

三本爪ダイヤフラムチャックを用いた精密位置決めに関する研究

片 山 剛之丞*・一 色 桂**

(平成15年9月12日受理)

Study on Precision Positioning using a Diaphragm Chuck with Three Jaws

Gonojo KATAYAMA and Kei ISSHIKI

(Received Sep. 12, 2003)

Abstract

The purpose of this study is to automatically position a workpiece model at an arbitrary point with high precision. For precision positioning with a gripped workpiece model, the diaphragm chuck has a piezoelectric element in each of the three jaws. Despite the disadvantages of narrow-range movement and hysteresis, the piezoelectric element is popular for use in fine adjustment because of the advantages of compactness, high resolution, good responsiveness, and control at an applied voltage. The workpiece model position was measured using a CCD camera. The CCD camera allowed quick position measurement. A voltage was applied to the piezoelectric elements to excite them as actuators for the automatic precision positioning of a workpiece model gripped by the diaphragm chuck with three jaws. Displacement to the target position was set to $7\mu\text{m}$ for positioning. Consequently, precision positioning with an error of within $0.39\mu\text{m}$ was realized in any direction.

Key Words: automatic precision positioning, piezoelectric element, CCD camera, micro motion mechanism, diaphragm chuck

1. 緒 言

位置決め技術は製品を製作したり物体の寸法を計測する場合や、運転制御する各種の機器など、機械工業において基盤となる技術の一つである。そして、近年における工作機械、各種産業機器、計測機器などの高精度化にともなって、精密位置決め技術が要望されるようになってきた¹⁾。

一般に位置決め系の構成は次のように分けられる。まず、アクチュエータと運動伝達用要素および案内要素から構成される送り機構、さらに物体位置を計測する位置検出用要素と、それから得られた情報をアクチュエータに指令する制御系がある。

アクチュエータとして各種回転モータやリニアモータを使用している事例が多く、圧電素子の使用もかなり多い。

圧電素子は可動範囲が狭くヒステリシスがあるなどの欠点もあるが、小型で分解能が高く、さらに応答性が良く印加電圧で制御できるなどの利点から微調整用として用いられることが多い²⁾。

本研究の目的は圧電素子を用いて工作物モデルを任意の位置に自動位置決めを行う機構を究明しようとするものである。軸物の内外形を同心に精密加工する場合、基準とする外径を精密研削加工し、その外径を回転主軸に同心にチャックして精密内面研削加工する。また取り付け基準外径が変動する変種変量生産の場合は寸法が変動する毎にチャック爪の取り替えおよび調整が必要となる。これらを自動的に行うことを考慮して3本爪ダイヤフラムチャックを用いた。工作物モデルを把持した状態で任意の位置に位置決めを行うために、3本爪のそれぞれに圧電素子を組み込ん

* 広島工業大学工学部機械システム工学科

** グローリー工業株

だ。この3本爪はダイヤフラム表面を半径方向に移動可能であり、圧電素子の変位量によって各爪を移動する構造である。工作物モデルの位置は CCD カメラを用いて測定した。CCD カメラを用いることにより、短時間で位置を測定することができる³⁾。そして、測定値から各爪に必要な移動量を計算し、次に各圧電素子の印加電圧を制御することによりダイヤフラムの3本爪を押し引きして工作物モデルを位置決めする。実験装置は以上の行程を目標位置に近づくまで自動的に行う。この実験装置を使用し、目標位置までの移動量を $7\mu\text{m}$ と設定し位置決めを行った。その結果、任意の位置へ $0.39\mu\text{m}$ 以内に精密位置決めを実現できたので報告する。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 ダイヤフラムチャック

図1に圧電素子を組み込んだダイヤフラムチャックを示す。工作物モデルは3本爪ダイヤフラムチャックによって把持されている。実験に使用したダイヤフラムは、トーヨーエテック製10型ダイヤフラムチャックである。ダイヤフラムチャックは、ダイヤフラム作動ボルトを締め付けることによりダイヤフラムに荷重を加えて、ダイヤフラムを作動させる。逆に、ダイヤフラム作動ボルトをゆるめることにより、工作物をチャックする構造になっている。

チャック爪はクロスローラーガイドユニット (THK, VRU2025) に取り付けられ、回転主軸中心方向に移動可能である。チャック爪を移動させる手段として圧電素子を使用する。チャック爪調整装置は圧電素子の伸び縮みによって直接チャック爪を押し引きする機構となっている。

