研究

SCARA ロボット諸元のティーチングによる校正*

古 屋 信 幸** 牧 野 洋**

Calibration of SCARA Robot Dimensions
by Teaching

Nobuyuki FURUYA and Hiroshi MAKINO

On an industrial robot positioning accuracy is important factor but there is not the standard method of calibration for robot dimensions that influence the positioning accuracy. This paper presents the calibration methods of SCARA type robot which has two linked arms move in plane. For calibration of robot dimensions, three points calibration method and four points calibration method have been developed. These methods are available for every

SCARA type robots. On these methods robot dimensions are calibrated accurately by teaching function of robot with simple measuring instruments of robot tool point. In this paper a digitizer is used. The accuracy is almost equal to that of measuring instrument. The fact is verified in experimental results, and the accuracy of measured arm length is ± 0.1 mm, that is the accuracy of digitizer used for calibration. These methods are based on the vector expression of robot model, so similar calibration method is available for the other type robot.

Key words: industrial robot, robot dimensions, calibration method, SCARA robot.

1. ま え が き

ロボットにおける位置座標の入力方式は、大別すると①ティーチング方式と②NC入力方式の二つになる。

まず、プレイバックロボットにおけるティーチング方式は、ロボットの各軸に適当な位置検出器をつけておけば、再生時には教示時に得られたデータをそのまま指令入力とすればよいので、座標変換演算を必要とせず、教示・再生の精度さえ良ければ、分解能と同程度の位置決め精度を得ることができる。

これに対して、数値制御ロボットにおけるNC入力方式では、位置決めデータをワールド座標として与えるために、ワールド座標から軸座標への変換を必要とし、そのためには、ロボット自身およびワールド（外界）に関する数学モデルが演算ソフトの中に記述されている必要がある。このモデルの精度は位置決め精度に影響を与え、ロボットのアームの長さや、ロボットとワールド座標系との相対位置関係の記述などに誤差があると、それはそのまま位置決め誤差となって現れる。したがって、もし、高い位置決め精度が要求されるならば、それと同等以上に高い精度でこれらの諸元の値を与えておかなければならない。

ところが、一般に組立用ロボットでは高い位置決め精度が要求されるのに対し、アーム長の製作公差はこの値を超えており、ロボットとワールドとの相対的な位置決

めも据付時に必要精度以内におさめることは難しい。そこで、据付後にこれらの諸元を実測することが必要となる。

実測の方法としては三次元測定器などの外部的な手段を用いることも考えられるけれども、手間がかかる上に十分な精度を得ることができないので、以下に述べるような「ティーチングによる校正」を行うことを提唱する。

この方法は、ワールド座標上で正確に与えることのできる数点をティーチングして、そのときの位置検出器（エンコーダなど）の読みからロボットの諸元を推定しようとするものである。以下に述べるように、ほぼ分解能の精度でアーム長さ等の諸元を推定することができる。

なお、プレイバックロボットにおいても、パレタイジング、デパレタイジングなどの作業においては、全部の格子点をティーチングすることをせず、二、三の点のみティーチングして、ほかの点を内挿・外挿によって求める方法が行われている。この場合にはやはり座標変換が必要であって、ロボットの諸元を校正しておくことが必要となる。

2. 二関節形組立用ロボット SCARA の場合

上記の手法において対象とするロボットの持つ構造上の特殊性、例えば直交座標形、円筒座標形といった形式上の差により、根本的な考え方は同じでも具体的な対処の方法に相違がある。ここでは、二関節形の SCARA ロボット¹⁾にその考え方を適用し、その方法を考える。

2.1 SCARA ロボット

現在 SCARA 形とよばれるロボットは何種類か存在

* 原稿受付 昭和 57 年 10 月 4 日、昭和 56 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 56 年 11 月 3 日）にて発表。

