

北海道大学工学部 ○石沢浩史 田中文基 岸浪建史
函館工業高等専門学校 山田 誠

要旨

本研究では、工作機械の幾何学的誤差の加工形状に及ぼす影響を明らかにするために、工作機械の誤差を考慮した形状創成機能モデルを用い、加工形状モデルを構築し、工作機械の精度解析を行う。本報では、3軸フライス盤でボールエンドミルを用いた加工についての解析を行う。

1. はじめに

近年、CAD/CAMが機械製造工業に普及するにつれて高精度加工が要求されている。高精度加工の必要性に伴い、工作機械の精度解析は重要な問題となっている。つまり、工作機械の加工プロセスの誤差要因がどのような形で表れてくるかを明らかにすることは重要である。このように工作機械の加工精度の解析を行うためには形状創成運動の数学モデルの構築が必要となる。本研究では、V.T.Portmanらの理論[1]に基づく工作機械の形状創成機能モデルを用い、工作機械の幾何学的誤差の影響を解析することを目的とする。

2. 3軸フライス盤の形状創成機能モデル

工作機械を加工物から工具までの剛体のlinkと考え、各構成要素に座標系を与えると、加工運動は各要素間の座標系の相対運動として与えられる。図1の3軸フライス盤は次のような構成要素のlinkとなる。

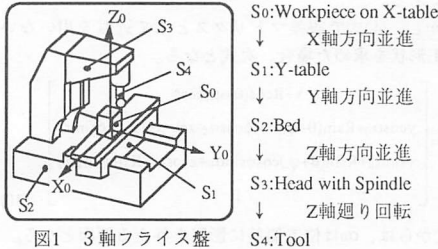


図1 3軸フライス盤

この場合、各要素に与える座標系は加工物座標系を基準座標系としてそれぞれ図2に示すような要素間の相対運動のみを考慮するような座標系として与える。

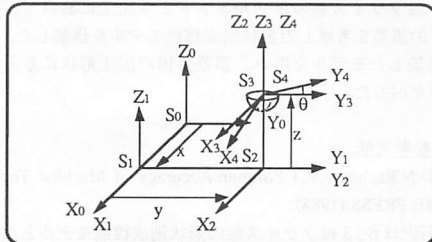


図2 3軸フライス盤の座標変換

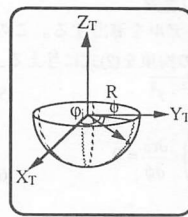


図3 ボールエンドミル

また工具を図3の形状の切刃を持つボールエンドミルとすると、切刃形状は次式のような1パラメータφで表現されるベクトルとなる。

$$r_T(\theta) = A^6(\phi)A^5(\theta)A^1(R)e^4 = \begin{bmatrix} R\cos\phi\cos\theta \\ R\sin\phi\cos\theta \\ -R\sin\phi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

V.T.Portmanらの理論に基づく、形状創成関数は各相対運動に対応する座標変換マトリクスの積で与えられ、加工物座標系における切刃軌跡を表す。図1の構造の3軸フライス盤と図3の形状のボールエンドミルの場合、形状創成関数は運動パラメータx,y,z,θ,φで表され、次式となる。

$$r_0 = A^1(x)A^2(y)A^3(z)A^6(\theta)r_T = A^1(x)A^2(y)A^3(z)A^6(\theta)A^6(\phi)A^1(R)e^4 = [x+R\cos(\theta+\phi)\cos\phi \quad y+R\sin(\theta+\phi)\cos\phi \quad z-R\sin\phi \quad 1]^T \quad (2)$$

また、3軸フライス盤の各構成要素に幾何学的誤差が存在するときの誤差関数は次式で表現される。

$$\Delta r_0 = \sum_{i=0}^4 A_0 \varepsilon_i A_i \varepsilon_i \begin{bmatrix} -R \sum_{i=0}^4 \gamma_i \sin(\theta+\phi_i)\cos\phi - R \sum_{i=0}^3 \beta_i + \alpha_4 \sin\theta + \beta_4 \cos\theta \sin\theta \\ -y(\gamma_0+\gamma_1) + z \sum_{i=0}^2 \beta_i + \sum_{i=0}^3 \delta_{x_i} + \delta_{x_4} \cos\theta - \delta_{y_4} \sin\theta \\ R \sum_{i=0}^4 \gamma_i \cos(\theta+\phi_i)\cos\phi + R \sum_{i=0}^3 \alpha_i + \alpha_4 \cos\theta - \beta_4 \sin\theta \sin\theta \\ + x\gamma_0 - z \sum_{i=0}^2 \alpha_i + \sum_{i=0}^3 \delta_{y_i} + \delta_{y_4} \sin\theta + \delta_{y_4} \cos\theta \\ R \sum_{i=0}^3 \alpha_i \sin(\theta+\phi_i)\cos\phi - R \sum_{i=0}^3 \beta_i \cos(\theta+\phi_i)\cos\phi + R\alpha_4 \sin\phi \cos\phi \\ -R\beta_4 \cos\phi \cos\phi - x\beta_0 + y(\alpha_0 + \alpha_1) + \sum_{i=0}^4 \delta_{z_i} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 ε_i はX,Y,Z軸方向の微小並進 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ と、X,Y,Z軸廻りの微小回転 α, β, γ の誤差パラメータからなる誤差マトリクスである。

