

遠隔グライнда加工のための力覚制御法

戸羽 篤也

Force control system for the grinding process by the tele-operation.

Atsuya TOBA

抄 録

製造工程における作業改善策の一つとして、力覚帰還を伴った遠隔加工システムの導入についてその可能性を検討してきた。グライнда加工作業へこれを適用する場合、機械振動や衝撃力といった高周波成分を含む力覚制御が必要である。

本研究は、高性能な装置や制御系を使わずに低コストな遠隔加工システムを構築するための工夫として、周波数帯により力覚情報を加工反力と機械振動とに分けてそれぞれ作業者に与える方法を考案し、その効果について試験を行った。

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 has been investigated that if the tele-operated processing system with force feedback control is effective on the improvement of working environment in a manufacture. Considering about the system applied on a grinding work, it is needed to be controlled that the force including high-frequency component as mechanical vibrations or shocks.

In order to construct the low-cost tele-operated processing system, without using any high-performance equipments, it is examined about the efficiency that the method of the force, separated to the reaction and the vibration by the band of frequency filter, are given back to the operator.

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

1. はじめに

製造現場における劣悪な作業環境の問題は、近年の少子化傾向とあいまって若者の製造業離れを加速させる要因となっている。人材確保の観点から、製造業における人材不足は企業技術力および技術開発能力の維持に支障をきたす心配もあり、その対応が急がれる。

劣悪な作業環境の一例として鑄造の後処理（鑄仕上げ）工程が挙げられる。これは、鑄造後の型ばらし、砂落とし、湯口系の切断および鑄型合わせ面に生じる鑄バリなどの切除などを施して鑄物を製品として仕上げる工程である。

この工程は、一部の量産製品の場合を除き機械化・自動化が進んでおらず、特に多品種少ロット生産の鑄造工場では主に人手によるグライнда研削加工が行われている。しかし、その作業環境は粉塵や機械振動およびその騒音などにより極めて劣悪である場合が多く、その対策が強く望まれている。

このような作業環境の改善方法の一つとして遠隔操作による加工、すなわち“遠隔加工”の装置を導入することにより、作業者はその劣悪環境から免れるといった対策が考えられる。¹⁾

グライнда研削加工のように、手作業で行われている作業を遠隔加工化する場合、加工時に作業者が五感から得ていた

情報を遠隔加工中の作業者にも返すことにより、加工時の臨場感を作業者に与えたり、微妙な手加減のような作業者特有の技能を活かすといった効果も期待できる。²⁾

遠隔加工システムに関連して、作業者に力覚情報を返ししながら動作制御を行うための研究例が報告されている。³⁻⁶⁾

力覚帰還を伴う遠隔加工制御手法の一つに、マスタ・スレーブ方式によるパイラテラル制御法がある。この制御法を利用した遠隔操作システムでは、動作を指示するマスタ装置と加工作業を行うスレーブ装置を組み合わせ使用し、双方の位置情報と荷重情報を検出して互いにそれらを共有するように制御を行う。⁷⁾

筆者らは低コストな装置開発を目指してこれまでに同制御法に関するいくつかの実験を行い、作業者に力覚情報を返ししながら動作を指示する制御システムを遠隔作業に応用した場合の有効性を確認した。^{8,9)}

低コストの遠隔加工システムを構築するには、位置および力を検出するセンサ類や駆動に用いる電動機系に要する費用を低く抑えるとともに、制御系もできる限りシンプルにする必要がある。

しかし、グラインダ作業に力覚制御を応用することを考える場合、工具と被加工物の接触状態による複雑な機械振動や衝撃力といった高い周波数成分を含む信号波形を処理する必要がある。これを作業者に正確に返すような制御を行うには、センシング、駆動系および制御系に高い性能や品質が求められるため、制御システムを含む装置全体はどうしても高価なものになる。

そこで本研究では、力覚信号を処理して高周波成分を含まない準静荷重的な加工反力と高周波成分を含む動的な機械振動に分離し、それぞれ別の方法で作業者に与える方法を考案し、その有効性を検討することを目的に実験を行った。

2. 実験方法

2.1 マスタ・スレーブ装置

今回の実験では制御動作を回転1自由度とし、加工に用いるグラインダはペンシル型グラインダを用いた。

図1に実験で用いたマスタ装置の写真を示す。マスタ装置による回転動作の指示は回転軸に取り付けたレバーで行い、この際の回転トルク（ねじりモーメント）をトルク変換器で検出した。

