

有限振幅のびびり振動を考慮した エンドミル加工プロセスの時間領域シミュレーション

名古屋大学 ○林宏樹, ©鈴木教和, 社本英二, 入野成弘, 今別府泰宏

要旨

切削加工において生じる有限振幅の振動の影響を考慮した時間領域シミュレーション技術を開発した。びびり振動を伴う加工現象の解析では、推定精度の低さが問題となっている。本研究では、有限振幅の影響で生じる非線形な切り厚変動や、工具逃げ面の接触によるプロセスダンピングを考慮可能なモデルをシミュレータに実装した。さらに、時間領域シミュレーションの結果に基づく、仕上げ面の Zmap 推定ツールを開発した。エンドミルによるコーナー加工を対象とした検証実験により、びびり振動の高精度推定を実現した。

1. 緒言

昨今の生産技術に対する高度化の要求から、切削加工の分野においては高速高精度なシミュレーション技術が要求されている。切削加工のシミュレーションにおいては、機械構造の動的挙動の考慮が重要となる。強制振動などの定常的な現象を扱うシミュレーション技術では、概ね精度よく現象を再現し得ることが知られているが、びびり振動を伴う現象に対しては、その推定精度の低さが問題となっている。従来の多くの解析モデルにおいて、機械構造に生じる振動の有限振幅の影響を正確に考慮していないことが、実現象との乖離を生む原因の一つであると考えられる。実現象では、有限振幅振動の影響で生じる非線形な切り厚変動や、被削材と工具の逃げ面が接触することで、系の安定性が向上するプロセスダンピング現象が発現する。本研究では、有限の振動振幅を考慮することが可能な動的エンドミル加工プロセスの時間領域シミュレータの開発を行った。さらに、振動シミュレーションの結果に基づき仕上げ面形状を推定する Zmap シミュレータを開発した。びびり振動の問題が生じやすいコーナー部の加工を対象に、開発技術の検証を行った。

2. 有限の振動振幅を考慮した時間領域シミュレーション

本研究では、機械構造の変位を \mathbf{u} 、モーダルマトリクス $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ をとし、切削力における切りくず生成成分 \mathbf{F}_c 、エッジフォース成分 \mathbf{F}_e 、プロセスダンピング成分 \mathbf{F}_{pd} を用いて、運動方程式を次式で表す。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_{pd} \quad (1)$$

切れ刃の運動軌跡が見かけの切削方向となす角度を軌道角 ψ とし、これが逃げ角 γ を超えるとプロセスダンピング力が生じると考え、 $\psi > \gamma$ を維持している時間をプロセスダンピング時間 T_{pd} とする。プロセスダンピング力は逃げ面接触長さ l_n に比例するとし、 l_n は見かけの切削速度 v_c と時間に比例すると考える ($l_n = v_c T_{pd}$)。以上より、プロセスダンピング力 \mathbf{F}_{pd} を式(2)で表す。なお、 σ_s は圧縮強さ、 τ_s はせん断強さ、 \mathbf{e}_n は逃げ面単位法線ベクトル、 \mathbf{e}_t は逃げ面単位接線ベクトル、 a は軸方向切削幅である。

$$\mathbf{F}_{pd} = v_c T_{pd} \int (\sigma_s \mathbf{e}_n + \tau_s \mathbf{e}_t) da \quad (2)$$

次に切り厚モデルについて説明する。時刻 t における機械構造の変位 $\mathbf{u}(t)$ を考慮し、軸方向位置が l 番目で j 番目の切れ刃の切り厚さは、半径方向単位ベクトル \mathbf{e}_r と k 刃前の切れ刃通過時間 T_k を用いて、簡易的に次式で表される。ただし、切れ刃の回転角を $\varphi(t, j, l)$ で表す。 ξ は工具の接触を判別する関数である。

$$h(t, j, l) \approx \xi(\varphi(t, j, l)) (c \sin \varphi(t, j, l) + \mathbf{u}(t) \cdot \mathbf{e}_r - u_{pre})$$

$$u_{pre} = \max_{k \in \{1, 2, \dots, N_k\}} (\mathbf{u}(t - T_{k, j, l}) \cdot \mathbf{e}_r - (k - 1)c \sin \varphi(t, j)) \quad (3)$$