** 正 会 員 山梨大学工学部（甲府市武田 4-3-11）

Fig. 1 SCARA robot proto type II

しているが、ここでは図1で示す原形のものを取り上げる。

このロボットは関節上のDCサーボモータによりアームを駆動するが、アームの先端には工具軸があり、ここで作業を行う。工具軸の上下の動きはエアシリンダにより、回転はステッピングモータで行う。図2はこのロボットによる位置決めをベクトルにより表示したものである。SCARAロボットは本来三次元的な構造となっているが、ここでは工具軸の上下は考えず平面的なアームの動きのみを問題とする。

2.2 SCARAロボットにおけるアーム長さの誤差の位置決め精度に及ぼす影響

SCARAロボットの第一アーム、第二アームの誤差が位置決め精度にどのように影響するかを、簡単な計算により定量的に明らかにする。SCARAロボットでは工具先端は式(1)のように2本のアームベクトルの和として表される。

$$P = R_1 + R_2 \quad (1)$$

$$R_1 = r_1 e^{j\theta_1}$$

$$R_2 = r_2 e^{j(\theta_1 + \theta_2)}$$

ここで、 r_1 : 第一アーム長さ、 r_2 : 第二アーム長さ、 θ_1 : θ_1 軸回転角度、 θ_2 : θ_2 軸回転角度。

図3はパレタイジングを行わせることを想定したものである。ロボットは長方形に区切られた作業領域内の格子点で作業を行う。データを教示するのにこのような場合には、すべての点について行う必要は無く、四隅の点のデータだけ入力し、ほかの点については、そのデータをもとに内挿により求めることができる。

SCARA 2号機の場合、第一アームの長さは400 mm、第二アームの長さは250 mmであり、標準作業域は400 mm×250 mmと定められている。想定された作業は、この標準作業域を分割した9×9の格子点で行うものとする。図4は四隅の点はX-Y座標形式のデータで与え、ほかの点については内挿により求めた場合の位置決め誤差である。また、図5は四隅の点をティーチングし、ほか

Fig. 2 Vector model of SCARA robot

Fig. 3 Palletizing

(-200, 500)

(200, 500)

Fig. 4 Error in palletizing
NC input, $\Delta R_1 = 1.0$, $\Delta R_2 = -1.0$ mm, Error scale $\times 15$ Fig. 5 Error in palletizing
Four corner teaching, $\Delta R_1 = 1.0$, $\Delta R_2 = -1.0$ mm, Error scale $\times 45$

の点はやはり、そのデータをもとに内挿により求めた場合の誤差である。両図において、第一アームに+1 mm、第二アームに-1 mmの誤差のある場合を示している。各例ともに、誤差の大きさは、もとの作業域の尺度に対して拡大して示してあるが、その拡大率は図に示した。

これらの例からわかることは、アームの長さの誤差の存在する状態でロボットに位置決めさせる場合、その影響は大きなものとなり、及ぼす効果は入力データの与え方により現れる傾向に差異が存在する。この例では四隅の座標をティーチングで与えた場合の方が誤差が小さい。また、誤差の最大値は両アームのもつ誤差の絶対値の和とほぼ同程度となる。したがって、例えば位置決め精度が0.01 mmの性能を必要とするロボットにおいて

Fig. 6 Three points calibration method

は、アームの長さを、それ以上の精度で与えなければ意味がないと結論できる。しかも、その値はロボットを組立てた後のものでなければならない。したがって、ロボットを組立てた後において、アームの長さ等の位置決めに影響を及ぼす諸元を校正することが必要となるのである。

3. ティーチングによるロボット諸元の校正法

ロボットのティーチング機能を利用し、位置決めに必要な諸元を校正する方法について考える。ここで、ロボット自体の持つ座標系と、作業空間内に固定されたワールド座標系とのずれは厳密に言えばロボット諸元とは言えないが、正確な位置決めを行う場合には是非知っておかなければならない量であるから、ロボット諸元の中に含め、同時に校正法の中で考えることとする。校正にあたってワールド座標系は図6のようにSCARAロボットの第一関節を原点とするX-Y座標系と定める。

