平面多関節型ロボットの位置精度の測定方法*

神谷 均** 辻 裕一*** 丸山 一男***

Measurement Method of Positioning Accuracy for SCARA Robot

Hitoshi KAMIYA, Hirokazu TSUJI and Kazuo MARUYAMA

According to JIS (Japan Industrial Standard), definition of positioning accuracy about the robots is clearly described but the measurement method of the accuracy is not described concretely. In this study a measurement method of positioning accuracy using the reference plate with grid patterns and the image processing probe with CCD camera is proposed. This measurement procedure consists of two steps. In the first step, the positions of grids on the reference plate are measured by the probe mounted on the 3-D coordinate measuring machine. In the second step, the robot is commanded to move at each position of grids on the plate placed in the robot's working area and then positioning accuracy about the robot is measured by calculating the difference between commanded position and performed position. The detective accuracy for certain grid is within $0.6 \mu\text{m}$ in standard deviation and that for 9 grid patterns in the $400 \times 360 \text{ mm}$ area is within $3 \mu\text{m}$. And this method is actually applied to a SCARA robot.

Key words: positioning accuracy, SCARA robot, image processing probe, 3-D coordinate measuring machine

1. 緒言

近年、産業界における製品の多様化、複雑化、精密化に伴い、その製造過程で活躍する産業用ロボットに位置に関する高い精度が求められている。

日本工業規格 (JIS B 8431¹⁾) では図1のようにロボットの位置に関する精度として位置決め精度と位置繰返し精度を定義している。しかし、その測定方法についてはいまだに確立されていない。特に、位置決め精度についてはロボットの機械原点設定および移動距離の測定方法に技術的問題点が多いとされ、規格化されるに至っていない。平面多関節型ロボットの運動においては2次元の位置決め精度が特に重視され、その測定方法として2-D digitizing method が挙げられており、その繰返し測定精度は現状では $0.2 \sim 2 \text{ mm}$ とされている²⁾。しかし、ロボットの性能測定に利用するには測定精度が不十分であり、より高精度の測定方法が必要である。

そこで本研究では、画像処理技術を用いて2次元の位置に関する精度の非接触測定方法を開発し、測定精度の向上を目指す。考案した測定方法の概要は次の通りである。まず9個の格子状の目印を貼り付けた検定用格子板を作製し、三次元座標測定機に取り付けた画像処理式プローブで1つ1つの格子点画像を取り込み、その画像を解析することにより9個の点の相対的な格子点中心座標を測定し、測定原器とする。そして次にロボットのアーム先端位置に画像処理式プローブを取り付け、各格子点の座標をロボットに入力し、得られた画像を解析する。これにより、ロボットが持つ位置に関する精度を μm オーダーで測定することを目指している。

2. 測定方法の概略

提案している測定方法は2段階で構成され、第1段階では検定用格子板を校正し、第2段階では検定用格子板を用いてロボットの位置に関する精度を測定する。すなわち、第1段階で

は9か所に格子パターンを持つ検定板の格子点の X, Y 座標および傾き角を三次元座標測定機に取り付けた画像処理式プローブにより測定し、検定用原器とする。第2段階ではロボットの可動領域に検定用格子板を置き、ロボットに第1段階で決定した格子点座標への位置指令を与え、ロボットのアーム先端に取り付けた画像処理式プローブを用いて格子点座標を測定する。これによりロボットのアームの X, Y 方向の位置および角位置に関する精度を測定する。

3. 実験装置および実験方法

3.1 測定システムの構成

図2に第1段階における測定システム全体の構成を示す。三次元座標測定機の制御および画像処理式プローブによる測定はコンピュータで集中的に行われる。画像処理式プローブはCCDカメラと画像処理装置で構成されており、カメラから取り込まれた画像信号は画像処理装置により画素数 640×400 、256階調のRGBデジタルデータに変換される。そのデータをコンピュータで処理し、検定用格子板上の格子点座標を非接触で決定する。図3に第2段階での測定システム全体の構成を

P_c : Commanded position
 P_a : Performed position
 $\{P_a\}$: Performed positions
 $\bar{P}_a$: Average of performed positions

Fig. 1 Definition of positioning accuracy (JIS B 8431-1988)

* 原稿受付 平成6年5月10日

** 学生会員 東京工業大学大学院 (横浜市緑区長津田町 4259)

*** 正会員 東京工業大学精密工学研究所

Fig. 2 Measuring system (First step)

