工作機械のひずみや振動を利用した切削力の測定*

碓 井 雄 一** 宮 沢 伸 一** 澤 井 信 重**

Estimation of Cutting Force from Machine Tool Conditions such as Distortion and Vibration

Yuichi USUI, Shinichi MIYAZAWA and Nobushige SAWAI

This paper presents a method of indirectly measuring cutting force by observing machine tool conditions such as distortion and vibration. Outputs of several sensors attached to a machine tool are converted to equivalent cutting force by applying inverse-transfer function of the measurement system. Then, averaging the equivalent cutting force signals with the weight proportional to the coherence of the measurement system improves the accuracy of the cutting force estimation. The effect of the proposed method is confirmed by measuring cutting force with strain gauges and an accelerometer installed on a milling machine.

Key words: sensor fusion, transfer function, coherent function, cutting force

1. はじめに

機械加工における加工状態監視や最適制御を行う際に、正確な切削力を求めることが重要である。切削力を測定するためには圧電効果などを利用した切削動力計がよく使用される。しかし加工の妨げになったり加工物の大きさに制限があったりするなど、動力計の利用は簡便な切削力検出方法とはいえない。

一方、主軸モータ電流変動や工作機械のひずみ・振動等には切削力によって励起される成分が多く含まれている。これらの信号は間接的に切削力を表しており、加工を妨げることもなく容易に測定することができる。しかし切削力測定という面ではセンサ信号の質が切削動力計に比べて低く、特に過渡的な切削力を測定する時は動力計とは全く異なった出力となることが多い。また、切削力以外に起因する信号成分も多く含まれており、その分離が必要になる。

本研究は、対象工作機械に適当に配置したひずみゲージや加速度計など複数のセンサの出力から切削力を求め、単独のセンサでは外乱の影響などが大きい場合でも特性の異なったセンサ信号を合成することによって精度の高い測定を可能にする、センサフュージョン手法を開発することを目的として行われた。各種センサで計測した信号にセンサ系の逆伝達関数を作用させて切削力に対応する信号にした上で、センサ系の信頼性に応じた重みをつけて合成することにより切削力を求めることができることを示すとともに、実験によってその効果を確認した。

2. 信号処理方法

工作機械に取付けた複数のセンサの出力から、図1に示す信号処理によって切削力を推定する。ここでは信号をラプラス変換した周波数領域の表現を使って考察を進める。

一般に切削力を測定する時、切削力 $F(s) = \mathcal{L}(f(t))$ を直接測定することはできず、ひずみなどに変換された量を測ることになる。力検出用以外のセンサを使って切削力を求める方法として、送り系をモデル化して送りモータの電流等から切削力を推定する方法がある¹⁾。この方法は有効な切削力推定方法であるが、系の正確なモデルをつくらんと困難がある。複雑な系

における測定やセンサの固有振動数に近い周波数の信号を測定しようとする時は、センサ系の伝達特性をあらかじめ求めておいてセンサ出力を補正する方法が有効であり^{2)~5)}、本報でもこの方法を利用する。

切削力推定に利用できる物理量とそれに対するセンサには種々の特性のものがあるが、これらを含めて切削力 $F(s)$ と i 番目のセンサの出力 $X_{i(s)} = \mathcal{L}(x_{i(t)})$ との間の伝達関数を $H_{i(s)}$ とする。このとき $F(s)$ は $H_{i(s)}$ による変換を受けるので、測定される信号は、

$$X_{i(s)} = H_{i(s)} F(s) \quad (1)$$

になる。そこで、あらかじめ測定系の $H_{i(s)}$ を求めることができれば、 $X_{i(s)}$ に $H_{i(s)}$ の逆関数を作用させて、

$$F'_{i(s)} = H_{i(s)}^{-1} X_{i(s)} \quad (2)$$

によりセンサによって検出された物理量から切削力に相当する信号を求めることができる²⁾。ここで利用する信号が工作機械本体の振動などであっても、切削力が原因となって起こっているものならば、外乱が入ったり工作機械の振動特性が変化したりしない限り、式(2)によって正しい切削力が得られる。

