) 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)
- 7) 榊 泰輔、舘 暲；インピーダンス制御の接触安定性についての考察；日本ロボット学会誌 Vol.12 No.3 (1994)