

5 軸ボールエンドミル加工の時間領域シミュレータの開発

名古屋大学 ○竹内裕也, ◎鈴木教和, DMG 森精機 入野成弘, 今別府泰宏

要 旨

切削加工の分野において、シミュレーションによる加工システム最適化技術の重要性が増している。これには、加工プロセスと機械構造ダイナミクスの相互作用を伴うびり現象の高精度推定技術が必要となる。本研究では、自由曲面加工に対応可能な5軸ボールエンドミル加工を対象とし、高精度時間領域シミュレーション技術を開発する。さらに、切込みと工具傾斜がびり安定性に与える影響を分析し、開発技術の妥当性を検証する。

1. 研究背景及び目的

金型や自由曲面を有する機械部品の加工において、ボールエンドミルによる切削加工は必要不可欠であり、5軸加工機の普及により5軸ボールエンドミル加工の需要が増加している。自由曲面加工においては、その加工条件変化の直感的な把握が容易ではないため、ツールパスデータに基づいた加工シミュレーションが、設定条件の妥当性評価に利用される。最近では加工能率改善の観点から、切削力やトルクを平滑化するように条件を最適化する技術が普及しつつある。一方で、5軸加工において工具や被削材の振動現象を正確に予測するシミュレーション技術は確立されていない。このため、びり振動が生じる場合には、治具の再設計などにより剛性を改善するか、経験に基づいて回転数や切削条件を修正するなどの対策がなされることが多い。これらの対策の多くは、加工能率の低下やコストの増加を引き起こして問題となる。5軸ボールエンドミル加工に適用可能なシミュレーション技術を確認することができれば、事前に最適条件を選択して効率化を図ることができる。特に、時間領域シミュレーションは非線形現象の考慮が容易であり、加工結果推定等への応用展開も期待できる。そこで、本研究では、高精度な時間領域シミュレーション技術を開発し、これを利用して加工特性を分析する。

2. 5軸ボールエンドミル切削プロセスのモデル化

加工シミュレーションにおいては、瞬間的な切れ刃の接触範囲を求める必要がある。グラフィック計算によってこの情報を求めることも多いが、ここでは加工条件と工具姿勢情報からパラメトリックに接触範囲を求める。まず、加工面法線と送り方向から定義される加工面座標系(Work CS: $O-x'y'z'$)と、工具軸方向から定義される工具座標系(Tool CS: $O-xyz$)を定義する。図1に示すように工具傾斜角(χ, ψ)によって座標変換は次のように表される。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

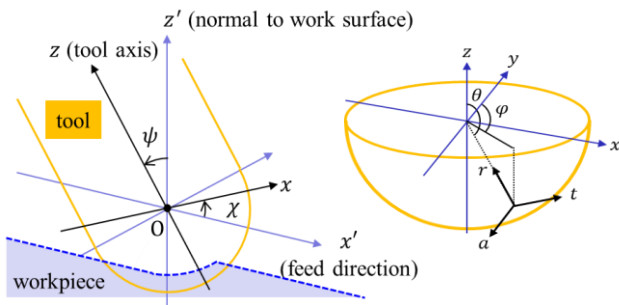


Fig. 1 Tool and workpiece coordinate systems

次に、加工領域や切れ刃位置について、ボール中心を原点とする極座標系を用いて定式化する。すなわち、各座標系においてボール面上の加工面極座標(θ', φ')と工具極座標(θ, φ)を定義する。

切削力モデルには、切削断面積に比例する単純なメカニスティックモデルを採用する。切削力推定においては、図2に示す切り取り厚さの推定が重要である。ここでは、構造のたわみや再生効果、非線形な切り取り厚さ変動の要因である多重再生効果等を考慮してモデル化する。 j 番目の切れ刃の θ 方向の e 番目の微小切れ刃について、時刻 t の切り取り厚さは加工面極座標(θ', φ')を用いて次式で表される。

$$h_{j,e}(\theta', \varphi', t) = ft \sin \theta' \sin \varphi' + \left((\mathbf{u}'_{t(t)} - \mathbf{u}'_{w(t)}) - \max \left((\mathbf{u}'_{t(t-nT)} - \mathbf{u}'_{w(t-nT)}) - (n-1)ft \sin \theta' \sin \varphi' \right) \right) \cdot \begin{pmatrix} \sin \theta' \sin \varphi' \\ \sin \theta' \cos \varphi' \\ \cos \theta' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sin \varphi_{j,e} - \sin \varphi_{j-1,e} \\ \cos \varphi_{j,e} - \cos \varphi_{j-1,e} \end{pmatrix} \cos \frac{e \pi}{N_e} \quad (2)$$