レバーの回転動作の駆動力は、DC サーボモータを専用の速度制御型ドライバで制御し、ギアヘッド（歯車減速装置）を介してレバーの回転軸にトルクを伝達した。

また、レバーの回転角度は、DC サーボモータの角速度制御用に取り付けられているロータリエンコーダの信号出力からパルス信号を取り出し、カウンタ回路で計数したパルス数からモータの回転角度を求め、さらにギアヘッドの減速率で

換算して得た。

図2に実験で用いたスレーブ装置の写真を示す。スレーブ装置の回転軸にはマスタ装置と同様にレバーを取り付け、それに加工時の力を検出させるための保持金具を介してペンシル型グラインダを設置した。また、スレーブ装置のレバー回転動作の駆動および回転角度の検出方法は、マスタ装置と同様に DC サーボモータで駆動を行い、モータに取り付けられ



図1 マスタ装置の概観



図2 スレーブ装置の概観

表1 実験装置仕様

機器名	メーカー・型式	性能項目	性能仕様
グラインダ	RYOBI HR20	出力 回転数	20 W 8,000～20,000 (可変)
トルク変換器	共和電業(株) TP-5KCE	検出容量	5 kgf・cm
DC サーボモータ	澤村電気工業 SS40E4-H3F-25	動力 (供給電圧) ギアヘッド減速比 ロータリエンコーダ分解能	40 W (24V) 1 : 25 (最大トルク ; 25 kgf・cm) 500 P/R

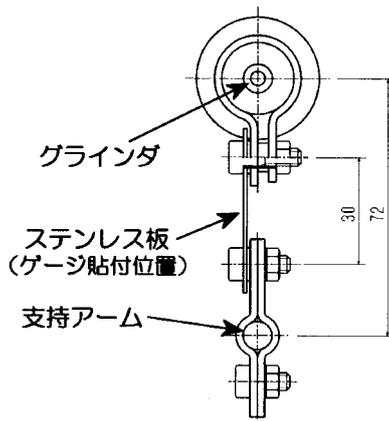


図3 力検出部の構造（模式図）



図4 力検出部の外観

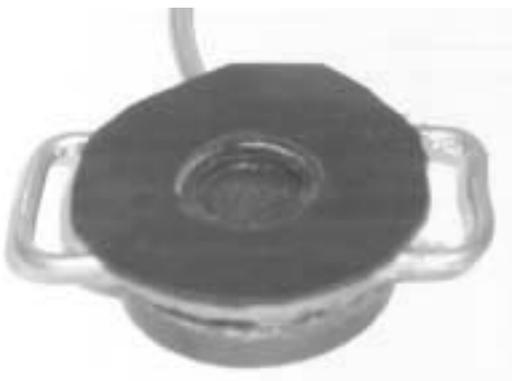


図5 機械振動再生器の外観

たロータリエンコーダの信号出力から換算して求めた。

実験装置に用いたマスタ・スレーブ装置を構成する機器の仕様を表1にまとめる。

2.2 加工力検出器

スレーブ装置における加工時の力覚情報を検出するために力検出用の保持金具を製作した。保持金具は図3の模式図を示すようにスレーブ装置のレバーとグラインダを保持する金具の間を厚さ1mmのステンレス板で連結した構造とし、このステンレス板にひずみゲージを貼って、負荷荷重に応じたひずみ量から加工時の力を求めた。

ひずみ検出にはゲージ長2mm、線抵抗350Ωの箔ゲージ4枚を用い、ステンレス板の両面に2枚ずつ同方向に貼り付け、ステンレス板に曲げ応力が加わった時に最大出力が得られるように4枚のゲージをブリッジ型に配線した。

検出されるひずみ量とグラインダ先端に加わる力との関係は、実際にグラインダ先端に荷重を加えた状態でひずみ量を計測して校正を行った。ひずみゲージによる加工力検出部の写真を図4に示す。

2.3 機械振動再生器

加工中の準静荷重的な工具の押付けに対する反力は、パイラテラル制御による力覚制御によりマスタに返すが、高周波成分を含む機械振動や衝撃力は、後述する考察のところでも述べるとおり加工時の補助的な情報であると考えて、マスタ装置とは別の再生装置を用いて作業者に直接振動を返す方式とした。

