回転角法による水平多関節型ロボットの校正*

立 田 英 明** 寺 田 英 嗣*** 牧 野 洋***

Calibration of Horizontally Articulated Robot by Rotation Angle Method

Hideaki TATSUTA, Hidetsugu TERADA and Hiroshi MAKINO

A calibration method using rotation angle is proposed for calibrating horizontally articulated robots. An arbitrarily chosen robot axis is rotated with an arbitrarily given rotation angle. The start and end points of the corresponding motion of the robot tool's axes are measured. Calibration is performed based only on the rotation angles and measured points. Horizontally articulated robots, such as SCARA type robots, can then be calibrated automatically without any teaching operation. Simulation was performed to compare analytically the proposed method with the three points and the four points calibration methods. The simulation chooses a rectangular area where each of the above methods is tested to obtain a measure of error between the theoretical and experimental values (arm lengths, initial angles and robot origin). The results show that the rotation angle method produces a smaller error. Also, it was observed that the proposed method converges faster to the theoretical values compared with the three points and the four points method.

Key words : horizontally articulated robot, SCARA type robot, rotation angle method, three points calibration method, four points calibration method

1. 緒 言

高い位置決め精度が要求される一般の組立用ロボットでは、アーム長などの製作公差およびワールド座標系に対するロボットの据付位置の誤差が大きな問題となる。そこで、据付後にこれらの諸元を測定し検証することが必要である。

今日までに多種のロボットに対してそれぞれの機構にあった多くのキャリブレーション法が提案されている。例えば、代表的な水平多関節型ロボットであるSCARA型ロボット¹⁾ (図1)のキャリブレーション法としては、三点測定法および四点測定法²⁾などが使われてきた。しかし、これらの測定法では、ティーチング操作によりツール先端を特定の数の基準測定点に随時移動する必要があった。このためツール先端を基準測定点へ移動する時のティーチング精度によってもキャリブレーションの信頼性が大きく左右された。また、三点測定法および四点測定法におけるキャリブレーションでは、対象とするロボットは2関節の水平多関節型ロボットであった。これより関節数を増やす場合は、平面に対するロボットの自由度が余るため逆機構解において解が特定できなくなり、キャリブレーションが行えなかった。

上述のようなキャリブレーション操作時に出る測定誤差の影響が少なく、3関節以上の関節を持つ水平多関節型ロボットにも対応できるキャリブレーション法として新しく回転角法と名付けた方法を考案した。この方法は水平多関節型ロボットに任意の回転角を任意の軸に単独で与え、それにより生ずるロボットのツール軸の軌跡の始点と終点の座標を測定しキャリブレーションを行う方法である。

本報では、回転角法の原理および特徴を挙げる。またある初

期位置を持つ2関節のSCARA型ロボットを例に、回転角法および三点測定法、四点測定法を用いてキャリブレーションを行う場合のシミュレーションを三点測定法および四点測定法に対する基準測定点への一致誤差と回転角法に対する測定誤差が一定という条件において行い各キャリブレーション法の精度比較を行った。

2. 回転角法による水平多関節型ロボット諸元の校正

キャリブレーションの際、不確定要因の大きいティーチング操作を必要とせず、初期位置を含めた水平多関節型ロボットの諸元をキャリブレーションする方法として以下のような回転角法を提案する。

水平多関節型ロボットに任意の回転角を任意の軸に単独で与えたとき、その回転軸からツール軸までの相対距離は変化しない。このときロボットツール軸の移動軌跡はその回転軸を中心とし、回転軸からツール軸までの距離を半径とする円弧を描く。この円弧の始点と終点の座標が測定可能であれば、与えた回転

Fig.1 SCARA type robot

* 原稿受付 平成7年9月4日

** 学生会員 山梨大学大学院 (甲府市武田4-3-11)

*** 正 会 員 山梨大学工学部

(a) Vector model of robot

(b) A motion of robot tool point axis
Fig. 2 Horizontally articulated robot

角とこの二つの座標からベクトル方程式を解くことによりこの円弧の中心座標を求めることができる。このことを利用して、 n 個の関節を持つ水平多関節型ロボット（図2(a)）の諸元（各アーム長 r_i ($i=1,2,\dots,n$), 各軸のオフセット角 τ_i ($i=1,2,\dots,n$), ロボット原点 $P_{C1}(x_{C1}, y_{C1})$) をキャリブレーションする。

