

サーボモータ電流を利用した穴加工の異常検知に関する研究

森本和邦*

A Study of Drilling Tool Trouble Detecting Method with Servo Motor Electric Current

Kazukuni MORIMOTO

In this study, a method of estimating cutting torque with servo motor electric current is proposed. The method is applied to high aspect ratio drilling, estimated cutting torque shows good correlation with measured cutting torque. It shows possibility that the method can detect increasing cutting torque with destruction of drilling tool by estimated cutting torque.

Key words: Electric Current, Cutting Torque, Drilling, Servo Motor

1. はじめに

切削加工ではターニングセンタやマシニングセンタによる加工の自動化が行われているが、加工に用いる刃物（以下切削工具とする）が摩耗や折損すると加工不良が発生するため、オペレータによる交換作業が必要になる。切削工具の摩耗や折損は正確に予測することが難しいため、現場では予め設定した加工時間や加工個数で交換し、さらに加工品の抜き取りによる品質検査や加工音に異常が認められる時に適宜切削工具が交換される。しかし、予め加工時間や加工個数を設定して交換する事は、切削工具がまだ使える状態で交換することになるため工具費が増える。そのため切削工具交換の折損兆候を事前に予測できれば、工具費も抑えられ、生産性が向上する。切削工具の折損を検出する方法として、切削動力計により切削トルク、切削抵抗を測定する方法がある。しかし、測定機が高価であり、量産加工に適用することは難しい。切削動力計を用いる以外にも折損を検出する方法として、測定金属が破壊する際に出る弾性波であるアコースティックエミッション(AE)を検出する方法¹⁾、加工音の周波数解析から折損の兆候を検出する方法²⁾等の報告がされてい

る。これらの方法は外部センサを用いる事が必要であり、広く普及していない。それらに対して工作機械に備え付けられているサーボモータの電流から切削トルクを推定し検出する方法は、工作機械の内部センサを利用することができる。そのため本報告ではサーボモータ電流から切削トルクを推定する方法を検討した。サーボモータ電流から切削トルクを推定する方法はモータトルクを専用ソフトウェアで見する方法³⁾やサーボモータ電流から計算する方法⁴⁾が提案されている。サーボモータ電流から計算する方法は、モータのトルク-電流特性に応じて加工時のモータ負荷トルクから非加工時で回転のみの状態のモータ負荷トルクを差し引く方法が用いられるが、リアルタイムに計算を行って検出している例はほとんど見られない。そこで、本研究では事前取得した非加工時のモータ電流を加工時のサーボモータ電流に同期させ、モータ電流からリアルタイムに切削トルクを推定し異常検知への適用について検討したので報告する。

2. 実験方法

2. 1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。実験は立型マシニングセンタ(DMG MORI 製 SV403)によって深穴加

* ものづくり研究課

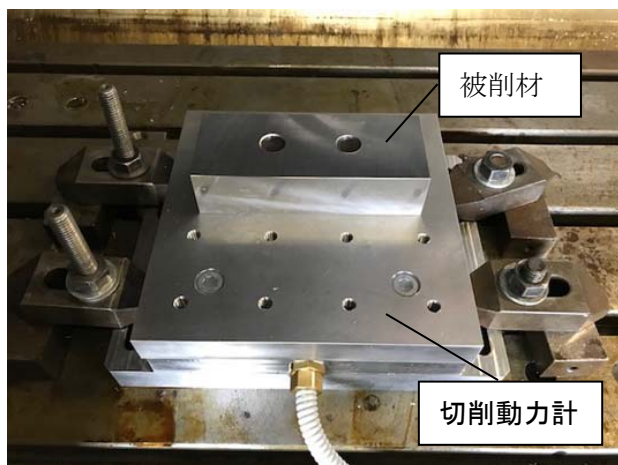


図1 実験装置

工(7.5D)を行った。加工した供試品の材質は S50C, 大きさは 150 mm×60 mm×35 mm とし, 切削動力計に取り付けるため座グリ穴を 2 か所に設けた。主軸サーボモータを制御するサーボアンプ電流は, 工作機械内部のセンサをメーカーのソフトウェアがないと取り出せないため, 外部センサとしてクランプセンサ (HIOKI 3284 CLAMP ON AC/DC HITESTER) で測定を行った。主軸回転用のサーボモータは FANUC 製 Built-In AC Spindle Motor (型式 αB112L-18.5) である。推定値を検証するため切削動力計 ((株) レプトリノ MFS200XS502US) により切削トルクを測定した。サーボアンプ電流は 1 kHz でサンプリングし, 切削抵抗は 1.2 kHz でサンプリングを行った。使用した切削工具および切削条件を表 1 に示す。