右辺の第一項が見かけの切り取り厚さ h_n であり、第二項が再生効果による切り取り厚さ変動の項である。また、第三項は工具の偏心による切り取り厚さ変動を示す。第二項において、多重再生効果により一刃以上前の軌跡が前加工面を創成している場合を考慮している。ただし、負の値が生じる場合はゼロに置き換える。

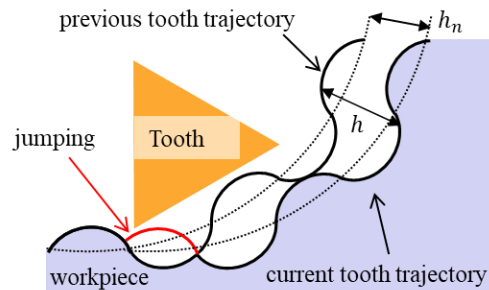


Fig. 2 Schematic of cutting process with chatter vibration

再生効果を考慮するため、運動方程式を用いて工具及び被削材の変位 \mathbf{u}_t および \mathbf{u}'_w を定式化する。工具座標系で導出した切削力 \mathbf{F} を用いて、被削材及び工具の運動方程式は次のように表される。

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{C}_t \dot{\mathbf{u}}_t + \mathbf{K}_t \mathbf{u}_t = -\mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_w \ddot{\mathbf{u}}'_w + \mathbf{C}_w \dot{\mathbf{u}}'_w + \mathbf{K}_w \mathbf{u}'_w = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \mathbf{F} \quad (4)$$

時間領域における微分方程式の解法としては、4次精度のルンゲ・クッタ法を用いる。また、切り取り厚さ変動に変換するために工具変位 \mathbf{u}_t を次式により加工面座標系に変換する。

$$\mathbf{u}'_t = \begin{pmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \mathbf{u}_t \quad (5)$$

切削力 \mathbf{F} は微小切れ刃が発生する微小切削力 $d\mathbf{F}$ の総和として次式

のように表される。

$$\mathbf{F} = \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{e=1}^{N_e} \begin{pmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$= \sum \begin{pmatrix} -\cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \\ 0 & -\cos \theta & -\sin \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dF_t \\ dF_a \\ dF_r \end{pmatrix}$$

各微小切れ刃が発生する切削力は、切削抵抗 \mathbf{K}_c 、切取り厚さ h 、エッジフォース係数 \mathbf{K}_e 、切削判定関数 D から次式で表される。

$$\begin{pmatrix} dF_t \\ dF_a \\ dF_r \end{pmatrix} = \{\mathbf{K}_c h + \mathbf{K}_e\} DR d\theta \quad (7)$$

切削抵抗 \mathbf{K}_c は、傾斜切削理論より微小切れ刃の切削方向に対する傾斜角の関数として求める。切削判定関数 D は微小切れ刃の被削材に対する接触を、幾何学的な関係からパラメトリックに算出する。図3に接触判定を加味して推定した極座標系における見かけの切取り厚さマップの計算事例を示す。

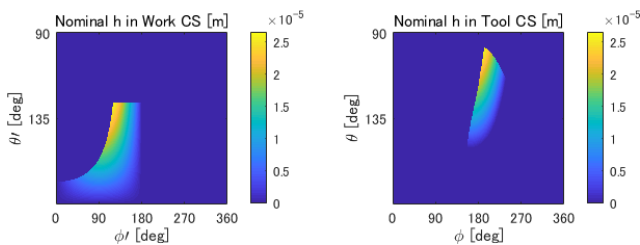


Fig. 3 Calculated nominal uncut chip thickness distribution (R 5 mm, a_p 2 mm, a_e 2 mm, ψ 15 deg, χ 75 deg)

以上の定式化に基づき、機械構造ダイナミクスと加工プロセスの相互作用を考慮した時間領域シミュレーションを行うことができる。加工範囲をパラメトリックに求めるため高速シミュレーションが可能である反面、パラメトリック表現できない条件には対応できないことに注意する必要がある。

3. びびり限界シミュレーション

前述の理論をもとに MATLAB を用いてシミュレータを作成し、工具角度と加工条件がびびり振動に及ぼす影響について評価を行った。まず、表1に示す条件1で0.2秒間の解析を行った結果を図4に示す。傾斜角 $\psi = 15^\circ$ の場合に比べて、傾斜角 $\psi = 30^\circ$ ではびびり振動が成長している。このように、切込みや送りが同一の条件でも工具姿勢が変化することで安定性が変化する。時間領域解析のため、有限振幅振動で準安定状態に達した際の力や変位を正確に推定することができれば、表面粗さ推定等、様々な応用が期待できる。

