

多軸工作機械の組立誤差を考慮した加工機能のデジタルツインに関する研究

北海道大学大学院 情報科学院 情報科学専攻 ○金山 晃央己, 田中 文基, 小野里 雅彦

要 旨

多軸工作機械で高精度加工を行うためには、工作機械の組立誤差の影響を導出し補正する必要がある。そこで本研究では、実工作機械の組立誤差を考慮したシミュレーションが可能な工作機械の加工機能に関するデジタルツインを構築する。デジタルツインでは、形状創成関数に基づく工作機械組立誤差モデルを用いる。次に、実工作機械の組立誤差と一致するように工作機械組立誤差モデルを修正する方法を提案する。最後に、実工作機械と 3D スキャナで実加工・計測を行い、モデル修正方法を検証、本研究の妥当性を示す。

1. はじめに

高機能な部品を生産するために、多軸工作機械による加工の需要が高まっている。多軸工作機械で高精度に加工するためには、工作機械の組立誤差の影響を導出し補正する必要がある。そこで本研究では、実工作機械の組立誤差を考慮したシミュレーションが可能な、工作機械の加工機能に関するデジタルツインを構築する。まず、形状創成関数と工具掃引条件から工作機械の組立誤差を考慮した工作機械組立誤差モデルを構築する。次に、工作機械組立誤差モデルの修正方法を提案し、実加工・計測を行うことで、工作機械組立誤差モデルの修正方法を検証する。

2. デジタルツインを用いた高精度加工システム

デジタルツインを用いた高精度加工システムを図1に示す。まず、デジタルツインにNCデータを与え加工誤差を得る。その加工誤差を用いてNCデータの修正を行い、修正されたNCデータを再度デジタルツインに与え、加工誤差が要求精度を満たすまで修正を繰り返す。得られたNCデータを実工作機械に与えて実加工を行う。ここで、デジタルツインの工作機械組立誤差モデルが常に実工作機械の組立誤差と一致するようにモデル修正作業が必要となる。

3. 工作機械の加工機能に関するデジタルツイン構築

工作機械の加工機能に関するデジタルツインを構築するために、形状創成理論[Inasaki1997]に基づき工作機械組立誤差モデルを構築する。ワーク座標系での工具切刃ベクトル r'_w は、工具座標系での工具切刃ベクトル r'_T と駆動系の相対運動に対応する座標変換行列との積で表される。図2に示す4軸工作機械について形状創成関数は式(1)となる。ここで、 A^1, A^2, A^3 はX, Y, Z軸並進運動に、 A^4 はA軸回転運動に対応する。

$$r'_w = A^4 A^2 A^1 A^3 r'_T \quad (1)$$

形状創成誤差関数は、各同次座標変換行列間に誤差の項を掛け合わせたものとなる。組立誤差は並進誤差 $\delta x, \delta y, \delta z$ と回転誤差 α, β, γ の6個であり、誤差の項を表す行列 ϵ'_j は、式(2)となる。

$$\epsilon'_j = \begin{bmatrix} 0 & -\gamma_j & \beta_j & \delta x_j \\ \gamma_j & 0 & -\alpha_j & \delta y_j \\ -\beta_j & \alpha_j & 0 & \delta z_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

図2に示す4軸工作機械について、考慮する誤差は図3のようになり[Inasaki1997]、誤差を考慮した形状創成関数は式(3)となる。

$$r'_w + \Delta r'_w = A^4 A^2 A^1 A^3 r'_T + A^4 \epsilon'_{AY} A^2 A^1 A^3 r'_T + A^4 A^2 \epsilon'_{YX} A^1 A^3 r'_T + A^4 A^2 A^1 \epsilon'_{XZ} A^3 r'_T + A^4 A^2 A^1 A^3 \epsilon'_{ZS} r'_T \quad (3)$$

形状創成関数から加工形状を導出するために、工具運動の開始位置から終了位置までの工具軌跡である工具掃引形状の導出方法[Arai2017]を用いる。形状創成関数と工具掃引条件により、組立誤差とNCデータに応じた工作機械の加工機能に関するデジタルツインを構築した。

4. 工作機械組立誤差モデルの修正方法

実工作機械の組立誤差と一致するように工作機械組立誤差モデルを修正するために図4に示すように実工作機械の組立誤差を求める。まず、形状創成関数と工具掃引条件から加工形状と組立誤差との関係式を導出する(A1)。次に、実加工を行い、得られた加工物を計測し加工形状点群を得る(A2)。この加工形状点群に

