

# メカニカルパワーファクタを用いたセンサレスびりり振動検知手法の開発

慶應義塾大学 ○大和駿太郎, ◎柿沼康弘

## 要旨

加工中に生じるびりり振動を検知するために、加速度センサ等の外部センサが利用されている。本研究では、サーボ情報から導出可能なメカニカルパワーファクタという新たな指標を導入し、センサレスでびりり振動を検知することを試みた。メカニカルパワーファクタは、切削力の送り分力とステージ速度の位相差を表し、これを監視することで、旋削加工におけるびりり振動を検知できることを確認した。

## 1. 結論

機械加工中に発生する異常加工に対応するために、工作機械の操作・監視は作業者の経験に頼っているのが現状である。そのため、近年生産プロセスの更なる能率化の要求により、異常加工を自律的に感知・回避する知能化工作機械の開発が盛んに進められている。特にびりり振動は突発的に発生し、生産性や加工精度の低下を招くため、外部センサを用いた検知手法が多く提案されてきた。しかし外部センサの使用は、高コスト化・故障率の増大・機械剛性の低下などの問題を招くため、実用化の例は少ない。

そこで本研究では、試作したリアモータ駆動の小型旋盤を用いて、サーボ情報のみでびりり振動を検知する手法の開発を目的とする。びりり振動を検知するために、切削力の送り分力とステージ速度の位相差を表すメカニカルパワーファクタを新たな加工状態の指標として提案し、旋削加工実験によって提案手法の有効性を評価した。

## 2. メカニカルパワーファクタを用いたびりり振動検知システム

パワーファクタ（力率）は、交流回路中の電力効率を表す指標である。電力効率は回路中の電圧と電流の実行値及び積の時間平均から求められ、 $\cos\varphi$ で表される。このとき、 $\varphi$  [rad]は力率角と呼ばれ、負荷における電圧と電流の位相差を示している。この力率角の考えを機械系に応用し、機械系における外乱 $F_{load}$  [N]と速度 $v^{res}$  [m/s]の位相差 $\theta$  [rad]を表すメカニカルパワーファクタ(MPF)が提案された<sup>[1]</sup>。その導出式を(1)式に示す。ただし、 $T$ は1回のMPF計算に用いるデータの時間窓幅を示している

$$MPF = \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v^{res} \cdot F_{load} dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v^{res2} dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_{load}^2 dt}} = \cos\theta \quad (1)$$

機械加工において、外乱は加工中に発生する切削力に相当する。びりり振動の発生原理から、びりり振動発生時には切削力とステージ速度の位相差 $\theta$ が0に近づく。よって加工中にMPFを監視し、MPFが1に近づく瞬間を捉えることでびりり振動を検知できると考えた。Fig.1にびりり振動検知システムのブロック線図を示す。本研究では、MPFの算出に必要な力情報として、外乱オブザーバ(DOB)から推定される推定外乱 $\hat{F}_{dis}$  [N]を用いた。DOBによって、モータへの電流参照値 $I_a$  [A]と位置応答値 $x^{res}$  [m]から系に加わる外乱 $F_{dis}$  [N]を推定できる<sup>[2]</sup>。またステージ速度情報は、エンコーダからの位置応答値を擬似微分した $\hat{v}_{comp}^{res}$  [m/s]を使用した。ただし、速度側にローパスフィルタを挿入することで、力情報との遅れを補償している。さらに、(1)式において直流成分は不要となるのでハイパスフィルタ(HPF)を導入した。

