301　旋盤加工における幾何学的誤差変数の推定

函館高専　〇山田　誠
北大工学部　石沢　浩　　田中　文基　　岸浪　建史

要　旨

工作機械における加工動作は種々の誤差要因を伴っている。工作機械の精度の評価は機械製造業において重要な問題である。高精度加工を実現するために、誤差補償を実行できる閉ループ加工システムが必要となる。また、この閉ループ加工システムを実現するためには工作機械の幾何学的誤差要因を推定する必要がある。本研究では加工物の測定値からの形状評価による旋盤の幾何学的誤差要因の推定問題を取り扱う。

1. はじめに

近年、機械加工の自動化に伴って、高精度加工が要求されている。工作機械による加工工程は、ある公称形状を入力とし、実際の加工形状を出力とする変換系であるといえる。一般的に、開ループ構造をとるシステムに於て、出力は変換系に混入する誤差(外乱)によって影響を受けやすい。従って、その補償を目的として、フィードバック構造を導入することが必要である。閉ループ加工システムを実現するために、工作機械の加工動作における数学モデル(形状創成関数と呼ばれている)とこれらの動作の誤差要因の推定とが必要とされる。本報告では、V.T.Portman の理論に基づく形状創成モデルより、工作機械の各構成要素に存在する幾何学的誤差を推定する問題について次の三点を記述し、旋盤加工を例として、加工物の測定値から旋盤の幾何学的誤差要因を推定する。

- 形状創成システムと加工形状からのモデリング法
- 最小自乗法を使用しての加工形状の評価法
- 誤差要因と評価値との関係

2. 閉ループ加工システムの構成

通常、CAMシステムと工作機械は形状モデルから物体への開ループ工程である。閉ループシステムは加工工程に於ける誤差については対処できないため、高精度加工の実現のためは、逆変換工程を可能にする閉ループ加工システムが必要となる。閉ループ加工システムを Fig.1 に示す。

加工工程は公称形状モデルから実際の物体へ、工作機械という関数系による変換であると考えられる。この変換は双方向であり、それらについてのシミュレーションあるいは推定の問題が両方向に存在する。一つの問題は工作機械の数学モデルと誤差要因モデルからの加工形状推定であり、それを順問題と呼ぶ。一方、実際の加工形状から工作機械のモデルを通して加工動作の誤差要因の推定の問題を、逆問題と呼ぶ。加工誤差の要因は、機械要素の幾何学的誤差、機械要素の弾性変形、機械要素の熱変形、振動等がある。

本報告では、機械要素の幾何学的誤差を扱い、誤差を含んだ加工動作と加工形状との関係を明らかにする。逆問題を解くための工程は次の三つからなる。

1)形状創成システムと加工形状のモデリング
2)工作機械構成の幾何学的誤差要因の中の加工面に影響を与えない誤差要因の削除
3)誤差要因の式と加工面の測定データの導出。

形状創成システムと加工形状のモデリング方法論はV.T.Portmanの理論を基にして数学モデルを構築する。また、測定データは三次元測定機から与えられるものを仮定し、加工物の測定データの最小自乗法から形状の幾何属性を決定する。これらにより、測定データから誤差要因の値を算出する。

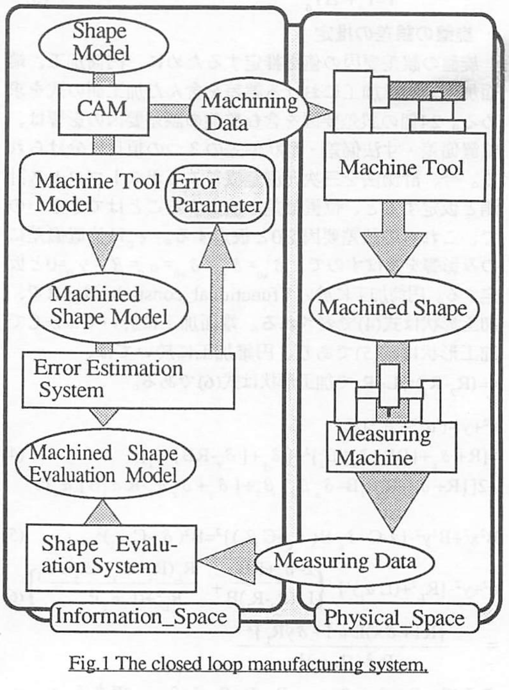

Fig.1 The closed loop manufacturing system.

