主軸電流値による切削状態の監視について*

藤 井 義 也** 李 勇***

On Monitoring Cutting Process Based on Detecting Spindle Motor Current

Yoshiya Fujii and Li Yong

This paper describes an experimental research on monitoring endmilling process depending on the detection of spindle motor current. In endmilling, it was noted that cutting forces produce deflection of the endmill and workpiece which result in dimensional inaccuracies or surface error. For a reduction in machining error, constant cutting force is expected by means of detecting spindle current. Machining experiments with workpieces in inner eccentric circle shape going with a variance of radial depth of cut are carried out on a system fitted with an adaptive control function. The evaluation about the practical effectiveness of such a monitoring method is discussed and a uniformed effect on machining accuracy without increasing machining time is achieved.

Key words : spindle motor current, monitoring, endmilling, radial depth of cut, adaptive control, machining accuracy, machining time

1. ま え が き

切削状態の監視は用いられるセンサ、すなわち検出信号に大きく依存する。フィードバックされた検出信号をもとにして、加工プロセスを制御し、最適切削状態を維持することが可能となる^{1)~2)}。それに際して、いかに切削状態に関する情報を正確に取り出すかが重要なことである。複数のセンサを使うのが一つの方法であるが、かえって複雑となり、実用的とは言えない。むしろセンサを少なくして、その検出信号を最大限度に生かすのが合理的である。近年NC工作機械の普及にともない、主軸モータ電流値の検出はよく用いられている。過大切削力、工具欠損などのような異常を検出するには、有効的であって、実用されている。しかし、主軸電流値の検出に着目すれば、正常レベルで切削過程の変動を監視することはそれほど容易ではない。

一方、エンドミル加工では輪郭加工、金型加工などのような複雑な形状を対象にする場合に、切削状態の監視が非常に有意義である。このような見地から、切削の異常状態だけではなく、加工プロセスのパラメータの変化にも対応して定常切削状態が保持されるように制御を加えるような監視問題が考えられる。そこで、本報ではエンドミルによる内径偏心円加工を取り上げ、切込みによる切削状態の変化に対し、主軸モータ電流値の検出による適応制御機能が備えられた監視システムを用いて切削実験を行った。加工能率とともに加工精度の向上をはかることを目的として、監視システムの作動及びその効果を検討することにした。

2. 監視システムの構成及びサンプリング時間

構成された監視システムは図1に示す。使用した工作機械は新潟鉄工所模型マシニングセンタHN50である。コンピュータ：三菱電機 MELCOM70/10、CPU/メモリ：16ビット、32K語、コントローラ：FANUC7M、インタフェース：FANUC N. L. U.。制御変数は送り速度と主軸回転数との2値である。主軸回転数のオーバーライドは、制御回路が未装備のため、新たなインタフェースを加えること

* 原稿受付 昭和63年12月16日。昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年 3月16日)にて発表

** 正 会 員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐二の町 8050番地)

*** 学生会員 新潟大学大学院

Fig.1 Adaptive control system based on detecting spindle motor current

によって可能とした。

監視システムにおいて、検出信号がそのまま切削状態を反映するために、サンプリング時間をノイズの影響が小さくなるよう定めなければならない。図1では主軸モータから検出している電流値のアナログ信号を0.1msの周期でサンプリングし、A/D変換を行ってデジタル信号を制御用コンピュータにフィードバックする。ところが、実際にコンピュータに入力する電流値のデジタル信号はC/LA処理による平均電流値である。C/LA処理が上述のサンプリング周期に入力点数をかけるサンプリング時間上で行われる。制御上の速応性を追求する意味合いから、サンプリング時間はできるだけ短いことが要求される³⁾。しかし、検出信号の信頼性及びシステムの安定性よりサンプリング時間に下限がある。電流周波数が50Hzであるので、サンプリング周期0.1msに対して入力点数を200以上とすることが望ましい。また、エンドミル加工では切削が断続的に行われるので、切削力が時々刻々変化する。電流値の不安定な挙動にならないためにサンプリング時間はエンドミルの1回転における1刃当たりのかかる時間の整数倍に等しいことが望まれている。そこで、電流周波数及び切削中の主軸回転数を考慮する上に、制御プログラムにおいて入力点数の指定がC/LA処理の長さを定めることにする。本報では切削条件に照らして上述の拘束の下で入力点数を600とした。すなわちサンプリング時間は0.06sである。システムの応答はこれ以上で、制御動作時間を加算したものとなる。

