

B14 リニアモータ駆動工作機械における工具寿命の制御手法に関する研究

Study on the Control of Tool Life Implemented on Linear Motor Driven Machine Tools

○学 清水 拓也 (京大), 正 茨木 創一 (京大), 正 松原 厚 (京大)

Takuya SHIMIZU, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto

In this paper, we apply a cutting force control strategy in a linear motor driven machine tool. The cutting force control strategy that we proposed aims a long-term control of the tool life. First, the cutting force is monitored only at every "check point" set on the tool path. The feedrate profile is updated at every check point, such that the desired cutting distance can be machined before reaching the end of tool life. The effectiveness of the present approach is experimentally investigated based on the estimation of cutting force by using linear motor currents.

Keywords: End milling, Tool wear, Tool life, Intelligent machining

1. 緒言

エンドミル加工における加工条件の自律的最適化を目的とした切削抵抗のフィードバック制御は、これまでに数多く研究されてきた。しかし、これらの研究成果が実用化された例は極めて少なく、その多くが適応制御理論の応用例という域を出なかった。その原因として第一に挙げられるのは、フィードバック制御を導入する実用的なメリットが十分明らかでないことであると考えられる。すなわち、切削抵抗を目標値に一定化するだけであれば、材料除去率が一定化されるように NC プログラムの送り速度を予めスケジューリングする手法で十分な性能が得られる場合が多い。最新の CAM ソフトウェアのなかにはこのような手法が実装されているものもある。また、フィードバック制御に必要とされる切削抵抗モニタリングの信頼性とコストも実用化が進まない大きな原因のひとつである。高い信頼性を得るためには動力計などの付加的なセンサで切削抵抗を測定する必要がある。

これまでに著者らは、工具寿命に至るまでに切削距離の目標値を安全に加工できることを主な制御目的として、フィードバック制御と送り速度スケジューリング法を組み合わせたエンドミル加工プロセスの新しい制御手法を提案した¹⁾。これまでの研究では、切削抵抗の測定には動力計を用いてきた。主軸モータや送り系サーボモータの電機子電流から切削抵抗を推定する手法は、付加的なセンサを導入する必要がなく、安価である。しかし、ボールねじ駆動の工作機械では、送り系の摩擦力による影響が大きいため、十分な精度で切削抵抗を推定することは一般的に難しい。一方、リニアモータと油静圧案内により駆動される工作機械では送り系の摩擦力が小さい。そのため、付加的なセンサを全く用いず、フィードバック制御に適用するのに十分な精度で切削抵抗のモニタリングが行えることが期待できる²⁾。

本論文では、リニアモータと油静圧案内により駆動される縦型マシニングセンタの送り系モータの電機子電流から切削抵抗を推定し、切削抵抗の制御という形で工具寿命の制御を行うことを目的とする。なお、(Al, Ti)N コーテッド超硬エンドミル ($\phi 6\text{mm}$, 6 枚刃) を用いた高硬度焼入れ金型鋼 SKD61(HRC53) の荒加工を対象とする。

2. モータ電機子電流による切削抵抗の推定

最初に、リニアモータと油静圧案内により駆動される

送り系において、リニアモータの電機子電流を用いた切削抵抗の推定精度を実験的に調べた。

一般に、工具摩耗の進行にともない、工具に作用する切削抵抗が増大していくことはよく知られている。工具摩耗の進行による切削抵抗の増大が送り系モータ電流からの推定で確認できることを直線切削による寿命試験により検証する。

加工条件は切削速度 301.6m/min、一刃当たりの送り量 0.12mm/tooth、径方向切込 0.3mm、軸方向切込 6mm、突き出し量 18mm(L/D=3)、ダウンカット、オイルミストである。直線切削を工具寿命に達するまで繰り返し、切削距離 30m 毎に切削抵抗を測定する。