Table 1 Cutting conditions and parameters for simulation

	Condition 1	Condition 2
Depth of cut a_p, a_e mm	2, 2	0.5~4, 2
Tilt angle ψ, χ deg	15~30, 75	-180~180, -45~45
Spindle speed n min ⁻¹	3900	3900
Feed rate f_v mm/tooth	0.38	0.38
Tool radius R mm	5	5
Number of flutes	2	2
Rake angle deg	30	30
Helix angle deg	30	30
Shear strength τ_c MPa	300	300
Friction angle β deg	40	40
Specific edge force \mathbf{K}_e kN/m	17, 0, 50	17, 0, 50
Natural Frequency Hz	2000	2000
Maximum compliance $\mu\text{m}/\text{N}$	2	2
Damping ratio	0.03	0.03

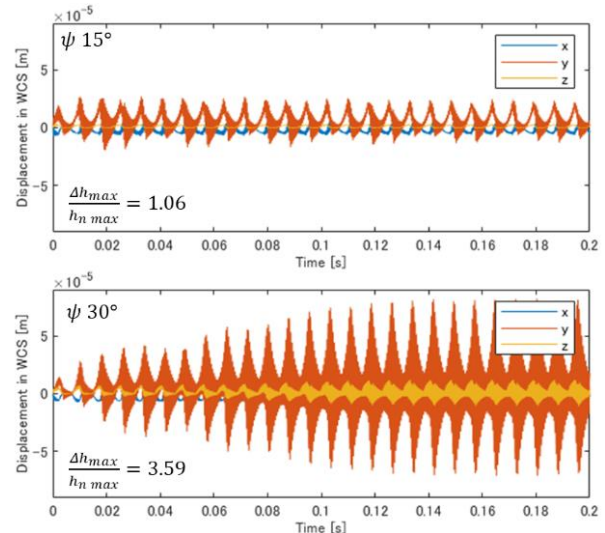


Fig. 4 Examples of process simulations

次に、工具傾斜角と傾斜方向、および切込み量がびびり安定性に与える影響について検証を行った。低剛性のボールエンドミルがびびり振動を起こす状況を想定し、表1に示す条件2で解析を行った。各条件において軸方向切込み a_p を増加させながら解析し、見かけの切取り厚さ h_n に対する切取り厚さ変動成分 Δh の比を分析した。全解析時間0.2秒のうち最大の h_n と最大の Δh の比 $\Delta h_{max}/h_{n,max}$ が5を超えるまでの到達時間を評価指標とし、この時間が短いほどびびり安定性が低いと考えた。工具傾斜角において $\psi = 15^\circ$ に固定し χ を変化させた場合と、 $\chi = -45^\circ$ に固定して ψ を変化させた場合の到達時間を図5に示す。黄色い領域は安定条件を示しており、傾斜角度および方向に依存してびびり安定性が変化する傾向が確認できる。これは、加工プロセスにおいて工具が被削材に接触する角度（エンゲージ角）と、接触領域の低剛性方向に対する投影長さに依存している。周波数領域で推定した従来研究の結果²⁾の傾向とも一致しており、正しく推定できていると考える。今後、加工現象解析や最適化などへの本手法の応用研究が期待される。

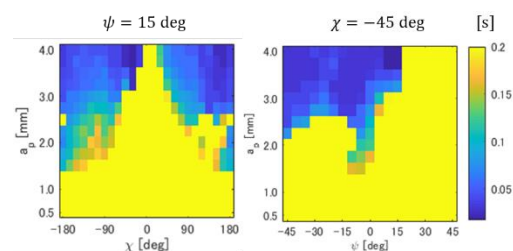


Fig. 5 Influence of tool tilt angles on chatter stability

4. 結言

有限振幅のびびり振動による非線形な切り取り厚さ変動を考慮したボール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。このシミュレーションによって工具姿勢が限界切り込み深さに与える影響を調べた。今後、実機による実験を通じて、びびりシミュレーションの妥当性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 林宏樹ほか：2019年度精密工学会春季大会，第26回学生会員卒業研究発表講演会講演論文集，pp.93-94 (2019)。
- 2) 赤澤浩一：加工条件の最適化による切削加工効率に関する研究，名古屋大学大学院工学研究科2009年度博士論文