3.1 三点測定法

正確なピッチで与えられた一直線上の3点を教示し、3点における各関節の回転角とピッチからベクトル方程式を解き、ロボット諸元を校正する方法を考え、三点測定法と名づけた。まず一直線上に等ピッチで並ぶ P_1, P_2, P_3 をティーチングしながらロボットの工具先端を移動させ、そのときの初期位置（エンコーダによる原点）からの回転角を $(\theta_{a1}, \theta_{b1}), (\theta_{a2}, \theta_{b2}), (\theta_{a3}, \theta_{b3})$ として求める。3点のピッチを P_x とすれば、この関係から得られるベクトル方程式の未知量は、 $P_1(x_1, y_1)$ の成分 x_1, y_1 と θ_{a0}, θ_{b0} ($P_1 \sim P_3$ の直線とロボットアームが初期位置（エンコーダによる原点）においてなす角度）、第一アーム、第二アームの長さ r_1, r_2 の計6個となる。これらの値は以下の三つのベクトル方程式を解くことによって得られる。

$$P_1(x_1, y_1) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a1})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a1} + \theta_{b0} + \theta_{b1})} \quad (2)$$

$$P_2(x_1 + P_x, y_1) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a2})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a2} + \theta_{b0} + \theta_{b2})} \quad (3)$$

$$P_3(x_1 + 2P_x, y_1) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a3})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a3} + \theta_{b0} + \theta_{b3})} \quad (4)$$

これより、

$$e^{-j\theta_{a0}}(P_3 - P_2) = e^{-j\theta_{a0}}(P_2 - P_1) \quad (5)$$

$$r_1(e^{j\theta_{a3}} - 2e^{j\theta_{a2}} + e^{j\theta_{a1}}) = r_2 e^{j\theta_{b0}}(-e^{j(\theta_{a3} + \theta_{b0})} + 2e^{j(\theta_{a2} + \theta_{b0})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{b0})}) \quad (6)$$

ここで、下式の二つの既知ベクトルを

$$e^{j\theta_{a3}} - 2e^{j\theta_{a2}} + e^{j\theta_{a1}} = k_1 e^{j\theta_1} \quad (7)$$

$$-e^{j(\theta_{a3} + \theta_{b0})} + 2e^{j(\theta_{a2} + \theta_{b0})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{b0})} = k_2 e^{j\theta_2} \quad (8)$$

とおくことにより

$$r_1 k_1 e^{j\theta_1} = r_2 e^{j\theta_{b0}} \cdot k_2 e^{j\theta_2} \quad (9)$$

(7), (8)は平面三角のベクトル解²⁾を用いて、

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_1}{k_2}, \quad \theta_{b0} = \theta_1 - \theta_2 \quad (10)$$

が求まり、また、 $P_2 - P_1 = P_x$ から

$$P_x = e^{j\theta_{a0}}\{r_1(e^{j\theta_{a2}} - e^{j\theta_{a1}}) + r_2(e^{j(\theta_{a2} + \theta_{b0} + \theta_{b2})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{b0} + \theta_{b1})})\} \quad (11)$$

また、ここで

$$e^{j\theta_{a2}} - e^{j\theta_{a1}} = k_3 e^{j\theta_3} \quad (12)$$

$$e^{j(\theta_{a2} + \theta_{b0} + \theta_{b2})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{b0} + \theta_{b1})} = k_4 e^{j\theta_4} \quad (13)$$

とおくことにより、

$$k_3 e^{j\theta_3} + \frac{k_1 k_4}{k_2} e^{j\theta_4} = k_5 e^{j\theta_5} = \frac{P_x}{r_1} e^{-j\theta_{a0}} \quad (14)$$

