

# 力覚を応用した遠隔加工支援技術

戸羽 篤也, 鎌田 英博

## Process Assist of Tele-operation by the Force Control System.

Atsuya TOBA, Hidehiro KAMATA.

### 抄 録

遠隔加工では被加工物と工具との位置関係など加工時の状態の視認性が悪いため、これを補う方法として近接距離を力の情報に変換して作業者に返す力覚応用技術を開発した。また、仮想連結インピダンスモデルによる制御手法を採ることにより、制御系の安定化に加えて従来の手加工のような柔らかい動作を再現することにも効果があることを確認した。

キーワード：遠隔加工, 力覚帰還制御, バイラテラル制御

### Abstract

It is inferior to detect that position between tools and works in tele-processing. In order to assist to the detection, We developed the method of giving a force information that transformed the distance between tools and works to the operator.

And applying the virtual connection impedance control model in order to improve the stability of control system, we confirmed the efficacy that make a soft touch in processing like a manual process by force control.

KEY-WORDS：Tele-operated processing, Force feedback control, Bilateral control.

## 1. はじめに

機械金属製造業をはじめ、製造工場における粉塵、振動、騒音、温度、湿度などによる劣悪な作業環境は、近年の少子高齢化のなかで、若い人が製造業で働くことを敬遠する要因の一つにもなっており、特に製品および加工の品質の維持を作業者の熟練に依存する傾向をもつ製造業にとって就労者不足や作業者の高齢化は、製造技術の維持、継承にも大きく影響を及ぼす。

作業環境の改善を目的とした生産工程の機械化、自動化は、作業環境改善や作業者の負担軽減に効果があることに加えて、作業、加工の非熟練化を図る効果も期待できる。

そうした背景から、既にかかなりの工程部分で機械化、自動

化を進められているが、それでもなお機械化が進まない工程として残るのは、加工対象の形状や種類が小ロットで変化し、その段取りに手間を要する場合や、加工中にしばしば起こり得る突発現象に対応するための条件設定が複雑で低コストかつ実用的な装置開発が困難な場合などである。

筆者らは、これらの理由で自動化しにくい加工工程の機械化を考えるにあたり、人の判断力や突発現象への適応能力を生かした遠隔加工法に着目した。遠隔加工では作業状況に伴う感覚情報が減少するため、特に力覚情報を作業者に返すことの出来る遠隔加工システムに関して、いくつかの要素技術の開発を行った。<sup>1-3)</sup>

本報は、遠隔加工システムにおける力覚制御を応用した作業支援技術の一つとして、遠隔加工時の死角や距離感のよう

な加工状況の視認性の悪さを補完することを目的に、近接距離を力覚情報に変換して作業者に返す力制御手法を検討するとともに、制御系モデルの工夫による制御の安定化と柔軟性を持たせる手法について実験によりその効果を確認したので報告する。

## 2. 研究の課題と目的

### 2.1 遠隔加工時の視認性の補完

遠隔加工の場合、作業者が工具を持って加工作業を行うのに比べて、加工時の工具と加工対象の位置関係が非常に認識しにくくなる。

加工反力は、工具が被加工物に接触することによって生じるが、工具を加工対象に向かって近づける過程では力の情報が得られず、工具が加工対象に接触して初めて作業者は力情報を得ることになる。

遠隔加工において工具と被加工物との位置関係が認識しづらい場合、ある有限の速度で工具が被加工物に近づいてそのままほぼ衝突に等しい状況で接触することとなり、それによる加工不良、あるいは工具の破損などが懸念される。

これを解決するためには、工具が加工対象に接触する前に近接状況を作業者に認知させる必要があり<sup>4)</sup>、その方法の一つとして近接距離の情報を力の情報に変換して作業者に返す手法を検討し、実験を行った。

### 2.2 非接触型加工支援

遠隔加工の応用例を考えるなかで、例えば塗装や溶接のように、工具を加工対象に直接接触させずに行う作業が考えられる。これらの作業は、加工対象の凹凸や溶接の開先に対して一定間隔を保ちながら做うという操作になる。

近接距離を力情報に変換して作業者に与えることにより、工具と加工対象との間隔を一定に保ちながら操作する作業を支援する技術の可能性について検討した。

### 2.3 低コスト化

力制御を行う場合に必要要素として、力と変位を検出するセンサ、動作を制御し力を再現するためのアクチュエータ、センサおよびアクチュエータに関する信号処理とシーケンスを管理する制御システムの3つが挙げられる。

きめ細かな精度の高い力制御を行うには、これら3つの要素のそれぞれに高い性能が要求され、システム総体のコストは必然的に高価になる。特に自由研削などで生じる高い周波数成分を含む機械振動を再現するには、大きな加速度を再生するための高性能なアクチュエータが必要である。

