

# マルチ統合切削力オブザーバの相互補償による センサレス切削力推定手法の高精度化

慶應義塾大学理工学部 ○一色海人, ◎柿沼康弘

## 要旨

本研究では、フルクローズドループ制御のボールねじ送り駆動系を対象に、複数の切削力オブザーバによる推定切削力を線形的に統合し、相互補償する切削力推定手法を提案した。統合手法として、各切削力オブザーバの推定切削力に対し線形回帰モデルを構築し、最小二乗法を適用することで校正係数を決定した。切削試験において、提案手法を適用することで、従来の切削力オブザーバよりも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、知能化工作機械の開発が盛んに行われている。知能化技術のうち、核となる要素技術であるプロセスモニタリングには、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おり、これまで様々な手法が提案されてきた<sup>1, 2)</sup>。一方、従来手法では、加工条件によって、それぞれの切削力オブザーバの推定精度にばらつきがあるため、条件に応じた適切なオブザーバを選択する必要がある。こういった、単一の情報に誤差や情報の欠落が含まれる場合に有効な手段として、複数のデータを統合した相互補償が挙げられる。本研究では、フルクローズドループ制御可能なボールねじ送り駆動系を対象に、従来提案されてきた複数の切削力オブザーバを線形的に統合し、相互補償する手法を提案し、様々な加工条件において、高精度に切削力を推定することを目的としている。

## 2. オブザーバのマルチ統合化による切削力推定手法

本研究では、オブザーバのマルチ統合化による切削力推定手法を提案する。切削力推定式を以下に示す。

$$\hat{F}_{cut} = \hat{K}_0 + \sum_{i=1}^p \hat{K}_i \hat{F}_i \quad (1)$$

$\hat{F}_i (i = 1, 2, \dots, p)$  は各切削力オブザーバによる推定切削力であり、 $\hat{K}_0$  は切片、 $\hat{K}_i (i = 1, 2, \dots, p)$  は各切削力オブザーバの推定値に対する校正係数である。また、 $p$  は構成するオブザーバの数である。本研究では、事前に加工試験を行い、動力計の実測値を目的変数、各オブザーバの推定切削力を説明変数とする回帰モデルに最小二乗法を適用することで、この線形モデルの校正係数を同定する。本研究では、説明変数となる切削力オブザーバとして、DOB, MEDOB, LDOB, 振動モード, 剛体モードを採用した。図1に、オブザーバ統合の概念を示す。

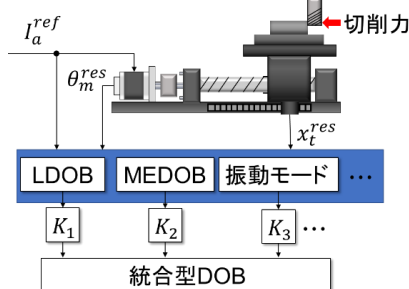


図1 オブザーバ統合の概念

## 3. オブザーバ統合のための校正係数の同定

複数のオブザーバの出力から回帰モデルを構築するためには、最適な変数を選択する必要がある。前章で挙げた5つのオブザーバのうち、<LDOB, 振動モード>, <MEDOB, 剛体モード>の組み合わせの相関係数を

を調べたところ、どちらもおよそ1であったため、モード分解型で相関性が高いと思われる振動モードと剛体モードを除外した。また、回帰モデルにおいて、説明変数同士に強い相関がある場合、多重共線性の影響により、符号逆転現象などが起こり、モデルが不安定化することがある。そのため、多重共線性の影響を考慮しなければならない。その指標として、多重共線性の程度を示す分散拡大係数(VIF: Variance Inflation Factor)を計算し、基準値を10として、変数の選択を行った。VIFを求める説明変数を目的変数として、他の説明変数で重回帰分析を行った時の決定係数を $R_i^2$ とすると、VIFは以下のように求められる。この値が大きいくほど、多重共線性の程度が大きいといえる。