しかし、個々のセンサは特定の周波数域の感度が低かったり、ノイズ成分が多い周波数帯があったりする。そこで切削力測定の精度を高めるために、センサの特徴を取り込んだ重みづけを行って複数のセンサ信号を合成する。信号合成に際して、各セ

Fig. 1 Signal processing flow

* 原稿受付 平成9年5月2日

** 正会員 機械技術研究所 (つくば市並木1-2)

ンサの出力のうち切削力に起因する成分とノイズ成分との比率を推定し、特性の良い部分だけを採用するために、重み関数としてコヒーレンス関数の利用を考える。

コヒーレンス関数は、基準となる切削動力計の出力と使用するセンサの出力のオートパワースペクトル（それぞれ $G_{xx}(s), G_{ii}(s)$ ），および両者のクロスパワースペクトル $G_{xi}(s)$ のアンサンブル平均から、

$$\gamma_i(s) = \overline{G_{xi}(s)}^2 / \overline{G_{xx}(s)} \overline{G_{ii}(s)} \quad (3)$$

として定義され、2つの信号間の周波数成分ごとの相関をあらわす。 $\gamma_i(s)$ は0~1の値をとるが、その値が1に近いほど両者の相関が高く、したがってその周波数における $F'_i(s)$ が正しい切削力 $F(s)$ に近いことを示している。そこで、 i 番目のセンサの信号 $F'_i(s)$ に対して、周波数成分ごとのコヒーレンスに応じた重み、

$$w_i(s) = \gamma_i(s) / \sum_j \gamma_j(s) \quad (4)$$

を乗じて、各センサの信号を加え合わせることに、

$$F'_s = \sum_i w_i(s) F'_i(s) \quad (5)$$

を得、 F'_s の逆ラプラス変換 $f'_s(t) = \mathcal{L}^{-1}(F'_s)$ によって時間領域の信号が求まる。ここで得られた $f'_s(t)$ はそれぞれのセンサの特性の劣る部分を補いあったものになっていて、本来の切削力 $f(t)$ に近いものになる。

以上の方法では、測定に先立って何らかの方法で測定系の $H_i(s)$ を求めておかなければならない。そのため、例えばセンサを組み込むときに切削動力計によって伝達関数を求めておく。これには一度だけは切削動力計が必要になるが、加工中は動力計を取り外すので加工の邪魔になることはない。より簡便な方法としては、ロードセルを付けたハンマを使って衝撃力を加えて伝達関数を求めることもできる。この方法は周波数特性からみても有力な方法である。また正確さではやや劣るが、振子に付けた重りを一定の高さから工具に衝突させると再現性の良い半コサイン波状の力が得られるので、簡便な伝達関数測定法として使うことができる。

3. 切削力測定実験

図2のように、主軸端 BT-40、高さ1800mmの立フライス盤にセンサを取付けて切削加工時の信号を検出した。センサの種類と取付け位置は、切削力のX方向成分を検出することを目標として、センサ1：主軸頭側面のコラム寄りに抵抗線ひずみゲージ、センサ2：テーブルX方向送りねじの軸受部根元に抵抗線ひずみゲージ、センサ3：主軸頭側面の主軸軸受近くに加速度計、とした。抵抗線ひずみゲージはゲージ長5mmのものを使い、主軸頭・軸受部とも曲げ変形を検出するようにした。シグナルコンディショナに共和電業 DPM713B を使用し、DC~10kHzの信号を検出した。加速度は Endevco213E 型によって検出し、ローパスフィルタで10kHz以上の信号を遮断した。

フライス盤テーブル上に取付けた切削動力計によって切削力を求めて、測定系の伝達関数の計算に使用した。切削動力計は Kistler9257B 型で、固有振動数が約4kHzである。信号処理して得られた結果との比較評価をするための参照信号としても切削動力計の出力を利用した。信号処理は、サンプル間隔78μs、ブロックサイズ512でサンプルしたデータに基づいて行った。