Fig. 3 Measuring system (Second step)

示す。ロボットの制御が専用のコントローラによる以外は第1段階と同じである。

3.2 検定用格子板

検定用格子板は、500×500 mmの正方形の鋼板 (S 55 C) で作製する。白く塗装した後、400×360 mmの長方形範囲内に計9個の格子状の目印を付け、この範囲内をロボットの位置精度の検定範囲とする。これは、牧野が提案したロボットの標準作業域を参考にし、設定する³⁾。

3.3 画像処理式プローブによる格子点座標の決定

図4にCCDカメラの画像 (画像範囲は約4.6×7.4 mm) からの格子点座標の決定方法を示す。画像の周辺部に4本の測定ラインを設定し、画像の濃度分布から格子画像のライン上でのエッジを2点ずつ検出する。その中点を結ぶ2直線の交点を仮の格子点座標とする。その位置から上下左右に50画素離れた近傍に8本の測定ラインを再設定し、同様の手順で格子点座標を決定し直すことにより、より高精度の検出を可能にした。

次にエッジ位置を求める方法について説明する。例として縦線が写る画像の部分的な模式図を図5に示す。理想的なエッジ

ではエッジ位置において濃度がステップ状に変化するが、実際のエッジ位置における濃度変化は図のように傾斜を持つ。そこでエッジ位置を濃度変化の最も大きい位置とする。濃度の差分を取り、さらに差分のピーク値と前後の値を用いて3点を二次曲線に近似し、その頂点をエッジ位置とする。このサブピクセル処理により1画素以下の分解能でエッジ位置の検出ができる⁴⁾。

3.4 プローブ座標系の補正方法

各格子点の相対的な位置は三次元座標測定機のプローブ変位と画面上における格子点の相対的な位置との和で表される。そこで画面上の画素変位が三次元座標測定機上で相当する変位をあらかじめ知る必要がある。

三次元座標測定機の座標系からプローブ座標系が θ 傾いていて、1画素の横幅 (X方向の画素サイズ) が p (mm) に、縦幅 (Y方向の画素サイズ) が q (mm) に相当すると仮定する。三次元座標測定機の移動距離と画面内における格子点の移動距離が一致することから両者の関係を導くことができる。例えば三次元座標測定機を (dX, dY) mm動かした場合、格子点の中

Fig. 4 Method to detect the position of a grid pattern

Fig. 5 Definition of edge position

Fig. 6 Calibration for probe coordinates

心位置が (dx, dy) pixel 移動したとすると図 6 に示す変換式が成り立つ。これから得られた各値は次のようになった。

$$p = 11.541 \mu\text{m/pixel}$$

$$q = 11.410 \mu\text{m/pixel}$$

$$\theta = -0.009437 \text{ rad}$$

この補正値を用いて、 $3 \times 3 \text{ mm}$ の撮像範囲内の画素位置を補正したところ、誤差は $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内であった。

3.5 検出精度

3.3 節で述べた方法により格子点中心座標の検出精度（繰返し性を標準偏差で表す）を測定する。検出用格子板を固定し、同一格子点の位置を 20 回測定し、ばらつきの程度を測定値の標準偏差により評価する。格子点中心位置の座標は画面中心を原点とするグローブ座標系で計算した後、前の 3.4 節で求めた p, q, θ の値を用いて三次元座標測定機の座標系に変換する。繰返し検出精度に影響すると考えられる因子を次に挙げる。

① 格子点中心座標の決定方法

- (1) 格子点予想時にエッジを検出するためにとる測定ラインの本数
- (2) 格子点決定時にエッジを検出するためにとる測定ラインの本数

② 照明強度

③ カメラのフォーカス

④ 画面上での格子点の位置及び傾き

以上の因子が繰返し検出精度に及ぼす影響を図 7～図 11 に示す。

図 7 に格子点予想ライン数（画面の上下左右において直線のエッジの中点を求める際にとる走査ラインの数）と検出精度および測定に要する時間の関係を示す。測定ラインは各 1 ラインのときは画面周辺から 50 ライン目に取り、それ以上のときは 50～90 ライン目の間に等間隔に設定した。この結果から予想ライン数が少ないほど処理時間は短縮され、検出精度はあまり変化しないことが分かる。そこで予想ライン数として画面上下左右の周辺部分に各 1 本ずつ、合計 4 本を採用する。