以上の定式化で求めた切り厚を用いて、再生効果を考慮した切削力成分 \mathbf{F}_c を算出することができる。また、プロセスダンピング力 \mathbf{F}_{pd} 、およびエッジフォース \mathbf{F}_e についても別途求めることにより、任意の時刻 t における瞬間的な切削力を求めることができる。式(1)で示す運動方程式から、振動変位 \mathbf{u} を求める。本研究では、4 次のルンゲクッタ法を用いて、時間領域シミュレーションを行う。

3. 任意形状の加工及びコーナー加工のシミュレーション開発

加工パスにコーナー部を含むエンドミル加工では、直線の切削パスに比べエンゲージ角 $\theta_{en} - \theta_{st}$ が大きくなるため、びびり振動が発生しやすいことが知られている。加工シミュレーションにおいては、そのエンゲージ範囲を求めることが極めて重要であり、本研究では、任意の2次元送りパスに対して、切削開始角度 θ_{st} と切削終了角度 θ_{en} を推定するシミュレーション技術を開発した。

提案手法では加工条件等に基づき、ワークの前加工面形状の離散化した点群 \mathbf{w} を設定する。また、工作機械のサーボ応答から工具中心の軌跡情報 \mathbf{p} を得る。ここで、ダウンカットを前提として考える。ある時刻 t_n のときの工具中心座標を \mathbf{p}_n とする。図1に示すように、 m 番目の前加工面離散点と工具中心座標間のベクトル $\mathbf{L}_m = \mathbf{w}_m - \mathbf{p}_n$ に関して、 $D/2 \leq |\mathbf{L}_{m-1}|$ かつ $D/2 > |\mathbf{L}_m|$ を満たす境界の座標を求める。すなわち、この回転角度で工具がワークに接触し始めると考え、次式により切削開始角度 θ_{st} を同定する。なお、 θ は x 軸負の方向から時計回りを正として定義する。

$$\theta_{st} = \pi - \tan^{-1} \frac{\mathbf{L}_m \cdot \mathbf{e}_y}{\mathbf{L}_m \cdot \mathbf{e}_x} \quad (4)$$

任意の時間 t_m での切削終了角度 θ_{en} は、サーボ応答における送り方向と垂直な方向であると仮定し、式(5)で表すことができる。ここで、送りベクトルを \mathbf{f}_n とする。

$$\theta_{en} = \frac{3}{2}\pi - \tan^{-1} \frac{\mathbf{f}_n \cdot \mathbf{e}_y}{\mathbf{f}_n \cdot \mathbf{e}_x} \quad (5)$$

以上より、任意の時間における切削開始角度と切削終了角度が導出され、任意加工形状に対応したシミュレーションが可能となる。なお、アップカットの場合は逆の計算をすればよい。

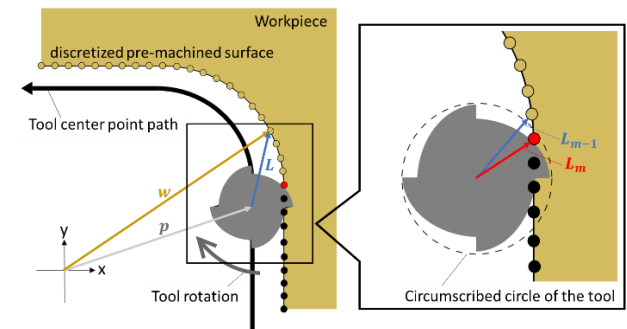
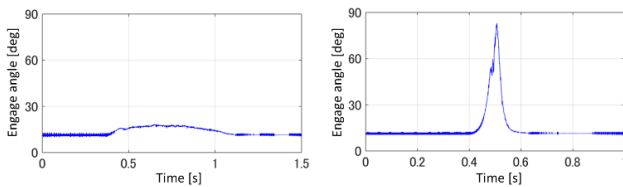