Fig. 2 Arrangement of sensors for force detection

工具径60mmのエンドミルを単刃で使い、切込み4mm、切削幅10mm、主軸回転数600rpm、1刃当たりの送り0.2mmで切削を行った時の信号により、センサ系の伝達関数とコヒーレンス関数を求めた。次に、伝達関数測定時と同じ切削条件の場合および強制振動周波数の影響を調べるために主軸回転数を低くした場合、切削力の大きさの影響を調べるために切込み深さを小さくした場合について、本信号処理方法によって求めた切削力を切削動力計の出力と比較してその効果を調べた。

工作物の大きさや取付け位置によって工作機械の振動特性が変化する。特に加速度計をセンサとする場合はその伝達関数の受ける影響が大きいと考えられる。そこで工作物をフライス盤テーブル隅に取付けた場合と中央に取付けた場合について実験し、両者の比較を行った。

切削力の最大値や特定の周波数成分など、利用すべき特徴が特定されているときは、その特徴量をもって信号処理の効果を評価することができる。しかし本論文では得られた信号の利用対象を特定していないので、信号処理の結果を量的に捉えるための目安として、切削動力計から得られた信号との間の相関係数を利用する。

信号処理によって得られた結果と切削動力計出力との相関係数は両者が一致すれば1となり、違いが大きくなるほど小さな値をとるので、信号処理結果がどの程度の誤差を含むかを示す指標となる。そこで、時間領域に関する相関係数 $r = \frac{(f'_s(t) - \bar{f}'_s(t))(f(t) - \bar{f}(t))}{\sqrt{(f'_s(t) - \bar{f}'_s(t))^2 (f(t) - \bar{f}(t))^2}}$ とリニアスペクトルに関する相関係数 $R = \frac{(F'_s(s) - \bar{F}'_s(s))(F(s) - \bar{F}(s))}{\sqrt{(F'_s(s) - \bar{F}'_s(s))^2 (F(s) - \bar{F}(s))^2}}$ によって信号処理結果を評価した。

4. 実験結果と考察

主軸回転数600rpm、切込み深さ4mmで切削を行った時に、切削動力計から図3の信号が得られる。切削開始時および終了後に約1.1kHzの振動が見られるのは切削動力計の固有振動によるものであり、切削動力計の出力が真の切削力を表しているわけではない。しかし、ここでは切削動力計によって得られる信号が正確な切削力であるものとして、測定系の伝達関数の計算および信号処理結果との比較を行う。

各センサから得られる信号 $x_{i(t)}$ およびそのスペクトルは図4のようになる。これらの信号にセンサ系の逆伝達関数を乗じた結果を時間領域であらわすと図5になる。図中の r は参照信号とした切削動力計の出力との相関係数を示している。ひずみゲージによる信号からは非常にノイズの多い信号しか得られない。

Fig. 3 Cutting force (output of a dynamometer)

Fig. 4 Output signal of sensors

相関係数を見ても加速度計で測定した信号の場合の0.93に比べて0.54程度と低くなっている。加速度計によって計測した信号からは、約1.1kHzの振動の重畳がめだつものの、切削動力計の信号に比較的近い波形が再現している。

図5の信号に対応するスペクトル $F'_{i(s)}$ と、これらの信号を一つに合成するときの重み関数 $w_{i(s)}$ を図6に示す。ひずみゲージを使ったセンサ1、センサ2はフライス盤の剛性が高いので感度が十分ではなく、時間領域と同様にリアスペクトルに関する相関係数も加速度計センサ3の方が高くなっている。これに対応して重み関数も加速度計を使った場合が総体的に大きい。しかし、加速度計の感度が落ちる低い周波数をはじめ、700Hz近傍やいくつかの周波数ではひずみゲージの重みが増して、それぞれのセンサの欠点を補いつていることがわかる。