製造工程に導入することを考えると過剰な設備投資は現実的でなく、高精度の加工が要求される場合を除き、作業者に与える力覚情報の品位を多少劣化させても、実用の範囲で力

情報を与えることに効果がある場合も多い。<sup>5)</sup>

本実験においては、特に力センサについては独自に製作して使用し、制御システムもできる限りシンプルにすることでシステムの低コスト化を図ることとした。

## 3. 実験方法

### 3.1 実験装置

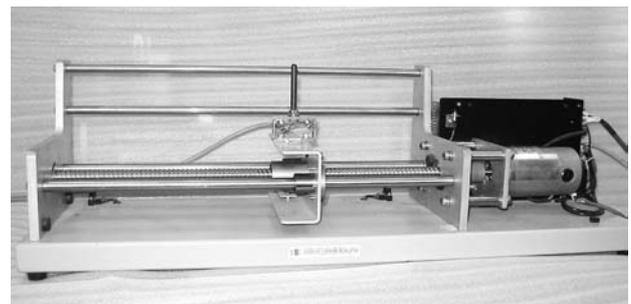
力覚制御の実験は、直動1自由度の力覚制御実験装置を用いた。その外観写真を図1に示す。

マスタ装置、スレーブ装置とも構造は同じで、ピッチが10.0mm/Rのボールネジをモータで回転させ、ガイドに沿ってスリーブを直線方向に変位を与える。変位領域の両端に安全停止用のセンサを配置し、有効移動距離は360mmである。

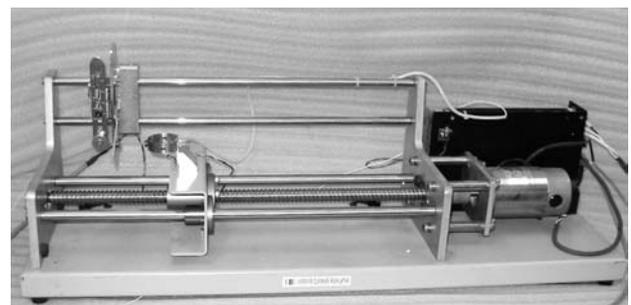
ボールネジの回転は、40WのDCモータを用い、専用のドライバを介して与えた電圧に比例した回転速度で回転させる。

スリーブの移動距離はDCモータの回転角度で換算するが、モータ回転角度はモータドライバのサーボ制御に用いられているロータリエンコーダから信号を分取し、パルスを計数して求めた。ロータリエンコーダは、1回転あたり500パルスの信号を発生するので、ボールねじ上を変位するスリーブの変位検出の精度は0.02mmとなる。

マスタ装置には、図2に示す構造による力センサを製作し、実験において作業者の操作力を計測した。構造部の図に示す位置に4枚のひずみゲージを貼り、ブリッジを形成するように配線して力に応じたひずみ量によって操作力を検出した。



a) マスタ装置



b) スレーブ装置

図1 マスタ・スレーブ制御実験装置の概観

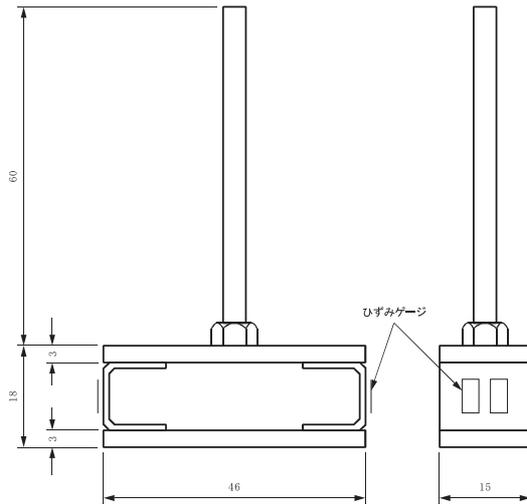


図2 マスタ操作力検出センサの概略図

### 3.2 近接距離センサ

近接距離を非接触で検出するセンサには、想定する近接距離が数 mm であることを考慮し、検出精度やコストなどの観点から、永久磁石の反発力を利用して製作した。

詳細は後述するが、磁力の検出は永久磁石を取り付けた構造部材にひずみゲージを貼り、磁力に応じたひずみ量を計測して電圧信号に変換した。ひずみゲージは、ゲージ長 2mm、120 Ω のものをセンサ1つについて4枚1組をブリッジ状に配線した。