式(14)において、 k_5, θ_5 が平面三角の解から求まり、これから

$$r_1 = \frac{P_x}{k_5}, \quad \theta_{a0} = -\theta_5 \quad (15)$$

となる。これより、第一アームの長さ r_1 、および初期位置でのアーム角度 θ_{a0} が求められる。第二アームの長さ r_2 、および角度 θ_{b0} は式(10)より求められる。また、これらの値を式(2), (3)または(4)に代入することにより、ロボット原点とワールド座標との相対位置関係も知ることができる。

3.2 四点測定法

三点測定法と同様な手法により、今度は長方形を形成する4点 $P_1(x_1, y_1), P_2(x_1 + P_x, y_1), P_3(x_1 + P_x, y_1 + P_y), P_4(x_1, y_1 + P_y)$ をティーチングする(図7)。このデータを用いて、ロボット諸元を校正する方法を四点測定法と名づける。この4点から得られたデータの間で次のようなベクトルの関係式が成り立つ。

$$P_1(x_1, y_1) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a1})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a1} + \theta_{b0} + \theta_{b1})} \quad (16)$$

$$P_2(x_1 + P_x, y_1) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a2})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a2} + \theta_{b0} + \theta_{b2})} \quad (17)$$

$$P_3(x_1 + P_x, y_1 + P_y) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a3})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a3} + \theta_{b0} + \theta_{b3})} \quad (18)$$

$$P_4(x_1, y_1 + P_y) = r_1 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a4})} + r_2 e^{j(\theta_{a0} + \theta_{a4} + \theta_{b0} + \theta_{b4})} \quad (19)$$

この方法は、未知の変数に対して条件式の数の方が多くなるが、長方形の縦、横の長さ P_x, P_y に着目することにより、それぞれ諸元を決定することができる。ここでは P_x の場合のみを示す。

Fig. 7 Four points calibration method

$$e^{-j\theta_{a0}}(P_3 - P_2) = e^{-j\theta_{a0}}(P_4 - P_1) \quad (20)$$

から

$$\begin{aligned} r_1(e^{j\theta_{a3}} - e^{j\theta_{a2}}) + r_2(e^{j(\theta_{a3} + \theta_{s0} + \theta_{s1})} - e^{j(\theta_{a2} + \theta_{s0} + \theta_{s2})}) \\ = r_1(e^{j\theta_{a4}} - e^{j\theta_{a1}}) + r_2(e^{j(\theta_{a4} + \theta_{s0} + \theta_{s4})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{s0} + \theta_{s1})}) \end{aligned} \quad (21)$$

$$e^{j\theta_{a3}} - e^{j\theta_{a2}} - e^{j\theta_{a4}} + e^{j\theta_{a1}} = k_1 e^{j\theta_1} \quad (22)$$

$$-e^{j(\theta_{a3} + \theta_{s1})} + e^{j(\theta_{a2} + \theta_{s2})} + e^{j(\theta_{a4} + \theta_{s4})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{s1})} = k_2 e^{j\theta_2} \quad (23)$$

とおくことにより,

$$r_1 k_1 e^{j\theta_1} = r_2 e^{j\theta_2} \cdot k_2 e^{j\theta_2} \quad (24)$$

これより,

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{k_1}{k_2}, \quad \theta_{b0} = \theta_1 - \theta_2 \quad (25)$$

$P_2 - P_1 = P_x$ であるから

$$P_x e^{-j\theta_{a0}} = r_1(e^{j\theta_{a2}} - e^{j\theta_{a1}}) + r_2(e^{j(\theta_{a2} + \theta_{s0} + \theta_{s2})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{s0} + \theta_{s1})}) \quad (26)$$

$$e^{j\theta_{a2}} - e^{j\theta_{a1}} = k_3 e^{j\theta_3} \quad (27)$$

$$e^{j(\theta_{a2} + \theta_{s0} + \theta_{s2})} - e^{j(\theta_{a1} + \theta_{s0} + \theta_{s1})} = k_4 e^{j\theta_4} \quad (28)$$