Fig. 1 Schematic illustration of engage angle identification

例として、 $\phi 10$ mm のエンドミルを用いて 90 度のコーナーを加工する場合のシミュレーションを行った。工具中心軌跡のコーナー半径を 5 mm および 0 mm とした場合のエンゲージ角変化のシミュレーション結果を図2に示す。コーナー半径 5 mm の場合はコーナー部で約 7 度増加するのに対し、0 mm の場合は約 70 度増加することが分かる。エンゲージ角の増加はびびり振動におけるゲイン増加を招くため、びびり振動の安定性が低下することを意味する。



Corner radius of 5 mm Corner radius of 0 mm
 Fig. 2 Calculation results of the engage angles $\theta_{en} - \theta_{st}$

4. 加工面シミュレータの開発

前述した時間領域シミュレーションを実行して得られる振動変位を用いて、加工面形状を Zmap 形式で推定する。図 3 に加工面推定手法の模式図を示す。まず、切削条件をもとに軸方向および送り方向に分割した前加工面形状 w を離散的に定義する。図 3 では送り方向 (x 方向) と切込み方向 (z 方向) を示している。次に、時間領域シミュレーションの結果をもとに、見かけの運動に振動を重畳して工具刃先の軌跡 $\{ {}^t x, {}^t z \}^T$ を描く。工具刃先が前加工面に切り込んだ状態で、連続する離散点 ${}^t x_p, {}^t x_{p-1}$ が加工面の離散点 ${}^s x_q$ を通過した際に高さ情報 ${}^s z_q$ を ${}^s z_q'$ に更新して加工面の再定義を行う。これを繰り返すことで、任意の座標上での切削後の加工面を推定する。なお、加工面の z 座標は式(6)に示すように内挿して求める。

$${}^s z_q' = \frac{{}^t z_p - {}^t z_{p-1}}{{}^t x_p - {}^t x_{p-1}} ({}^s x_q - {}^t x_{p-1}) + {}^t z_{p-1} \quad (6)$$

以上の方法で加工面を再定義する。これを全ての切れ刃について、切削開始から終了までの時間で計算することにより、任意の軸方向高さの断面において加工面を算出する。さらに、軸方向分割した全ての平面内での結果を合成することにより加工面形状を推定する。

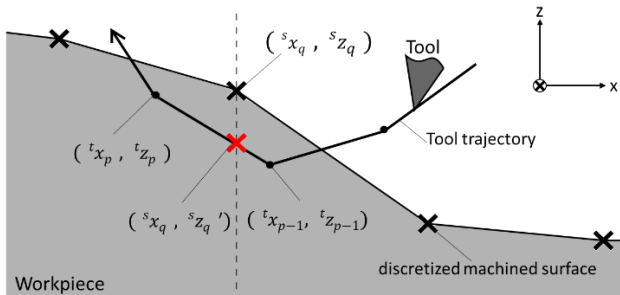


Fig.3 Schematic illustrations of machined surface and cutter trajectory

5. 実験検証および各種パラメータの同定

立形マシンングセンタ (DMG 森精機製 CMX 1100V) を用い、3 章で示したコーナー半径が異なる 2 条件 (0 mm, 5 mm) を対象にコーナー加工の検証実験を行った。主な切削条件を表 1 に示す。ここでは、実験中に計測されたサーボ応答に基づきエンゲージ角を算出しており、コーナー半径 0 mm の条件では、コーナー部でやや減速するものの、図 2 に示すように著しくエンゲージ角が増加する。コーナー半径 5 mm では減速は生じずに、エンゲージ角の増加も顕著ではない。

