

## パラレルリンク機構型工作機械の性能評価

金沢工業大学工学部機械工学科 ○田中寛人 ◎森本喜隆 林 晃生 山岡英孝 上木優人

### 要 旨

パラレルリンク機構型工作機械は、従来の工作機械とは異なり、空間座標系での直線移動を行う際にすべての駆動軸が動くため、誤差要因が多く存在する。特に寸法誤差や組立誤差の影響が大きく、位置決め精度を劣化させている。本研究では、パラレルリンク機構型工作機械の機構誤差を考慮した運動学モデルを考案し評価する。また、対象機器でミーリング加工を行い、加工時における機体の振動特性や工作物の加工表面性状を評価する。

### 1. 緒言

近年、ロボットは産業用、医療用など、幅広い分野で利用されている。産業用では組み立て用など、形態や作業内容によって様々な違いがある。今後は、機械加工に用いる要求が出てきている。

産業用ロボットにはパラレルメカニズムとシリアルメカニズムがある。ベースから最終出力であるエンドプラットフォームまで直列なリンクで連結している機構をシリアルメカニズムという。また、並列に複数のリンクで連結している機構をパラレルメカニズムという。パラレルメカニズムは、シリアルメカニズムと比較すると高剛性、高精度であるが、工作機械への応用を考えた場合、精度は不十分である。これは、パラレルメカニズムが、空間座標系での直線移動を行う際にすべての駆動軸が動き、誤差要因が多く存在するためである。特に寸法誤差や組立誤差の影響が大きく、キャリブレーションが必要である。太田らは逆運動学に基づいたキャリブレーション法を提案している。

本研究では、対象とする工具先端の位置決め機構にパラレルメカニズムを採用したパラレルリンク機構型工作機械の動作特性の向上を目的とし、運動特性を評価する。まず、パラレルリンク機構型工作機械の運動構造をモデル化し、指令値、計算値の比較を行い、考案したモデルの精度を評価する。また、対象機器でミーリング加工を行い、加工時における機体の振動特性や工作物の加工表面性状を評価する。

### 2. 対象機器

工作機械は(株)EXECOHN社製 XMINI<sup>2)</sup>を使用する。XMINIの軸構造を図1に示す。対象機器はフレームにCFRPを用いられているため、従来の工作機械と比べ軽量で熱変形が小さい。また、モジュールが軽量化されているので、比較的容易に組立てが可能である。また、本工作機械の運動学モデルを表現する上で3つの座標系が存在する。1つ目は、Base platformと第1軸の交点を原点とし、内部構造を表す基準となる座標系の Internal Coordinate System(ICS)である。2つ目は、Moving platformの傾きを考慮した座標系の Moving Platform Coordinate System(MPS)、3つ目は、空間座標系の3軸に平行であり、工具の向きと座標を表す座標系の Base Coordinate System(BCS)である。

### 3. 順運動学モデル

#### 3.1 3次元幾何学モデル

対象機器の3次元幾何学モデルを図2に示し、表1に姿勢制御パラメータを示す。対象機器の全体構造をモデル化することで、各軸の運動と姿勢制御パラメータを明確にする。

#### 3.2 順運動学モデルの作成

順運動学モデルは同時座標変換行列を用いて、工具先端座標を導出する。モデル化は、ICSの原点 $A_1$ から第1軸、第2軸、第3軸、直動軸と回転軸を繋ぐ部品(Moving platform)、C軸、A軸、工具の順に行う。駆動軸である第1軸のストローク $q_1$ 、第2軸のストローク $q_2$ 、第3軸のストローク $q_3$ と、C軸の角度 $q_C$ 、A軸の角度 $q_A$ を入力パラメータとする。

①ICSの原点 $A_1$ から各軸とMoving platformの交点 $B_1, B_2, B_3$ を導出する。 $B_1, B_2, B_3$ を導出することで、Moving platformの姿勢と、MPSの原点 $O_M$ の座標を算出できる。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_1) & -\sin(\alpha_1) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_1) & 0 & \sin(\beta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_1) & 0 & \cos(\beta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -q_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda_1 \\ 0 & 1 & 0 & \lambda_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_2) & -\sin(\alpha_2) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\beta_2) & 0 & \sin(\beta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_2) & 0 & \cos(\beta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -f \\ 0 & 1 & 0 & e \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -q_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

