

ボールねじ駆動ステージにおける 力センサレス切削力モニタリング手法の開発

慶應義塾大学 ○山本智之, 慶應義塾大学 ◎柿沼康弘

要旨

加工中の振動や異常状態の自動検知には切削力の計測が有効である。しかし、共振や弾性変形、非線形摩擦の影響をうけ、ボールねじ駆動系での力センサレスな切削力計測は難しい。本研究では1次モードまでを考慮した2慣性モデルに基づく切削力オブザーバを提案する。高精度に慣性を同定できれば、提案法の利用によりばね性の影響を受けず推定できる。エンドミル加工試験結果から、広帯域な切削力推定を実現できることを示した。

1. 緒論

工作機械の自動化に伴い、生産効率の向上につなげるため、工具摩耗、工具欠損、びびり振動といった異常加工の自動検知システムの需要が高まっている。こうした異常加工の検知には広帯域な切削力モニタリングが効果的であるが、付加的な力センサの利用はコストの増大や機械剛性の低下を招く。そこで工作機械内部のサーボ情報を利用した切削力推定手法が提案されてきた[1,2]。ただし、実用化するためには推定精度及び帯域をさらに高める必要がある。一方で、近年、高精度加工を実現するため、フルクロード制御ボールねじ駆動ステージが増え、サーボ情報としてステージ位置も利用可能になったが、その特性を活かした切削力推定手法はこれまでに示されていない。そこで、本研究では、フルクロード制御下におけるサーボ情報を利用することで、2慣性モデルに基づく切削力推定手法を導入し、高精度・広帯域な切削力推定手法の開発を目的とする。

2. 2慣性モデルに基づく切削力推定手法

本研究では振動の1次モードまでを考慮するため、図1に示す2慣性モデルに基づき切削力推定を行う。その運動方程式は以下のように導かれる。

$$J_r \alpha_m = K_t I_a^{ref} - T_{fric} - D_r \omega_m - K_r (R\theta_m - x_t) \quad (1)$$

$$M_t a_t = K_r (R\theta_m - x_t) - C_t v_t - F_{cut} - F_{fric} \quad (2)$$

ここで、 x_t, v_t, a_t はステージの位置・速度・加速度、 $\theta_m, \omega_m, \alpha_m$ はモータの回転角度・角速度・角加速度、 M_t は被駆動体質量、 J_r は回転系の全慣性モーメント、 C_t, D_r は並進系・回転系の粘性摩擦係数、 K_t はトルク定数、 I_a^{ref} はモータの電流参照値、 R は回転系と直動系の変換係数、 K_r は駆動系の軸方向剛性、 F_{fric}, T_{fric} は摩擦力・摩擦トルクである。反力 $K_r(R\theta_m - x_t)$ を消去するように(1)式と(2)式を連立することで、切削力を求めることができる。

$$F_{cut} = \frac{1}{R} (K_{tn} I_a^{ref} - J_{rn} \alpha_m - T_{fric}) - M_{tn} a_t - F_{fric} \quad (3)$$

ここで、右下添え字のnはノミナル値であることを示す。フルクロード制御のボールねじ駆動ステージでは、内部情報として I_a^{ref}, x_t, θ_m の3つが利用可能である。そのため、事前に摩擦同定を行っておくことで、(3)式により切削力を推定できることがわかる。また、(3)式には剛性 K_r が含まれないことから、ばね性に依存しない推定手法であると云える。なお、(3)式の導出時には粘性に起因する力を考慮していない。これは、過去の切削試験結果から他の力に比べ小さく、推定に及ぼす影響が小さいことがわかっているためである。

図2に切削力オブザーバのブロック線図を示す。本研究で用いたボールねじ駆動ステージでは、エンコーダ信号の変換や通信、

AD/DA変換やモータの機械的な特性により遅れが生じることがわかっている。そこで、モータトルクを加振力とした正弦波掃引試験を行ったところ、 I_a^{ref}, x_t, θ_m の間の位相遅れはむだ時間によってモデル化できることがわかった ($e^{-T_a s} = 0 \text{ ms}, e^{-T_b s} = 1.2 \text{ ms}, e^{-T_c s} = 1.0 \text{ ms}$)。生じた位相遅れを補償するため、切磁力オブザーバ内にてむだ時間による位相遅れ補償を行い ($e^{-T_1 s} = 1.2 \text{ ms}, e^{-T_2 s} = 0 \text{ ms}, e^{-T_3 s} = 0.2 \text{ ms}$)、各信号のむだ時間量の総量を1.2msとした。