当初の計画では、機械振動の再生を回転子の重心を回転中心からずらした“偏心モータ”を用い、モータの回転数と振動支点からの距離により振動数および振幅を制御することを考えた。この方法は大きな振動を再生できるという利点はあるが、機械振動が実際の振動とは異なる“擬似振動”になり、振動子の質量が大きくなると振動の急発振および急停止ができないなどの不都合が明らかになり、電磁式の振動再生方式を採用することにした。

電磁式の振動再生では機構上の制限から、あまり大きな機械振動を再生できないが、比較的正確な振動情報を再生することができ、急発振および急停止にも対応できるという利点

がある。

試作した機械振動再生器を図5に示す。振動再生器は負荷インピーダンス8Ω、最大許容入力1Wのオーディオ用スピーカーを改造して製作した。

2.4 波形分離用フィルタ

加工中の力覚検出波形を予め設定した周波数で二つの帯域に分離するためのフィルタ回路を試作した。図6に周波数分離フィルタ回路のブロックダイアグラム、図7にその外観写真を示す。

信号の増幅およびフィルタ回路には汎用のOPアンプを用いた。電源は5V、0V、+12V、-12Vの4種類の電位に相当する電圧を供給し、0Vを回路の接地電位として5Vのブリッジ電圧を回路基板から供給し、+12Vおよび-12VはOPアンプの電源として用いた。

ひずみゲージからの力覚信号の入力は、一般にロードセル用に利用されているコネクタを用い、このコネクタのピン配列仕様に従って行うとともに、ひずみゲージへのブリッジ電圧の供給を行った。

回路構成は、ひずみゲージの出力を一次増幅回路で増幅した後、その出力を低域通過フィルタ回路(Low Pass Filter)と高域通過フィルタ回路(High Pass Filter)の両方に入力し、それらによって処理された出力信号はそれぞれ独立した電力増幅回路を経て加工反力信号および機械振動信号として制御系に出力される。このとき、高周波領域の信号については特定の周波数成分の除去あるいは強調を行うためのノイズ除去フィルタ回路(Noise Reduction Filter)を通してからオーディオアンプで増幅して振動再生器を駆動した。

低周波数成分と高周波成分に分離する際の分離の境目となるカットオフ周波数は、

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad [\text{Hz}]$$

で得られるので、回路上で抵抗RとコンデンサCを取り替えてカットオフ周波数 f_c を変化させることができるようにした。この際、低域通過フィルタ回路と高域通過フィルタ回路に用いる抵抗とコンデンサは双方で同じ値とし、同一のカットオフ周波数で帯域分離処理を行った。

2.5 制御システム

遠隔加工のための動作制御は、マイクロプロセッサ・コンピュータシステムを用いたデジタル制御法を採用した。

全体のシステム制御に関する信号処理は、図8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、C言語で記述した制御プログラムをMS-DOSでコンパイルして実行させた。

位置制御と力覚制御を同時に行う“バイラテラル制御法”では、マスタ装置およびスレーブ装置からそれぞれ位置と力

覚の二つを情報として検知しながら、両装置のモータ駆動制御を行う。位置情報は、DCモータのサーボ制御用に取り付けられているロータリエンコーダの出力信号から取り出し、カウンタ回路を用いてパルスを計数し、モータの回転角度に換算した。

力覚荷重の検出とモータへの速度指令信号はアナログの電気信号として受け渡しを行うが、これを制御プログラムで処理するために、16ビットのA/D変換回路(Interface製IBX-3135)およびD/A変換回路(Interface製IBX-3304)を用いて制御信号の入出力を行った。

また、制御用のタイムステップを知らせるためのタイマ割り込み回路を用意し、CPUに対して1~10ミリ秒間隔の割り込み信号を発生させてインターバルタイムとして用いた。