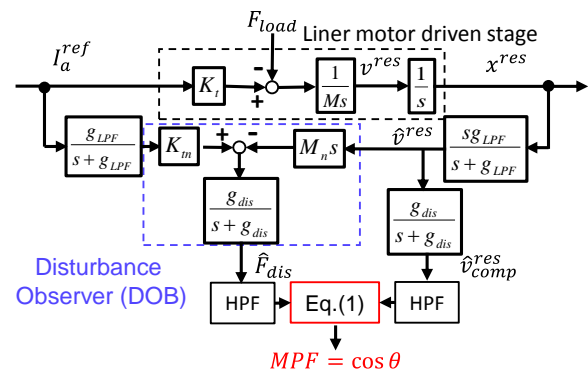


Fig.1 Block diagram of MPF monitoring system

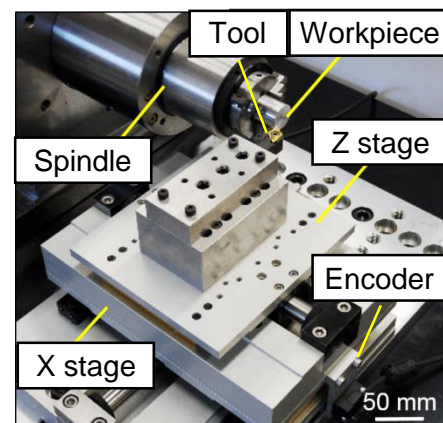


Fig.2 Prototype precision turning machine

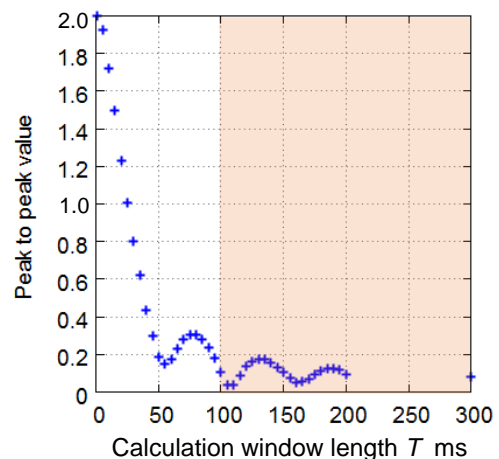


Fig.3 Result of evaluation of calculation window length  $T$

### 3. 実験装置

本研究で使用する高精密旋盤試作機を Fig.2 に示した. 主軸には空気静圧軸受けのワークスピンドルを使用し, ステージはシャフトタイプのリニアモータと転がり案内によって XZ 方向に駆動される. また XZ ステージそれぞれに位置計測分解能が 10 nm のリニアエンコーダを搭載している.

本装置を用いて, 提案手法のびびり振動検知の有効性を評価した.

### 4. 実験方法及び結果

#### 4. 1 MPF 逐次計算における計算窓幅 $T$ [s] の評価

MPF を逐次計算するために, (1)式における計算窓幅  $T$  [s] を決定する必要がある.  $T$  [s] が MPF 逐次計算に与える影響を加振実験によって調べた. 力と速度の位相差は系に入力される周波数によって決定されるため, 単一の周波数が入力された場合 MPF は 1 つの値を示す. しかし, MPF を逐次計算する場合, 計算ごとに MPF の値は変動する. そこで, XZ ステージの Z 方向に加振器から 10 Hz の正弦波外乱を 5 秒間入力し, 窓幅を変えて MPF を逐次計算した際の, 各窓幅における計算値の変動を p-p 値によって評価した. その結果を Fig.3 に示す.

Fig.3 より計算窓幅が 100 ms 以上のとき, p-p 値は 0.2 以下の値を示しており, 逐次計算ごとの変動が小さいことがわかる. ここで, 100 ms は振動周波数 10 Hz の 1 周期分に相当しており, 機械に入力される振動に対して 1 周期分以上の計算窓幅を設定しなければならない.

#### 4. 2 びびり振動検知実験

半径方向切込みを加工中に増大させる外周旋削を行い, 加工途中で発生するびびり振動を提案手法により検知できるか評価した. 旋削実験の加工条件を Table1, MPF の計測条件を Table2 に示した. 旋削加工においては, スピンドル回転周波数に応じた切削力が外乱として機械に入力されるため, Fig.3 の結果に基づき, スピンドル回転数 1 周期分の 60 ms を計算窓幅とした.