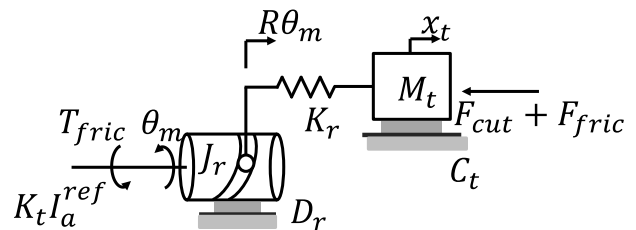


図1 ボールねじ駆動ステージの2慣性モデル

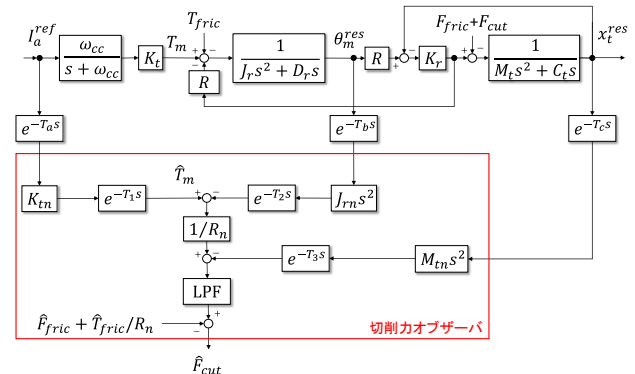


図2 切削力オブザーバのブロック線図

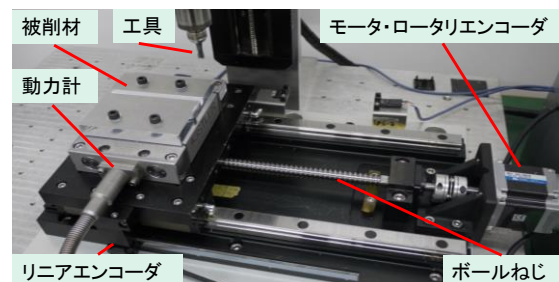


図3 実験装置の構成

3. 実験条件

図3に示す1軸のボールねじ駆動ステージを用いてエンドミル加工試験を行った。実験条件及び実機の仕様を表1に示す。駆動系の共振・反共振周波数は402 Hz, 135 Hzにあることが予めわかっている。切削力の振動数に対する推定精度と切り込み深さに応じた推定精度を検証するため、主軸回転数と切り込み深さをそれぞれ4種類、計16種類の条件で加工試験を行った。ステージの上に水晶圧電式切削動力計(Kistler製, Type9129A)による実測値と比較することで推定精度の評価を行った。実験では2慣性モデルに基づく提案手法だけでなく、1慣性モデル(剛体)に基づく従来手法による推定値の評価も行った。ここで、従来手法とはセミクロズドループ制御下において切削力推定を行うため、駆動系を剛体とみなし、モータの情報のみで切削力オブザーバを構成した場合のことを示す。なお、駆動時に受ける摩擦力・摩擦トルクは位置依存性及び再現性が大きいことを考慮して空送り試験により同定及び補償した。

4. エンドミル加工試験結果

図4に切削力の振動数に応じた推定精度の比較結果を示す。青色の破線で実測値を、赤色・緑色の実線で2慣性モデル・1慣性モデルに基づく推定値を示す。また、両推定値とも遅れ補償を行った場合の結果を示している。1慣性モデルに基づく従来法では低速加工時(図4(a))には精度よく推定できるものの、高速加工時(図4(b))には精度が低下していることがわかる。一方で、提案法ではばね性を考慮したモデルに基づき推定式が導かれているため、切れ刃通過周波数が400 Hzに達する高速加工時においても精度よく推定できることがわかる。次に、切削力の変動成分の推定精度を評価するため、推定値の標準偏差を測定値の標準偏差で割り正規化した。モデル化手法及び2慣性モデルについて遅れ補償の有無によって比較した結果を図5に示す。この時、ゲインが1に近いほど推定精度が高いことを示す。図5(a)より、提案手法は特に高速加工時における推定精度の改善効果が大きいといえる。図5(b)より、遅れ補償により推定精度は向上したことがわかるが、その改善幅は(a)と比較すると小さいことがわかる。よって、高速加工時における推定精度向上には、遅れ補償よりも2慣性系としてモデル化することが重要であると云える。