センサを製作後、おおよそ 5～10N の荷重を加えて、そのときのセンサ出力を増幅して得られる電圧との関係を調べ、センサ出力特性の校正をおこなった。

試験において、センサは片持ち梁状のものとリング状のものを製作し、それぞれの出力特性について評価を行った。

### 3.3 信号処理

マスタ装置の操作力および近接距離センサの出力は、専用のひずみ計測用ハイブリッド IC である HSC-20BS(共和電業製)を用いて増幅回路基板を製作し、実験に用いた。ひずみ信号の処理系ブロックダイアグラムを図3に示す。

HSC-20BS は、ブリッジ電圧の調整回路、増幅量を決定するゲイン調整回路、無負荷時の信号出力を 0V に調整する回路に対応しており、永久磁石の反発力に伴うひずみ量と出力信号レベルに応じて、これらの調整を行った。使用したハイブリッド型のひずみ信号増幅器の外観を図4に示す。

### 3.4 力覚制御システム

力覚制御実験のための動作制御には、DOS/V 仕様のメインボード (CPU ; Intel 製 Pentium 133MHz) を使用した。

信号の入出力及び制御系のブロックダイアグラムを図5に示す。力覚信号の入力およびモータ制御信号の出力に用いられるアナログ信号の入出力には、市販の 16ビット A/D 変換

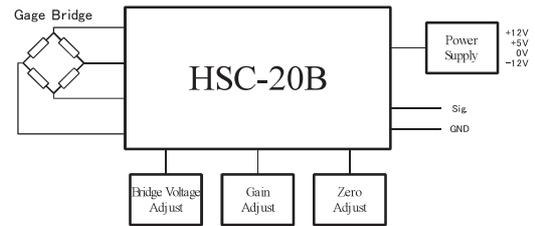


図3 ひずみ信号増幅系ブロック図

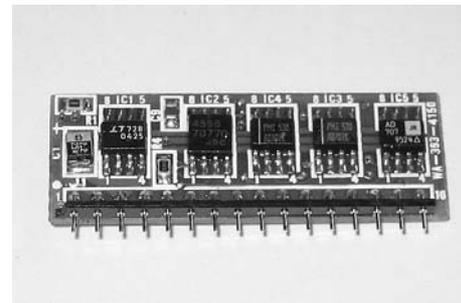


図4 ひずみ信号増幅用ハイブリッド IC (KYOWA 製 HSC-20SB)

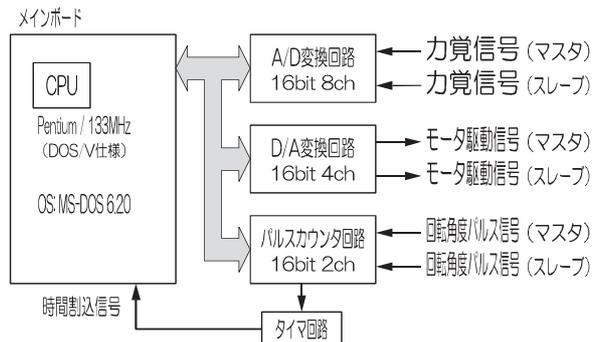


図5 制御系ブロックダイアグラム

基板 (Interface 製 IBX-3135) と D/A 変換基板 (Interface 製 IBX-3304) を用いた。

マスタおよびスレーブの変位を検出するためにロータリエンコーダのパルス信号を計数するカウンタ回路および制御インターバルを決定するために CPU に対してタイマ割込み信号を発行させる回路は、ISA 仕様の基板を独自に製作して用いた。

力覚制御実験には、遠隔加工において操作を指示するマスタ装置と実際の加工を行うスレーブ装置で位置と力を並行して制御する「バイラテラル制御」の手法を採用した。

アクチュエータとなる DC モータは専用の速度指令型駆動ドライバを用い、位置決めの際の速度制御は、PID 制御の手法を用いて目標位置との位置偏差に応じて適正な回転速度を与えるように係数を調整し、制御プログラムに組み込んだ。バイラテラル制御のシーケンスは、C 言語で記述した制御プログラムを MS-DOS 上でコンパイルして実行させた。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 近接距離センサの選定と性能試験

近接距離を非接触で測るために一般的に用いられるのは、超音波の反射を利用した超音波センサである。その原理は、発射波が対象にぶつかって反射して来た波を検出するまでの時間から距離を換算するものである。

超音波を利用した距離計測では空中における音波伝播速度の影響を大きく受けるため、一般に市販の超音波利用計測デバイスの計測レンジは100～500mmである。また、正確な距離を計測するというより、ある距離範囲の中での有無を検出する定性的な計測用途が多いようだ。