とおくことにより,

$$P_x e^{-j\theta_{a0}} = r_1 k_3 e^{j\theta_3} + \frac{k_1}{k_2} r_1 k_4 e^{j\theta_4} \quad (29)$$

$$k_3 e^{j\theta_3} + \frac{k_1 k_4}{k_2} e^{j\theta_4} = k_5 e^{j\theta_5} \quad (30)$$

平面三角の解を適用することにより, これを解いて,

$$r_1 = \frac{P_x}{k_5}, \quad \theta_{a0} = -\theta_5 \quad (31)$$

r_2, θ_{b0} に対しては, 式 (25) を用いることにより求めることができる。 P_y を基準として解く場合については式 (20) 以降に別の式が与えられるが, 過程は同じなので省略する。

3.3 測定系について

三点測定法, 四点測定法はティーチングにより教示した工具先端の移動距離と各関節の回転角度から, ロボット諸元を校正する方法である。そのためには, 工具先端の位置と各関節の回転角度を正確に測定することが必要

Fig. 8 Calibration system of SCARA robot

となる。関節の回転角度に関してはモータに取り付けた光学式エンコーダにより測定でき, 工具先端の位置を測定するためには, 今回は平面内の座標を読み取るディジタイザを用いた。測定系の構成を図 8 に示す。ロボットの工具先端に取り付けたカーソルをディジタイザの上で移動させ, その座標値を X, Y 座標として読み取ることができる。このデータは, ディジタイザの出力端子より, 制御用のマイクロコンピュータに取り込む。また, 関節の回転角度はモータのドライバに入力させたパルス数を数えることにより求められる。結果は直接 CRT 上に表示させる。ディジタイザの分解能は X, Y 軸ともに 0.04 mm であり, 測定範囲は $350 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ である。また精度に関しては, 総合精度 0.15 mm である。関節の回転角度は, モータ軸に直結した 240 p/r の光学式エンコーダによるが関節軸上のハーモニックドライブ減速機により, θ_1 軸で $1/157$, θ_2 軸で $1/80$ に減速するので, θ_1 軸 $1.67 \times 10^{-4} \text{ rad/p}$, θ_2 軸で $3.27 \times 10^{-4} \text{ rad/p}$ の分解能となる。

測定に際しては, オペレータが CRT を見ながら, 工具先端が一直線上の 3 点, あるいは長方形の 4 頂点にくりよように教示し, X, Y 座標値と回転角度を読み取る。このデータは, 大型計算機により処理して, ロボットの諸元を求める。

4. 校正結果と考察

4.1 三点測定法により求めた結果

3.3 節までで説明した方法により, SCARA 2 号機のアームの長さの校正を行った。図 9 は三点測定法により実際に求めた結果である。測定条件としては, ロボット作業域に設定した $X-Y$ 座標系で原点となる第一アームのつけ根の関節から, $Y=273 \text{ mm}, 370 \text{ mm}, 483 \text{ mm}$

Fig. 9 Three points calibration method

Fig. 10 Four points calibration method (P_x varied) Fig. 11 Four points calibration method (P_y varied)

と位置を変え、測定のパッチを X 方向に $P_x=50$ mm, 100 mm, 150 mm の 3 種類で行った。なお測定位置の Y の値は、三点測定法の計算処理により校正した値であ

る。図 9 (a), (b) に示したのは、三点測定法により実測して求めた第一アーム、第二アームの長さである。測定のパッチ P_x を大きくとるに従い、第一アームの長さ、

第二アームの長さとも一定の値に収束してゆく傾向のあることが実験的に示された。この値は測定位置 (Y の値) によっても異なってくるが, P_x が大きくなるに従い一定の値に収束している。すなわち, この収束値が真のアーム長さと考えられる。

