

## 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

京都大学 河野大輔, 茨木創一, 大分県産業科学技術センター 大塚裕俊, 安田工業株式会社 大下 功

A Study on the Estimation of Cutting Forces by using Motor Currents in Feed Drives  
 Kyoto University Daisuke KONO, Soichi IBARAKI, Oita Industrial Research Institute Hirotooshi OHTSUKA  
 YASDA PRECISION TOOLS K.K. Isao OSHITA

This research deals with the estimation of cutting forces by using motor currents in a drive system on a machine tool. Since motor currents are greatly influenced by the friction imposed on a drive system, a model of the friction forces is needed to estimate cutting forces. In this paper, we propose a friction model that considers influences of the feedrate and the table position on the friction for two different machine tools. One of those has ball screws and linear guides for its drive systems. The other has linear motors and hydro static guideways. The estimation accuracy of cutting forces is evaluated experimentally with the present friction model.

## 1. 緒言

機械加工プロセスを加工機自体が監視し, 最適な加工条件を自律的に設定することができる自律型加工システムの実現に向けて, これまで多数の研究が進められてきた<sup>1)</sup>. その中でも加工状態の把握のために, 切削抵抗の推定は重要な技術である. 主軸モータや送り系のサーボモータの電流から切削抵抗を推定する方法は付加的なセンサを導入する必要がなく, 最も安価である. しかしこの方法を用いて 200N 以下の切削抵抗を推定することは難しい<sup>2)</sup>. これは送り系に内在する摩擦力が, 運転条件によって変動するためである.

そこで本研究では, 実際の加工機において送り系の摩擦力が切削抵抗の推定精度に与える影響を調べる. このため, ボールねじと転がり案内を用いた加工機と, リニアモータと油静圧案内を用いた加工機においてテーブル駆動時の摩擦力を調べ, 摩擦力推定モデルを構築する. また切削実験によってこのモデルを用いた切削抵抗の推定精度を比較する.

## 2. ボールねじと転がり案内を用いた送り系の場合

実験に用いた機械は縦型の汎用マシニングセンタである. この機械をボールねじ機と呼ぶことにする. 送り速度を 2000mm/min で一定として X 軸をフルストローク ( $x=10 \sim 530\text{mm}$ ) で駆動した場合のモータ電流値を測定し, この値にトルク定数と回転-直動の変換係数を乗じてモータの直動力を求めた. この直動力を送り系の摩擦力とする. 摩擦力の測定結果を図 1 に示す. また, テーブルを  $x=220$  から 320mm まで駆動する. このとき送り速度を 50 ~ 2000mm/min まで変化させ. 各送り速度で測定された摩擦力の平均値をとった結果を図 2 に示す.

図 1 から, 摩擦力の大きさは 1000N 程度であるが, 転がり案内の摩擦力はこれほど大きくない. 従って, この摩擦力は回転系とボールねじのナットに内在していると考えられる. フルストロークを駆動した実験結果を見ると, 摩擦力が 100N 程度変動している. この変動は  $x=220 \sim 320\text{mm}$  の駆動結果の変動とほぼ同じである. 一方, 摩擦力の平均値は図 2 に示すようにストライバック曲線を描いている.

以上の結果より, 送り系の摩擦力の推定値  $\hat{F}(x, \dot{x})$  を次式のようにモデル化した.

$$\hat{F}(x, \dot{x}) = f(x) + g(\dot{x}) \quad (1)$$

ここで,  $f(x)$  は位置による摩擦力の変動成分であり,  $g(\dot{x})$  は送り速度による摩擦力の変動成分である. ただし  $f(x)$  は図 1 の赤線に示すようにモデル化した.  $g(\dot{x})$  は図 2 の赤線に示すようにモデル化し,  $g(\dot{x})$  が  $\dot{x}=2000\text{mm/min}$  で 0 となるようにオフセットした.

## 3. リニアモータと油静圧案内を用いた送り系の場合

実験に用いた機械は縦型の高精密マシニングセンタである. この機械をリニアモータ機と呼ぶことにする. 実験の要領はボールねじ機での実験と同様である. 送り速度を 1500mm/min で一定として Y 軸を駆動した場合の摩擦力の測定結果を図 3 に示す. また, テーブルを  $y=75$  から 175mm

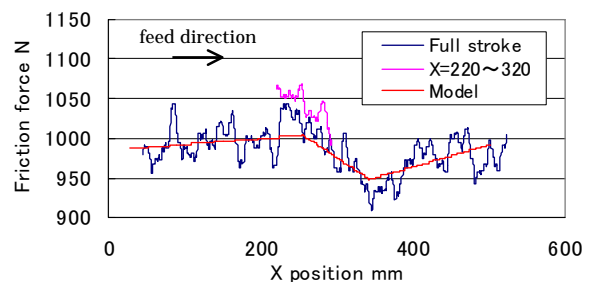


Fig.1 Relation between friction force and position

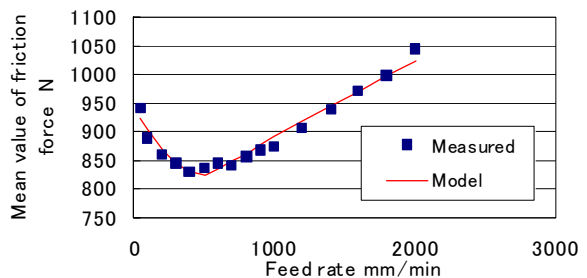


Fig.2 Relation between mean value of friction force and feed rate

まで駆動する．このとき送り速度を 50～2000mm/min まで変化させ、各送り速度で測定された摩擦力の平均値をとった結果を図 4 に示す．

リニアモータと油静圧案内を用いた送り系は非接触駆動であるが、図 3 から摩擦力が 5～50N 程度存在することがわかる．フルストロークを駆動した実験結果を見ると、摩擦力が 50N 程度変動している．この変動は  $y=75\sim 175$ mm の駆動結果の変動と異なる．一方、摩擦力の平均値は図 4 に示すように 3N 程度変動している．この変動量は、フルストロークを駆動した場合の変動量 (50N) に比べて小さく、無視できる．以上の結果より、送り系に作用する摩擦力の推定値  $\hat{F}(y, \dot{y})$  を図 3 の赤線に示すようにモデル化した．