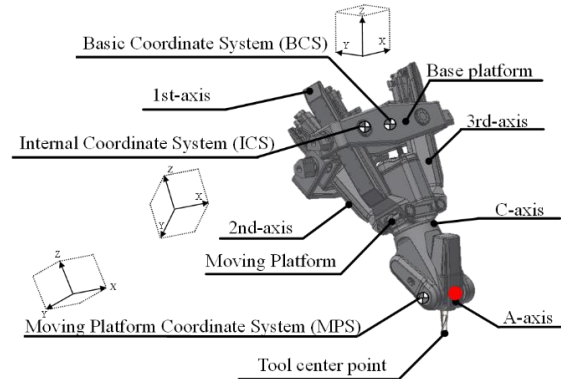


Fig. 1 XMINI 3D model

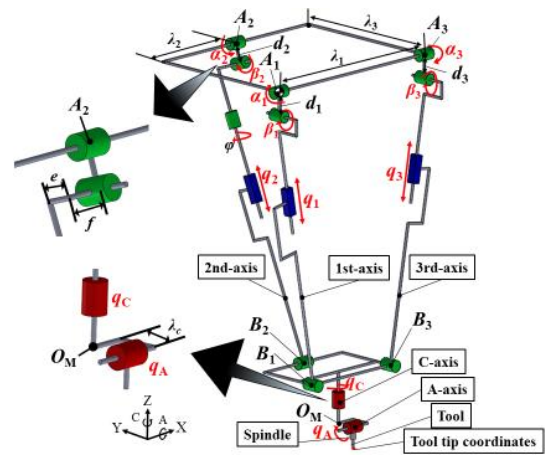


Fig. 2 3D Geometric model of XMINI

Table 1 Parameters of XMINI

$O_{ICS}$	Origin of internal coordinate system ( $A_1$ )
$O_M$	Origin of moving platform coordinate system
$A_i$	Point of intersection of base platform and the each axis
$B_i$	Point of intersection of Moving platform and each axis
$q_i$	Length of the perpendicular between $A_i$ and $B_i$
$q_C$	Angle of the C rotary axis
$q_A$	Angle of the A rotary axis
$\alpha_i$	Angle of the outer, inner universal joint at the base platform
$\beta_i$	
$\lambda_i$	Distance between O and $A_2, A_3$ along the X, Y direction
$\lambda_C$	distance between $O_M$ and A axis
$d_i$	Distance between both rotaries of a universal joint
$e, f$	Possible offsets perpendicular to 2-axis at the base point $A_2$
$\varphi$	Angle between 2-axis about its longitudinal direction

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \lambda_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_3) & -\sin(\alpha_3) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_3) & \cos(\alpha_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta_3) & 0 & \sin(\beta_3) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta_3) & 0 & \cos(\beta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -q_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

②算出した $O_M$ 座標を用いて工具先端座標を導出する。 $\theta_0$ は対象機器全体の傾き、 $O_{MX}, O_{MY}, O_{MZ}$ は $O_M$ 座標、 $\theta_{CZY}, \theta_{CXZ}$ はMPSに対する4軸の補正、 $t_x, t_y, t_z$ はA軸からスピンドルの先端までの距離を表す

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{CYZ}) & -\sin(\theta_{CYZ}) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_{CYZ}) & \cos(\theta_{CYZ}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q_c) & -\sin(q_c) & 0 \\ 0 & \sin(q_c) & \cos(q_c) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \lambda_c \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -t_x \\ -t_y \\ -t_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3 順運動学モデルの評価

順運動学モデルを用いて算出した結果を評価するために、実際に工作機械を動かすときの指令値と比較する。X 軸方向に 5 mm ピッチで±20 mm 直線移動させた時の各軸の誤差を表したグラフを図 3 に示す。Y 座標と Z 座標は今回の動作範囲では常に誤差が±0.01 mm 以下だった。しかし、X 座標の誤差が大きく、X=20 mm 地点では誤差が約 0.06 mm あることが明らかになった。この原因として、Moving platform の姿勢の定義が不十分だったことが考えられる。

4. パラレルリンク機構型工作機械によるミーリング加工

4.1 実験方法

本実験では、OSG 社製の AL-EDS φ6 のハイスクエアエンドミルを用いた。図 4 にハイスクエアエンドミルで加工を行う際の切削範囲を示す。表 2 にハイスクエアエンドミルの加工条件を示す。また、加工時の振動を評価する際には、図 1 の赤丸で示した箇所に加速度測定機を固定し、測定する。

4.2 X 軸方向に加工を行なった場合の特性

ハイスクエアエンドミルを用いて空間座標系における X 軸方向に直線加工を行なった際の挙動観測を行い、加工表面性状に影響する機械要素の特定を行う。図 5 に加工面と最大高さ粗さを示す。X 軸方向に加工を行なった際には、図 5 に示す四角の部分で接触痕が確認できる。この接触痕の最大高さ粗さは 10.2 μm である。原因を探るため対象機器の各軸の動作状況を工作機械の外部エンコーダとコントローラの内部機能を用いて測定を行った結果、第 2 軸と A 軸に反転動作が見られた。これらの挙動が発生する時の駆動軸のパラメータを順運動学モデルに代入し工具先端座標を導出した結果を図 6 に示す。図 6 より、Z 軸方向に約 15 μm の変位が生じていることが明らかとなった。これらの結果より、空間座標系における X 軸方向に加工を行なった際に生じる接触痕は、第 2 軸における反転動作時の挙動変化が影響することが明らかとなった。

