

高速ミーリング用スピンドルにおける センサレス微小切削トルク推定手法の開発

慶應義塾大学 ○酒田慎哉, ◎柿沼康弘

要旨

加工プロセスの監視には従来力センサやカメラなどが用いられてきたが、近年オブザーバベースのセンサレスプロセス監視技術が注目されている。しかし従来用いられていた光学式ロータリエンコーダは高速回転に対応できないといった問題点がある。そこで本研究ではホールセンサを応用した高速回転領域における微小径工具の切削トルク推定手法を提案する。さらに本手法を硬脆材料の穴加工における電着工具摩耗検知に応用した。

1. 緒論

電子機器・光学機器の高性能化・小型化に伴い、超精密加工において求められる加工精度はさらに高まっている。このような高精度な加工を自由な形状に対して実現するためには、小径工具を用いた高速回転での切削加工が不可欠となる^[1]。制御工学における外乱オブザーバは負荷推定にあたって一般的に光学式エンコーダを利用するが、高速回転の場合、エンコーダからのパルス信号の処理が間に合わず、正確な角度情報を取得することができないという欠点がある。

そこで本研究では予め高速スピンドルに搭載されているホールセンサを角速度検出に応用し、求めた角速度情報を用いた、高速ミーリングにおける微小切削トルク推定手法を提案する。

2. 微小切削トルク推定手法の原理

本研究では Fig. 1 に示すとおり、電流参照値や角速度といったサーボ情報を基に、加工中に生じる切削トルクを負荷トルクとみなすことで、センサレスに切削トルクを推定することができる。また本研究では、切削トルク推定に必要な角速度情報をホールセンサの信号から取得する。しかし一般的にホールセンサはスピンドルに回転軸に対して 120°間隔で 3 つしか備わっていないため、光学式のロータリエンコーダと比べると極端に分解能が低いという短所を持つ。

そこで本研究ではホールセンサの角速度検出精度を向上させる手法を提案する。

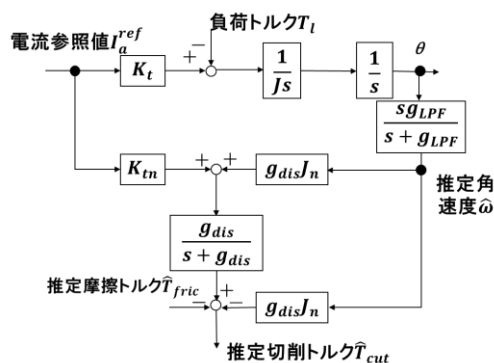


Fig. 1 切削トルク推定オブザーバ

3. 主軸角速度の計測方法と評価

角速度検出の高精度化のためにホールセンサの信号に対して、速度・加速度・躍度を考慮した角度補間手法を提案した。ホールセンサパルスから計時法を用いて求めた角速度 $\hat{\omega}_k$ とその一階微分である角加速度 \hat{a}_k 、さらにその一階微分である角躍度 $\hat{\beta}_k$ を用いて、ホールセンサのパルス間の角度情報を次式のように推定する。

$$\hat{\theta} = \theta_{hall} + \hat{\omega}_k t + \frac{1}{2} \hat{a}_k t^2 + \frac{1}{6} \hat{\beta}_k t^3 \quad (1)$$

この式を用いて、一つ前サンプリング点からホールセンサ信号の更新がないサンプリング点における角度を推定し、それを擬似微分することにより角速度情報を取得する。これにより、ホールセンサによる速度計測時の量子化誤差に起因する高周波ノイズを抑え、安定した角速度推定を試みる。

この手法の有用性を確認するために、Table 1 に示した条件で角速度計測シミュレーションを行い、提案手法の性能を評価した。その結果、Fig. 2 に示すとおり、速度・加速度・躍度を考慮した角度補間手法によって高精度な角速度の計測に成功したことから、この手法を微小切削トルク推定に応用することにした。

Table 1 シミュレーション条件

主軸回転数 [min ⁻¹]	10000
変動周波数 [Hz]	10, 50, 100
カットオフ周波数 [rad/s]	100

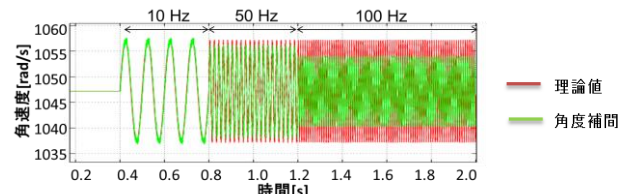


Fig. 2 角速度推定シミュレーション結果

4. 切削トルク推定手法の適用と評価

提案手法の有効性を評価するために、超精密 3 軸立形加工機 (Fig. 3) を用いて切削トルク推定実験を行った。本装置は駆動部にリアモータおよびエアガイドを採用することで非接触駆動となっており、摩擦力を低減している。

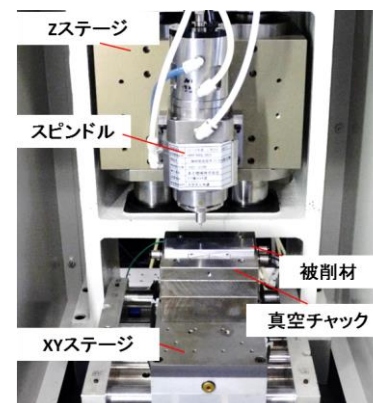
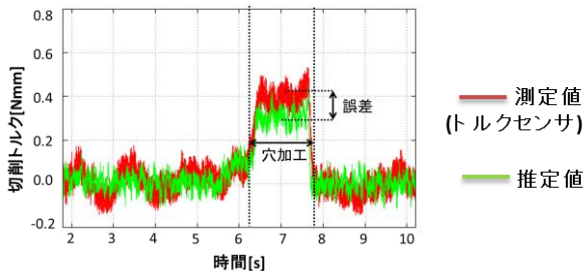


