

非線形モデルパラメータの同定によるセンサレス切削力推定法

慶應義塾大学理工学部 ○佐藤泰輝, ◎柿沼康弘

要旨

本研究ではフルクロード制御のボールねじ送り駆動系を対象に、負荷側外乱オブザーバ(LDOB)によるセンサレス切削力推定を行った。位置・加振力依存性を持つ軸方向剛性及び粘性減衰係数を時間領域で同定する新たな手法を提案し、ステージ送り時と静止時それぞれにおける特性を同定した。切削試験において、加工時のステージ位置と相対変位振幅から決定されるモデルパラメータを用いることにより、推定精度が向上することを確認した。

1. 結論

近年、生産性の向上を目的として、自動的に加工を行う知能化工作機械の開発が盛んに行われている。知能化技術の一つである加工プロセスモニタリング技術には、外乱オブザーバを応用した外部センサレス切削力推定技術が有効であることが知られている^[1]。しかし、工作機械において主流のボールねじ送り駆動系では、ステージ位置や加工負荷に応じて周波数特性が変動する位置・加振力依存性が存在する。本研究では、加振試験による非線形モデルパラメータ同定手法を提案し、同定結果を切削力オブザーバに適用することで、送り軸・静止軸両方向における切削力推定精度を向上させることを目的としている。

2. 外乱オブザーバを応用したセンサレス切削力推定手法

本研究では負荷側外乱オブザーバ (LDOB) ^[2]を応用した切削力推定手法を提案する。推定式を以下に示す。

$$\hat{F}_{cut} = G_{LPF}(-M_{tn}\hat{a}_t - C_{tn}\hat{v}_t + K_{rn}x_{dif} - \hat{F}_{fric}) \quad (1)$$

ここで、 M_t は被駆動体質量、 C_t は直動系の粘性摩擦係数、 K_r は軸方向剛性、 x_{dif} はモータ-ステージ間の相対変位、 a_t, v_t はそれぞれステージ加速度、速度、 G_{LPF} はローパスフィルタ、 F_{fric} は摩擦力である。従来手法と異なり電流情報を用いないため、トルクリプルやサーボ情報間の時間遅れ要素などの誤差要因の影響を受けない。また、モータ-ステージ間の相対運動を考慮しているため、送り軸・静止軸両方向において高精度な切削力推定が可能である。図1に切削力推定に関するブロック線図を示す。

3. 非線形モデルパラメータの特性とその同定手法

ボールねじ送り駆動系の軸方向剛性 K_r は、これを構成する各要素の剛性の足し合わせとして以下のように表される^[3]。

$$\frac{1}{K_r} = \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_n} \quad (2)$$

ここで、 K_s, K_b, K_n はそれぞれねじ軸、支持軸受、ナットの軸方向剛性である。ねじ軸と支持軸受の剛性の足し合わせ K_{sb} は以下のように表される。

$$K_{sb} = \frac{1}{\frac{1}{K_{b1}} + \frac{x}{E_s A_s}} + \frac{1}{\frac{1}{K_{b2}} + \frac{L-x}{E_s A_s}} \quad (3)$$

ここで、 K_{b1}, K_{b2} はそれぞれモータ側、反モータ側支持軸受の軸方向剛性、 x はモータ側支持軸受からナットまでの距離、 E_s, A_s, L はそれぞれねじ軸のヤング率、断面積、全長である。軸方向剛性はステージ位置に応じて変化する位置依存性を持つことが分かる。