接触痕が生じなかった加工面の表面粗さは加工時に発生する加速度振動が影響すると考え、加速度測定機を用いてスピンドル付近に発生する振動を測定した。その結果をフーリエ変換したものを図 7 に示す。図 7 より、切れ刃通過周波数である 166 Hz 付近で最大加速度振幅が発生していることがわかる。また、このときの加速度を変位に換算すると、空間座標系における Z 軸方向には、3.22 μm 変位していることが明らかとなった。Z 軸方向に発生する振動は、最大高さ粗さ 4.42 μm の約 76.3%の変位に相当することから、図 5 の赤丸で示す加工面においては切れ刃通過周波数が加工表面粗さに影響すると考えられる。

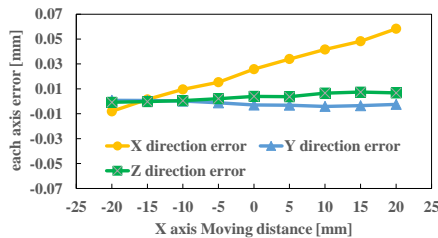


Fig. 3 Error of forward kinematics model in moving X direction

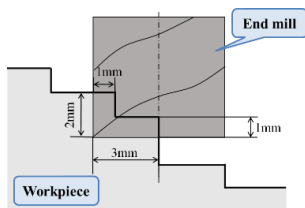


Fig. 4 Cutting area

Table 2 Machining conditions

Conditions	Value	Unit
Spindle speed	5000	min <sup>-1</sup>
Feed speed	150	mm/min
Cutting speed	92.4	m/min
Processing environment	Dry cut	-
Tool diameter	6	mm
Depth of cut	Axial direction	1 mm
	Diameter direction	1 mm
machining method	Down cut	-

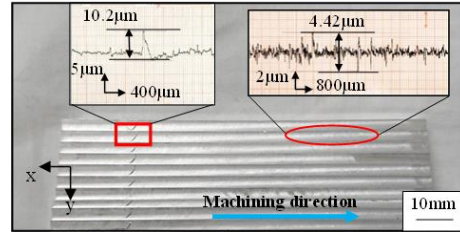


Fig. 5 Machined surface when processing in X-axis direction

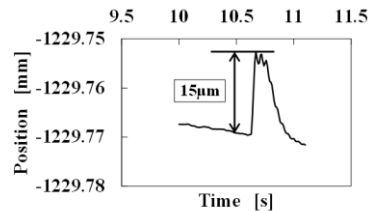


Fig. 6 Tool center point travel of Z-axis (Calculated value)

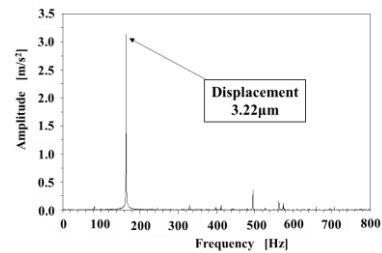


Fig. 7 Acceleration measurement result (Z-axis)

5. 結論

発表者は、3次元幾何学モデルおよび順運動学モデルの改良し、加工時の挙動を評価した。

本研究の結論を以下に示す。

- 1) 考案した順運動学モデルを用いて工具先端座標を算出した結果、Y 座標と Z 座標の誤差と比べて X 座標の誤差が大きかった。
- 2) X 軸方向に直線加工を行った結果、接触痕が生じ、第 2 軸における反転動作時の挙動変化が影響することが明らかとなった。
- 3) 加工時の振動を計測した結果、Z 軸方向に発生する加速度振動が最大高さ粗さの約 76.3%の変位に相当することが明らかになった。

謝辞

本研究の成果は、本工作機械を提供いただいた株式会社 GKM 様により得られた結果であり、関係諸氏にお礼申し上げます。本研究を進めるにあたりご指導いただいた同大学 藤木信彰教授とご協力いただいた同大学 長尾啓氏に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 太田浩充, 渋川哲郎, 遠山退三, "パラレルメカニズムのキャリブレーション方法の研究(第 1 報)", 精密工学会誌, Vol.66, No.6 (2000) p950.
- 2) "工作機械・機械加工・パラレルリンクマシン", 株式会社 GKM, <http://www.gkm.co.jp/index.html> (参照日 2020 年 1 月 17 日)