

要旨

従来、ある特定の製品に対する加工の可否判定は人間の判断に依存してきた。しかし、加工作業の自動化および省力化の達成のためには、計算機を用いたVirtual Machiningにより加工の可否判定を行う必要がある。加工の可否判定の一つの要因として、工具の移動経路を表現する加工機能モデルが必要となる。そこで本報では工作機械機構モデルで設定されたパラメータ表現を用いて、加工機能モデルの構築方法について述べる。

1. はじめに

ある特定の製品に対する工作機械の加工シミュレーション(Virtual Machining)のためには、工作機械の構造および運動に関する情報を表現する機構モデルが必要となる。

そこで本報では、工作機械の作業空間を推定できる工作機械機構モデル[1]から工具形状モデルを考慮してVirtual Machiningによる加工機能モデルの構築方法について述べる。

2. 工作機械機構モデルの構築方法

機構モデルは、ロボットモデルに用いられるSU-パラメータ [2]により表現される。以下にSU-パラメータの設定法とそれを用いた工作機械の機構モデルを示す。

機構モデルでは、剛体の各構成要素をリンク(link)、それらの連結を示す関節をジョイント(joint)とする。特にグランドに固定されたリンクをベースとする。

2.1 SU-パラメータの設定

リンクとジョイントにベースに近い方から順に添え字を付ける。ここで図1に示すように、リンク*i*ではジョイント*i*の基準となる箇所に付随する固定された座標系*O<sub>i</sub>*(*x<sub>i</sub>y<sub>i</sub>z<sub>i</sub>*)が存在する。一方、リンク*i+1*における座標系*O'<sub>i</sub>*(*u<sub>i</sub>v<sub>i</sub>w<sub>i</sub>*)は、座標系*O<sub>i</sub>*を参照してジョイント*i*に依存した拘束条件に従って設定される。

図2の様に同一リンク*i*上の座標系*O<sub>i</sub>*-*O'<sub>i-1</sub>*の関係は、*w<sub>i-1</sub>*から*z<sub>i</sub>*方向の二軸*w<sub>i-1</sub>*、*z<sub>i</sub>*の共通法線*t<sub>i-1,i</sub>*を使い、SU-パラメータという次の6つのパラメータで表す。

- a<sub>i-1,i</sub>*: *t<sub>i-1,i</sub>*に沿って測定された*w<sub>i-1</sub>*から*z<sub>i</sub>*の距離
- α<sub>i-1,i</sub>*: 正の*t<sub>i-1,i</sub>*について反時計回りに測定された正の*w<sub>i-1</sub>*から正の*z<sub>i</sub>*への角度
- b<sub>i-1,i</sub>*: *z<sub>i</sub>*に沿って測定された*t<sub>i-1,i</sub>*から*x<sub>i</sub>*の距離
- β<sub>i-1,i</sub>*: 正の*z<sub>i</sub>*について反時計回りに測定された正の*t<sub>i-1,i</sub>*から正の*x<sub>i</sub>*への角度
- c<sub>i-1,i</sub>*: *w<sub>i-1</sub>*に沿って測定された*u<sub>i-1</sub>*から*t<sub>i-1,i</sub>*の距離
- γ<sub>i-1,i</sub>*: 正の*w<sub>i-1</sub>*について反時計回りに測定された正の*u<sub>i-1</sub>*から正の*t<sub>i-1,i</sub>*への角度

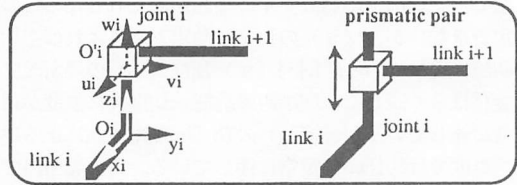


図1 SU-パラメータの座標系設定

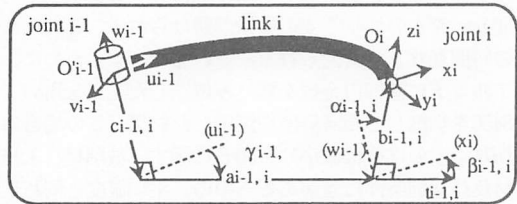


図2 SU-パラメータ表現

リンク*i*を示す座標系*O<sub>i</sub>*-*O'<sub>i-1</sub>*間の関係は、座標系*O<sub>i</sub>*上のベクトル*P<sub>i</sub>*の座標系*O'<sub>i-1</sub>*における座標値*P'<sub>i-1</sub>*を用い、式(1)で示される。

$$P'_{i-1} = T_{i-1,i} P_i \tag{1}$$

式(1)において、*T<sub>i-1,i</sub>*はSU-パラメータの設定法により式(2)のように表せる。

$$T_{i-1,i} = A^3(c_{i-1,i}) A^6(\gamma_{i-1,i}) A^1(a_{i-1,i}) A^4(\alpha_{i-1,i}) A^3(b_{i-1,i}) A^6(\beta_{i-1,i}) \tag{2}$$