まず、ロボットに測定初期位置を与える。このとき、ロボットのオフセット角（エンコーダによる原点位置）からの各軸の回転角を初期位置角 ϕ_i ($i=1,2,\dots,n$) とする。すべての軸について任意の回転角 θ_i ($i=1,2,\dots,n$) を測定初期状態のロボットに与える。それにより出来るそれぞれのツール軸の移動軌跡の始点 $P_S(x_S, y_S)$ と終点 $P_{Ei}(x_{Ei}, y_{Ei})$ ($i=1,2,\dots,n$) の座標を取り込む。これらの測定データを用いて以下のようにベクトル方程式を解くことにより測定初期状態での各軸中心座標 $P_{Ci}(x_{Ci}, y_{Ci})$ ($i=1,2,\dots,n$) を求めることができる。

まず、図2(b)より式(1), (2)が導ける。

$$P_S(x_S, y_S) = P_{Ci}(x_{Ci}, y_{Ci}) + d_i e^{j\phi_i} \quad (1)$$

$$P_{Ei}(x_{Ei}, y_{Ei}) = P_{Ci}(x_{Ci}, y_{Ci}) + d_i e^{j(\phi_i + \theta_i)} \quad (2)$$

(ただし、 d_i : 軌跡半径($i=1,2,\dots,n$),

ϕ_i : $\overrightarrow{P_{Ci}P_S}$ の X 軸となす角($i=1,2,\dots,n$))

式(1)と式(2)より $d_i e^{j\phi_i}$ を消去すると、式(3)が導ける。

$$P_{Ci} = \frac{1}{e^{j\theta_i} - 1} \{ e^{j\theta_i} \cdot P_S - P_{Ei} \}$$

$$\begin{Bmatrix} x_{Ci} \\ y_{Ci} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{Bmatrix} (x_S + x_{Ei}) + \frac{\sin \theta_i}{1 - \cos \theta_i} \cdot (y_S - y_{Ei}) \\ -\sin \theta_i \cdot (x_S - x_{Ei}) + (y_S + y_{Ei}) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

(ただし、 $i=1,2,\dots,n$)

Fig. 3 Relation between calibration error and rotation angle for rotation angle method

Fig. 4 SCARA type robot working area

また、各アーム長 r_i は、

$$P_{C(i+n)}(x_{C(i+n)}, y_{C(i+n)}) = P_{Ci}(x_{Ci}, y_{Ci}) + r_i e^{j\zeta_i} \quad (4)$$

(ただし、 $P_{C(n+1)} = P_S$,

ζ_i : $\overrightarrow{P_{Ci}P_{C(i+n)}}$ の X 軸となす角($i=1,2,\dots,n$))

を解くことにより求める。

各軸のオフセット角 τ_i は、

$$\tau_i = \zeta_i - \phi_i - \sum_{k=1}^{i-1} \zeta_k \quad (5)$$

(ただし、 $\tau_1 = \zeta_1 - \phi_1$)

から求める。

以上のキャリブレーション操作により n 個の関節を持つ水平多関節型ロボットの校正すべき諸元がすべて求まる。

3. 回転角法の特徴

ここでは、キャリブレーション操作の面から見た回転角法の特徴を三点測定法および四点測定法の場合との比較を含め以下に示す。

(1) 三点測定法および四点測定法でキャリブレーション結果の精度の基準となるものは、ロボット関節部の各エンコーダの分解能と幾つかの基準点の位置精度。そして、その基準点へツール先端を移動するためのティーチング操作の精度である。

これに対し回転角法では、ロボット関節部の各エンコーダの分解能とキャリブレーションに使用する基準座標平面の分解能のみである。また、2節の式(3)より測定誤差による

回転角法のキャリブレーション結果に与える影響を考えると、

$$f(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{1 - \cos(\theta)} \quad (6)$$

の値が0に近づくほどキャリブレーション誤差は小さくなる。式(6)は図3のような値をとることから、キャリブレーションに使用する任意の回転角 θ は π に近いほど測定誤差によるキャリブレーション誤差が小さくなり、キャリブレーション結果の信頼性もあがる。最小のキャリブレーション誤差は $\theta = \pi$ のときであり、ロボット軌跡の始点と終点でそれぞれ $\Delta P_S(\Delta x_S, \Delta y_S)$, $\Delta P_E(\Delta x_E, \Delta y_E)$ の測定誤差があるとする、これにより求まる回転軸中心座標に生じる誤差 $\Delta P_C(\Delta x_C, \Delta y_C)$ は、

$$\Delta P_C = \frac{1}{2}(\Delta P_S + \Delta P_E) \quad (7)$$

となる。

- (2) 三点測定法および四点測定法のようにロボットの校正すべき諸元のすべてを逆機構的に一度にキャリブレーションする方法では、平面に対する自由度が余るため3個以上の関節を持つ水平多関節型ロボットのキャリブレーションには適さなかった。