全体の制御系を図9に示す。スレーブ装置で得られた加工

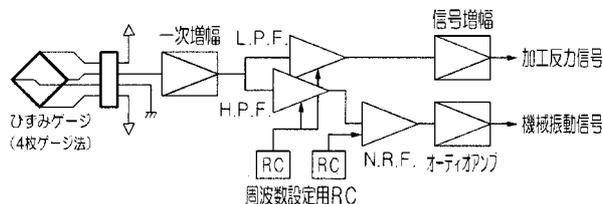


図6 力覚波形分離回路構成

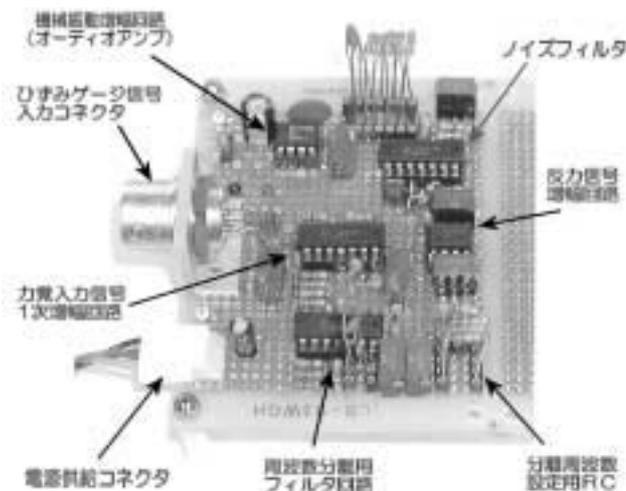
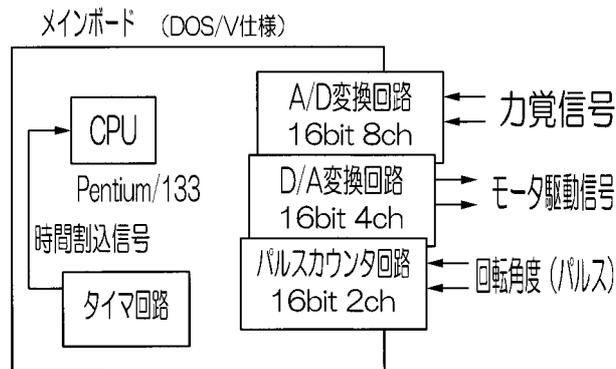


図7 力覚波形分離回路基板(外観)



※信号の入出力は、それぞれマスタおよびスレーブ用に2経路ずつ

図8 制御信号処理系の構成

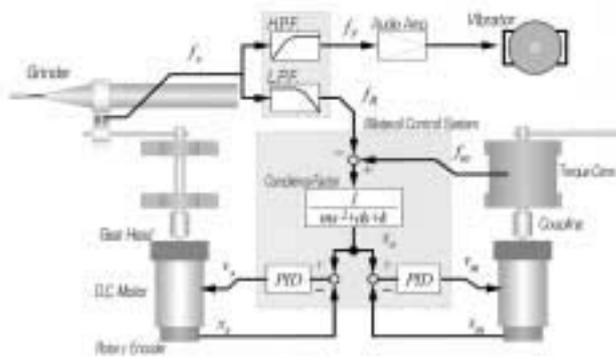


図9 システムの制御信号のフロー

時の力覚信号をフィルタで2つに分離し、高周波成分を含む信号はそのまま振動再生器へ出力する。

もう一方の低周波数側の加工反力とマスタ側から得られる手動トルクの力差からインピーダンス制御の手法を用いてマスタ装置およびスレーブ装置の回転変位を計算し、両者が同じ位置に動くようにそれぞれの位置指令信号を出力する。

マスタ装置とスレーブ装置は、現在の角度位置を検出し、指令された角度位置に回転するようにPID制御手法を用いて与えるべきモータの速度を計算し両者のモータドライバへ駆動指令電圧を出力することにより、マスタ装置とスレーブ装置の間で力と位置を共有する制御を行う。

3. 実験結果および考察

3.1 加工中の力覚波形

スレーブ装置の工具保持金具に貼り付けたひずみゲージ出力から得たグラインダ加工時の力覚波形例を図10に示す。グラインダ加工中の力覚波形は、加工に伴う細かな機械振動と、大きなうねりのような状態の加工反力とが重ね合わされた波形になっていることがわかる。

同図の例ではグラインダが軽く被加工物に接触して研削を行っている程度の加工状態であったが、振幅の程度について加工反力と機械振動を比較すると加工反力の振幅が機械振動の振幅の4～5倍であると読み取ることができる。加工反力は片振り荷重であることも考慮すると、加工に伴う力覚情報のうち工具の押付けに対する反力が主要な要素であると考えられる。