ここで、行列*A<sup>i</sup>*を表1に示す。ジョイント*i*の動作は、座標系*O<sub>i</sub>*-*O'<sub>i</sub>*間の関係で示され、座標系*O'<sub>i</sub>*上のベクトル*P'<sub>i</sub>*の座標系*O<sub>i</sub>*における座標値*P<sub>i</sub>*とを用い、ジョイント*i*の動作を示す行列を*Φ<sub>i</sub>*その変数を*q<sub>i</sub>*として式(3)で示す。

$$P_i = \Phi_i(q_i) P'_i \tag{3}$$

式(1)、(3)によって式(4)が導かれ、これはリンク*i*とリンク*i+1*のつながりを表現している。

$$P'_{i-1} = T_{i-1,i} \Phi_i(q_i) P'_i \tag{4}$$

2.2 工作機械機構モデル

ベッドからXY-テーブルとZ-テーブル(工具)のように二つの経路、すなわちループ(loop)を持つ三軸フライス盤を例に取り、SU-パラメータを用いた工作機械

の機構モデルを図3に示す。図3では、リンクを太線で示し、ジョイントをハッチングされた□で示す。

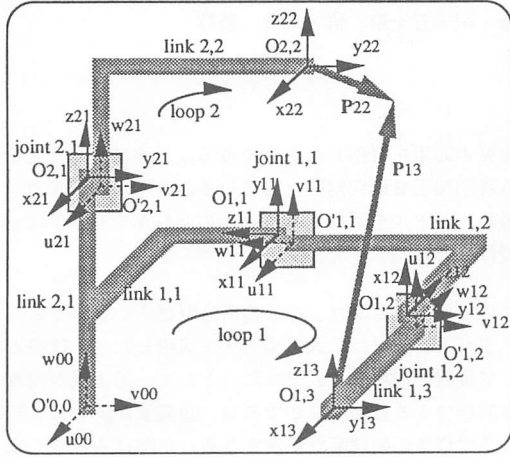


図3 SU-パラメータによる工作機械機構モデル

複数のループが存在する場合、全てのジョイントとリンクを識別するために、ループ*i*におけるジョイント*j*、リンク*j*を各々ジョイント*i,j*、リンク*i,j*とする。

ベッドはリンク1,1とリンク2,1で示され、加工物側をリンク1,1、工具側をリンク2,1とする。Y-テーブルはリンク1,2、X-テーブルはリンク1,3で示し、工具を含んだZ-テーブルはリンク2,2で示す。ここでリンク*i,j*に付随する座標系を*O<sub>i,j</sub>*、ジョイント*i,j*から設定される座標系を*O'<sub>i,j</sub>*、ベッドとなるリンクは基準座標系*O'0,0*を設定する。

ジョイント*i*に依存した拘束条件は、ジョイント*i*が prismatic pair なので、SU-パラメータの座標設定より変換行列は  $A_i^3(s_i)$  である。

ここで、Z-テーブルの座標系におけるベクトルを X-テーブルから見た座標値として示すために、式(1)(3)(4)を用いて、式(5)の様に座標系  $O_{2,2}$  におけるベクトル  $P_{22}$  を座標系  $O_{1,3}$  の座標値  $P_{13}$  として示す。

$$P_{13} = T_{12,13}^{-1} A_{12}^3(s_{12})^{-1} T_{11,12}^{-1} A_{11}^3(s_{11})^{-1} T_{00,11}^{-1} T_{00,21} A_{21}^3(s_{21}) T_{21,22} P_{22} \quad (5)$$

式(5)で表現された工作機械全体のつながりを工作機械機構モデルと呼ぶ。

### 3. 加工機能モデル

加工機能モデルは工具と加工物の関係で表される。本報では工具の形状を表現するために V.T.Portman の形状創成理論[3]における工具形状モデルを適用する。

#### 3.1. 工具形状モデル

工具の切刃形状を形状創成点の集合とすると点切刃工具、線切刃工具、面切刃工具の三つに大別できる。工具形状モデルの一般形は式(6)で与えられる。

$$P_{22} = A_T e_{22}, e_{22} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (6)$$

本報では、フライス盤を考えているため、工具はエンドミルとし、式(6)中の  $A_T$  は式(7)で表される。

$$A_T = A^6(2\pi z_T/p) A^3(z_T) A^1(R), 0 \leq z_T \leq B \quad (7)$$

ここで、式(7)における変数は  $p$ : ピッチ、 $R$ : 工具半径  $z_T$ : 工具先端からの切刃高さ、 $B$ : 刃長を示す。

#### 3.2. 加工機能モデルの構築

図3のフライス盤を考慮し、式(5)で示した工作機械機構モデルと式(6)(7)で示した工具形状モデルから次式の加工機能モデルを得る。

$$P_{13} = \begin{bmatrix} A_{13,22} \\ B_{13,22} \\ C_{13,22} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R \cos(2\pi z_T/p) + s_{12} \\ R \sin(2\pi z_T/p) + s_{11} \\ z_T + s_{21} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)において、ジョイントの変数 ( $s_{11}, s_{12}, s_{21}$ ) と工具形状モデルのパラメータ ( $p, R, z_T$ ) から成る第2項によって加工機能モデルが表現できる。 $A_{13,22}, B_{13,22}, C_{13,22}$  は各リンクの SU-パラメータから計算される。

### 4. おわりに

本報では三軸フライス盤を例にとり、SU-パラメータを用いた工作機械機構モデルを示し、工具形状モデルを考慮した加工機能モデルを導出した。

#### 参考文献

- [1] 鈴木他, "Virtual Machiningのための工作機械機構モデルの構築方法(第一報)", 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 1994
- [2] P.N.Sheth, J.J.Uicker, Jr., "A Generalized Symbolic Notation for Mechanisms", Journal of Engineering for Industry, TRANS.ASME, 1971, pp.102-112
- [3] D.N.Rechetov, V.T.Portman, "Accuracy of Machine Tool", ASME Press, 1988

表1 座標変換マトリクス

	X軸	Y軸	Z軸
並進移動	$A^1(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^2(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^3(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
回転移動	$A^4(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^5(\phi) = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^6(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$