パラレルメカニズムを用いた座標計測用倣いプローブに関する研究 —リンク機構の設計と機構キャリブレーション—

Scanning Probe for Coordinate Measurement Using Translational Parallel Mechanism -Design of the Link Mechanisms and Calibration of the Mechanical Parameter-

○正 原田 孝 (近畿大) 学 糸魚川 智之 董 科 金丸 健太

Takashi HARADA, Kinki University, harada@mech.kindai.ac.jp
Tomoyuki ITOIGAWA, Ke DONG and Kenta KANAMARU

A 3-dof active scanning probe using a translational parallel mechanism (TPM) is proposed. In this paper, the characteristics of the mechanism, optimum design, and accuracy of the TPM are introduced. An optimum TPM design is proposed as the manipulability of the mechanism is equal in all directions. This implies that the force and position sensitivities of the TPM share an isotropic relationship. The working range and the positional resolution of the mechanism are designed as ± 0.8 mm cubic volume and $1\mu\text{m}$, respectively. An experimental mechanism using the proposed design is introduced. In order to evaluate the accuracy of the TPM, we developed an experimental system for the measurement of the position of the TPM by using image processing. By applying mechanical calibration, the accuracy of the absolute position of the TPM has become $3.4\mu\text{m}$.

Key Words: Parallel Mechanism, Kinematic Calibration, Coordinate Measurement, Scanning Probe, Optimum Design

1. 緒言

複雑な形状を高速で倣い(スキヤニング)計測する3自由度並進パラレルメカニズム(Translational Parallel Mechanism, 以下 TPM と略す)を用いたアクティブ・スキヤニングプローブに関する研究に取り組んでいる。本研究では、工作機械や三次元座標測定装置の先端に搭載するスキヤニングプローブを TPM で実現するものであり、可動範囲がミリサイズであると共に、測定対象を倣うための力制御を行わせることが特徴である。

筆者らは先立って、垂直直動型の TPM に対して、XYZ 方向の計測感度を等方にする機構設計を提案し、3-PUU リンクを用いた、TPM を設計試作した^{[1][2]}。しかし、3-PUU リンクは、3-UPU 機構と同様にその機構学上の特性により設計誤差に対してセンシティブ^[3]であり、筆者らの TPM も、設計上はエンドプレートが並進運動のみを行うところが、試作機ではエンドプレートが傾斜する問題^[2]が生じていた。

そこで、本報では、リンク部に平行リンク機構を用いた TPM を新たに設計試作し、機構キャリブレーションにより位置精度を検証した内容を報告する。

2. TPM の運動学

2.1 構想設計 TPM は図 1(a)に示すように、工作機械や CMM 先端に搭載され、測定対象物の表面を倣いながら座標計測を行う。TPM の設計の構想を下記に列挙する。

- ・机上計測における防塵防滴としてアクチュエータ部をコンパクトにまとめるために、垂直直動型^[4]を採用する。
- ・接触力を制御するために、微小推力制御可能なリニアボイスコイルモータ(VCM)をダイレクトドライブする。
- ・関節部の摩擦などを補償するために、先端部に力センサを配置したロバスト・インピーダンス制御^[5]を実装する。
- ・空間 3 自由度の並進動作を実現する機構分類の中から、製作の容易さを考慮して、(並進 1+平行リンク機構)を 3 組配置したメカニズムとする。

以上に基づいて 3 次元 CAD を用いて構想設計したスキヤニングプローブを図 1(b)に示す。

2.2 運動学と微小運動学 TPM の機構モデルを図 2 に示す。図中の記号は次のとおりである。

- p : エンドプレート中心位置ベクトル
- p_{bi} : ベース中心-ベース対偶位置ベクトル, r_b : ベース半径
- p_{ei} : エンド中心-エンド対偶位置ベクトル, r_e : エンド半径
- z_i : アクチュエータ対偶-エンド対偶の単位方向ベクトル
- a : ベース対偶-アクチュエータ対偶の単位方向ベクトル
- l_i : 連結ロッド長さ, c_i : アクチュエータの制御量
- i : 対偶番号