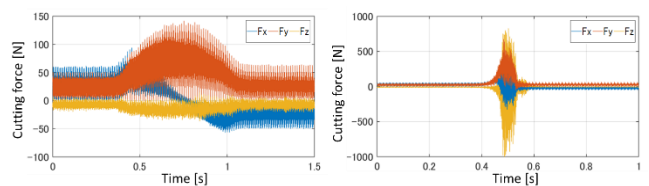
実験において計測された切削力と開発したシミュレータによる推定結果を図 4 に示す。実験結果から、コーナー半径 5 mm の条件において、コーナー部の加工の際に切削力の増加がわずかにみられるが、びびり振動は発生していない。一方、コーナー半径 0 mm の条件ではびびり振動が発生していることが分かる。シミュレーションにおいても同様の結果が得られており、プロセスの特徴が良く再現されている。なお、コーナー半径 5 mm の実験結果から比切削抵抗係数を同定してシミュレーションに用いた。また、モダルパラメータはインパルス応答法により求めた。

次に、加工後に計測された加工面形状と開発したシミュレータによる推定結果を図 5 に示す。ここでは工具偏心の影響についても考慮している。表面形状を比較すると、いずれの条件も概ね傾向が一致しており、コーナ

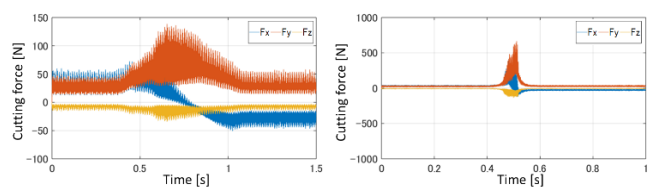
ー半径 0 mm の条件ではびびりマークが確認できる。以上の結果から、提案手法を用いることでエンゲージ角の変化に起因して生じるびびり振動の現象を精度よく推定し得ることを確認した。本シミュレーション技術は、加工面粗さだけでなく加工精度推定にも利用できると考える。

Table.1 Cutting conditions

Number of flutes	4
Diameter of end mill [mm]	φ10
Spindle rotational speed [min ⁻¹]	4800
Radial depth of cut [mm]	0.1
Axial depth of cut [mm]	10

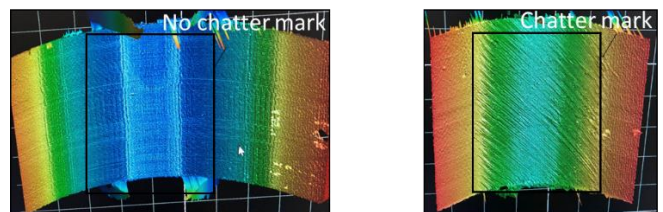


(a) Measured cutting forces at corner radii of 5 mm (left) and 0 mm (right)

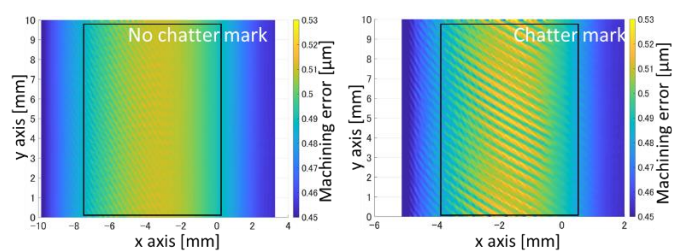


(b) Simulated cutting forces at corner radii of 5 mm (left) and 0 mm (right)

Fig.4 Comparison of measured and simulated cutting forces



(a) Measured cutting surfaces at corner radii of 5 mm (left) and 0 mm (right)



(b) Simulated cutting surfaces at corner radii of 5 mm (left) and 0 mm (right)

Fig.5 Comparison of measured and simulated cutting surfaces

6. 結言

プロセスダンピングや非線形な切取り厚さ変動をモデル化し、有限振幅のびびり振動を考慮したエンドミル加工プロセスの時間領域シミュレーション技術を開発した。さらに加工面シミュレータを開発し、びびり振動を伴う表面形状の推定を行った。コーナー加工を対象とした提案手法の検証実験を行い、切削力と表面形状を精度よく推定し得ることを確認した。

参考文献

1) 井桁秀徳ほか: 有限の振動変位を持つびびり振動を考慮した切削力モデルに関する基礎研究, 精密工学会秋季大会講演論文集 pp.377-378, (2016)