各センサの信号から求めたスペクトル $F'_{i(s)}$ に重み $w_{i(s)}$ を乗じたものを加え合わせて得られる信号 $F'_{(s)}$ とその時間領域の波形 $f'_{(t)}$ は図7のようになる。基準にした切削動力計との間の相関係数は時間領域で0.957、リアスペクトルで0.835となり、個々のセンサから得られた信号の値よりも改善されている。図7を図3と比べると、約1.1kHzの振動が大きな誤差になっている。この周波数が参照とした切削動力計の固有振動数に当たるため、測定系の伝達関数の推定が正しく行われなかったことが原因と考えられる。この振動を除けば、信号処理の結果得られた $f'_{(t)}$ は元の波形 $f_{(t)}$ を良く再現している。

いろいろな切削条件に対して、最終的に得られた切削力信号

Fig. 5 Compensated signal

Fig. 6 Composition of compensated signals

$f'_{(t)}$ と切削動力計の出力 $f_{(t)}$ を、図8および図9に示す。図8が伝達関数測定時と同様に工作物をテーブル中央に取付けた場合、図9が工作物をテーブル左端に取付けた場合の結果である。 $f_{(t)}$ と $f'_{(t)}$ との時間領域および周波数領域における相関係数を r と R として図中に示す。また、ひずみゲージの信号を使わないで加速度計の出力に逆伝達関数を作動させただけでも、動力計に比較的近い信号が得られるので、そのときの相関係数 r_a と R_a を参考として示す。

切込みが小さくて切削力が小さいときはノイズが多く、元の波形の再現が困難であった。信号が大きいときは、主軸回転数などを変えた場合でも、切削動力計で測定した切削力に類似した結果が得られている。ほとんどの場合において、加速度計単独から得られた信号よりも、ひずみゲージの信号を加えることによって相関係数が改善されていて、ここで提示した信号処理

Fig. 7 Cutting force (composed signal)

方法が有効であることが確認できる。また、工作物取付け位置が移動するとフライス盤の振動特性が変化するが、その場合でも工作物をテーブル中央に取付けた場合に比べて相関係数がわずかに小さくなっている程度で、比較的良く切削力の推定が行われていることがわかる。しかし信号処理の出発となるセンサの出力が切削力からはかなり隔たったものであったため、細部までは切削力の再現はできていない。信号処理とともに信号検出方法の高品質化を図っていくことが大切である。

5. まとめ

工作機械に適当に配置したひずみゲージや加速度計など特性の異なった複数のセンサの出力から切削力に相当する信号を求め、センサの特性に応じた重みをつけて合成することによって、単独のセンサに比べて精度の高い測定を可能にするセンサフュージョン方法の提示を目的とし、以下のことを行った。

- (1) センサフュージョンの過程では、各センサ系の伝達関数をあらかじめ求めておいてセンサ出力に伝達関数の逆数を乗じて切削力に相当する信号を求めることと、各センサ系のコヒーレンス関数に応じた重みをつけて合成するという手法を採用した。
- (2) ひずみゲージおよび加速度計をマシニングセンタに取付けて、ミーリング加工中に測定した信号に(1)の方法を適用し、個々のセンサから求められた切削力信号に比べてこの方法によって得られる信号の精度が向上していることを確認した。

参考文献

- 1) Y.Altintas: Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements, Trans. ASME J. Eng. Ind., Vol.114 (1992) 386.
- 2) 宮沢伸一, 碓井雄一, 齊藤宏昭: フーリエアナライザを利用した過渡的切削力の測定法, 精密機械, 49,3 (1983) 359.
- 3) S.Miyazawa and Y.Usui: Measurement of Transient Cutting Force by Means of a Fourier Analyser, Prec. Eng., 7,2 (1985) 99.
- 4) 放生明廣, 茶谷明義, 上村文人: 畳み込み積分による衝撃力推定法, 日本機械学会論文集 (A編), 55,511 (1989) 477.

Fig. 8 Examples 1 (work: at the center of table)

Fig. 9 Examples 2 (work: at the corner of table)

- 5) H.Inoue, H.Ishida, K.Kishimoto and T.Shibuya: Measurement of Impact Load by using an Inverse Analysis Technique, JSME Int. J. Ser.1, 34,4 (1991) 453.