6 自由度垂直直動型パラレルリンクメカニズムのモデリング方法^[4]を参考にして、TPM の運動学は式(1)で与えられる。

$$L_i = \begin{bmatrix} l_{xi} & l_{yi} & l_{zi} \end{bmatrix}^T = p + p_{ei} - p_{bi} = c_i a + l_i z_i \quad (1)$$

$$p = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T$$

Fig.1 Schematic view of TPM

Fig.2 Kinematic model of TPM

ロッド長さ l_i , 対偶位置ベクトル p_{ei} および p_{bi} とアクチュエータ方向ベクトル a は弾性変形しない(一定である)条件の下で式(1)を全微分することで, 微小運動学が以下に導出される^[1].

$$J_1 \Delta p = J_2 \Delta c \quad (2)$$

$$\Delta p = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T, \Delta c = [\Delta c_1, \Delta c_2, \Delta c_3]^T$$

2.3 逆運動学と順運動学 式(1)において $c_i a$ を左辺に移項して, 両辺を二乗する.

$$(L_i - c_i a)^T \cdot (L_i - c_i a) = (l_i z_i)^T \cdot (l_i z_i) \quad (3)$$

式(3)を c_i に関して解くことにより, 逆運動学式が導出される.

$$c_i = l_{zi} - \sqrt{l_i^2 - l_{xi}^2 - l_{yi}^2} \quad (4)$$

本 TPM では, 順運動学の解析解を導出することができる. 図2に示すように, エンドプレートおよびベースプレートの i 番目の対偶位置を配分する角度を φ_i とすると, 式(1)の L_i は,

$$L_i = p - r_{be} [\cos \varphi_i \quad \sin \varphi_i \quad 0]^T \quad (5)$$

$$r_{be} = r_b - r_e$$

となる. 式(5)を式(3)に代入し, 式(6)を得る.

$$(x - r_{be} \cos \varphi_i)^2 + (y - r_{be} \sin \varphi_i)^2 + (z - c_i)^2 = l_i^2 \quad (6)$$

$$(i = 1, \dots, 3)$$

式(6)は, 3 個の球の方程式を意味し, 各アクチュエータの制御量 c_i が与えられたとき, エンドプレート位置 $p = [x, y, z]^T$ は 3 球の交点として導出できる.

3. TPM の最適設計条件

3.1 可操作性だ円体 式(2)より, アクチュエータの微小変化に対するエンドエフェクタ位置の微小変化の関係は,

$$\Delta p = (J_1^{-1} J_2) \Delta c = J_{12} \Delta c \quad (7)$$

となる. スキャンニング動作は, エンドエフェクタ中立位置($x=y=0$)近傍を用いる. 3 本の連結ロッド長さが等しい条件の下で, 中立位置にけるヤコビ行列 J_{12} の特異値分解の数式解は次のような簡単な式となる.

$$J_{12} = U \Sigma V^T \quad (8)$$

$$U = I, \Sigma = \text{diag}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sqrt{2/3} \cdot \sqrt{(l_i / r_{be})^2 - 1}, \sigma_z = \sqrt{1/3}$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ はヤコビ行列 J_{12} の特異値である. 中立位置における図2の連結ロッドの方向角度 γ は,

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\sqrt{(l_i / r_{be})^2 - 1} \right) \quad (9)$$

となる. 式(8)より, 本研究で提案する TPM の中立位置の可操作性だ円体^[6]に関して, 以下のような特徴がある.

- ・行列 U で定まるだ円体の主軸方向は, U が単位行列であるために, そのままベース座標系の x, y, z 軸方向を向く.
- ・だ円体の z 軸方向主軸長は $\sqrt{1/3}$ の一定値である.
- ・だ円体の x, y 軸方向の主軸長は共に等しく, すなわち中立位置では xy 方向に機構学的に等方である.
- ・ x, y 軸方向の主軸長は, 式(8)のように簡単な式で計算できる.