次に図 8 に格子点決定ライン数と検出精度の関係を示す。測定結果は図 7 と同じ傾向を示し、検出精度には目立った変化はないので、決定ライン数には各 2 本ずつ、合計 8 本を採用す

Fig. 7 Effect of number of scanning lines on detective accuracy in predictive step

Fig. 8 Effect of number of scanning lines on accuracy in determinative step

Fig. 9 Effect of light intensity on accuracy

る。測定ラインは各 1 ラインのときは格子点予想位置から 50 ライン目に取り、それ以上のときは 50～90 ライン目の間に等間隔に設定した。

図 9 に照明強度と検出精度の関係を示す。図 9～図 11 中の曲線は測定結果を 2 次曲線で近似した結果を示している。レンズの絞り、照明装置から格子点までの距離を固定し、6 段階に照明強度を変化させ測定したところ画面上で格子点の写り方が

Fig. 10 Effect of focus on accuracy

Fig. 11 Effect of gradient of grid on accuracy

Table 1 Detective accuracy for grid pattern (standard deviation)

	X coordinate μm	Y coordinate μm	ϕ rotation mrad
CMM	0.3	0.2	0.3
Robot	0.6	0.5	0.4

はっきりしていた3段階目の検出精度が最も良く、その値に照明強度を固定して測定を行う。

図10にレンズから検定用板までの距離と検出精度の関係を示す。画面上で格子点の写り方がはっきりする位置を0とし、三次元座標測定機をZ方向に上下数mm移動させた結果、フォーカスが合っている位置での検出精度が最も良く、以後そのZ座標値に固定して測定を行う。

図11に画面上の格子パターンの傾きと検出精度の関係を示す。画面上で格子点の横軸がX軸と平行になる場合を傾き0°とし検定用板を5°ずつ回転させたところ、X方向の精度には相関関係は見られないが、Y方向の精度は傾きが小さいほど良い。そこで、できる限り傾きが0°になるように検定用格子板を設置する。

以上はすべて三次元座標測定機上で行った結果であるが、検出精度が最も良い条件に固定し三次元座標測定機上とロボットの測定用土台上で格子点を検出した結果を表1に示す。

ここで、 ϕ は格子パターンの横線の傾きの検出精度を表し、ロボットのアーム先端軸の回転精度を測定するのに用いる。

① + (-199.769, 180.026, -0.6) (0.001, 0.002, 0.8) (0.042, 180.013, -5.6) (0.002, 0.003, 1.4)	② + (200.137, 180.198, -1.5) (0.001, 0.002, 0.8) (0.001, 0.003, 0.7)	③ + (0.001, 0.002, 0.8) (0.001, 0.003, 0.7)
④ + (-199.994, 0.038, 2.7) (0.000, 0.003, 0.4) (0.000, 0.000, 5.8) (0.000, 0.000, 1.2)	⑤ + (199.882, 0.038, 5.7) (0.000, 0.003, 0.4) (0.000, 0.000, 5.8) (0.000, 0.000, 1.2)	⑥ + (0.000, 0.003, 0.4) (0.000, 0.000, 5.8) (0.000, 0.000, 1.2)

Upside ...Average at 5 measurement data
Downside...Standard deviation at 5 measurement data
(X coordinate mm, Y coordinate mm, ϕ Rotation mrad)

Fig. 12 Measurement result for the positions of six grids (upwards)

① + (-199.769, 180.026, -0.6) (0.042, 180.013, -5.6)	② + (200.137, 180.198, -1.5) (0.001, 0.002, 0.8) (0.001, 0.003, 0.7)	③ + (0.001, 0.002, 0.8) (0.001, 0.003, 0.7)
④ + (-199.994, 0.038, -1.8) (0.001, -0.001, 2.0)	⑤ + (199.882, 0.038, 1.2) (0.001, -0.001, 2.0)	⑥ + (0.001, -0.001, 2.0)
⑦ + (-200.392, -180.018, -21.2) (0.201, -180.142, -18.2)	⑧ + (199.801, -179.965, -7.5) (0.201, -180.142, -18.2)	⑨ + (0.201, -180.142, -18.2)

(X coordinate mm, Y coordinate mm, ϕ Rotation mrad)

Fig. 13 Measurement result for the position of all grids on the reference plate

三次元座標測定機の測定ステージは空気圧による防震装置が付いているために検出精度が高いと考えられる。

この節は3.4節の後に書かれているが、実際には最初に以上の条件について調査し、最も検出精度の高い条件で固定してから座標系の補正を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 検定用格子板の校正 (第1段階)

