

モード分解を応用したボールねじ送り駆動系における センサレスびびり振動検知手法の開発

慶應義塾大学 ○杉山晃洋, ©柿沼康弘

要旨

本研究ではフルロード制御のボールねじ送り駆動ステージを対象に、サーボ情報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。ボールねじ送り駆動ステージの2慣性モデルから固有値解析に基づくモード分解により1慣性系の振動モード空間を導出するとともに、振動モード空間上で力率理論を応用して切削力-変位間の位相差監視を行った。エンドミル試験を通じ、提案手法により自励びびり振動が検知できることを確認した。

1. 緒論

近年、生産性の更なる向上や工場の省人化・自動化を目的として工作機械の知能化技術の研究が盛んに行われており、異常加工の1種であるびびり振動の検知・回避手法が数多く提案されてきた。しかし、高コスト化や信頼性の低下などの問題から、外部センサを利用した検知・回避手法が実用化に至る例は少ない。また、閾値設定が加工条件に依存する場合、条件変更のたびに膨大な試し加工を行う必要が生じ、生産性を大きく低下させる。

本研究では、ボールねじ送り駆動ステージを対象に、切削力-変位間の位相差を監視するメカニカルエネルギーファクタ(MEF)を指標とした、サーボ情報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. 力率理論を応用したびびり振動検知手法

MEFは交流回路における電力効率を表すパワーファクタ(PF)を機械系に応用した^[1]もので、切削力 F_{cut} [N]と変位 x^{res} [m]間の位相差 θ [rad]を表す指標として式(1)で定義される。

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

突切り加工における自励びびり振動は共振点より高い周波数帯で発生し、発生時の切削力-変位間の位相差は $-\pi < \theta < -\pi/2$ の範囲にある。そのため、加工中の位相差を監視することで、 $MEF < 0$ となる瞬間に自励びびり振動の検知が可能であると考えられる。MEFは移動平均と同様の計算アルゴリズムによって算出されるため周波数解析などに比べて低計算負荷であることに加えて、位相差に基づく指標のため振動の大きさによらない一意な閾値設定が可能であるという特長を持つ。

3. モード分解を応用したセンサレス切削力推定手法

ボールねじ送り駆動系は、回転系と直動系からなる2慣性系としてモデル化することが多い。しかし、2慣性系は1慣性系に比べて位相特性が複雑になり、MEFの定式化が困難である。そこで本研究では、固有値解析に基づくことで独立なモードに分解できることを考慮し、2慣性モデルを互いに独立な等価1慣性系である剛体モードと振動モードに分解し、びびり振動モデルに則した振動モード空間上で解析を行う。Fig.1にモード分解のモデル図を示す。振動モード空間上でマルチエンコーダ型外乱オブザーバ^[2]を応用することで、センサレスに切削力を推定できる。Fig.2にびびり振動検知システムのブロック線図を示す。

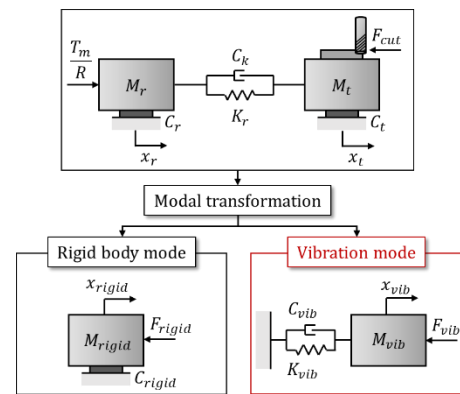


Fig.1 Mode decoupling of two inertia model

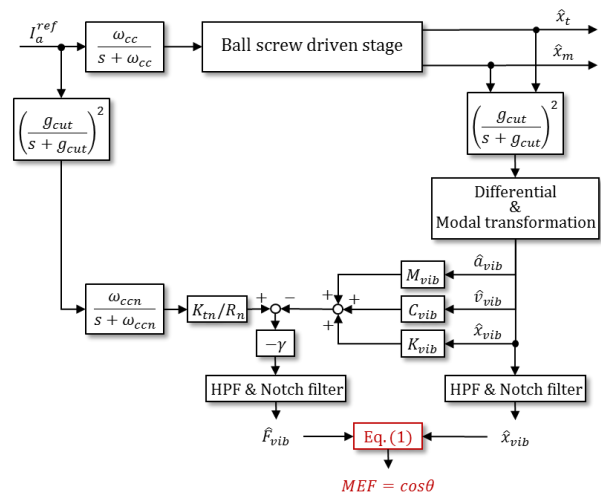
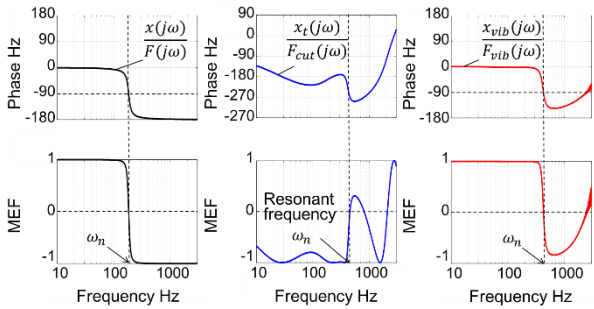