各誤差マトリクスの物理的意味を以下に示す。

ϵ_0 : 加工物の取り付け誤差

ϵ_1 : XテーブルとYテーブルとの相対誤差

ϵ_2 : Yテーブルとベッドとの相対誤差

ϵ_3 : ベッドとヘッドとの相対誤差

ϵ_4 : 工具の取り付け誤差

(2)式と(3)式から加工運動を表す形状創成機能モデルは次式で与えられる。

$$\mathbf{r}(x,y,z,\theta,\phi) = \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r}_0 \quad (4)$$

3. 加工形状への誤差パラメータの影響

半球面加工の場合の加工形状モデルを導出する。この加工では、以下の運動パラメータの拘束を(2)式に与える。

$$\text{functional constraint} \quad z = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} \quad (5)$$

enveloping constraint

$$\left(\frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial x} \times \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \theta} \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \phi} = 0 \quad \left(\frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial y} \times \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \theta} \right) \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_0}{\partial \phi} = 0 \quad (6)$$

(5)式、(6)式より次式が得られる。

$$\theta + \phi_i = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (7) \quad \phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{r^2 - x^2 - y^2}{x^2 + y^2}} \quad (8)$$

(5)式、(7)式、(8)式を(2)式に代入することにより、 x, y で表現される半球面の加工形状モデルが得られる。

次に誤差を含んだ加工によって得られる形状について考慮する。3軸フライス盤は30個の誤差パラメータを含んでおり、それらが加工形状への誤差として作用する。形状誤差は一般に、位置偏差、寸法偏差、形状偏差の3つの幾何偏差から構成されている。従って、誤差パラメータを幾何偏差を基に分類すると以下のようになる(図4)。

- 1)幾何偏差に影響を与えないもの(No Effect)
- 2)位置偏差に影響を与えるもの(Positioning)
- 3)寸法偏差に影響を与えるもの(Dimensioning)
- 4)形状偏差に影響を与えるもの(Form)

誤差パラメータと幾何偏差の関係を得るために、(4)式において個々に誤差パラメータを代入し、得られる式を解析する。このとき、(4)式の構築において近似誤差を用いているため、誤差パラメータの分類において実際の結果と相違が生じる場合がある。相違が生じる誤差パラメータに対しては近似を用いないことで、加工形状にどのような影響を与えるか明らかにする。結果に相違が生じる誤差パラメータは $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0, \alpha_1, \gamma_2, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3, \alpha_4, \beta_4, \gamma_4$ であり、これらの誤差には考慮を加えて、半球面加工の場合の誤差パラメータと幾何偏差の関係を表1に示す。

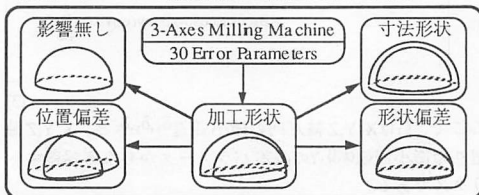


図4 誤差パラメータの分類

表1 誤差パラメータと幾何偏差との関係

Error	Deviation	Error	Deviation	Error	Deviation
α_0	Positioning	α_2	Form	α_4	No effect*
β_0	Positioning	β_2	Form	β_4	No effect*
γ_0	Positioning	γ_2	No effect	γ_4	No effect
δ_{x0}	Positioning	δ_{x2}	Positioning	δ_{x4}	Form*
δ_{y0}	Positioning	δ_{y2}	Positioning	δ_{y4}	Form*
δ_{z0}	Positioning	δ_{z2}	Positioning	δ_{z4}	Positioning
α_1	Positioning	α_3	No effect		
β_1	Form	β_3	No effect		
γ_1	Form	γ_3	No effect		
δ_{x1}	Positioning	δ_{x3}	Positioning		
δ_{y1}	Positioning	δ_{y3}	Positioning		
δ_{z1}	Positioning	δ_{z3}	Positioning		

ここで、表1中の*で示した工具の取り付け誤差の $\alpha_4, \beta_4, \delta_{x4}, \delta_{y4}$ は、加工形状を生成できない要因として作用する場合がある。

結果に相違が生じる誤差パラメータの例として、加工物の取り付け誤差 α_0 の場合を以下に示す。

(4)式において α_0 のみを代入すると次式を得る。

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x + R \cos(\theta + \phi_i) \cos \phi \\ y + R \sin(\theta + \phi_i) \cos \phi + \alpha_0 R \sin \phi - \alpha_0 z \\ z - R \sin \phi + \alpha_0 R \sin(\theta + \phi_i) \cos \phi + \alpha_0 y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(9)式より得られる結果は、 α_0 は位置偏差に影響を与える要因である。

しかし、(4)式で誤差マトリクスとして近似を用いないで加工形状を求めた場合、次式となる。

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x + R \cos(\theta + \phi_i) \cos \phi \\ y \cos \alpha_0 + R \sin(\theta + \phi_i) \cos \phi \cos \alpha_0 - z \sin \alpha_0 + R \sin \phi \sin \alpha_0 \\ y \sin \alpha_0 + R \sin(\theta + \phi_i) \cos \phi \sin \alpha_0 + z \cos \alpha_0 - R \sin \phi \cos \alpha_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(10)式からは、 α_0 は位置偏差に影響を与える要因となる。

4. おわりに

本報では、以下のことを行った。

- (1)3軸フライス盤のボールエンドミル加工において、幾何学的誤差を考慮した形状創成機能モデルを構築した。
- (2)構築したモデルを用い、誤差要因の加工形状に与える影響を示した。

5. 参考文献

- [1] D.N.Reshetov, V.T.Portman: Accuracy of Machine Tools, ASME PRESS, (1988)
- [2] 石沢ほか: 3軸フライス盤の形状創成機能モデルと誤差シミュレーション, 精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, (1991)