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (2)$$

残る変数のうち、<DOB, MEDOB>の組み合わせのVIFはどの実験条件でも基準値を超えたため、除外した。また、残る変数の単回帰の結果、LDOBの場合が最も良いモデルであったため、DOBとMEDOBの単回帰の場合も除外した。したがって残る組み合わせは、<LDOB>, <LDOB, DOB>, <LDOB, MEDOB>の3通りである。本研究では、構築した線形モデルの適合度合いの指標として自由度調整済み決定係数の値を用い、0.7を基準値とした<sup>3)</sup>。また、モデルの良さを評価するための指標として、赤池情報量基準(AIC: Akaike's Information Criterion)<sup>4)</sup>を採用した。自由度調整済み決定係数 $R_{adj}^2$ とAICは、それぞれ以下のように表される。

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{N - 1}{N - p - 1} \quad (3)$$

$$AIC = N \log S + 2p \quad (4)$$

$R^2$ はモデルの決定係数、 $N$ はサンプル数、 $S$ は残差平方和である。AICの値が小さいほど良いモデルであるとされており、本研究でもAICが最小となるようなモデルを最適なモデルとする。これと前述したVIFの3つの指標をもとに、最適な説明変数を選択する。

前章で示したオブザーバ統合のため、事前に表1に示すような条件で加工試験を行うことにより、校正係数の同定を行った。切れ刃通過周波数の変化における依存性を調査するため、工具の刃数が一定の条件で主軸回転数を変化させて加工を行った。

## 4. 切削試験によるオブザーバ統合化切削力推定手法の評価

切削試験は、同定試験と同様の表1の条件でおこなった。主軸回転数の条件を変えて、送り軸、静止軸方向の切削力を推定するため、X, Y軸両方向で加工試験を行い、提案手法と従来手法で推定し、動力計の測定値と比較することで、提案手法の精度や有効性を評価した。送り軸方向の切削力時間波形を図2に、静止軸方向の場合を図3に示す。送り軸方向では、従来手法が振幅の大きさや、刃の非接触時に誤差を生じて、波形が合っていないのに対し、提案手法はそういった誤差を適切に相互補

償し、誤差が低減していることがわかる。一方、静止軸方向では、LDOBの推定精度が良く、提案手法とLDOBとの間にそれほど差は見られないが、提案手法により若干の精度の向上が見られた。また、動力計の実測値とそれぞれの手法の二乗平均平方根誤差(RMSE: Root mean squared error)をまとめた図を、送り軸方向は図4に、静止軸方向は図5に示す。提案手法は、従来手法では精度が下がる共振周波数付近(主軸回転数7000min<sup>-1</sup>)においても、高精度に切削力を推定することができており、全ての条件で最も良い精度であることがわかる。以上のことから、自由度調整済み決定係数やVIF、AICといった基準の下で、加工条件ごとに適切なオブザーバを選択し、統合することにより、どの加工条件でも切削力推定精度の向上を達成することができたといえる。送り軸方向は、最大67%の精度の改善が見られ、静止軸方向は最大71%の精度の改善が見られた。

5. 結論

本研究では、従来提案されてきた複数の切削力オブザーバを線形的に統合し、相互補償を行うオブザーバのマルチ統合化による切削力推定手法を提案し、切削試験による評価を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 各切削力オブザーバの出力を説明変数とし、それぞれに対し適切な校正係数を同定することで、回帰モデルを構築した。
- (2) 回帰モデルに用いる変数は、自由度調整済み決定係数、VIF、AICといった基準をもとに最適な組み合わせを選択した。
- (3) 事前の加工試験により適切な校正係数を同定することで、提案手法により、どの加工条件でも切削力推定精度が向上しており、送り軸方向では最大67%、静止軸方向では最大71%の精度の向上が見られた。

参考文献

- [1] Yamada Y, Kakinuma Y. Sensorless cutting force estimation for full-closed controlled ball-screw-driven stage. *Int J Adv Manuf Technol* 2016;87:3337-48.
- [2] Yamato S, Sugiyama A, Suzuki N, Irino N, Imabeppu Y, Kakinuma Y. Enhancement of cutting force observer by identification of position and force-amplitude dependent model parameters. *Int J Adv Manuf Technol* 2019;104:3589-605.
- [3] Moore D, Notz W.I, Fligner M.A. *The Basic Practice of Statistics*. 6th ed. 2016.p.138.
- [4] 赤池弘次, 室田一雄, 土谷隆. 赤池情報量規準AIC:モデリング・予測・知識発見 共立出版; 2007.

