

ミリングプロセスモデルの高速高精度パラメータ同定手法の検討

名古屋大学 ○三輪智, ◎鈴木教和, 社本英二 三菱電機 高幣一樹

要 旨

切削プロセスの最適化には、機械構造ダイナミクスと切削プロセスの相互作用を考慮したシミュレーション解析が必須である。それには数多くのモデルパラメータが必要になるが、これらの同定は容易ではない。本研究では、加工中に計測可能なプロセス情報に対して最小二乗法を適用することで、モデルパラメータを高速高精度で同定する新手法を提案する。最小二乗法のための定式化と同定手順を示すとともに、その実現可能性を検証する。

1. 緒言

切削加工において高能率、高精度な加工を実現するには、機械構造の伝達特性や加工プロセスに応じて適切な加工条件を選択する必要がある。機械構造ダイナミクスと加工プロセスの特性は、インパルス応答試験や切削実験から得られるデータを分析することで取得することができる。これらのデータに基づき、モデルベースシミュレーションを実施することで、最適化計算などを実施することができる。一方で、これには精度の高い計算モデルと、これに用いるパラメータの高精度同定が必要となる。ソフトウェア技術の向上に伴い、高度なモデルを用いたプロセス推定技術が普及しており、これが実装された市販ソフトをプロセス最適化に活用する生産現場が増加している。一方で、モデルに用いるパラメータの同定技術は確立しておらず、これが精度低下を招く問題が顕在化している。これに対し著者は、加工中に計測可能なプロセス情報を利用して推定可能な外乱力を利用し、モデルに用いるパラメータを同定する手法を提案している^{1,2)}。モデルの複雑性から探索的にパラメータを同定するため、精度と高速性に課題がある。そこで本研究では、最小二乗法により高速高精度で同定する手法を提案する³⁾。シミュレーション実験により得られた切削力を参照データとして提案手法によりパラメータ同定を行い、その実現可能性を検証する。

2. 機械構造ダイナミクスと切削プロセスのモデル化

本研究で対象とする CNC 工作機械とスクエアエンドミルによるミリングプロセスの模式図を図 1 に示す。テーブルに固定されている低剛性構造物の先端に切削力 F_c が作用し、低剛性構造物の伝達系を介して外乱力 F_d が作用する。ここで、モード方向の運動方程式を考える。簡単のため工具の剛性は十分に高く、低剛性構造物の 1 次モードのみを考慮すればよいと仮定する。低剛性構造物のモード方向変位を u_1 、テーブルのモード方向変位を u_2 とする。モード方向の時間別切削力成分 F_{cm} と外乱力成分 F_{dm} は、モードパラメータ m, ζ, ω_n を用いて次式で表すことができる。

$$F_{cm} = m\ddot{u}_1 + 2m\zeta\omega_n(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + m\omega_n^2(u_1 - u_2) \quad (1)$$

$$F_{dm} = 2m\zeta\omega_n(\dot{u}_1 - \dot{u}_2) + m\omega_n^2(u_1 - u_2) \quad (2)$$

また式(2)において、微分行列 $[D]$ を用いて $\dot{u}_1 - \dot{u}_2 = [D](u_1 - u_2)$ と表す。変位 u_1 は近似して式(3)で得られる。

$$u_1 = \frac{1}{m\omega_n^2} \left([I] - \frac{2\zeta}{\omega_n} [D] \right) F_{dm} + u_2 \quad (3)$$

$[I]$ は単位行列である。すなわち、外乱と運動方程式から構造物の振動変位を近似して推定することができる。

次に、切削プロセスのモデル化を行う。切削力の推定には、切りくず生成に寄与する成分(比切削抵抗)と、エッジフォース成分を考慮する。軸方向に切れ刃を離散分割し、微小要素の切削力の総和をとることによって、エンドミル全体に作用する切削力を求める。式(4)に微小要素における切削力 f_c を示す。

$$f_c = \begin{bmatrix} f_{ct} \\ f_{cr} \end{bmatrix} = \Delta a \left(\begin{bmatrix} K_{ct} \\ k_{cr} K_{ct} \end{bmatrix} h + \begin{bmatrix} K_{et} \\ K_{er} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

$[f_{ct} \ f_{cr}]^T$, $[K_{ct} \ k_{cr} K_{ct}]^T$, $[K_{et} \ K_{er}]^T$ はそれぞれ接線方向および径方向の切削力, 比切削抵抗, エッジフォース係数を表す。また Δa , h はそれぞれ微小切削幅と微小領域における切り厚さである。切り厚さ h は、工具回転角 ϕ と一刃あたりの送り量 f_d , および工具偏心量から幾何学的に求めることができる成分と、機械構造の変位 u_1 によって変動するびりり振動成分の和で表すことができる。ここでは、式(5)に示す切り厚さの計算式を用いる。

$$h = f_d \sin \phi + \Delta h_{ecc} + \sin \phi \{x(t) - x(t - T)\} + \cos \phi \{y(t) - y(t - T)\} \quad (5)$$