3. 制御アルゴリズム

主軸モータの特性より、主軸モータ電流値が主軸トルクまたは切削力に比例するものと認められる⁴⁾。そのために、切削状態の監視は主軸電流値の検出の上に

切削力の拘束適応制御を行うことを意味する。主軸電流値の検出については前述したが、次に監視システムの制御動作を考える。

切削条件、切削抵抗および主軸電流値に関するデータベースを応用して切削力の拘束条件としてあらかじめ主軸電流値の許容幅を設定しておく。これは主に加工精度を維持するためである。切削力の挙動を主軸電流値を用いて表すことにより、空切削、実切削および工具損傷などのような異常状態を検出するには比較的容易である。ところが、通常切削状態で切削力を一定の拘束範囲内に納めようとすると、主軸電流値に影響を与える要素が多いため、切削中の自動判別方法を考案する必要がある。データベースで調べた結果より検出している主軸電流値は定常切削ではガウス分布に従うものとすれば良いことがわかる。それによって許容範囲は設定されたレベルの標準偏差の2倍($\pm 2\sigma$)とすれば、許容幅内に収まる確率は95%である。その上システムの安定性と速応性に依拠して誤動作を避けるために、切削中の主軸電流値が連続2回許容幅を超えた時、オーバーライドがかかることにする。このようにして主軸電流値が許容幅内に押さえられるよう送り速度を下げるか上げるかによって切削力を維持する。監視システムの動作アルゴリズムを図2に示す。工作機械を作業状態に入れたと同時に、切削状態の監視を始める。空切削の時はサンプリングを繰り返す。切削中に主軸電流値が設定されたレベルの2倍を超える場合は異常状態として切削を中断させる。

一方、監視システムの下で加工精度と生産性の良いバランスを追求するため、加工精度とともに加工能率及び加工コストを考慮に入れる。加工精度は上述の主軸電流値の変動幅を制御することによって向上させる方針であるが、加工生産性の評価関数は次式⁵⁾によるものとする。

$$PI = \frac{R_d \cdot A_d \cdot S}{K_d + (K_d \cdot t_c + K_t) / T} \quad (1)$$

ここで、PIは単位時間当たりの除去体積と単位時間当たりのコストの比である。 R_d ：半径方向切込み(mm)、 R_d の値がリアルタイムで切削位置に応じて計算される。 A_d ：軸方向切込み(mm)、 S ：送り速度(mm)、 K_d ：人件費+経費(¥/min)、 K_t ：工具費用(¥/edge)、 t_c ：工具交換時間(min)である。工具寿命時間T(min)は応答曲面法を用いる実験によって求められた式(2)に示すテラー寿命方程式によって決められる。

Fig.2 Flowchart of controlling system

$$V \cdot T^{0.794} \cdot S_z^{0.684} = 240 \quad (2)$$

ただし、 S_z ：1刃当たりの送り(mm/tooth)。

式(1)及び(2)により、送り速度の増減は評価関数に与える影響が大きい。切削速度の増加は工具寿命の変化を経て比較的に小さく評価関数に影響を及ぼす。よって送り速度を下げるオーバーライドがかかった場合に、評価関数の比較計算を行う。評価関数 10%以上減少すれば、送り速度と同時に主軸回転数のオーバーライドもかかることとする。また、システムにおいて制御判断あるいは制御動作ごとにその時刻を自動的に記録する。式(2)とともに、Miner法則