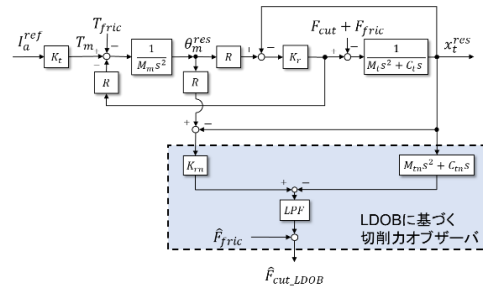


図1 LDOBに基づく切削力オブザーバのブロック線図

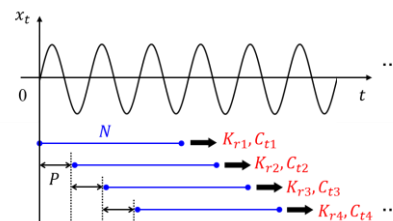


図2 同定手法の概略図

ボールねじ駆動機構の構成要素であるねじ軸や転がり軸受、転がり案内において発生する転がり摩擦は、変位の大きさに応じてその特性が変化することが知られている。転がり要素が回転する転がり領域ではクーロン摩擦の静的特性を、微小変位領域では非線形ばね特性を示す。この非線形ばね特性により直動転がり案内の周波数特性が変動することが報告されている^[4]。したがって、摩擦に関する項である粘性減衰係数には加振力依存性が存在すると考えられる。

本研究では単一正弦波加振試験に最小二乗法を適用することで、時間領域におけるモデルパラメータ同定手法を提案する。無負荷状態でステージを加振する場合、機械系に加わる外力は0であり、摩擦や高周波ノイズをフィルタにより除去すると、式(1)は以下のように書き換えられる。

$$M_t a_t = K_r x_{dif} - C_t v_t \quad (4)$$

ここで、被駆動体質量 M_t に設計値を用いることで、最小二乗法を用いて左辺と右辺の差分が最小となるように未知のモデルパラメータを同定することができる。残差平方和 ϵ を以下のように計算する。

$$\epsilon = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{M_t a_{ti} - (K_r x_{dif i} - C_t v_{ti})\}^2 \quad (5)$$

残差平方和を各モデルパラメータで偏微分したものが共に0になる条件から、同定パラメータは以下の式で計算される。

$$\begin{Bmatrix} K_r \\ C_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_{difi}^2 & \sum_{i=1}^N x_{difi} v_{ti} \\ \sum_{i=1}^N x_{difi} v_{ti} & \sum_{i=1}^N v_{ti}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^N M_t a_{ti} x_{difi} \\ \sum_{i=1}^N M_t a_{ti} v_{ti} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

図2に示すように、計算窓幅 N と計算周期 P を適切に設定し、逐次的にパラメータ同定を行う。転がり摩擦の非線形ばね特性の影響から、送り軸と静止軸において加振力依存性は異なる。そこで本研究で実施する加振試験は、ステージを送りながら行うステージ送り加振試験と、静止させて行うステージ静止加振試験の2種類とし、切削力を推定する時に使い分ける。

4. 加振試験による非線形パラメータの同定

実験条件を表1にまとめる。初めに、代表して加振振幅1.0 mm/sのステージ送り加振試験結果を図3に示す。ステージ位置に応じてパラメータが変化する位置依存性を、連続的に同定できていることが確認できる。次に、ステージ状態の異なる加振試験結果におけるステージ位置0 mm (モータ側)の相対変位と軸方向剛性同定値の関係を図4にまとめて示す。同じ位置・加振力条件でも、ステージの状態に応じて加振力依存性が異なることが確認できる。送り軸の場合、転がり摩擦はクーロン摩擦の静的特性を示すため、モデルパラメータはほぼ一定値となる。一方、静止軸の場合、加振力が小さく変位が微小の条件において転がり摩擦は非線形ばね特性を示している。

5. 切削試験による切削力推定手法の実験的評価

実験条件を表2に示す。ステージ位置と軸方向切り込み深さの条件を変えて切削試験を行い、位置・加振力依存性に対する提案手法の有効性を検証した。推定精度を評価するため、水晶圧電式の切削動力計を設置した。モデルパラメータに加振試験による同定結果を適用した場合と、一定値を設定した場合それぞれにおけるLDOBによる推定切削力を実測値と比較する。ここで、一定値にはステージ位置40 mm (中央)での掃引加振試験によるパラメータ同定結果を採用した。静止軸方向の切削力推定について、代表してステージ位置0 mm、軸方向切り込み深さ1.5 mmの結果を図5に示す。モデルパラメータを一定値に設定した場合、位置依存性だけでなく加振力依存性の影響も受け推定精度が悪化している。一方、同定結果を適用した場合、推定精度が向上していることが確認できる。他の全ての条件においても、同様に同定結果を用いた場合に推定精度の向上を確認した。