次に切り込み深さが変動成分の推定精度に与える影響を評価した。この結果を図6に示す。従来法、提案法の両手法においていずれのグラフも横ばいになっていることから、切り込み深さが推定精度に与える影響は小さいと云える。提案手法では、いずれの切り込み深さについても高速加工時(8000 min⁻¹・12000 min⁻¹)における推定精度が大幅に向上することが確認された。

5. 結論・課題

- (1) ボールねじ駆動ステージの動的な挙動と信号間の位相遅れを考慮した、2慣性モデルに基づく切削力推定手法を示した。提案手法ではモデル化誤差がない場合、ばね性の影響を受けずに切削力推定を行うことができる。
- (2) エンドミル加工試験の結果、提案手法を用いることで切削力推定の高精度・広帯域化を実現できることが実験的に示された。また、実験で用いた加工条件において、切削力の変動成分は切り込み深さの影響を受けずに推定できることが示された。

6. 参考文献

- [1] Altintas Y.: "Prediction of Cutting Force and Tool Breakage in Milling Feed Drive Current Measurements", ASME Journal Engineering for Industry, Vol.114, No.4, pp.386-392, (1992)
- [2] 茨木創一:"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よ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, Vol70, No.8, pp.1091-1095, (2004)

表1 実験条件及び実機の仕様

| 工具 | 超鋼エンドミル φ6mm 2枚刃 |
|--|-----------------------|
| 被削材 | アルミニウム材 |
| 軸方向切り込み深さ[μm] | 30・60・90・120 |
| 主軸回転数[min^{-1}] | 1000・4000・8000・12000 |
| 1刃あたりの送り量[μm] | 30 |
| サンプリングタイム[μs] | 200 |
| ロータリエンコーダ分解能[bit] | 17 |
| リニアエンコーダ分解能[nm] | 20 |
| 被駆動体質量[kg] | 7.0 |
| 総慣性モーメント[$\text{kg}\cdot\text{m}^2$] | 3.75×10^{-5} |

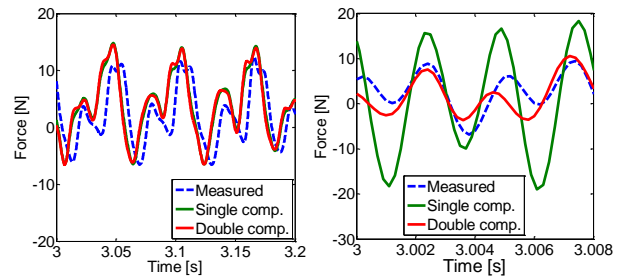


図4 エンドミル加工試験結果(切り込み深さ: 120 μm)

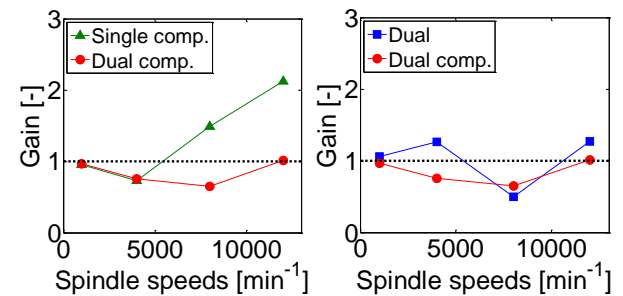


図5 切り込み深さ 120 μm における推定精度の比較結果

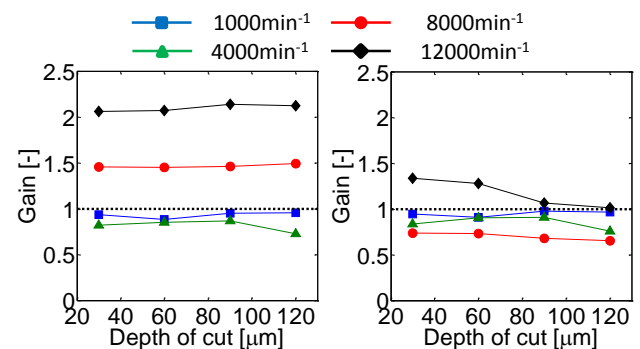


図6 切り込み深さに応じた推定精度の比較結果