機械振動を作業者に返す目的は、工具と被加工物の衝突時の衝撃感を得るといった加工中の研削の状態を把握するためであるが、これをよりよく感じ取るためには、加工振動の方を幾分か大きめに増幅して与えることも効果であろう。

図11に、加工を行わず無負荷の状態でグラインダをまわしている時に得られた力覚波形を示す。実際には非常に小さな振幅の波形信号であるが、この波形から約6ミリ秒周期の波が読み取れる。これは167Hzに相当し、工具の回転数である10,000回転/分(rpm)に一致する。

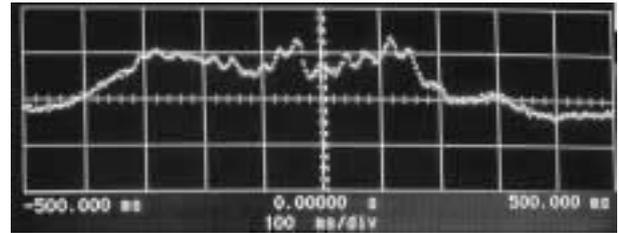


図10 グラインダ加工中の力覚波形

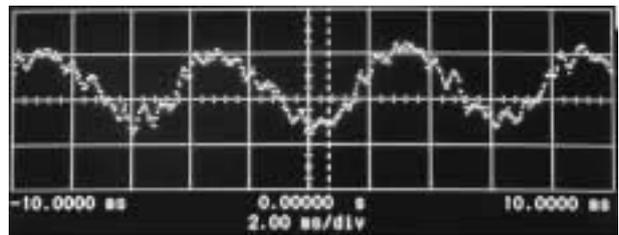


図11 無負荷時の力覚波形

したがってこの波形はグラインダの工具が空転している時の機械振動を捕らえたものと判断するが、この波形には周波数が数kHz程度の更に細かい振動が認められた。これはセンサ部分の固有振動等の影響ではないかと考えられる。しかしいずれの振幅も加工時の振動や加工反力の大きさに比べて極めて小さいため、加工中の力覚情報としては工具が回転しているか否かの判断に用いる程度で、実際の加工中の状態把握に影響を与えるものではない。

図10の細かな振動波形を注意してみると20～25ミリ秒の周期の振動波形が読み取れる。この周期は工具の回転と一致せず、その4～5倍程度になっている。これについてはっきりとしたメカニズムを解明したわけではないが、グラインダ加工中には工具の砥粒が被加工物と接触瞬間に反発して跳ね返された後に工具の押付け力によって押し戻され再度砥粒が被加工物に衝突するというを細かく繰り返しながら研削加工が進行しているものと推測している。

この試験の結果をもとに機械振動として再現すべき周波数帯域について考察すると、力覚信号の高周波成分は砥石工具が被加工物に接触した瞬間の力の立ち上がりに影響するものの、高い方でも数kHzの周波数帯を再現できれば良く、一方の低い方は加工中の振動を考慮すれば100Hz以上が再現できればよいことがわかった。

3.2 周波数分離フィルタの設計

試作した周波数分離フィルタ回路を用いて、力覚信号を加工反力と機械振動に分離する際のカットオフ周波数を決定するための試験を行った。

一般にカットオフ周波数を高く設定すると、加工反力の細やかな変化にも俊敏に反応することができるため、加工中の押付け力の手加減などを微妙に行うことができるようになるが、その一方では制御が不安定になりやすくなり、力の大き

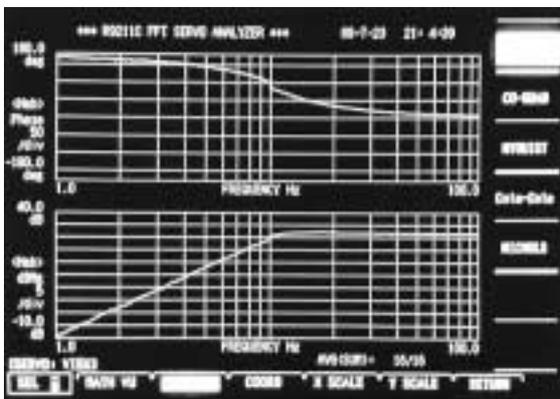
な変動に対して制御系が発散してしまう可能性が高くなる。

したがって、制御の安定性と得られる力感覚のリアリティの間には相反する関係があり、制御の安定性を確保しながらできるだけ臨場感を与えることがフィルタ設計の上で大きな課題となる。

