

相互相関に基づく センサレスびびり振動検知手法の開発

慶應義塾大学 ○廣澤泰輔, ◎柿沼康弘

要旨

本研究では、駆動軸制御系に適用したオブザーバ技術によって推定した切削力情報と、制御システム内のサーボ情報との相関監視に基づくびびり振動検知システムを開発した。フルクローズド制御方式のボールねじ送り駆動ステージを対象に、エンドミル加工試験によって検証を行った。提案手法により、閾値設定を必要としない簡易な検知アルゴリズムのもと、外部センサレスでびびり振動を検知した。

1. 緒論

近年、更なる生産プロセスの能率化の要求により、異常加工を自律的に検知・回避する知能化工作機械の研究が盛んに行われている。異常加工の1種であるびびり振動は、加工能率・コスト・仕上げ面性状を大きく左右し、切削加工における永遠の課題といわれている¹⁾。そのため、びびり振動の検知・回避手法が数多く提案されてきた。しかし高コスト化、機械剛性の低下などの問題から外部センサを用いた手法は実用化に至らない場合が多い。また、周波数解析を行う手法は計算負荷が大きいため実時間検知に適さない。さらに、振動振幅の大きさによってびびり振動検知する場合、加工条件によって閾値が異なるという問題がある。本研究では、これらの問題の解決を図るために、サーボ情報を利用した推定切削力-位置・加速度間の相関監視に基づくセンサレスびびり振動検知手法の開発を行った。

2. 相関監視に基づくびびり振動検知指標

切削力-位置間の相関係数 $r_{F_{cut}x}$ 、切削力-加速度間の相関係数 $r_{F_{cut}a}$ は切削力 F_{cut} [N]、位置 x^{res} [m]、加速度 a^{res} [m]を用いて以下の式で導出される。

$$r_{F_{cut}x} = \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_{cut} \cdot x^{res} dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_{cut}^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^{res2} dt}} \quad (1)$$

$$r_{F_{cut}a} = \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_{cut} \cdot a^{res} dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_{cut}^2 dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} a^{res2} dt}} \quad (2)$$

びびり振動の発生原理より、一般にびびり振動は共振周波数より高い周波数で発生する。1 慣性系であれば共振周波数より高周波側での相関係数の関係は $r_{F_{cut}x} < r_{F_{cut}a}$ となる。これより、加工中の相関係数を監視することができれば $r_{F_{cut}x} < r_{F_{cut}a}$ となる瞬間にびびり振動を検知できると考えた。相関係数を移動平均アルゴリズムに基づいてサーボ周期ごとに低計算負荷で算出することで、びびり振動の実時間検知を実現する。

3. モード分解を応用したセンサレス切削力推定手法

一般的な工作機械の駆動方式であるボールねじ送り駆動は、回転系と直動系からなる2慣性系でモデル化される。しかし、前述したびびり振動検知指標は、1 慣性系を対象とした検知技術である。そこで本研究では、煩雑さを避けるために、2 慣性系でモデル

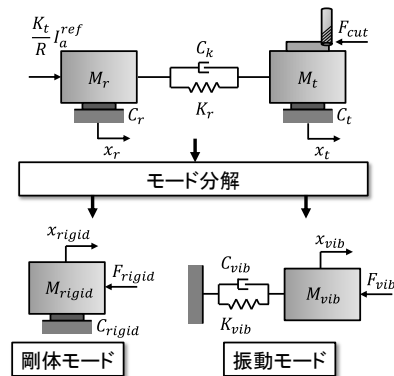


図1 2 慣性モデルのモード分解

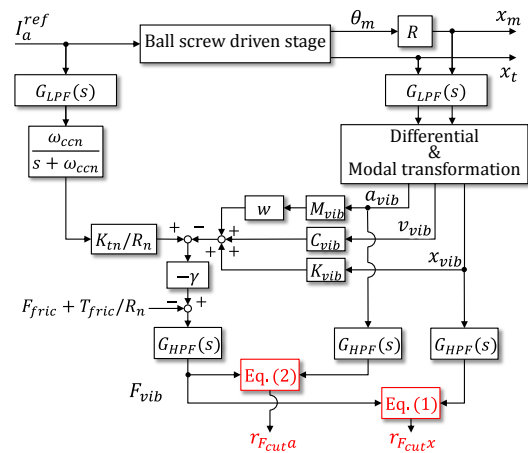


図2 びびり振動検知のアルゴリズム

化されるフルクローズドループ制御方式のボールねじ送り駆動ステージを、モード分解により等価1 慣性系の剛体モード・振動モードに分解する。特に、びびり振動モデルに則した振動モード空間に外乱推定理論を応用する²⁾ことで、等価1 慣性系内での相関監視システムを構築した。図1にモード分解の概要図を示す。また、振動モード空間における位置 x_{vib} と推定切削力 F_{vib} の導出式を以下に示す。

$$x_{vib} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} (R\theta_m - x_t) \quad (3)$$

$$F_{vib} = \alpha \left(\frac{K_t I_a^{ref}}{R} - w M_{vib} a_{vib} - C_{vib} v_{vib} - K_{vib} x_{vib} \right) \quad (4)$$