表1 切削試験条件

送り方向	X, Y
主軸回転数 [ $\times 10^3 \text{min}^{-1}$ ]	1,2,3,4,5,6,7,8,9
1刃あたりの送り量 [mm/tooth]	0.03
軸方向切込み深さ [mm]	1.5
半径方向切込み深さ [mm]	1.5
工具	超硬ラジアスエンドミル
工具径 [mm]	$\phi 6$
刃数	2
被削材	A7075
LPFのカットオフ周波数 [Hz]	500
サンプリング周波数 [kHz]	10
加工方法	ダウンカット

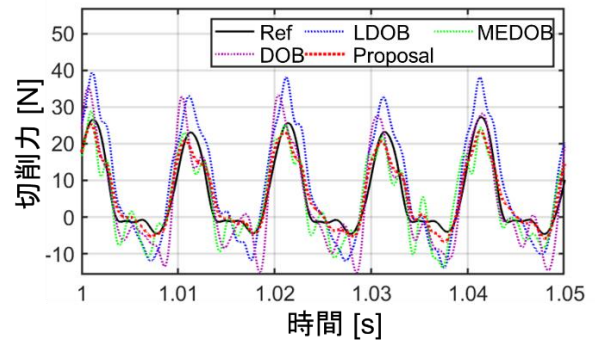


図2 送り軸方向における各手法による推定切削力時間波形 (送り速度: 3 mm/s, 主軸回転数: 3000 min<sup>-1</sup>)

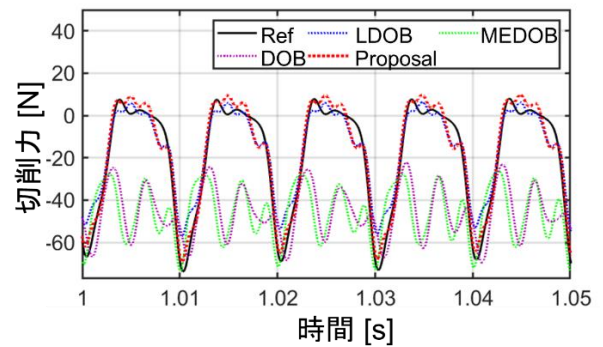


図3 静止軸方向における各手法による推定切削力時間波形 (送り速度: 3 mm/s, 主軸回転数: 3000 min<sup>-1</sup>)

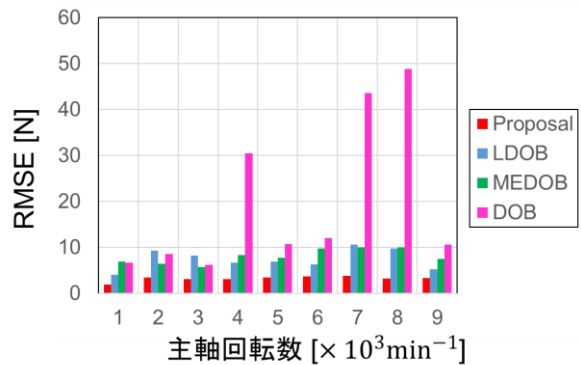


図4 送り軸方向における各手法のRMSE

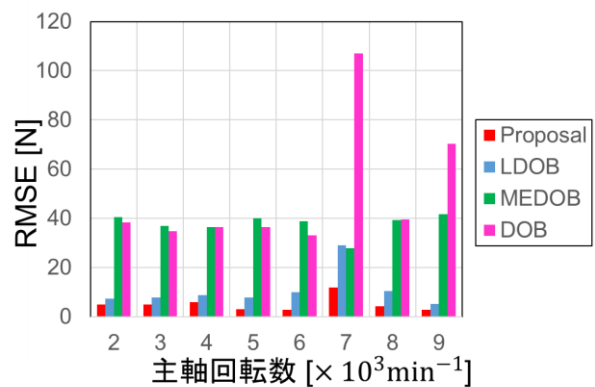


図5 静止軸方向における各手法のRMSE