3. 旋盤の形状創成システム

V.T.Portmanの理論によると、工作機械の関数は形状創成関数と呼ばれるマトリクスによって表現されることができる。631型の旋盤は、形状創成関数は(1)式で表される。

$$\mathbf{r}_0 = A^6(\theta)A^3(z)A^1(x)\mathbf{r}_3$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x\cos\theta \\ x\sin\theta \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

幾何学的誤差による加工形状誤差$\Delta\mathbf{r}_0$は式(2)で与えられる。

$$\Delta\mathbf{r}_0 = \varepsilon_0 A^6A^3A^1\mathbf{r}_3 + A^6\varepsilon_1 A^3A^1\mathbf{r}_3 + A^6A^3\varepsilon_2 A^1\mathbf{r}_3 + A^6A^3A^1\varepsilon_3\mathbf{r}_3$$

$$= \begin{bmatrix} \Delta_1\cos\theta - \Delta_2\sin\theta + \Delta_3 \\ \Delta_1\sin\theta + \Delta_2\cos\theta + \Delta_4 \\ \Delta_5 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ただし、$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$

$$\Delta_1 = \delta_{x1} + \delta_{x2} + \delta_{x3} + z\beta_1$$
$$\Delta_2 = \delta_{y1} + \delta_{y2} + \delta_{y3} - z\alpha_1 + x(\gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2)$$
$$\Delta_3 = \delta x_0 + z\beta_0 \qquad \Delta_4 = \delta_{y0} - z\alpha_0$$
$$\Delta_5 = \delta_{z0} + \delta_{z1} + \delta_{z2} + \delta_{z3} + x(\alpha_0\cos\theta - \beta_0\sin\theta - \beta_1 - \beta_2)$$

ここで、δ_{xi}, δ_{yi}, δ_{zi}(i=0,1,2,3)は各々の軸についての並進の誤差要因である。また、$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$(i=0,1,2,3)はx,y,z軸に関する回転の誤差要因である。結局、実際の旋盤における加工形状は式(3)によって与えられる。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \Delta\mathbf{r}_0 \quad (3)$$

4. 旋盤の誤差の推定

旋盤の誤差要因の値を推定するために、円筒加工、端面加工、円錐加工における誤差を含んだ加工面の式を求める。24個の誤差要因を含む旋盤の誤差要因の影響は、位置偏差・寸法偏差・形状偏差の3つの項目に分けられる。今、計測法を三次元測定機によるポストプロセス計測と仮定すると、位置偏差を検出することはできないので、これらの誤差要因を0と仮定する。ε_0は位置偏差にのみ影響を及ぼすので、$\delta_{x0}=\delta_{y0}=\delta_{z0}=\alpha_0=\beta_0=\gamma_0=0$と仮定する。円筒加工に於いてfunctional_constraintはx=Rで、加工形状は式(4)で表される。端面加工に於いてはz=Cで加工形状は式(5)であり、円錐加工に於いては、$x=(R_2-R_1)z/L+R_1$で加工形状は式(6)である。

$$x^2+y^2-(\alpha_1^2+\beta_1^2)z^2$$
$$=[R+\delta_x+\{RB-\delta_z\}\beta_1]^2+[\delta_y+\{\delta_z-RB\}\alpha_1]^2 \quad (4)$$
$$+2[\{R+\delta_x+R\beta_1B-\delta_z\beta_1\}\beta_1+\{\delta_y+\delta_z\alpha_1-R\alpha_1B\}\alpha_1]z$$

$$B^2x^2+B^2y^2-\{z-C-\delta_z-B(\delta_x+C\beta_1)\}^2=B^2(\delta_y-C\alpha_1)^2 \quad (5)$$

$$x^2+y^2-\{R_L{}^2+(L\alpha_1)^2\}\left\{\frac{z-\delta_z+RB}{L-(R_2-R_1)B}+\frac{R_L(R_1+\delta_x)-\delta_yL\alpha_1}{R_L{}^2+(L\alpha_1)^2}\right\} \quad (6)$$
$$=\frac{\{R1+\delta x)L\alpha 1+\delta yR_L\}^2}{R_L{}^2+(L\alpha_1)^2}$$