3.2 最適設計条件 TPM を計測装置として用いるために, 中立位置でスキャンニングプローブの計測感度が x, y, z 方向に等方になる, すなわち可操作性だ円体の各主軸長が等しくなることを最適条件とする. 式(8)の特異値がだ円体の主軸長を示すので, 最適条件は,

$$r_{be} / l_i = \sqrt{2/3} \quad (10)$$

となり, この時の連結ロッドの方向角度 γ は,

$$\gamma = \tan^{-1} \sqrt{1/2} = 35.26(\text{deg}) \quad (11)$$

となる.

4. 平行リンク機構を用いた TPM の設計

4.1 平行リンク機構の設計 筆者らが先立って試作した 3-PUU メカニズムは, 機構学上の特性により設計誤差に対してセンシティブ^[3]であり, 設計上はエンドプレートが並進運動のみを行うところが, 試作機ではエンドプレートが傾斜する問題^[2]が生じていた. そこで, 新たに図3に示す平行リンク機構を用いたリンク部を設計試作した. この機構では, 図3に示すリンクの回転軸方向が

$$t_1 // t_3, t_{2a} // t_{2b} \quad (12)$$

のように平行となる $P\tilde{R}\tilde{R}\tilde{R}\tilde{R}$ タイプの平行リンク機構であり, エンドプレートが純粋な並進運動を行うタイプ^[7]に属す. 図3(a)のエンドプレートジョイント部の平面断面図を図4に示す. シャフト1(2)とナット1(2)および, ボルト1,2を締結することによりボールベアリングに適度な与圧 $f_1 \sim f_3$ を加えて, ベアリング周辺部のガタを取り除く設計とした.

4.2 ロッド長さとエンド・ベース半径の設計 アクチュエータは, SMAC 社ボイスコイルモータ LAL-10(ストローク長さ $\pm 2.5\text{mm}$, 低格推力 1.3N, 位置分解能 $1\mu\text{m}$)を用いる. 既報ではロッド長さ $l=8.1\text{mm}$ にて試作を行った^{[1][2]}が, 動作範囲の全体における等方性を考慮して, リンク長さを再設計した.

Fig.3 Parallelogram linkage

Fig.4 cross-section view of endplate joint

TPM の基準動作範囲を xyz 方向に $\pm 0.8\text{mm}$ とする。図 5 にロッド長と、基準動作範囲内の等方性 $[1/(\text{条件数})]$ の最小値]との関係を示す。ロッド長が 15mm 以下になると、等方性が極端に悪くなる。コンパクト性を考慮し、ロッド長を $l=18\text{mm}$ と設計した。エンドプレートに力センサを搭載するスペースを用意するために、エンドプレート半径 $r_e=15.47\text{mm}$ とし、式(10)の最適条件からベースプレート半径 $r_b=30.17\text{mm}$ と設計した。

ロッド長さ $l=18\text{mm}$ の時の、TPM の動作範囲を図 6(a)に示す。TPM の基準動作範囲である立方体を図に重ねて描いている。本研究の TPM は垂直直動タイプであるために、エンドプレートの z 座標は式(7)のヤコビ行列 J_{12} に影響しない。エンドプレートの xy 座標が基準動作範囲である $\pm 0.8\text{mm}$ の領域内における、ヤコビ行列 J_{12} の $1/(\text{条件数})$ を図 6(b)に示す。中立位置($x=y=0$)で条件数は 1 となっているが、動作範囲境界で $1/(\text{条件数})$ が小さくなり、等方性が悪くなる様子が伺える。 $l=18\text{mm}$ の場合は、中立位置に対して動作範囲境界で等方性が 75% に保たれている。

4.3 TPM の試作 設計試作した TPM を図 7 に示す。エンドプレート上部にミネベア社製 力センサ(定格力 $\pm 2.5\text{N}$)とレニショー社製 ルビー球スタイラス($\phi 1.0\text{mm}$)を搭載している。