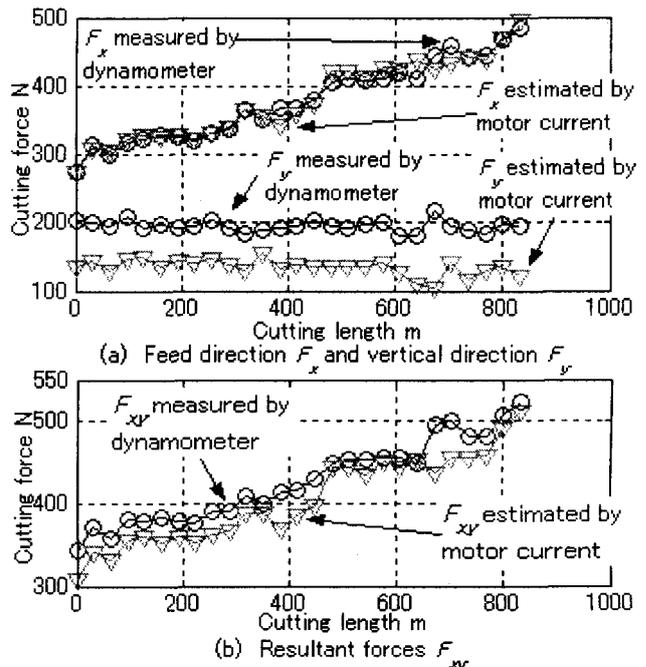


Fig.1 Comparison of cutting forces measured by dynamometer with estimated by motor current

図 1 に切削抵抗の変化を動力計により測定した値とモータ電機子電流から推定した値の比較を示す。ただし、 F_x は送りと垂直方向の切削抵抗、 F_y は送り方向の切削抵抗、 F_{xy} は二つの切削抵抗の合力を示す。 F_x の最大推定

誤差は 28N (誤差の平均値 1N, 標準偏差 12N), F_y の最大推定誤差は 74N (誤差の平均値 61N, 標準偏差 14N), F_{xy} の最大推定誤差は 59N (誤差の平均値 23N, 標準偏差 13N) であった。送り方向の切削抵抗の誤差が大きい原因は、実験に使用したマシニングセンタの送り系にカバーやケーブルに起因する送り方向の摩擦力が 50N 程度あることがわかっており、摩擦力の影響であると考えられる。

3. 工具寿命の制御手法

著者らがこれまでに提案した制御手法¹⁾では、初めに NC プログラムの送り速度を大塚らの提案した切削抵抗予測式³⁾ (式(1)) を用いて加工開始時の切削抵抗が一定化されるようにスケジューリングする。切削中は、工具経路中に設置した「チェックポイント」でのみ限定的に切削抵抗をモニタリングをする。チェックポイントにおける切削抵抗は工具摩耗の影響だけでなく、工具パス形状や切り込み量、送り速度などにも依存する。その影響を除き一定の条件で比較するため、式(2)によって標準条件 (標準加工条件での直線切削を想定する) 下での切削抵抗値 $\tilde{\beta}_0$ (標準切削抵抗と呼ぶ) に変換する。これにより工具摩耗の進行度を判断する。工具寿命に達する前に目標の切削距離を加工できることを目的として、各チェックポイントにおける標準切削抵抗の目標値 $\bar{\beta}_0$ を決定する。 k 番目のチェックポイントにおいて、式(3)に示すように単純な比例制御を用い、次のチェックポイントまでの送りオーバーライドを決定し、送り速度の更新を行う。

$$\hat{F} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

$$\tilde{\beta}_0(k) = F(k) - (\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{12} X_1 X_2) \quad (2)$$

$$f(k+1) = f(k) + (\bar{\beta}_0(k) - \tilde{\beta}_0(k)) \cdot K \quad (3)$$

ただし、 \hat{F} は切削抵抗の予測値、 X_1 , X_2 はそれぞれ変形前最大切りくず厚さと切削関与長を正規化したものである。加工開始時の係数 $\beta_0 \sim \beta_{12}$ はモデル同定試験により求める。 $F(k)$ はチェックポイント k における切削抵抗の測定値、 $\bar{\beta}_0(k)$ はチェックポイント k における標準切削抵抗の目標値、 $f(k)$ はチェックポイント k における送り速度、 $f(k+1)$ はチェックポイント $k+1$ までの送り速度であり、 $K=25$ とした。