#### 4. モデルを用いた切削抵抗の推定

##### 4.1 実験方法

構築した摩擦力推定モデルを用いて実加工での切削抵抗の推定を行い、その推定精度を調べる．実験には各摩擦モデルを構築した機械を用い、エンドミルを用いて長方形ワークの側面 (X 軸方向と Y 軸方向) を直線加工する．加工中の送り速度、主軸回転数、半径方向切り込み量、軸方向切り込み量は一定である．ボールねじ機では、送り速度：50～4100mm/min、半径方向切り込み量：0.02～0.71mm で変化させ、34 通りの条件で加工する．リニアモータ機では同様に 32 通りの条件で加工する．

加工時に測定されたサーボモータ電流値の駆動力への換算値から摩擦力の推定値を差し引いた値を切削抵抗の推定値とする．同時に工具動力計による切削抵抗の測定をおこない、切削抵抗の測定値とする．

##### 4.2 実験結果

切削抵抗の推定値と測定値の平均値を比較した結果を図 5 に示す．図 5 (a) はボールねじ機における結果、同図 (b) はリニアモータ機における結果である．ボールねじ機における切削抵抗推定誤差の標準偏差は 152N である．図 1 より、位置による摩擦力変動成分のモデル化誤差の標準偏差は 18.8N であり、この値に比べて切削抵抗推定誤差の標準偏差は大きい．これは送り速度による摩擦力変動成分のモデル化誤差が大きいためである．一方、リニアモータ機における切削抵抗推定誤差の標準偏差は 8N である．図 3 より、摩擦力のモデル化誤差の標準偏差は 11.4N であり、この値と切削抵抗推定誤差の標準偏差はほぼ等しい．

#### 5. 結言

本研究では実際の加工機において、送り系の摩擦力が切削抵抗の推定精度に与える影響を調べた．その結果以下の結論が得られた．

- (1) ボールねじと転がり案内を送り系に用いた加工機では摩擦力のモデル化誤差の標準偏差が 18.8N であるのに対して、切削抵抗推定誤差の標準偏差は 152N である．
- (2) リニアモータと油静圧案内を送り系に用いた加工機で

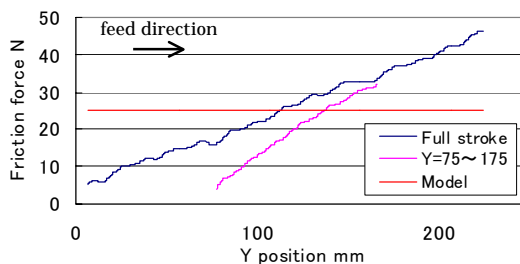


Fig.3 Relation between friction force and position

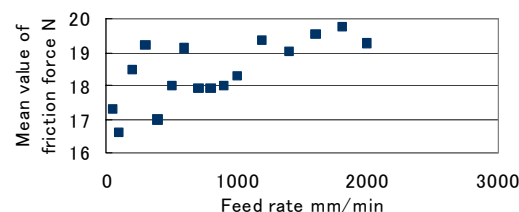
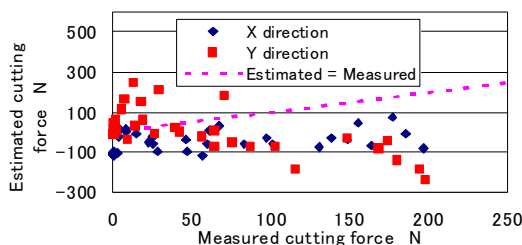
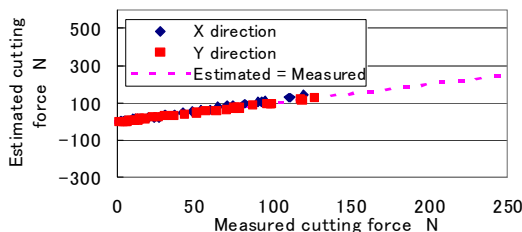


Fig.4 Relation between mean value of friction force and feed rate



(a) Ball screw + Rolling guideway



(b) Linear motor + Hydrostatic guideway

Fig.5 Comparison of measured and estimated mean values of the cutting force

は摩擦力のモデル化誤差の標準偏差が 11.4N であるのに対して、切削抵抗推定誤差の標準偏差は 8N である．

#### 参考文献

- 1) 例えば, M. Kaefer, N. Brouer, M. Refse, M. Weck : NC Integrated Process Monitoring and Control for Intelligent, Autonomous Manufacturing Systems, 29<sup>th</sup> CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Osaka, 1997, 69
- 2) 茨木創一, 坂平昌浩, 新家秀規, 松原 厚, 垣野義昭 : エンドミル加工における切削抵抗の推定法 - 主軸モータ電流とサーボモータ電流における切削力ベクトルの幾何学的合成による推定法 - , 精密工学会誌, **70**, 8(2004), 1091