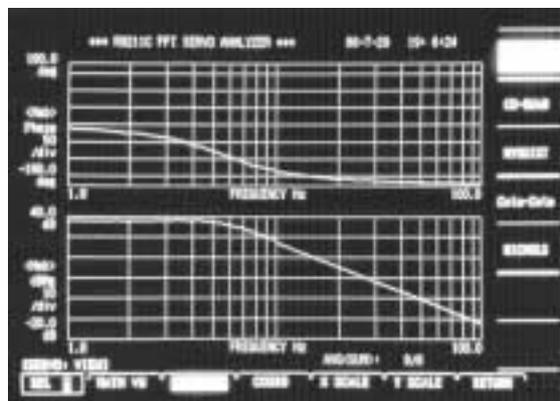
前項の考察により、周波数分離で選定すべきカットオフ周波数は100Hz以下であることがわかったが、力覚帰還制御システムに関して今回の試みのように力覚情報を周波数帯域で分離するという報告例を知ることができなかったため、カットオフ周波数の選定は実際にカットオフ周波数を様々に変えながら制御を行ってみて、感覚として最も適正と思われる値を求めた。

図12は、試作した周波数フィルタの特性を示すボード線図の一例である。a)の方はカットオフ周波数を約10Hzに設定した時の高周波通過フィルタ(H.P.F.)の周波数応答特性を、b)の方はカットオフ周波数を約5Hzに設定した時の低周波通過フィルタ(L.P.F.)の周波数応答特性をそれぞれボード線図で示したものである。

ボード線図とは、フィルタ等の伝達回路にある周波数の正弦波入力波形信号に対する出力のゲイン(増幅率)と位相の遅れを一連の周波数に対してとり、横軸に周波数、縦軸に位相遅れ角とゲインをプロットしたものである。¹⁰⁾



a) 高周波通過フィルタの周波数特性 ($f_c=10\text{Hz}$)



b) 低周波通過フィルタの周波数特性 ($f_c=5\text{Hz}$)

図12 周波数分離フィルタの周波数特性の例

今回試作した周波数分離フィルタは2次遅れ型の回路になっており、位相遅れが最大で 180° 、減衰比は -12dB/oct となっているのが確認できる。

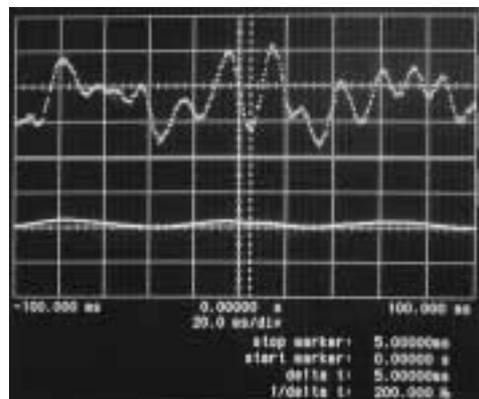
このフィルタ回路の低周波帯域出力を加工反力として用いて、カットオフ周波数の設定を変えながらバイラテラル制御による遠隔操作実験を行い、制御の安定性と加工時の押付け力の感触等を検討した結果、カットオフ周波数を5Hz程度としたときに最も良好な状態が得られた。

ただし、これは実験に用いた装置や制御システムという環境条件の下で安定性を重視し、若干臨場感を犠牲にした場合の結果であり、全てのシステムでこの条件が適当ということではない。

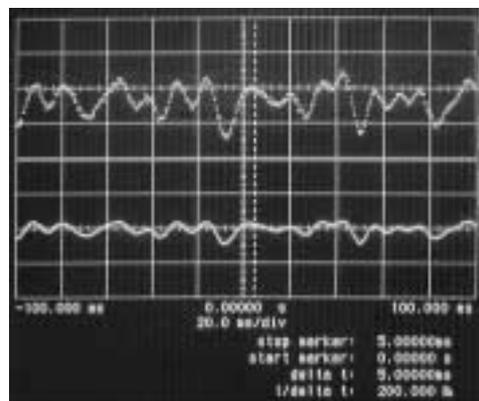
例えば、装置の剛性、センサ出力の耐ノイズ性、モータの駆動トルク等の物理的な条件や、デジタル制御のインターバルタイムの時間短縮、制御の一部をアナログ化するなど、制御性の向上をはかることにより、カットオフ周波数を高めた条件設定も可能であると考えられる。