4.2 四点測定法により求めた結果

図 10, 図 11 は四点測定法により求めた第一アーム, 第二アームの長さを図示したものである。この図は 4 点のなす長方形の X 方向の辺の長さ P_x , Y 方向の辺の長さ P_y を変えて比較したものである。

図 10 は $P_y = 195.6 \text{ mm}$ で一定にして, P_x の値を変化させたものである。黒丸は P_x から求めた結果, 白丸は P_y から求めた結果である。この結果からも一辺の長さ P_x を増大させるに従い, ロボットの 2 本のアームの長さの校正値が一定の値に収束してゆく傾向が実験的に確かめられた。また, P_x の値を増大させてゆくに従い, P_x, P_y の両方で求めた値が一定の値に収束している。図 11 は P_x を一定 ($P_x = 319.52 \text{ mm}$) として P_y を変え, そのデータの傾向について調べたものである。この場合も図 10 と同様に, P_y の増加に従い, 測定値が一定の値に収束し, また, P_x から求めた値と P_y から求めた値の両者が同一の値に収束してゆくことが実験的に確かめられた。

4.3 三点測定法と四点測定法の比較

三点測定法と四点測定法について, その比較を行う。三点測定法は測定によって求められた諸元が, 測定のピッチを大きくとらないと収束しない。しかし, 直線上で測定が行えるということは, 平面的な広がりが必要としないので, 長所の一つとも考えられる。これに対して, 四点測定法では工具先端を長方形の 4 頂点上を移動させるなければならないので測定器も平面的な広がりを測定できるものでなければならない。一直線上の 3 点を移動させる三点測定法に比較して, 長手方向の距離は比較的短くてすみ, 測定データをもとに計算した諸元も速やかに収束する。また, 同一の測定結果から, 二つの計算法により, それぞれ諸元を求めることができるので, 両者を比較することにより, 得られた結果の信頼性を判定する目安となる。

5. 結 論

SCARA ロボットの位置決め精度に影響を及ぼす要因

について考察を加え, ロボット諸元の校正法の必要なことを示した。具体的な手法として三点測定法, 四点測定法と名づけた方法を開発し, 実際に SCARA 2 号機とデジタイザを組み合わせた測定システムをつくり, SCARA ロボット諸元の校正を行った。その結果として次の結論を得た。

- (1) SCARA ロボットのアーム長さに誤差が含まれる場合, 正しいアームの長さをもとに位置決めを行わせると, アームの長さに存在する誤差と同程度の位置決め誤差を生ずる。したがって, 位置決め精度と同程度かそれ以上の精度でアームの長さを校正しておく必要がある。
- (2) 位置決め精度に影響を及ぼす SCARA ロボット諸元の校正のために, 三点測定法および四点測定法と名づけた手法を開発し, 実際に両者の比較を行った。その結果, 二つの方法にはそれぞれ特徴があるが, 共通していえることは, 測定ピッチ P_x, P_y はなるべく大きくとるのが良いことがわかった。
- (3) 両測定法ともに, ピッチを大きくとるならば, 工具先端の移動距離の測定に用いた測定器と同程度にまで精度を向上させることができる。今回用いたデジタイザでは, その値は $\pm 0.15 \text{ mm}$ であり, アーム長さの測定結果のばらつきも, その範囲内にあった。
- (4) 三点測定法, 四点測定法はロボットをベクトル表示することにより導かれた手法である。したがって, ほかの形式のロボットにおいても, 複雑にはなると思われるが同様な校正方法が存在するものと考えられる。

以上が SCARA ロボット諸元の校正法に関する研究から導かれた結論であるが, 組立用ロボット等の位置決め精度が高くなるにつれて, このような校正法の必要性も大きくなるものと考えられる。特に, コンピュータの制御の比重が高まり, ロボットが NC 化した場合に, その必要性は著しくなると考えられる。

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) 牧野 洋: 自動機械機構学, 日刊工業新聞社 (1976) 43~78.