2. 2 切削トルクの推定方法

実験に使用した主軸サーボモータにおける電流と回転トルクは次式で表すことができる⁵⁾。この検討では, 回転数が一定である加工を想定しているため, 一定回転数におけるトルクと電流の関係性として定義している。

$$T_m = K_m * I_m = K_m * A_m * \sin(2\pi f t + \theta_m) \quad (1)$$

T_m : モータトルク [N・m], K_m : モータ比例定数,
 I_m : モータ電流 [A], A_m : 電流振幅 [A], π : 円周率,
 f : 周波数 [Hz], θ_m : 位相角

一般的に主軸の回転には, 加工負荷だけでなく, モータの回転を維持するために必要な負荷, 減速機構の駆動にかかる負荷が加わる。そのため加工負荷のみを抽出するために, 加工負荷のある時のモータ

表 1 切削工具および切削条件

加工種別	穴加工
切削工具	三菱マテリアル(株) ハイスドリルφ4 SD0040 刃数 2
ホルダ	ミーリングチャック
突出し量 [mm]	55
切削速度 [m/min]	114.6
回転数 [rpm]	1440
刃当り送り量 [mm/rev]	0.042
加工深さ [mm]	30
切削油	無 (乾式)

トルクから加工負荷のない状態のモータトルクを差し引くことで, 加工負荷のみを抽出し, 次式で切削トルクを算出する。

$$M_z = K_m * (I_m - I_0) = K_m * \{ A_m * \sin(2\pi f t + \theta_m) - A_0 * \sin(2\pi f t + \theta_0) \} \quad (2)$$

M_z : 切削トルク, K_m : モータ比例定数, I_m : モータ電流, I_0 : 無負荷時モータ電流, A_0 : 無負荷時電流振幅 [A], π : 円周率, θ_0 : 無負荷時電流位相角

無負荷時電流 I_0 は主軸に工具を取り付けた状態で 10 秒間空転させ算出する。10 秒間の電流の絶対値の平均から振幅 A_0 を算出し, 主軸回転数 N とモータ極数 p から計算される周波数 $f = N * p / (2 * 60) = 48$ [Hz] の正弦波で近似した。

次にサーボモータ電流と無負荷時電流の位相を合わせるために, サンプリングしたモータ電流の 1 波形において電流が 0 A になる時間軸の接点を計算し, この時間で無負荷時電流の位相が 0 になるようにした。図 2 に計算方法の概略図を示す。

実際の波形に適用する際は, 電流周波数は僅かに変動するため, 1 波長毎に位相計算をして調整する。正弦波の足し引きにおいては, 正弦波形の特徴から位相が 0° , 180° 付近でずれが小さく, 90° , 270° 付近の時にずれが大きくなるため, サンプリング周期毎の逐次計算では誤差が大きくなる。

そこで, 正弦波の半波長における電流値の差を積分し, 正弦波の $1/2$ 周期で除算し, $1/2$ 周期における平均値として切削トルクを算出した。

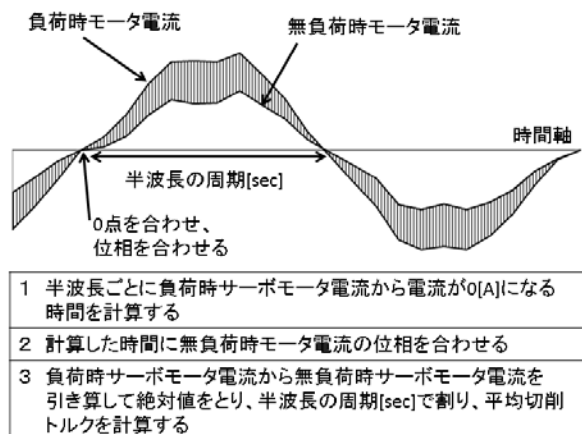


図2 電流から切削トルクを計算する方法

3. 実験結果および考察

切削トルクの推定値と実測値の比較を図3、図4に示す。図3は加工の全ての時間における比較、図4は188秒～215秒における比較を示したものである。結果より主軸サーボモータ電流から推定した切削トルクは折損時のずれを除くと加工時の平均切削トルク 1.55N・m、平均誤差 0.24 N・m、最大誤差 0.6 N・m で推定できていた。推定値では電流波形の1/2周期の波形から平均値を計算しているため、切削トルクのピークが小さくなり、実測値と比較して全体的に切削トルクの振れ幅が小さくなる傾向が見られた。主軸回転開始時や回転停止時には加減速のため大きな電流が流れるため、推定切削トルクは実測値から大きく外れたが、トリガー機能で一定以上の大きな電流が流れる場合にその値を推定対象から除外することは可能である。