3.3 周波数分離フィルタによる力覚信号処理

スレーブ装置でグラインダ加工を行った時の力覚波形を試作した周波数分離フィルタ回路を用いて加工反力と機械振動に分離した信号波形の一例を図13に示す。



a) 加工反力の力覚波形



b) 機械振動の力覚波形

図13 フィルタ分離後の力覚波形の例

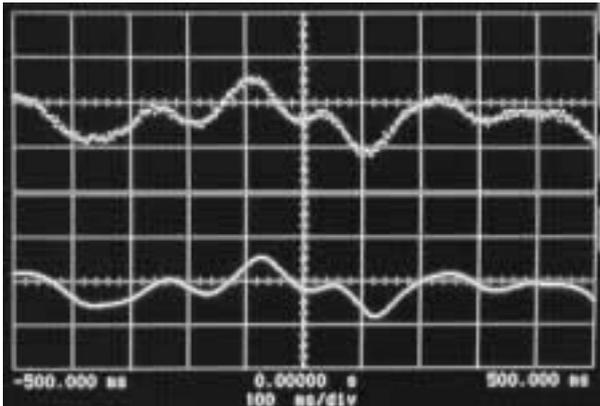


図14 加工反力の入出力比較

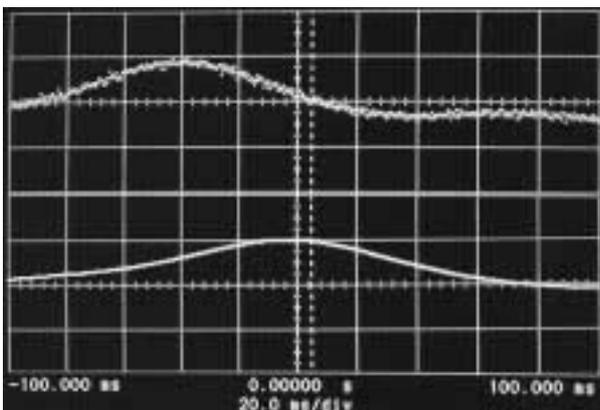


図15 加工反力の時間遅れ

図の上段が入力信号波形であり、下段がそれぞれのフィルタ回路を経て処理された出力波形である。

a) は低周波成分主体の加工反力の力覚波形を示しているが、工具が被加工物と接触して起こる振動などが除かれて、押付け力に応じてわずかにゆっくりと脈打つように力の加減が行われている様子が確認できた。

一方の b) は高周波成分域の機械振動の力覚波形を示しているが、こちら a) の場合とは逆に加工反力によるうねりのような変動が取り除かれて、加工中の振動のみが伝えられている様子が確認できた。

加工反力に関して低周波通過フィルタを経過した信号波形の追従性を確認するため、工具の回転を止めてスレーブのセンサに荷重を加えた場合のフィルタ回路の入力と出力を比較した結果の例を図14に示す。

上段がフィルタに入る前の波形、下段は低周波通過フィルタを通った後の波形である。図では横軸のスペンが1秒間になっているが、時間スペンを長くすると見ると入出力の関係に良好な追従性が認められる。むしろ、細かいノイズ成分が取り除かれていて滑らかな波形になっており、制御の安定性という視点から好ましい状態になっているように見える。

しかし短い時間スペンで観察すると、図15に示すようにフィルタ出力の波形が入力波形に対し若干の時間遅れのあるこ

とがわかった。図の例では、約30ミリ秒間の時間遅れが認められる。

これは、低周波通過フィルタを構成する RC の時定数による位相遅れの影響を受けていることが原因と考えられる。

先に図12-bのボード線図で示したように、低域通過型フィルタは、周波数がゼロ、すなわち D.C. (直流) に近いときには位相遅れが小さいが、周波数が高くなるにつれて位相遅れ大きくなり、カットオフ周波数付近で 90° 、更に高い周波数では最大 180° までの位相遅れが発生する。

いまカットオフ周波数に近い5 Hzの正弦波を入力したと仮定し、このとき位相が 90° 遅れるとすると、入力波形の周期は200ミリ秒であるから約50ミリ秒の時間遅れが発生することになる。このことから、図15の例で示す30ミリ秒程度の時間遅れの発生は、このフィルタ回路の位相遅れによって説明できるものとする。