ここで、 α は慣性比、 K_t はトルク定数、 R は直動-回転換算係数、

$M_{vib}, C_{vib}, K_{vib}$ は振動モードにおける各モジュールパラメータである。 F_{vib} を導出する際、モデル化誤差に伴う慣性力の過大な推定を補正するためにスケーリングファクタ w を導入した。速度 v_{vib} と加速度 a_{vib} は式(3)の数値微分によって推定できるため、フルロード制御方式の工作機械では、モータ電流参照値 I_a^{ref} 、モータ角度 θ_m 、ステージ位置 x_t の3つの内部情報から、式(1)-(4)を用いてびびり振動を検知できる。提案システムを図2に示す。ここで $I_a^{ref} \cdot \theta_m \cdot x_t$ にはノイズ対策のローパスフィルタ G_{LPF} と直流成分除去のハイパスフィルタ G_{HPF} を適用している。

4. 実験装置および実験方法

本研究で使用する実験装置を図3に示す。各軸にはリニアエンコーダと23bitロータリエンコーダが搭載され、フルロード制御される。びびり振動判定のためXステージ上に水晶圧電式の切削動力計を設置した。実験条件を表1に示す。本研究では、加工途中でびびり振動が発生するように、傾斜被削材を用いて加工中に軸方向切り込み量を増大させ、提案手法の評価を行った。

5. 実験結果

図4(a)に切削動力計で測定したX軸方向の切削力の時間波形を、図4(b)にその短時間フーリエ変換の結果を示す。これらの結果より、5.5秒～9.2秒にかけて1787Hzのびびり振動が発生し、切削力の振動振幅が大きくなっていることが確認できる。しかし、一般に時間波形のピーク値はばらつきが大きく、加工条件によっても変化することから最適な閾値を決めるのは容易でない。また、フーリエ変換などの周波数解析は計算負荷が大きく実時間での計算に適さない。図4(c)に振動モード空間における切削力間一位置、切削力-加速度間の相関監視結果を示す。びびり振動が発生している領域で $r_{F_{cut}x}$ と $r_{F_{cut}a}$ の値が急峻に入れ替わり、 $r_{F_{cut}x} < r_{F_{cut}a}$ となっていることが分かる。よって、提案手法によって外部センサや事前の閾値の検討無しに、簡易なアルゴリズムに基づいてびびり振動を実時間検知できることが示された。

6. 結論

本研究では、切削力-位置・加速度間の相互相関に基づくびびり振動検知手法を提案した。ボールねじ送り駆動系の2慣性モデルからモード分解により導出した振動モード空間上で相関監視することで、外部センサや事前の閾値の検討無しに簡易なアルゴリズムから、加工途中で発生するびびり振動の検知が可能である。

参考文献

- [1] Shamoto E. Mechanism and Suppression of Chatter Vibrations in Cutting. Denki Seikou, Vol.82, No.2, 2011, pp 143-155.
- [2] Y. Yamada, Y. Kakinuma. Sensorless cutting force estimation for full-closed controlled ball-screw-driven stage. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.87, No.9, 2016, pp 3337-3348.

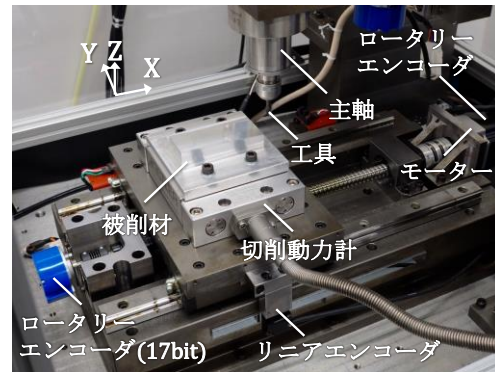


図3 門型3軸加工機

表1 実験条件

主軸回転数	8000 mm ⁻¹
軸方向切り込み深さ	0 ~ 6.1 mm
半径方向切り込み深さ	1 mm
送り速度・方向	0.030 mm/tooth (Y軸)
加工種類	アップカット
工具	エンドミル(2枚刃, φ4.0 mm)
被削材	A5052
サンプリング周波数	10 kHz
計算窓幅	100 μs
LPF カットオフ周波数	2000 Hz 4次バターワース
HPF カットオフ周波数	20 Hz 4次バターワース

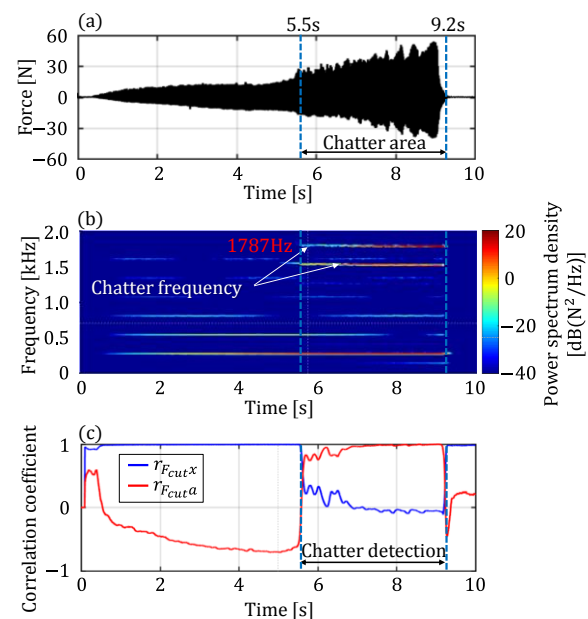


図4 実験結果 (a)切削力の時間波形 (b)切削力の短時間フーリエ変換 (c)相関監視に基づくびびり振動検知指標