4. ケーススタディ

ケーススタディとして、実際の加工に近い等高線加工の工具経路において、提案した制御手法を適用する。図 2 に示す工具経路を 1 層 (切削距離約 39m) として、工具寿命に達するまで繰り返す (図 2 は工具経路を解り易くする為、ステップオーバー量を実際より大きく表示している)。ただし、工具経路中の切削関与角が 90° 以上となる場所はチッピングが生じやすいためトロコイド加工により予め除去する。1 層中で切削距離が約 14m, 26m, 35m の計 3 箇所チェックポイント (直線部分, 凸部分, 凹部分を 1 セットとする) を設置する。チェックポイントを含む工具経路一周分の切削抵抗を測定し、上記部分の切削抵抗を抜き出す。ただし、切削抵抗は送り方向成分とそれに垂直な成分の合力 F_{xy} を用いる。初期の切削条件は切削速度 151m/min, 一刃当たりの送り量 0.06mm/tooth, ステップオーバー 0.3mm であり、その他の条件は第 2 節と同じである。また、目標の切削距離は 600m とし、工具寿命に達する標準切削抵抗 $\bar{\beta}_0$ は約 480N とする。

切削距離 200m までは制御を行わず、初期切削条件で

加工を行う。切削距離 200m 以降も初期切削条件で加工を続けると約 380m で工具寿命に達すると予想される。そのため、工具寿命に達する前に目標の切削距離を加工するために、図 3(a) に示すように標準切削抵抗の目標値 $\bar{\beta}_0$ を決定し、送り速度の更新を行う。ただし、送りオーバーライドを変更する範囲は初期値の約 40%~160% とした。

図 3 (a) に $\tilde{\beta}_0$ の変化, (b) に送りオーバーライドの変化を示す。 $\tilde{\beta}_0$ と $\bar{\beta}_0$ の最大誤差は約 31N であり十分な精度で制御を行うことが出来た。その結果、切削距離 565m で工具寿命に達し、ほぼ目標の切削距離の加工が行えた。

5. 結言

本論文では、切削抵抗の測定方法として、リニアモータと油静圧案内により駆動される工作機械の送り系モータの電機子電流から切削抵抗を推定した。提案した制御手法を等高線加工に適用した。

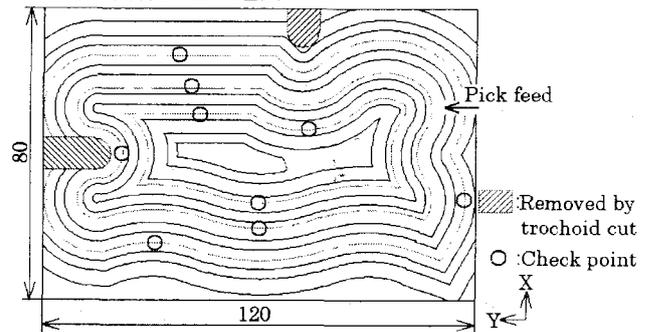
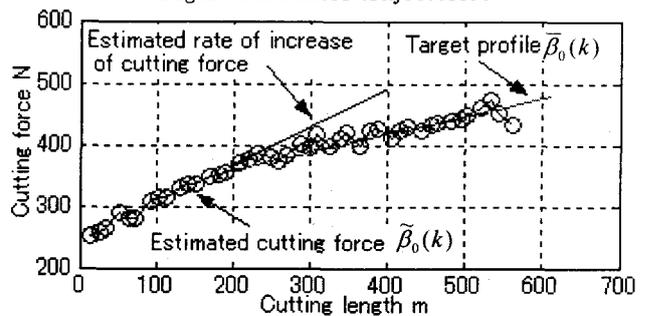
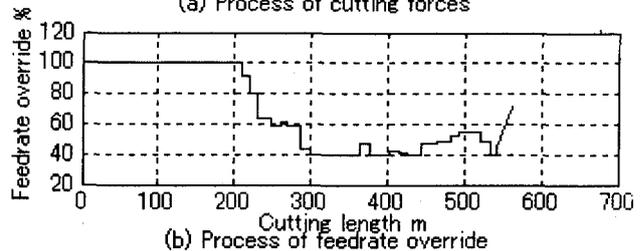


Fig.2 Tool center trajectories



(a) Process of cutting forces



(b) Process of feedrate override

Fig.3 Experimental results of case study

参考文献

- 1) 清水, 茨木, 松原: エンドミル加工における工具寿命の制御に関する研究, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集, pp.301-302
- 2) 河野, 茨木, 大塚, 大下: 送り系のモータ電流を用いた切削抵抗推定法に関する研究, 2006 年度精密工学会春季大会学術講演論文集, pp.175-176
- 3) 垣野, 大塚, 中川, 廣垣, 佐々木: 焼入鋼のエンドミル加工に関する研究 (第 1 報), 精密工学会誌, Vol.66, No.5, (2000), pp.730-734