ここで T は切れ刃通過周期である。また Δh_{ecc} は偏心による切り取り厚さ変動分であり、 j 番目の切れ刃の影響を次式でモデル化する。

$$\Delta h_{ecc} = \Delta x (\sin \phi_j - \sin \phi_{j-1}) + \Delta y (\cos \phi_j - \cos \phi_{j-1}) \quad (6)$$

なお、 Δx , Δy は工具座標系における偏心量の各軸方向成分である。

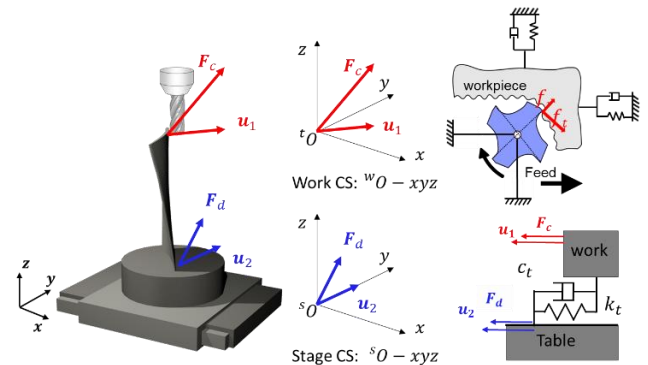


Fig. 1 Schematics of milling process and structural dynamics system.

3. モデルパラメータの同定手法

2 節で示したモデルに基づき、最小二乗法を用いて外乱力データから各パラメータの同定を行う提案手法について説明する。式(1)および式(2)より外乱力 F_d は切削力 F_c とびりり振動の周波数成分をもつ慣性力 $m\ddot{u}_1$ との差で表せる。切削力 F_c は、主軸回転周波数および切れ刃通過周波数に同期する成分と、これに同期しないびりり振動成分に分離することができる。一般に、前者に対して後者は周波数が高いことが多い。慣性力は振動加速度に比例するため、びりり振動が生じたときに大きくなると考える。そこで、外乱力をローパスフィルタで処理することで、びりり振動の影響を取り除いた切削力成分のみを取り出すことができると仮定する。

ローパスフィルタによりびりり成分を取り除いた外乱力成分を F_{dl} とすると、比切削抵抗, エッジフォース係数, 偏心量による関

数として、次のように近似して表すことができる。

$$\mathbf{F}_{dl} = [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \mathbf{A}_3 \quad \mathbf{A}_4 \quad \mathbf{A}_5] \begin{bmatrix} K_{ct} \\ K_{ct}\Delta x \\ K_{ct}\Delta y \\ K_{et} \\ K_{er} \end{bmatrix} \quad (7)$$

すなわち、インプロセスデータから推定可能な外乱力 \mathbf{F}_{dl} と、モデルベースにより算出可能な行列 $[\mathbf{A}]$ から、最小二乗法により切削プロセスモデルに用いるパラメータを同定することができる。

次に、 \mathbf{F}_d から \mathbf{F}_{dl} を取り除いた成分を \mathbf{F}_{dH} とする。 \mathbf{F}_{dH} は切削力のびり成分と慣性力の差である。このため、各プロセスを前述のモデルにより定式化し、次式で示す関係式が得られる。

$$\mathbf{F}_{dH} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2] \begin{bmatrix} 1 \\ \omega_n^2 \\ 2\zeta \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$[\mathbf{B}]$ は再生効果を含む加工プロセスモデルと運動方程式により定式化することができる。これにより、モーダルパラメータを同定することができる。詳細は省略するが、これらの定式化に基づき2段階で各種パラメータの同定を実施する。

4. シミュレーション実験による提案手法の検証

2節で示したモデルを用いて時間領域シミュレーションを行い、得られた外乱力を参照データとして、提案手法によりパラメータ同定を行った。主な加工条件を表1に示す。 x 方向の剛性が y 方向よりも十分高くなるようにして、 y 方向の1次モードのみがびりに影響するよう設定した。また、2枚刃エンドミルでは偏心を2方向で同定するのは難しいため、1方向(x 方向)のみを考慮した。

まず、ローパスフィルタ(LPF)によって外乱力 \mathbf{F}_d からびりの影響を取り除いた切削力成分 \mathbf{F}_{dl} のみを抽出した。 y 方向の共振周波数は400 Hzであり、切れ刃通過周波数は100 Hzである。ここでは、120 Hzを閾値とするローパスフィルタ(LPF)を用いた。図2に外乱力 \mathbf{F}_d および \mathbf{F}_{dl} を示す。びり振動により振動が増加するが、LPFによりびり成分を除去できていることが分かる。

次に、式(7)を用いてモデルパラメータの同定を実施した。同定結果を用いて加工モデルと運動方程式から推定した理論外乱力と、 \mathbf{F}_{dl} の比較を図3に示す。それぞれよく一致していることが分かる。さらに、式(8)を用いてモーダルパラメータを同定した。同定パラメータを用いて推定した各状態量と、参照データの比較を図4に示す。推定状態量の変化がよく一致していることが分かる。