Fig. 3 超精密 3 軸立形加工機

本研究で提案する微小切削トルク推定性能を評価するために、超硬ドリルによる実験を行った。本実験では、穴加工時のトルクセンサによって計測した値と比較する。実験条件を Table 2、推定結果を Fig. 4 に示す。

Table 2 穴加工実験条件

主軸回転数 [min ⁻¹]	20500
送り速度 [mm/min]	30
被削材	A5052 (アルミ合金)
工具	0.5 mm 径超硬ドリル
LPF カットオフ周波数[rad/s]	30

Fig. 4 穴加工における切削トルク推定結果
φ 0.5 mm 超硬ドリル

測定値と推定値の切削トルク変動の挙動が一致していることから、本手法によって小径工具によるドリル加工時の切削トルクを精度良く推定できたといえる。さらに Table 3 に示すようにトルク定数を調整することにより、誤差を低減させることに成功した。

Table 3 トルク定数の値による誤差平均

トルク定数[Nm/A]	切削トルクの推定誤差[Nm]
0.0021 (修正前)	8.62×10^{-5}
0.0026 (修正後)	1.80×10^{-5}

次に、エンドミルによる溝加工において、提案手法による推定可能な最小切削トルクの評価実験を行った。実験条件を Table 4、推定結果を Fig. 5 に示す。

Table 4 溝加工実験条件

主軸回転数 [min ⁻¹]	20500
切込み量 [mm]	0.05
被削材	A5052 (アルミ合金)
工具	0.5 mm 径エンドミル
LPF カットオフ周波数 [rad/s]	10

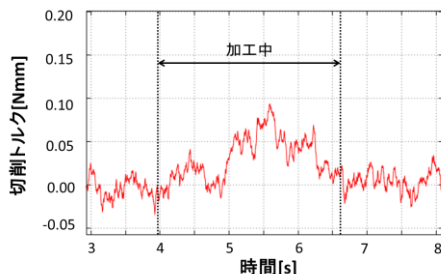
Fig. 5 溝加工における推定切削トルク
φ 0.5 mm エンドミル

Fig. 5 より、加工中と想定される時間において、0.05 Nmm 程の変動が観測できるように見えるが、空転時のノイズのピークと加工時の推定切削トルクのピークにあまり差がないことから、切削時のトルク変動を観測できたとはいえない。ここで、空転時の

推定外乱トルクの変動と加工時の切削トルクの変動を区別するため 20500 min⁻¹ の空転時の推定トルクの変動を確認した。

カットオフ周波数が 10 rad/s の時の推定外乱トルク 12000 サンプル (1.5 秒間) のうち、最小値に対し 0.05 Nmm より大きい外乱トルクが 13 サンプル検出された。このことから Fig. 5 における変動は切削トルクに起因するものとは判断できない。それに対し 0.1 Nmm 以上の切削トルクは 0 サンプルだったことから、0.1 Nmm を超える変動は切削時の負荷によるものだと考えられる。また、これより微小径の工具による加工時は切削トルクを推定することができなかったことから、本手法では推定可能な最小切削トルクは 0.1 Nmm と結論付けられる。

5. 電着工具摩耗検知手法への応用

提案した切削トルク推定手法を応用して、硬脆材料の穴加工における電着工具摩耗検知手法を提案し、加工実験を行った。本実験では、硬脆材料の加工に適しているヘリカル加工によって、穴加工を行った。実験条件を Table 5、切削トルクの推定結果を Fig. 6(a)、工具の観察写真を Fig. 6(b) に示す。

Table 5 摩耗検知実験条件

主軸回転数 [min ⁻¹]	20500
送り速度 [mm/min]	0.3
ヘリカルピッチ [mm]	0.01
被削材	S7213 [ソーダ石灰ガラス]
工具	0.6 mm 径電着ダイヤモンド工具
LPF カットオフ周波数 [rad/s]	30

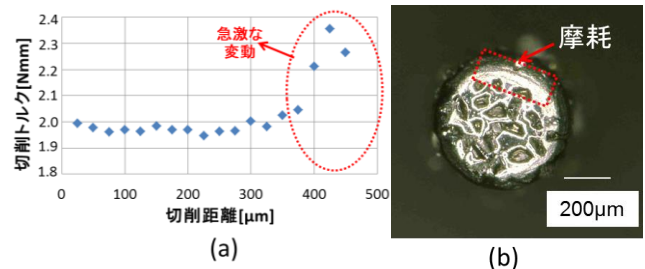
Fig. 6 (a)推定切削トルク (b)切削距離 325 μm 後の
工具写真 φ 0.6 mm

Fig. 6 (a) より、300 μm 加工後から切削トルクが急増していることがわかる。また Fig. 6 (b) より、325 μm 加工後において工具摩耗が進行していることが観測できたため、切削トルク変動結果との相関を確認できる。以上から、0.6 mm 径の微小径工具において、切削トルクの変動から工具摩耗の進行を検知することができたといえる。

6. 結論

本研究では切削トルク推定手法を用いて、高速回転における微小切削トルクの検出を試みた。角度補間手法によって切削トルクの推定精度を向上させることに成功し、加工実験により、最小 0.1 Nmm の切削トルクの変動を検知できた。この手法により、外部センサを用いずに、0.6 mm 径の微小径工具において、摩耗進行に伴う切削トルクの増加を確認することができた。

7. 参考文献

- [1] 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", 精密工学会誌, Vol. 70, No. 8, 2010, pp. 1091-1095