Fig.2 Block diagram of MEF monitoring system

4. シミュレーションによるモード分解の評価

パラメータの同定誤差や位置/角度計測時の量子化誤差、摩擦が無視できる理想状態において、2慣性系としてモデル化したボールねじ送り駆動系に対して正弦波状の外乱を与え、周波数を1 Hzから3000 Hzまで掃引するシミュレーションを行い、切削力-変位間の位相差とMEFの周波数特性を求めた。1慣性系のパネマスタダンパモデルにおける力-変位間の理論的な周波数特性と、シミュレーションによって求めた通常の2慣性系の外乱オブザーバによる推定切削力とテーブル変位間の周波数特性、振動モード空間上の切削力-変位間の周波数特性をそれぞれFig.3に示す。



(a) One inertia model (b) Two inertia model (c) Vibration mode
Fig.3 Frequency characteristics between force and difference

Fig.3(b)より、2 慣性系の周波数特性は複雑で極値が複数存在し、閾値設定が困難であることが分かる。これに対して Fig.3(c)より、振動モード空間における周波数特性は 1 慣性系と類似しており、同様の簡潔な閾値設定が可能である。

5. びびり振動検知実験

使用した 3 軸加工機を Fig.4 に示す。比較のため、力センサとして 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 Table1 に示す。びびり振動に対する安定性が連続的に変化するよう、加工中に軸方向切り込み深さを増大させる切削試験を行い、提案手法の有効性を評価した。切削力の直流成分やトルクリプルによる推定切削力の低周波振動を除去するため、ハイパスフィルタを用いた。また、ノッチフィルタにより切削力の第 5 高調波成分まで除去した。切削力実測値のスペクトログラムを Fig.5 に、通常の 2 慣性系の外乱オブザーバによる推定切削力とテーブル変位間の位相差から算出した MEF と、振動モード空間における MEF の解析結果を Fig.6 に示す。

Fig.5 より、4.6 秒付近からびびり振動が発生していることが確認できる。Fig.6(a)より、2 慣性系における MEF は安定切削時に 0 付近、びびり振動発生時に僅かに正の値をとることが分かるが、変化が小さく検知が困難である。これに対して Fig.6(b)より、振動モード空間における MEF はびびり振動発生時に正から負の値に大きく変化していることが分かり、振動モード空間上で MEF を用いることで自励びびり振動を検知可能であることが示された。

6. 結論

本研究では、ボールねじ送り駆動系におけるセンサレスなびびり振動検知手法の開発を目的として、カー変位間の位相差監視を行うメカニカルエネルギーファクタ(MEF)をびびり振動検知指標として導入した。MEF はサーボ情報に基づくセンサレスな指標で、低計算負荷かつ位相差に基づく一意な閾値設定が可能である。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 MEF を監視することで、自励びびり振動の検知が可能であることを切削試験により確認した。

参考文献

[1] T. Mizoguchi, T. Nozaki, K. Ohnishi. The power factor in mechanical system. IEEE International Conference on Mechatronics, 2013, pp. 576-581.
[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.

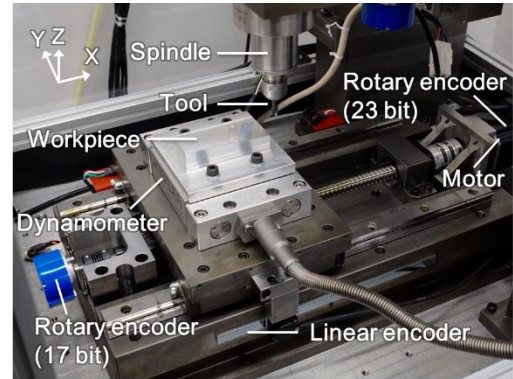


Fig.4 Experimental setup

Table1 Experimental condition	
Tool	Square end mill (2 tooth, φ4.0 mm)
Workpiece	A5052
Feed rate (X-direction)	12 mm/s
Axial depth of cut	0.0~5.4 mm
Radial depth of cut	1.0 mm
Spindle rotation speed	12000 min ⁻¹
Sampling time	10 kHz
Calculation window length	60 ms
Cutoff frequency of LPF	2000 Hz
Cutoff frequency of HPF	50 Hz

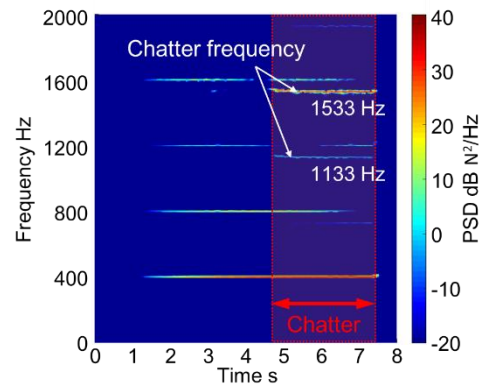
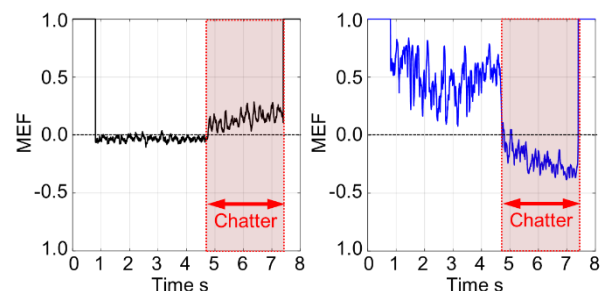


Fig.5 Spectrogram of measured cutting force



(a) Two inertia model (b) Vibration mode

Fig.6 Monitoring result of MEF