しかし、回転角法におけるキャリブレーションでは、対象とするロボットは n 個の関節を持つ水平多関節型ロボットであるため、関節数は問題にならない。ただし、平行リンクを使ってツール先端の姿勢制御を行っているような水平多関節型ロボットには向かない。これは回転角法では、単独で特定の軸を回転した場合にその軸からツール先端までのアームの相対関係が変化しないことを第一条件とするためである。

- (3) 回転角法では、先端軸のみの追加キャリブレーションが可能である。これは、各軸ごとにキャリブレーションを行えるためであり、先端ツールのみを取り替えるロボットに対してのキャリブレーションの場合有効である。
- (4) 回転角法のキャリブレーション操作は、ある軸を回転させ、そのときのツール軸の移動軌跡の始点と終点座標を機械的に読み取るのみであり、煩わしいティーチング操作が不要である。このため、キャリブレーションに必要な所要時間が比較的短くて済み、ティーチング操作による人的誤差が生じないため測定データの信頼性も高くなる。また、キャリブレーションの自動化も容易である。
- (5) 三点測定法および四点測定法では、正確なピッチで並んだ幾つかの基準点に対して、それぞれツール先端が一致するまでアームを移動させるのみで位置測定を必要としない。これに対して回転角法はツール点の位置が測定可能であることが必要である。

4. 各キャリブレーション法のシミュレーションによる比較

4.1 各シミュレーションの比較条件

4.1.1 ロボットキャリブレーションの比較条件

各キャリブレーション法においてシミュレーション条件を同一のものとするために以下の条件を用いてシミュレーションを行った。

- (1) 比較のための対象ロボットは2関節の水平多関節型ロボットとし、エリアは牧野が提案したロボットの標準作業域³⁾を参考にし設定した(図4)。
- (2) ロボット各軸のエンコーダ分解能は 10^{-20} とした。これは、この分解能によりロボット自体が持つ分解能が決まるためであり、今回は使用したコンピュータの計算精度とした。
- (3) 測定データには、三点測定法および四点測定法ではツールの位置決め誤差を一定量含んだ点として、また回転角法ではツール点の測定誤差を一定量含んだ点として、基準点から半径0.1mmの円周を水平0° から24等配した点を用いた。このため、回転角法および三点測定法では一つのキャリブレーションパターンにおいて24通り、四点測定法では24通りのシミュレーションを行った(図5)。
- (4) 各キャリブレーションの等価対応は、測定に使用する基準平面の測定エリアの幅Dxが同じものとし、Dxが20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160mmの場合の8パターンについて行った。各キャリブレーションのそれぞれに対応した基準点を表1に示す。

4.1.2 座標変換精度の比較条件

各キャリブレーションの結果を総合的に評価するために、次の方法によりロボット座標からワールド座標への座標変換精度をシミュレーションで評価した。

- (1) 座標変換精度を評価するために用いる目標点は、図4に示したロボットの標準作業域の四隅の点とした。

(a) Rotation angle method

(b) Three points and four points calibration methods

Fig.5 Standard points used in calibration methods

Table 1 Standard points of eight patterns for calibration methods

Dx	Rotation angle method						Four points calibration method								Three points calibration method					
	P_S		P_{F1}		P_{F2}		P_{F1}		P_{F2}		P_{F3}		P_{F4}		P_{T1}		P_{T2}		P_{T3}	
	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
20	10.00	302.50	-10.00	302.50	-2.52	282.50	-10.00	282.50	10.00	282.50	10.00	302.50	-10.00	302.50	-10.00	292.50	0.00	292.50	10.00	292.50
40	20.00	312.50	-20.00	312.50	-5.71	272.50	-20.00	272.50	20.00	272.50	20.00	312.50	-20.00	312.50	-20.00	292.50	0.00	292.50	20.00	292.50
60	30.00	322.50	-30.00	322.50	-9.49	262.50	-30.00	262.50	30.00	262.50	30.00	322.50	-30.00	322.50	-30.00	292.50	0.00	292.50	30.00	292.50
80	40.00	332.50	-40.00	332.50	-13.82	252.50	-40.00	252.50	40.00	252.50	40.00	332.50	-40.00	332.50	-40.00	292.50	0.00	292.50	40.00	292.50
100	50.00	342.50	-50.00	342.50	-18.70	242.50	-50.00	242.50	50.00	242.50	50.00	342.50	-50.00	342.50	-50.00	292.50	0.00	292.50	50.00	292.50
120	60.00	352.50	-60.00	352.50	-24.17	232.50	-60.00	232.50	60.00	232.50	60.00	352.50	-60.00	352.50	-60.00	292.50	0.00	292.50	60.00	292.50
140	70.00	362.50	-70.00	362.50	-30.40	222.50	-70.00	222.50	70.00	222.50	70.00	362.50	-70.00	362.50	-70.00	292.50	0.00	292.50	70.00	292.50
160	80.00	372.50	-80.00	372.50	-37.78	212.50	-80.00	212.50	80.00	212.50	80.00	372.50	-80.00	372.50	-80.00	292.50	0.00	292.50	80.00	292.50