$$\sum (t_i / T_i) \leq 1 \quad (3)$$

を用いて、工具交換時期の設定は可能となっている。式(3)の左辺の値は切削中に累加され、1より大きくなった時、工具交換指令を自動的に出すこととなる。

4. 切削実験及び結果

エンドミル加工では加工精度に影響を与える切削分力が半径方向、すなわち切削面に垂直となる y 方向分力 F_y である。切削合力 F の平均値をもって制御を行うので、切込みの変化に対し、送り修正によって対応できるかどうかを確認する必要がある。これは F_y/F の比率変化を把握することになる。詳述すれば、 F_y/F の送りオーバーライドによる挙動および F_y 、 F の S 、 R_d によるそれぞれの挙動の一致性を調べることである。幸いなことに、 F_y/F の送りオーバーライドによる顕著な変化が見られず、しかも S 、 R_d を同じパーセントで変化させる場合に、 F_y 、 F はいずれもほぼ同様な変動傾向を示すことが実験で確かめられた。この結果に基づいて、精度制御の立場から切込みによる切削状態の変化を監視することが意味をもつ。

なお、半径方向切込みによる加工精度へ及ぼす影響の一例を図3に示す⁶⁾。エンドミルによる側面切削の場合に、加工誤差は工作機械の幾何誤差、NC工具経路誤差、工具、工作物の相対変形、及び熱変形、びり振動などが挙げられるが、その中の工具変形による加工誤差が大きいことがわかる。そこで、切込みの変化をもつ内径偏心円加工において、異なる切削位置の切削量の増減に対し、工具変形となる要因の一つ、切削力を制御することに目をつける。

偏心円加工の切削実験に使用した切削工具は高速度鋼、4枚刃、ねじれ刃 30°スクエアエンドミルである。被削材がS45Cで、湿式、下向き削りで切削を行った。工作物はφ66mmの内径をそれぞれ0.50、0.75、1.00mm偏心させたものである。軸方向切込みを10mm、半径方向切込みを5mmとした。偏心円加工後ミットヨF403三次元測定機を用いて真円度を測った。

まず、図4に偏心量0.00mmの円加工後の真円度曲線を示す。切削条件は切削速度21.8m/min、送り速度122mm/minで、工作物上面より1mmのところを5°ごとに測定したものである。測定位置を限定したのは図3よりわかるように軸方向切込みの影響を除くためである。図4では横軸の左端が切削の開始時点に対応している。下向き削りが削り残しになるが、切削に入る時点でエンドミル切れ刃が切り込んでしまい入口部誤差が生じる。図について外側は設計した真円で、内側は加工後の真円度の平均位置を示す。またこの場合の検出され

Fig.3 Machining error due to changing depth of cut

Fig.4 Circularity curve of an inner circle shaped

た主軸電流値の平均値、標準偏差を含めて、円加工の実験結果およびデータが以下の偏心円加工の比較基準として使われる。

図5は内径偏心円加工の測定結果を示す。切削は偏心による切込みの最小となる位置、図では横軸の左端から始まる。電流値の初期設定は半径方向切込み5mm、軸方向切込み10mmに対応している基準レベルとする。なお図5の偏心円加工は図4の円加工と比べると、偏心量だけに違う点を持つが、切削量すなわち除去体積

が同じである。そこで、加工結果を評価するには削り残し平均誤差以上の偏心誤差に着目する。図5(a)は監視システムを作動せず、制御を加えない場合に測定したもので、図5(b)は主軸電流値の検出を行い、制御を加えた結果を示す。図5(a)では明らかに偏心量

Fig.5 Cutting results with inner eccentric workpieces

による切込みの変化の加工誤差への影響がそのまま示されている。それは均一の加工精度を得る意味では望ましくないことである。切削の入口部において切込みが偏心量によって減少したため、加工誤差が偏心量の増加に反比例して現れる。一方、図5(b)については、図5(a)と比較しながら制御効果を検討する。上述した制御方法で偏心誤差が一定の程度に修正されたと認められる。より詳細な検討は主軸電流値の検出、切削条件の変化に関連して次に述べる。

5. 実験考察

偏心円加工後の測定データから求めた直径の平均値はほぼ同じぐらいで、偏心量に相関がないと見てよい。従って、平均誤差を考えずに、表1に示す誤差の標準偏差による評価を取った。表1では σ_{off} 、 σ_{on} 、 σ_o がそれぞれ偏心円加工の無監視、監視及び円加工時の真円度の標準偏差である。この表から、偏心円加工は円加工と比較すると、偏心量によって偏差が著しく大きくなってしまふ。制御を加えた場合は偏差が偏心量0.75、1.00 mmに対して小さくなった。しかし、偏心量0.50 mmに対しては少々大きくなっている。監視と無監視との比較から、制御によって誤差を均一にする