検定用格子板上に貼り付けられた格子点の座標と各格子パターンの横線の傾きを求める。この傾きの値はロボットのアーム先端軸の回転精度の評価に用いる。格子点の座標は前章で述べたように三次元座標測定機の変位と画面上の格子点の相対的な変位との和で表される。三次元座標測定機の測定範囲はX, Y方向に500×200mmであるので、9個の格子点を一度に測定することができない。そこで板の上下6個ずつに格子点を分けて測定を行い、重複する3点の座標を重ね合わせて一致させる。図12に上半分6点の測定結果を示す。ただし、各測定値は点④, ⑤, ⑥の最小自乗直線の傾きが0になるように座標系を回転し、9点のうちで中心にある点(表中の点⑤)を原点としたときの座標を表示する。各点の測定繰返し精度を標準偏差で表すと3μm以内であった。下半分6点についても同じ精度で測定できた。更に、重複する3点を一致させた際の誤差も3μm以内である。図13に9個の格子点の座標を求めた結果を示す。

4.2 ロボットアーム先端軸とプローブ中心の偏心量の測定

ロボットの位置精度を測定する際に得られる画像情報にはX, Y方向の位置決め精度のほかにアーム先端の回転部分の精度が影響する。図14に示すように格子点の座標を測定する場合、アーム先端軸まわりの角度が検定用板に対して変化する

Fig. 14 Measurement error by the rotation of the arm axis

と、ロボットのアーム先端軸中心から格子点までの距離を半径とし変化した角を中心角とする弧の距離が測定誤差になるためである。その誤差を求めるためにはロボットアーム先端軸の中心が取得画像のどこに相当するのかを調べる必要がある。ロボットアーム先端軸の中心は軸を回転させたとき取り付けカメラから得られる画像の中の不動点の位置にあたる。そこでアームをロボットアーム先端軸まわりに 90° ずつ回転させた場合の格子点画像を3枚取り込み、その3つの格子点中心を円周上に持つ円の中心を求めれば、そこがロボットアーム先端軸の中心位置である。

画面の中心を $(0, 0)$ としてロボットアーム先端軸中心位置の座標を画素座標で表すと、結果は次のようになる。

測定された画素座標

$$X = -91.59 \text{ pixel}$$

$$Y = 16.63 \text{ pixel}$$

10 回繰り返した際の標準偏差

$$\sigma_x = 0.37 \text{ pixel} = 4.28 \mu\text{m}$$

$$\sigma_y = 0.17 \text{ pixel} = 1.94 \mu\text{m}$$

4.3 ロボットの位置精度の測定（第2段階）

図 15 に検定用格子板を用いて平面多関節型ロボットの位置決め精度と位置繰返し精度を測定した結果を示す。位置決め精度は $\pm 0.4 \text{ mm}$ 、位置繰返し精度は 0.03 mm 以内であり、位置繰返し精度に比べて位置決め精度が劣るという結果が得られた。

測定結果の定量的な評価は、比較できる他の測定方法が手元がないので、今後の課題である。

5. 結 言

本研究で得られた主な結果は次のようになる。

(1) 画像処理式プローブと検定用格子板によるロボットの

Fig. 15 Measurement result for positioning accuracy

位置に関する精度の測定方法を提案した。この方法は X 、 Y 方向の位置精度のほかにロボットのアーム先端軸の回転精度も同時に測定可能である。

(2) 検定用格子板の $400 \times 360 \text{ mm}$ 範囲内の格子点座標を三次元座標測定機に取り付けた画像処理式プローブで5回繰返し測定したところ、位置検出の繰返し精度は標準偏差で $3 \mu\text{m}$ 以内である。

(3) 本測定方法で平面多関節型ロボットの位置精度を JIS B 8431 に従い測定したところ、位置決め精度は $\pm 0.4 \text{ mm}$ 、位置繰返し精度は 0.03 mm 以内である。

文 献

- 1) 日本工業規格 JIS B 8431-1988：産業用ロボットの特性・機能の表示方。
- 2) ISO/TC 184/SC 2/WG 2 N 261 Rev. 3：Committee Draft Technical Report (DTR) 13309, Aug. 1993.
- 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.
- 4) 丸山一男，辻 裕一，橋本勝郎：エッジ画像のサブピクセル処理による高精度形状検出，1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(1992) 243.