※ Dx, x, y in mm

Fig.6 Calibration results

(2) 4.1.1節の条件で導かれたそれぞれのパターンのキャリブレーション結果を用いて、各目標点に対する逆機構解を解く。その値でロボットの順機構解を解く。この解と目標点との座標のずれを評価した。

4.2 シミュレーションによる結果の比較

4.1節に挙げた条件によりシミュレーションを行った結果として、各諸元についてのキャリブレーション結果(図6)と座標変換精度についての結果(図7)を示す。図の横軸はキャリブレーション

操作に使用した基準平面の幅Dxを示し、縦軸は各諸元のキャリブレーション計算値を示す。また、図中の記号はそれぞれ、RA(Rotation Angle)回転角法およびFP(Four Points)四点測定法、TP(Three Points)三点測定法、actual真の値である。

4.2.1 ロボットキャリブレーション

図6により各キャリブレーション法の比較を行うと以下のようなになる。

共通点：

Fig.7 Coordinate transformation error

- (1) どの諸元についても基準平面の幅Dxが広くなれば広くなるほど測定誤差によるキャリブレーション誤差への影響が小さくなり各諸元の真の値に近づく。
- (2) ロボット原点 P_{CI} の要素 x_{CI} および y_{CI} の結果についてはキャリブレーション法の違いによる差はほとんどないが、比較的四点測定法が良い結果を出せるようである。

相違点：

ロボット原点 P_{CI} の要素以外の結果について基準平面の幅Dxが20mmのときの回転角法の値程度に真の値に収束するためには四点測定法では4倍から5倍程度、三点測定法では8倍以上の基準平面の幅が必要となる。このことから回転角法は、基準平面が狭い場合でも測定誤差によるキャリブレーション誤差への影響が小さいキャリブレーション法であるといえる。

4.2.2 座標変換精度

実際のキャリブレーションにおいてキャリブレーション誤差は、測定に使用するものの総合精度に対して1オーダー程度大きな値になる。このため、このシミュレーション結果(図7)において座標変換誤差が1.0mm以下程度となる基準平面の範囲を各キャリブレーション法の使用有効範囲とし評価することにした。それぞれの結果は以下ようになった。

回転角法では、Dx=40~60mm程度以上の範囲が使用有効範囲となり、四点測定法では、Dx=160mm程度以上の範囲で使用有

効範囲となる。三点測定法では、Dx=160mmの場合でもキャリブレーション誤差が規定値以下にならず、これ以上の広い基準平面が必要となることがわかる。

以上の結果からキャリブレーションに使用する基準平面が同じ場合、回転角法が最も測定読取誤差による影響が小さいことがわかった。そして、かなり狭い基準平面であってもキャリブレーションの使用有効範囲になるため、実用性の高いキャリブレーション法であるといえる。

5. 結 言

n 個の関節を持つ水平多関節型ロボットの諸元およびワールド座標系に対するロボットの据付位置をキャリブレーションする方法として回転角法と名づけた方法を提案し、原理および特徴を示した。また、三点測定法および四点測定法と呼ばれる既存のキャリブレーション法との比較を三点測定法および四点測定法に対する基準測定点への一致誤差と回転角法に対する測定誤差が一定という条件においてシミュレーションにより行い、次の結論を得た。

- (1) 回転角法は、各関節軸を単独で回転できる任意の軸数を持つ水平多関節型ロボットのキャリブレーションが可能であることを数学的に証明した。
- (2) シミュレーション誤差を比較することにより、回転角法が従来のキャリブレーション法に比べ読取誤差による影響が格段に小さいことを示した。また、それぞれのキャリブレーション法に適した基準平面の大きさを求めることができた。

今後の課題として、実際のロボットに対して今回のシミュレーションと同様の実験を行い、これらのことを実証する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 牧野 洋ほか：SCARAロボットの開発，精密機械，48，3 (1982) 378.
- 2) 古屋 信幸，牧野 洋：SCARAロボット諸元のティーチングによる校正，精密機械，49，9 (1983) 69.
- 3) 牧野 洋：組立用ロボットの性能評価法，昭和60年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集，(1986) 753.