加工後の表面と表面の粗さ曲線の結果を Fig. 4 に示した. 切込み深さを増大していくと, 15 秒付近からびびり振動が発生し, 粗さ曲線は大きく変動し, 表面品位も悪化している. ここで安定切削時(12秒付近)とびびり振動発生時(25秒付近)での力と速度の波形を Fig.5, 加工時の MPF の解析結果を Fig. 6 に示した. Fig.5 より, 安定切削時には速度と力の位相差が存在するのに対して, びびり振動発生時には位相差が 0 に近づいていることがわかる. びびり振動発生時に生じる急激な位相差の変化に応じて MPF が瞬時に 1 に近づいており, 提案手法によるびびり振動検知の有効性が示された.

### 5. 結論

本研究では, 力と速度の位相差を表す MPF を, びびり振動検知の新たな指標として導入し, サーボ情報のみから旋削におけるセンサレスびびり振動を検知する手法を提案した. 提案手法の有効性を外周旋削加工によって評価した結果, びびり振動発生時に MPF が瞬時に 1 に近づくことを確認した. MPF を用いたびびり振動検知の有効性を明らかにした.

### 参考文献

- [1] T. Mizoguchi, T. Nozaki, K. Ohnishi: The Power Factor in Mechanical System, IEEE International Conference on Mechatronics, (2013) 576.
- [2] 大西公平: 外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール, 日本ロボット学会誌, 11, 4 (1993) 486

Table1 Turning condition

Cutting tool	Carbide
Workpiece	A5052 ( $\varnothing 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ )
Feed rate (Z-direction)	36.0 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Work spindle rotation	1000 $\text{min}^{-1}$
Depth of cut	150 – 175 $\mu\text{m}$

Table2 Measurement condition of MPF

Control sampling time	80 $\mu\text{s}$
Calculation window length $T$	60 ms
Cutoff frequency of Pseudo-differential	1000 rad/s
Cutoff frequency of DOB	1000 rad/s

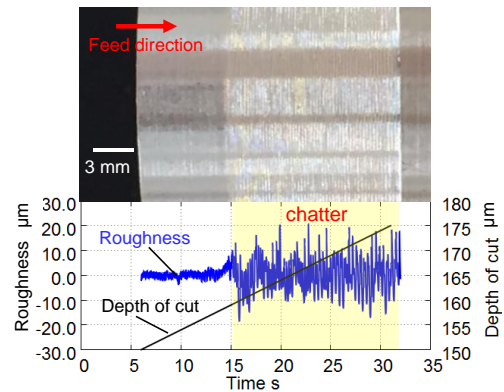
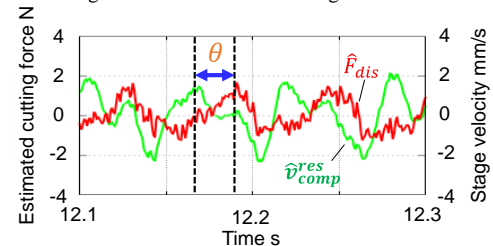
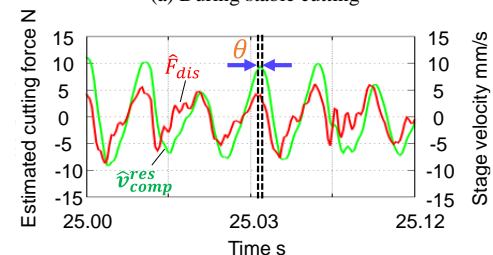


Fig.4 Machined surface & roughness curve



(a) During stable cutting



(b) During chatter vibration

Fig.5 Behavior of estimated cutting force and stage velocity

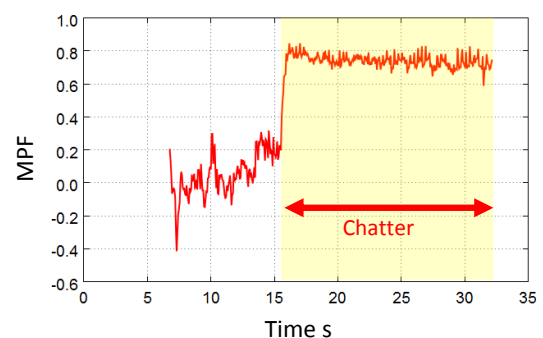


Fig6. Monitoring result of MPF during turning