ここで、$B=\beta_1+\beta_2$, $\quad R_L=R_2-R_1+L\beta_1$ 　である。

寸法と形状に影響を与える誤差要因は、$\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \delta_x=\Sigma\delta_{xi}, \delta_y=\Sigma\delta_{yi}$である。

式(4)～(6)から、円筒面、端面、円錐面についての旋盤加工に於いて、加工面は常に(7)式で示される様な二次曲面になることは明白である。

$$aX^2+vY^2+cZ^2+2(fYZ+gZX+hXY+lXLmY+nZ)+1=0 \quad (7)$$

さらに、最小自乗法を使用して一般式(8)を解くことによって、測定点$P_i(x_i,y_i,z_i)$から式(7)の係数を計算できる。

$$C=(X^TX)^{-1}X^TN \quad (8)$$

ここで、

$$X=\begin{bmatrix} x_1{}^2 y_1{}^2 z_1{}^2 y_1z_1 z_1x_1 x_1y_1 x_1 y_1 z_1 \\ x_2{}^2 y_2{}^2 z_2{}^2 y_2z_2 z_2x_2 x_2y_2 x_2 y_2 z_2 \\ \vdots \\ x_n{}^2 y_n{}^2 z_n{}^2 y_nz_n z_nx_n x_ny_n x_n y_n z_n \end{bmatrix}$$

$$C=[a\ b\ c\ 2f\ 2g\ 2h\ 2l\ 2m\ 2n]^T \quad (9)$$

$$N=[\,1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\,]^T$$

測定形状を二次曲面の標準形に変換すると、円筒加工の面は式(10)、端面加工は式(11)、円錐加工は式(12)のように記述できる。

$$x^2+y^2-K_{11}z^2=K_{12} \quad (10)$$
$$K_{21}x^2+K_{21}y^2-z^2=K_{21}K_{22} \quad (11)$$
$$x^2+y^2-K_{31}z^2=K_{32}\ /\ K_{31} \quad (12)$$

誤差要因と評価値の関係は次式である。

1)$K_{11}=0$の時 $\alpha_1=\beta_1=0, K_{12}=(R+\delta_x)^2+\delta_y{}^2$ (13)

2)$K_{11}\neq 0$の時 $K_{11}=\alpha_1{}^2+\beta_1{}^2, K_{12}=\{(R+\delta_x)\alpha_1+\delta_y\beta_1\}^2$ (14)

3)$K_{21}=0$の時 $\beta_2=-\beta_1$ (15)

4)$K_{21}\neq 0$の時 $K_{21}=(\beta_1+\beta_2)^2, K_{22}=(\delta_y-C\alpha_1)^2$

$K_{31}=(R_2-R_1+L\beta_1)^2+(L\alpha_1)^2$ (16)

$K_{32}=\{L\alpha_1(R_1+\delta_x)+\delta_y(R_2-R_1+L\beta_1)\}^2$

5.結言

閉ループ加工システムに関して、以下の事柄を示した。

1)V.T.Portmanの理論に基づき、旋盤の幾何学的誤差を考慮した形状創成システムと加工形状のモデリング法について示した。

2)ポストプロセス計測を対象として、最小自乗法を使用した加工形状の評価法を示し、旋盤による加工面は常に二次曲面となることを示した。

3)誤差要因と評価値との関係を導出した。この関係式を利用して、測定値から誤差要因の値を計算できることを示した。

6.参考文献

[1]V.T.Portman,D.N.Reshetov,"ACCURACY OF MACHINE TOOLS",ASME PRESS,1988

[2]山田他、工作機械の形状創成運動モデルと加工形状モデルに関する研究(第一報)　1991年精密工学会春季大会

[3]階戸他、　同(第二報)　1991年精密工学会春季大会