6. 結論

本研究では、ボールねじ送り駆動系における外部センサレス切削力推定手法の高精度化を目的として、加振試験による非線形モデルパラメータ同定手法を開発した。位置依存性、及びステージの状態に応じて異なる加振力依存性を同定し、これをLDOBによる切削力オブザーバに適用することで、送り軸・静止軸両方向における推定精度の向上を実験的に確認した。

参考文献

- [1] Yamada Y, Yamato S, Kakinuma Y (2017) Mode decoupled and sensorless cutting force monitoring based on multi-encoder. Int J Adv Manuf Technol 92:4081–4093
- [2] Katsura S, Suzuki J, Ohnishi K (2006) Pushing Operation by Flexible Manipulator Taking Environmental Information Into Account. IEEE Int Symp Ind Electron 53:1688–1697

- [3] 厚松原. 精密位置決め・送り系設計のための制御工学. 森北出版株式会社; 2008.pp123-128
- [4] 酒井康徳, 田中智久, 堤正臣. 直動転がり案内の振動特性に生じる加振力依存性. 精密工学会誌/Journal Japan Soc Precis Eng 2014;80:534.

表1 加振試験の実験条件

	ステージ送り	ステージ静止
	加振試験	加振試験
ステージ位置 [mm]	0-80	0, 40, 80
送り速度 [mm/s]	4.0	-
加振振幅 [mm/s]		0.1-3.0
加振周波数 [Hz]		200
ピークフィルタ種類		2次IIR
ピーク周波数 [Hz]		200

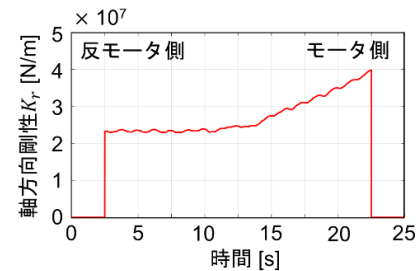


図3 位置依存性

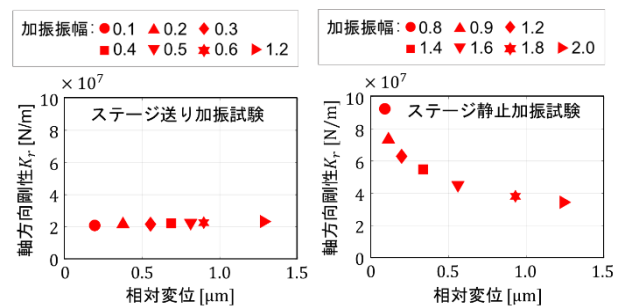


図4 加振力依存性

表2 切削試験の実験条件

	X	Y
送り方向		
ステージ位置 [mm]	0-80	0, 40, 80
送り速度 [mm/s]	4.0	1.0
軸方向切り込み深さ [mm]	0.2	1.5
半径方向切り込み深さ [mm]		4.0
スピンドル回転数 [min ⁻¹]		6000
工具	超硬エンドミル (Φ4, 刃数2)	
LPF・HPF種類	4次バターワース	
LPFカットオフ周波数 [Hz]	300	
HPFカットオフ周波数 [Hz]	30	5
サンプリング周波数 [kHz]	10	

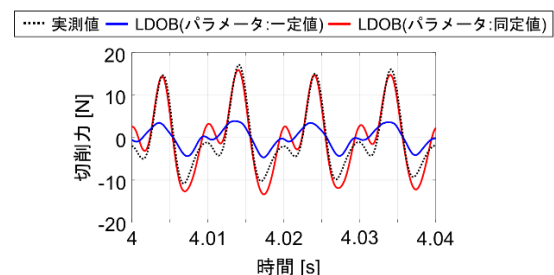


図5 切削力推定結果