Fig.5 Relationship between the rod length and isotropy of TPM

Fig.6 Kinematic characteristic of TPM

Fig.7 Prototype of TPM

Fig.8 Experimental system for measuring the position of TPM

Fig. 9 Experimental setup for calibration of TPM

5. 機構キャリブレーション

5.1 実験装置 図 7 のスタイラス先端のルビー球の 3 次元座標値を測定するために、図 8 に示すステレオ画像計測装置を設計した。JAI 社製 CCD カメラ CV-A1(1/2 インチ、有効画素数 1392×1040)、Edmond Optics 社 両側テレセントリックレンズ(TS SILVER 倍率 1 倍)とテレセントリック・バックライトを用いた平行光学系にて、ルビー球の中心位置をサブピクセル計測する。試作した実験装置を図 9 に示す。

TPM を位置分解能 $1\mu\text{m}$ の XYZ ステージ上に搭載し、XYZ ステージにより格子状に位置決めしたプローブ球中心位置画像を用いて、ステレオ画像計測装置本体のカメラキャリブレーションを行った。 0.5mm 間隔の $\pm 1\text{mm}$ 立方格子を用いたカメラキャリブレーションの絶対位置精度は $3.4\mu\text{m}$ であった。

5.2 キャリブレーションアルゴリズム 式(6)の順運動学式を用いて、機構キャリブレーションを行った。順運動学式を用いたキャリブレーション方法^[8]に対し、さらに TPM の据付位置もキャリブレーション対象に加える。TPM の据付位置は、図 10(a)に示す世界座標系(=ステレオ画像計測座標系) Σ_w から、TPM の基準座標系 Σ_p への座標変換行列 wA_p にて定義する。

$${}^wA_p(q_c) = \text{Trans}(x_0, y_0, z_0) \cdot \text{Rot}(z, \gamma_0) \cdot \text{Rot}(y, \beta_0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_0) \quad (13)$$

$$q_c = [x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0]^T$$

Trans, Rot は 4×4 の並進および回転座標変換行列^[9]である。便宜上、座標変換パラメータをベクトル形式 q_c にまとめている。TPM の順運動学式を、式(6)の解として、

$${}^p x_i = [{}^p x, {}^p y, {}^p z, 1]^T = {}^p x_i(q_i, c_i) \quad (14)$$

と表現する。 q_i は TPM の機構パラメータをベクトル形式でまとめたものであり、本報では、図 10(a) に示す、

$$q_i = [c_{02}, c_{03}, l_1, l_2, l_3, r_{be}]^T \quad (15)$$

6 個の機構パラメータをキャリブレーション対象とした。 c_{02} , c_{03} はアクチュエータ 2, 3 のエンコーダゼロ点オフセットである。図 10(b) に示すように、TPM の基準動作範囲内に 0.4mm 間隔の格子状に 125 点位置決めするアクチュエータの制御量 c_i を与え、その時のプローブ球中心位置をステレオ画像計測した。画像計測による座標測定値を ${}^w x_{mi}$ とし、

$$\sum d_i = \sum \| {}^w x_{mi} - {}^w A_p(q_c) {}^p x_i(q_i, c_i) \| \quad (16)$$

を観測方程式とした非線形最小二乗法を用いて、座標変換パラメータ q_c と機構パラメータ q_i を計算した。

5.3 実験結果と考察 同一の測定データを用いて、キャリブレーション対象を、

(case 1): 据付位置のみ

(case 2): (case 1)+ エンコーダゼロ点オフセット

(case 3): (case 2)+ ロッド長さ

(case 4): (case 3)+ r_{be} (ベース半径—エンド半径)

としたときの結果を表 1 に示す。最下行の d は式(16)の d_i の平均値であり、キャリブレーション後の TPM の絶対位置精度に該当する。図 11 には上記(case 1)および(case 3)の条件にてキャリブレーションした実験に関し、 ${}^w x_{mi}$ を○で表示し、各点における TPM の位置決め誤差を 25 倍拡大して実線表示している。

表 1 よりキャリブレーション前の絶対位置精度が 16.2 μm に対して、機構キャリブレーションを行うことにより絶対位置精度が 3.4 μm と大幅に改善された。また、ロッド長さをキャリブレーション対象に加えた(case 3)(case 4)より、位置精度の改善度合いが大きくなっている。これは、既報の機構誤差伝播解析^[10]で、機構パラメータの中で、ロッド長さ誤差から位置誤差への伝播が最も大きいことを示した結果と一致する。