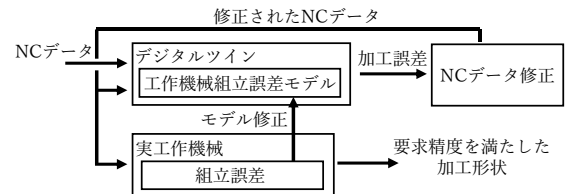


図1. デジタルツインを用いた高精度加工システム

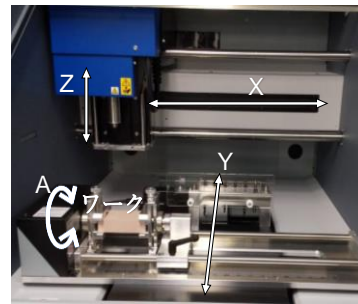


図2 4軸工作機械 MDX-50 (ローランド DG 社)

構成要素	考慮する誤差
ワーク	
A軸	$\delta y_{AY}, \delta z_{AY}$
Y軸	β_{AY}, γ_{AY}
ベッド	
X軸	α_{YX}, γ_{YX}
Z軸	β_{XZ}
主軸	
工具	α_{zS}, β_{zS}

図3 考慮する誤差

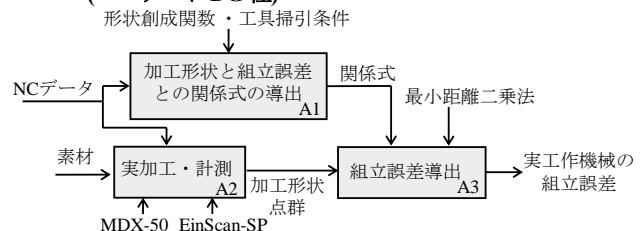


図4 モデル修正方法

対して最小距離二乗法を適用し2つの平面の方程式を求め、その関係式から組立誤差を導出する(A3). この方法では、工作機械を停止させること無く組立誤差を導出できる。

例えば、図 5.6 に示すように、A軸回転量が 0° の時は $y = y_1$ 、 180° の時は $y = y_2$ という条件で加工した場合の組立誤差が加工形状に与える影響について示す。ここで、機械座標系を (X_m, Y_m, Z_m) 、ワーク座標系を (X_w, Y_w, Z_w) と表す。A軸回転量 0° の形状創成関数 r'_{w0} は式(4)となる。

$$r'_{w0} = \begin{bmatrix} x - (Y_{AY} + Y_{YX})R - y_1 Y_{AY} + (\beta_{AY} + \beta_{XZ} + \beta_{ZS})z_t + z(\beta_{AY} + \beta_{XZ}) \\ R - (\alpha_{YX} + \alpha_{ZS})z_t + y_1 + x(Y_{AY} + Y_{YX}) - z\alpha_{YX} + \delta y_{AY} \\ (\alpha_{YX} + \alpha_{ZS})R + z_t + z - x\beta_{AY} + \delta z_{AY} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A軸回転量 180° の形状創成関数 r'_{w180} は式(5)となる。

$$r'_{w180} = \begin{bmatrix} x + (Y_{AY} + Y_{YX})R - y_2 Y_{AY} + (\beta_{AY} + \beta_{XZ} + \beta_{ZS})z_t + z(\beta_{AY} + \beta_{XZ}) \\ R + (\alpha_{YX} + \alpha_{ZS})z_t - y_2 - x(Y_{AY} + Y_{YX}) + z\alpha_{YX} - \delta y_{AY} \\ (\alpha_{YX} + \alpha_{ZS})R - z_t - z + x\beta_{AY} - \delta z_{AY} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)(5)より加工形状平面の方程式は、それぞれ式(6)(7)となる。

$$X_r(Y_{AY} + Y_{YX}) - Y_r - Z_r(\alpha_{YX} + \alpha_{ZS}) + (R + y_1) + z\alpha_{ZS} + \delta y_{AY} = 0 \quad (6)$$

$$-X_r(Y_{AY} + Y_{YX}) - Y_r - Z_r(\alpha_{YX} + \alpha_{ZS}) + (R - y_2) - z\alpha_{ZS} - \delta y_{AY} = 0 \quad (7)$$

式(6)(7)から、 α_{YX}, α_{ZS} の値が既知であるとき、2つの平面の式から $Y_{AY} + Y_{YX}, \delta y_{AY}$ の値を求めることができる。