また600秒付近におけるドリル折損時には、モータ負荷が急激に増加し、推定切削トルクが大きく推

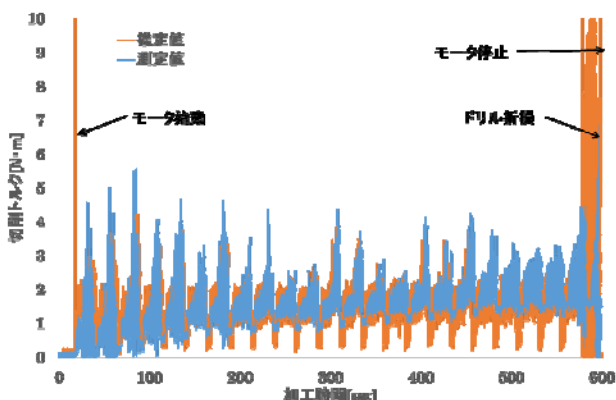


図3 加工時の切削トルク

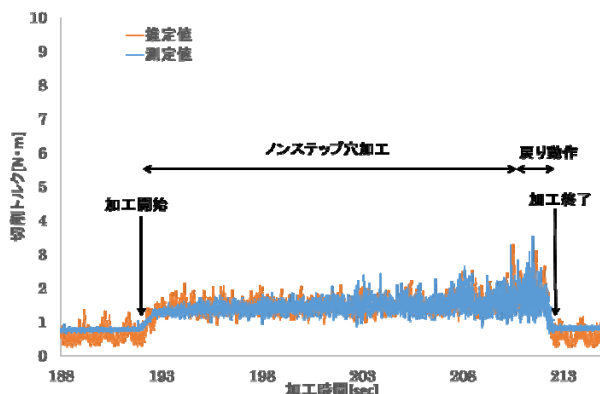


図4 1穴加工時の切削トルク

定されるため、その対応が課題である。同実験を複数回実施したが、全て同じ傾向であった。異常検出については、ドリルが折損する直前での検知になるため、切削トルクに加えてZ軸サーボモータから同様に推定できるスラスト力を耐スラスト力として2つのパラメータで管理する方法で精度を向上させる方法を今後検討予定である。

4. 結言

主軸サーボモータ電流から負荷トルクを算出し、無負荷時のトルクを引くことで切削トルクを推定し、切削動力計により実測値と比較して、異常検知の可能性を検討した。検討の結果、以下の事が得られた。

1. 主軸サーボモータ電流から推定した切削トルクは、ドリル折損時を除いて平均切削トルク 1.55 N・m 平均誤差 0.24 N・m、最大誤差 0.6 N・m であった。
2. ドリル折損時にはモータ負荷が急激に増加するため推定切削トルクは実測値より大きくなるのが課題であるが、ドリルの折損検知として使用できる可能性が示唆された。
3. 本手法ではドリルの折損直前での検知となるため、切削トルク以外にスラスト荷重と組み合わせ、ドリルの強度に基づいた検知手法とすることで精度の向上が期待される。

参考文献

- 1) 萱場英樹ほか：“アコースティックエミッションセンサを用いた回転工具損傷の検知”. 日本機械学会論文集 (C編) 60巻 580号, p4374-4379

(1994)

- 2) 久富茂樹ほか：“音源分離技術を用いた切削音による工具摩耗評価”. 岐阜県情報技術研究所研究報告第 14 号, p33-36 (2013)
- 3) 西田 勇ほか：“切削トルクの予測結果と実測結果の定量比較による加工異常検出システム（第 1 報工具摩耗による異常検出）”. 日本機械学会論文集 84 巻 857 号, p.17 (2018)

- 4) 藤嶋 誠ほか：“知能化工作機械におけるドリル加工に関する研究（第 1 報）”. 精密工学会誌, 66(11), p17925 (2000)
- 5) 友原健治：“サーボモータの基礎知識”. 日本ロボット学会誌, 25(7), p1033-1035 (2007)

(本研究は、法人県民税の超過課税を財源としています.)