もし、 180° に近い位相遅れが発生すると、制御系は不安定になり、制御が発散してシステム全体の動作が制御不能になってしまうため、加工反力の動作で許容できる周期は少なくともカットオフ周波数で設定した値以下でなければならないということになる。

したがって、実用化を考慮する場合には周波数分離フィルタのカットオフ周波数をより高く設定できるように、例えば前項にも述べたように PID 制御の計算処理をアナログ制御系に置き換えるなど、システムの設計の段階で考慮していかなければならない。

3.4 遠隔加工における力覚帰還の有効性

バイラテラル制御系とは別に振動再生器を用いて機械振動の情報を作業者に返す実験を行ったが、カットオフ周波数が非常に低い値であったため、加工中に発生している機械振動情報はほぼ正確に伝わっていることが確認された。

機械振動再生器はオーディオ用スピーカを改造して試作したが、機械振動の情報は力覚情報ということだけでなく、聴覚を刺激する“加工音”として返しても作業上の臨場感を与えることがわかった。

機械振動は、もともとの振幅レベルが小さいため、反力の増幅率よりかなり高い増幅度を持たせてあるが、実際に力覚として刺激するレベルとしては比較的刺戟に対して敏感な指先等の部分で感じられる程度であった。

しかし、加工に際して工具の回転振動や被加工物と接触したときの衝撃感、反発感など、当初の目的どおり加工状態を感じ取ることができ、フィルタで高周波成分を取り出して機械振動として再生し作業者に与えることの有効性を確認した。

3.5 加工中の機械振動に関する考察

最後に、グラインダ加工における機械振動の意味合いにつ

いて若干考察する。

もともと機械振動は工具から伝わってくることを考えると、振動も手のひらや指先に返すべき力覚情報である。しかし、マスタのレバー等にこの振動を返すとマスタのトルク変換器がこの振動をひろってパイラテラル制御系に高周波成分が流入し、うまく制御ができない状況になってしまうことから、あえて最初から手や指とは別な位置に振動を返すことを前提としていた。

グラインダ加工において、加工反力はグラインダに加える力を加減するために用いられるが、一方の機械振動は作業状況を確認したり、目視で確認できない工具と被加工物の相対的な関係を認識したりするための補助としてその役割を担っていると考えられる。

本報でも示したように、加工反力と機械振動の力覚的な特性を比較し、その振幅の差などを考慮すると、機械振動による力覚情報よりは、加工中に工具を押付ける力を確認する意味での力覚情報をより重視すべきであり、その上で機械振動も含めた高周波成分域の力情報は、工具の回転の有無、工具と被加工物面および鑄バリ等の要切除個所との接触認識など、作業者が加工状態を把握するための補助的な情報として与えられれば、作業の臨場感は向上すると推測される。

また、必要以上に機械振動を与えることは労働安全面的な配慮の上からもあまり好ましいこととされない場合も考えられる。グラインダ加工におけるこうした認識を踏まえた上で、場合に応じて機械振動の与え方やレベルを決定していくように配慮していく必要があるものとする。

4.まとめ

鑄仕上げ加工を想定した製造工程の劣悪環境下作業の対策として力覚帰還を伴う遠隔グラインダ加工のための低コストな力覚制御システムについて検討を行った。

遠隔グラインダ加工を想定した制御システムにおいて、グラインダ加工時に発生する機械振動等の高周波数成分が制御系に与える悪影響を防止するため、加工力信号を適当な周波数で分離し、それぞれ加工反力、機械振動として作業者に帰還する方法を考案し、その有効性を確かめた。

力帰還型遠隔作業システムの実用化のためには、装置コストへの配慮は重要な要素である。その上で制御品質を向上させるためには、制御系の一部をアナログ化するなどの工夫が必要であると考えられる。

今後も安価な制御機構によるシステム構築を基本とし、さらに製造工程での実用化に向けて検討を進める予定である。

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) 杉本浩一；位置と力のハイブリッド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；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) 戸羽篤也，桑野晃希；パ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)
- 8) 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)
- 9) 戸羽篤也，桑野晃希；パ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；北海道立工業試験場報告 Vol.298 (1999)
- 10) 中野道雄，美田 勉；制御基礎理論；昭晃堂 (1993)