TPM の絶対位置精度のさらなる向上のためには、画像計測装置本体の精度向上やキャリブレーションのために機構モデルの改良が必要であり、これらは今後の課題である。

Fig.10 Calibration of TPM

Fig.11 Result of the calibration

Table 1 Result of the calibration

		case 1	case 2	case 3	case 4
q_c	$x_0(\text{mm})$	0.070	0.071	0.173	0.169
	$y_0(\text{mm})$	0.088	0.089	-0.042	-0.041
	$z_0(\text{mm})$	-9.999	-10.040	-10.137	-9.933
	$\alpha_0(\text{deg})$	0.488	0.126	0.371	0.371
	$\beta_0(\text{deg})$	-0.413	-0.254	-0.063	-0.064
	$\gamma_0(\text{deg})$	0.152	0.151	0.161	0.161
q_i	$c_{02}(\text{mm})$	[0.000]	0.018	0.269	0.264
	$c_{03}(\text{mm})$	[0.000]	-0.141	-0.113	-0.110
	$l_1(\text{mm})$	[18.000]	[18.000]	17.948	17.597
	$l_2(\text{mm})$	[18.000]	[18.000]	18.380	18.020
	$l_3(\text{mm})$	[18.000]	[18.000]	18.005	17.653
	$r_{be}(\text{mm})$	[14.700]	[14.700]	[14.700]	14.411
	$d(\mu\text{m})$	16.2	15.2	3.5	3.4

6. 結 言

リンク部に平行リンク機構を用いて、1.6mm 立方の基準動作領域にて位置分解能 1 μm を実現する TPM を新たに設計製作した。順運動学式を用いた機構キャリブレーションにより 1.6mm 立方の基準動作領域にて絶対位置精度が 3.4 μm を実現した。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(C)の交付を受けていることを付記し、謝意を表す。

文 献

- [1] T. Harada and N. Adachi, "3 DOF Scanning Probe using Parallel Link Mechanism", *Proc. EUSPEN 2008*, pp. 189-192, (2008).
- [2] T. Harada and K. Dong, "Mechanical Design and Control of 3-DOF Active Scanning Probe Using Parallel Link Mechanism", *International Journal of Automation Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 86-90, (2011).
- [3] C. Han, J. Kim, J. Kim and F. Park, "Kinematic sensitivity analysis of the 3-UPU parallel mechanism", *Mechanism and Machine Theory*, 37, pp. 787-798, (2002).
- [4] 増田 峰知ほか, "垂直直動垂直直動型パラレルメカニズムの運動学解析と試作", *機論 C 編*, vol. 65, no. 638, pp. 4076-4083, (1999).
- [5] 原田 孝ほか, "外乱推定オブザーバを用いたマニピュレータのロバスト・インピーダンス制御インピーダンス制御", *機論 C 編*, vol. 60, no. 569, pp. 225-230, (1994).
- [6] T. Yoshikawa, "Manipulability of Robotic Mechanisms", *Int. J. of Robotic Research*, vol. 4, no. 2, pp. 3-9, (1985).
- [7] X. Kong and C. M. Gosselin, "Type Synthesis of 3-DOF Translational Parallel Manipulators Based on Screw Theory", *Trans. ASME, J. of Mechanical Design*, vol. 126, no. 83, pp. 83-92, (2004).
- [8] 太田浩充ほか, "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 2 報) 順運動学による機構パラメータのキャリブレーション", *精密工学会誌*, Vol. 66, No. 10, pp. 1568-1572, (2002).
- [9] R.P.Paul, 古川恒夫(訳), "ロボットマニピュレータ", コロナ社, p.14, (1984).
- [10] 蜷 科ほか, "3 自由度パラレルリンク機構を用いた座標計測装置の誤差解析", *精密工学会秋季大会論文集*, pp. 719-720, (2009).