

センサレス切削力計測技術とその応用

1. はじめに

生産システムの自動化や工作機械のインテリジェント化の観点から、加工プロセスの監視技術に関する研究は従来から広く行われてきた。加工プロセスに関係する物理量の中でも、切削力はびびり振動、工具欠損・摩耗などの状態診断を行ううえで有効である。切削力を高精度かつ高応答に計測できる技術かつ信頼性・頑丈性・費用の観点も満足する計測技術が開発されれば工作機械の様な高機能化を実現できる。本稿では、高速加工で主に使用されるリニアモータ駆動の工作機械や超精密加工機を対象に、外部センサを用いることなくサーボ情報から高精度に切削力を計測する技術とその応用について紹介する。

2. センサレス切削力計測

図1のようなりニアモータ駆動テーブルにおける切削モデルを考え、工作物とテーブルを加算した質量を M (kg)、速度を v (m/s)、モータの推力定数を K_t (N/A)、モータ電流 I (A)、切削力を F_{cut} (N)、案内面の摩擦力を F_{fric} (N) として、運動方程式から切削力を導くと $F_{cut} = K_t I - M (dv/dt) - F_{fric}$ と記述できる。つまり、切削力はモータ電流、加速度、摺動部の摩擦から推定できることになる。加減速のない一定送りの場合では、モータ電流から切削力を近似して推定できることがわかるが、応答性は電流制御部のローパスフィルタにより制限される。そのためおおよその切削負荷を見積もることはできるが、高応答の計測は難しい。一方で、加速度は位置の2階微分であり、位置情報はエンコーダにより測定できることから、加減速に関する第2項は制御系内で推定できる。これを含めることで高精度な切削力推定が可能となる。つまり、図2に示すように位置制御系に加減速加工にも対応する切削力推定機能を搭載することができるわけである。これを切削力オブザーバと呼んでいる⁽¹⁾。切削力オブザーバは外乱オブザーバを応用したもので摩擦力の同定は必要だが、その他のパラメータ同定を全く行う必要がないこと、外部のセンサや測定機器は一切使用しなくてよいこと、位置制御系内に構成できることから、工作機械にお

るサステナブルでユビキタスな状態監視技術になり得る。ただし、さらなる高精度な切削力推定には、摩擦同定による誤差をなくすため、空気静圧案内などで機械的に摺動摩擦をほぼゼロとするか、精度の高い摩擦モデルが必要となる。また、超精密加工では除去量が少ないため、工作物の質量変動は無視できるが、工作機械での重切削を考えた場合は、質量変動をモデルに加えることで正確な推定が可能になる。

3. 応用例

切削力オブザーバをエンドミル加工(加工条件: 2枚刃スクエアエンドミル $\phi 3.0\text{mm}$, 回転数 $10\,000\text{min}^{-1}$) における切削力監視に応用した結果を図3に示す。その際に比較のために圧電式切削動力計でも計測を行った。切削力オブザーバにより、一刃が加工する様子を捉えることができ、その値は圧電式切削動力計が示す値とほぼ同値である。制御系の工夫ひとつで計測における周波数帯域は 2kHz 程度まで高めることができる。

上述したとおり、切削力オブザーバの応答性は従来の負荷電流による推定に比べて十分に高いことから、びびり振動検知や工具摩耗検知に応用も期待される。また、切削力オブザーバにより読み取った値をコントローラ側へフィードバックすることで、“早い切削力制御”も実現できる⁽²⁾。エンドミルによる側面加工での力制御の結果を図4に示す。切削力制御が可能ということは、研削や研磨における圧力制御が可能であることを意味し、1台で位置制御による切削加工から圧力制御による研磨加工までこなせる複合加工機の開発にも繋がる。

4. おわりに

本稿では、センサレス切削力計測技術とその応用について紹介した。切削力オブザーバは、信頼性・頑丈性・費用の観点も満足する計測技術で、その応用も多岐にわたる。位置制御と力制御を統合した切削プロセスなどへの展開も可能であり、単なる加工状態監視への応用のみならず新たな加工プロセスの領域を産み出すツールとなれば幸いである。

(原稿受付 2011年3月22日)

[柿沼 康弘 慶應義塾大学]

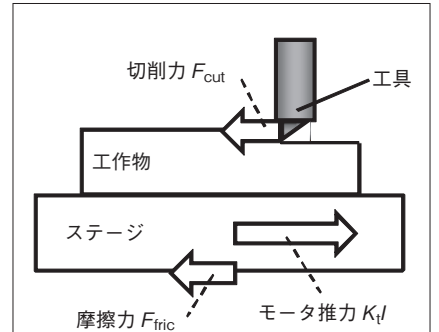


図1 切削モデル

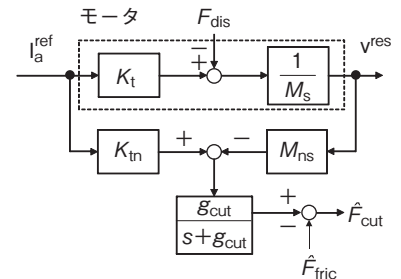


図2 切削力オブザーバ

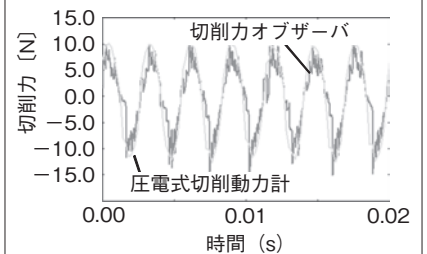


図3 切削力モニタリング結果

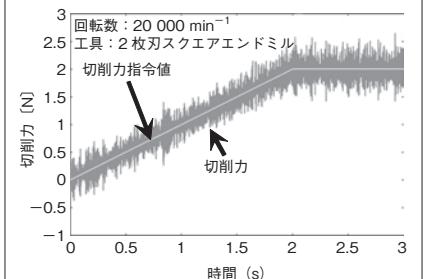


図4 切削力制御の結果

●文献

- (1) Kurihara, D., Kakinuma, Y., and Katsura, S., *IJAT*, 3-4, (2009), 415-421.
- (2) Kurihara, D., Kakinuma, Y., and Katsura, S., *JAMDSM*, 5-4, (2010), 955-965.