5. 工作機械組立誤差モデルの修正方法の検証

本研究では、実加工により工作機械組立誤差モデルの修正方法の検証を行う。組立誤差 δy_{AY} のみが生じた工作機械で加工する場合、式(6)(7)から $y_1 = -y_2$ という条件で加工すると加工形状の平面間距離が $2\delta y_{AY}$ となる。

組立誤差 $\delta y_{AY} = -0.50$ [mm]と設定した実工作機械に、 $y_1 = -y_2 = -25.0$ という条件で実加工を行った。使用した CNC 工作機械はローランド DG 社の MDX-50、工具はフラットエンドミル($\phi 6$ mm)である。組立誤差 δy_{AY} は工作機械の原点補正設定にて A 軸の回転軸を原点より 0.50 [mm]だけ Y 軸負方向にずらすことによって設定した。誤差が無い場合と誤差を与えた場合の実加工結果をそれぞれ図 7,8 に示す。図 8 から誤差を与えた場合の加工形状には段差があることが分かる。実加工によって得られた加工物をパターン投影によるステレオ法で測定する SHINING 3D 社の EinScan-SP で計測した。EinScan-SP を図 9、仕様を表 1 に示す。計測結果を図 10 のように Cloud Compare で表示した。また、図 10 の赤線で囲まれた段差部分を拡大したものを図 11 に示す。なお、測定点数は $1,266,606$ 個である。

加工形状点群から2つの平面の方程式を求め、平面間距離を導出した。2つの平面の方程式 $ax + by + cz + d = 0$ の係数 a, b, c 、平面 A を基準として導出した平面間距離を表 2 にまとめる。 $\theta = 0^\circ, 180^\circ$ の平面をそれぞれ平面 A、平面 B とした。

まず、表 2 の a, b, c の値は平面の法線ベクトルの x, y, z 成分であり、その値が平面 A と平面 B とでほぼ同じことから、この 2 平面は、ほぼ平行であるといえる。表 2 の平面間距離から組立誤差 $\delta y_{AY} = -0.5055$ [mm]であることが分かる。誤差の設定値と

測定結果から、得られた誤差との差が 0.0055 [mm]と測定誤差内であるため、本提案の妥当性が示された。

6. おわりに

形状創成関数と工具掃引条件から組立誤差を考慮した工作機械の加工機能に関するデジタルツインを構築した。また、工作機械デジタルツインのモデル修正方法を提案し、実加工・計測を行うことで、工作機械デジタルツインのモデル修正方法を検証した。本研究では、並進誤差 δy_{AY} の検証を行ったが、他の誤差についても検証する必要がある。

参考文献

- [Inasaki1997] 稲崎一郎, 岸浪建史, 坂本重彦, 杉村延広, 竹内芳美, 田中文基. 工作機械の形状創成理論—その基礎と応用—. 養賢堂, 1997
- [Arai2017] 荒井航. 多軸工作機械の幾何学的誤差を含む加工シミュレーションのための工具掃引体導出に関する研究—ラジアスエンドミルにおける工具掃引領域形状の分類—. 精密工学会誌, 83 巻, 9 号, 2018

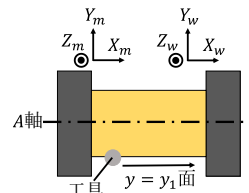


図 5 加工経路($\theta = 0^\circ$)

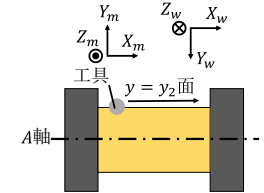


図 6 加工経路($\theta = 180^\circ$)



図 7 実加工結果(誤差無し)



図 8 実加工結果(誤差有り)



図 9 EinScan-SP (SHINING 3D 社)

表 1 EinScan-SP の仕様

点間ピッチ	0.17~0.20mm
精度	0.05mm
焦点距離	290~480mm
光源	白色



図 10 計測結果(誤差有り)

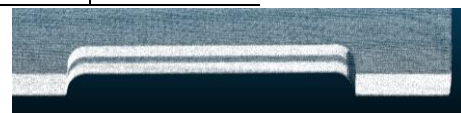


図 11 計測結果(段差部分拡大図)

表 2 各平面の係数と平面間距離

平面	a	b	c	平面間距離[mm]
平面 A($\theta = 0^\circ$)	0.98	0.00	0.20	-1.011
平面 B($\theta = 180^\circ$)	0.98	0.00	0.21	