本実験で想定している計測レンジは数mm程度であるため、超音波による距離計測は困難であると判断した。

一方、非接触式でかなり精度の高い距離計測が可能なセンサにレーザー距離計などが知られているが、かなり高価であるため、用途が限られる。

そこで、加工対象が鉄などの磁性体であることが前提となるが、機械金属製造分野での適用範囲の広がりが期待できる方法として、永久磁石を応用した近接距離計測に着目した。

磁力であれば、数mmレンジの近接距離計測に応用できることに加えて、単純構造にして低コストで製作できること、本実験の目的に照らして力情報として直接的に得ることができることなどの点で有利である。

ただし、磁力は近接距離に対して線形変化とならないため、何らかの補正が必要になる。

はじめに、図6に示すような片持ち梁型の単純な構造のセンサを試作し、永久磁石の同極を向かい合わせ、約40mmの距離から徐々に近づけ、近接距離とそのときの磁性反発力との関係を出力特性として計測した。さらに、固定対象を鉄製のブロックに置き換え、同じく約40mmの距離から徐々に近づけながら近接距離と磁性引力との関係を調べた。

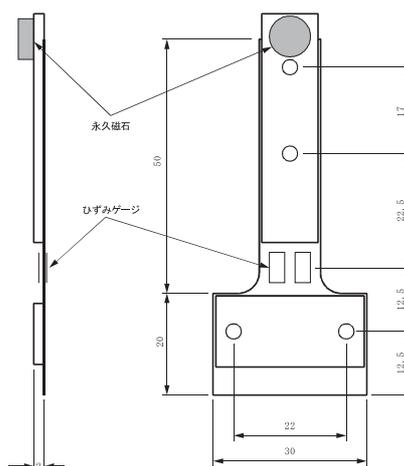
これらのセンサの出力特性試験の結果を図7に示す。どちらの場合も、ある一定の距離になると磁性により力が働き、距離が近づくと連れて急激に力の大きさが増大する傾向を示している。

永久磁石の同極どうしを向かい合わせた場合は、約20mmまで近づいたところで磁性反力を感じはじめ、その後の近接距離が近づくと連れて加速度的に磁性反力が増大する。

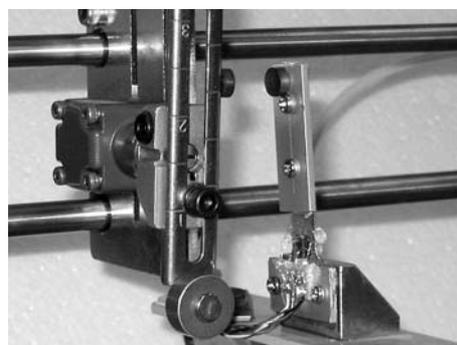
これに対し、片方を磁性体に置き換えた場合は、約10mmまで近づいたところで磁性引力を感じはじめ、その後は距離が近づくと連れて急速に磁性引力が増大する。

磁性力の及ぶ距離の違いは、永久磁石どうしの場合と片方が磁性体(鉄)の場合で磁束密度が違うことで説明できるが、距離が近接するときの磁性力の増大の様子を比較すると単純に尺度の問題だけでなく傾向の違いが認められる。

特性試験時のセンサの状態を観察すると、感度を考えてセ

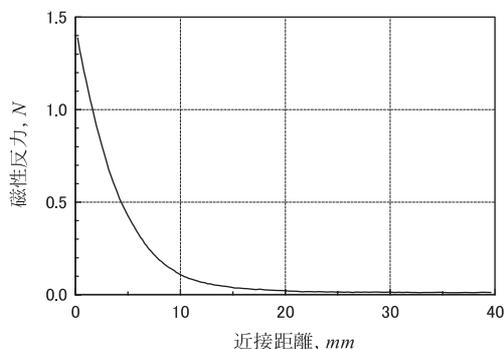


a) センサの概略図

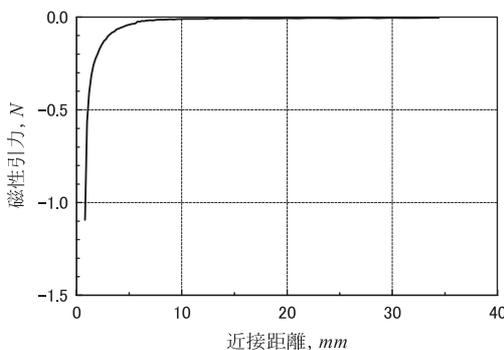


b) センサの外観

図6 永久磁石を利用した近接距離センサ (片持ち梁タイプ)



a) 磁性反発力



b) 磁性引力

図7 センサ特性計測結果