効果が得られる。同時にその適用範囲が存在することは指摘される。この結果では、主軸電流値が許容幅をもつため、偏心量の小さい場合の切込みの変化を検知しにくくなると考えられる。一方、切込みの変動幅が大きい場合は検出するには有利であるが、システムの速応性を考慮すれば制御動作を考えなおす必要がある。

なお、主軸電流値の挙動を図6に示す。図6(a)の

Table 1. Evaluations about experimental results

eccentricity mm	$\frac{\sigma_{off}-\sigma_o}{\sigma_o}$	$\frac{\sigma_{on}-\sigma_o}{\sigma_o}$	$\frac{\sigma_{on}-\sigma_{off}}{\sigma_{off}}$	$\frac{t_{on}-t_{off}}{t_{off}}$
0.50	58.80%	83.78%	15.74%	2.20%
0.75	222.95%	92.68%	-40.38%	-4.62%
1.00	312.13%	171.43%	-34.15%	-3.82%

Fig.6 Behavior of spindle current while cutting inner eccentric circles

主軸電流値は偏心円加工における切込みの変化傾向をそのまま表している。使われている切削条件では切込みによる切削状態の挙動に対し、切削力を介して主軸電流値が十分応じると考えられる。監視システムを作動させ制御を加えた時の主軸電流値の挙動を図6(b)に示す。主軸電流値から見れば拘束適応制御動作がほぼ予想通りに行われた。ところが、切削開始後の送り

Fig.7 Cutting parameters under AC

速度のオーバーライドが頻繁にかかったためシステムがやや不安定になる時期もあった。これは図5(b)の真円度の改善には十分な効果が示されなかった原因の一つであると認められる。

また、図7には制御を加えた時の切削条件の変化過程を示す。式(1)の評価関数が応用されたため、加工能率、つまり加工時間が保証された。表1に示すように偏心量0.50mmでは、設定した基準時間 86.5sにほぼ同じく、0.75mm及び1.00mmの場合に、切削時間が短縮

された。送り速度のオーバーライドは主に切込みの変化に応じたもので、主軸回転数のオーバーライドは主として評価関数の値を保証するために用いられた。図中の S_z はそれに対応する1万当たりの送りの変化を表す。 S_z は近似的に切削力あるいは切削トルクに比例するものである。従って、主軸電流値にも同様な関係をもつ。図5、6に関連して切削条件の変化、主軸電流値の挙動および加工結果がほぼ一致していることがよくわかる。

6. 結 論

以上述べたことより、次のような結論が得られる。

- (1) 主軸電流値の検出を、切削異常状態に限らず、通常切削状態の監視にも適用することを図って、切削状態の監視範囲を拡張することを考案した。
- (2) エンドミル加工における半径方向切込みによる切削状態の変化に対し、主軸モータ電流値を検出信号とする監視手段の有効性を考察した。
- (3) 主軸電流値によって検出された切削状態の挙動に対して、送り速度、主軸回転数オーバーライドが用いられる適応制御を行ったため、加工能率を落とさずに、加工精度を均一にする効果が確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 竹山秀彦：工作機械の適応制御，日本機械学会誌，74,631(1971)978.
- 2) 本多庸悟，竹山秀彦，安部哲夫：計算機・適応制御旋削加工システムの試み（第2報），精密機械，40,3(1974)244.
- 3) 佐田登志夫，塩田泰仁：旋削加工の適応制御，精密機械，46,7(1980)805.
- 4) R.Bedini and P.C.Pinotti：Experiments on Adaptive Constrained Control of a CNC Lathe, ASME Journal of Engineering for Industry, 104, (May 1982)139.
- 5) R.M.Centner and J.M.Idelson: Adaptive Controller for a Metal Cutting Process, IEEE Trans.on AC, (May 1964)154.
- 6) 藤井義也，岩部洋育，鈴木雅晴：切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係（第1報），精密機械，43,7(1977)807.