表2に、参照データ作成に用いたパラメータと、提案手法による同定結果を比較する。提案手法により概ね精度よく推定できたことが分かる。提案手法に要する計算時間は5.3secであり、従来手法¹⁾の713 secと比較して大幅な高速化を実現した。なお、同定精度の低いパラメータもみられる。これらは、同定計算における近似の影響が大きいと考える。また、適切に同定するには、関係式のランクを十分に満たすように工夫が必要である。

5. 結言

工作機械のインプロセスデータから推定可能な外乱力を利用し、機械構造ダイナミクスと切削プロセスのモデルパラメータを同定する新しい手法を提案した。最小二乗法を利用することで、高速化と高精度化を両立することができる。シミュレーション実験を通じて、提案手法により概ね精度よくパラメータを同定することに成功した。また、解析時間を大幅に短縮し得ることを確認した。

Table 1 Input cutting conditions.

Tool diameter	20 mm	Spindle Speed	3000 min ⁻¹
Number of flutes	2	Cut style	Slotting
Axial depth of cut	4 mm	Sampling freq.	10 kHz
Radial depth of cut	20 mm	Feed per tooth	0.1 mm

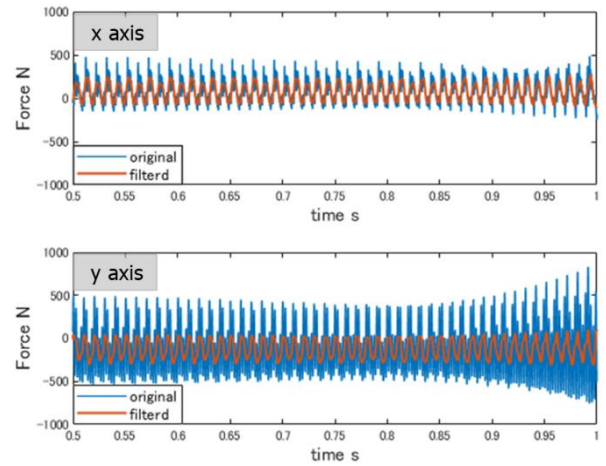


Fig. 2 Reference disturbance forces and ones processed by LPF

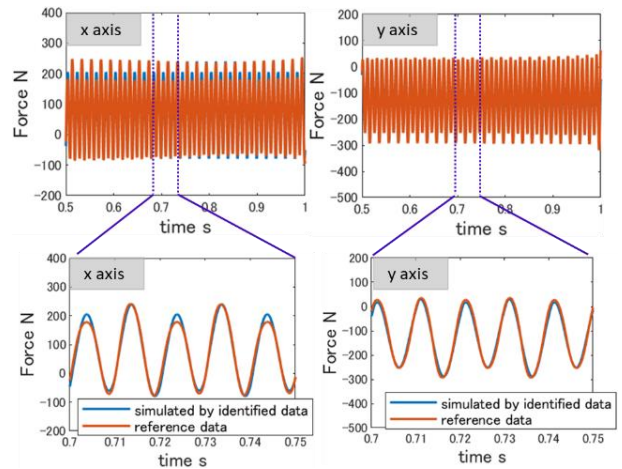


Fig. 3 Estimated disturbance forces without chatter vibration

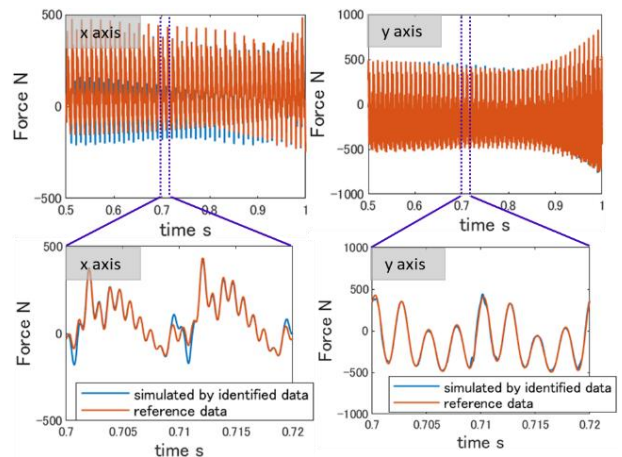


Fig. 4 Estimated disturbance forces with chatter vibration

Table 2 Original and identified parameters

	Original	Identified
K_{ct}	1.25 GPa	1.21 GPa
K_{cr}	0.600	0.597
Δx	20 μm	14.8 μm
K_{et}	100 N/m	1570 N/m
K_{er}	500 N/m	1580 N/m
m_y	1.28 kg	1.32 kg
ω_{ny}	400 Hz	399 Hz
ζ_y	0.0385	0.0473

参考文献

- 1) K. Takahei, et al., Proc. 9th Int. Conf. LEM21 (2017)
- 2) 大野彰也, 他, 2017年度精密工学会秋季大会論文集, 2017, 59-60
- 3) K. Takahei, et al., Proc. 15th Int. Conf. HSM (HSM2019)