ダイヤフラムチャックの特性として工作物をチャックす

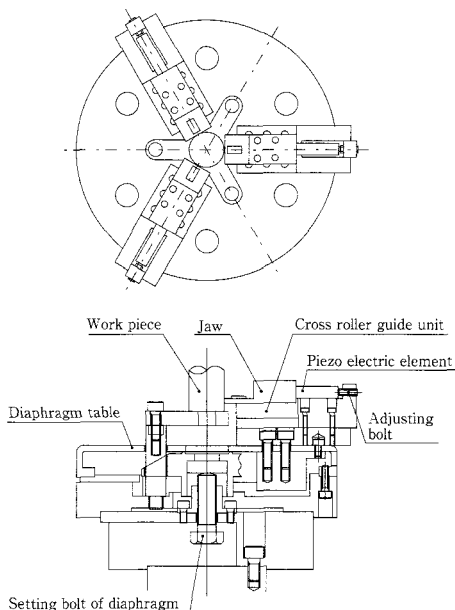


Fig.1 diaphragm chuck

るとき、角度を持ってチャックするため、チャック爪の先端が直角であれば片あたりを起こしてしまう。そのため、チャック爪の先端に R60 の丸みを持たせた。

2.2 位置決め制御システム

実験装置の概略を図2に示す。工作物モデルの位置測定には CCD カメラと視覚コントローラ (OMRON, 3Z4SP-C22) を用いた。カメラで工作物モデルを撮像し、濃淡画像をシリアルなビデオ信号に変換して視覚コントローラに入力する。視覚コントローラはビデオ信号を画像処理が可能ないようにデジタル化し、ノイズ除去などの補正を行う。さらに多値画像から2値画像に変換する。また、画像をすべて点の集まりとして内部処理し、扱う画像は、横256画素、縦242画素で構成されている。

工作物モデルを CCD カメラで撮影する際、コントラスト・照明条件によって、画像ノイズを生ずることがあり計測誤差の原因となる。また、短時間に急激な明るさの変動があった場合、カメラ内部で明るさの変動に追従しきれなくなり、出力画像が安定するまで時間がかかることになる。そこで、周辺からの工作物モデルへの明るさの変動の影響を避けるために位置決め装置は他からの光が当たらないように設置し、照明としてリング状の高周波点灯照明を使用した。

また、モニターには2値画像を出力し、測定状況を観察できるようにした。測定データの処理及び電圧負荷装置の制御は、パソコンによって行い、ディスプレイに測定値を出力した。

2.3 爪の移動量の決定

図3にチャック爪の移動量を示す。工作物モデルの初期位置 O の座標を $(0, 0)$ 、目標位置 O_t の座標を (X_t, Y_t) とする。X 軸方向への移動量を dX 、Y 軸方向への移

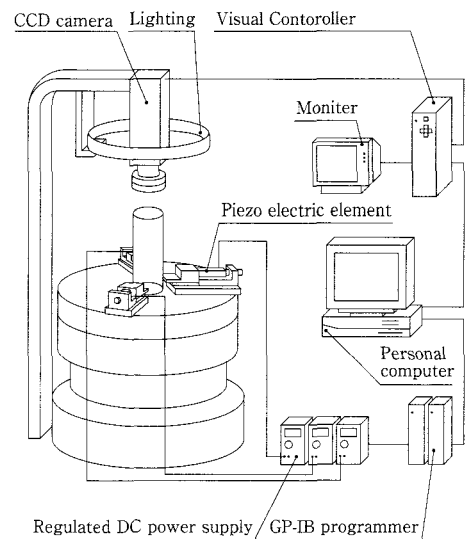


Fig.2 System of precise positioning

動量を dY とすると、初期位置から目標位置までの距離 e_0 は次式で表される。

$$e_0 = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2} = \sqrt{dX^2 + dY^2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

位置決め k 回目の位置 O_k の座標を (X_k, Y_k) とすると、位置決め k 回目の位置から目標位置までの距離 e_k は次式で表される。

$$e_k = \sqrt{(X_t - X_k)^2 + (Y_t - Y_k)^2} = \sqrt{dX^2 + dY^2} \quad (k=1,2,3,\dots) \quad \dots\dots(2)$$

また、爪1に対する工作物モデルの移動方向を θ とすると、

$$dX > 0 \text{ のとき } \theta = \tan^{-1} \frac{dY}{dX} \times \frac{180}{\pi} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$dX < 0 \text{ のとき } \theta = \tan^{-1} \frac{dY}{dX} \times \frac{180}{\pi} + 180 \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$dX = 0, dY > 0 \text{ のとき } \theta = 90^\circ$$

$$dY = 0, dX < 0 \text{ のとき } \theta = 270^\circ$$

である。

各爪の移動量は次のようになる。

$$\text{爪1の移動量} : L_{j1} = -e \times \cos \theta \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\text{爪2の移動量} : L_{j2} = e \times \cos \left(\frac{\pi}{3} + \theta \right) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{爪3の移動量} : L_{j3} = e \times \cos \left(\frac{\pi}{3} - \theta \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

爪の移動量 L_{j1}, L_{j2}, L_{j3} の値が正ならば爪は押す方向へ、負ならば引く方向へ移動させる。

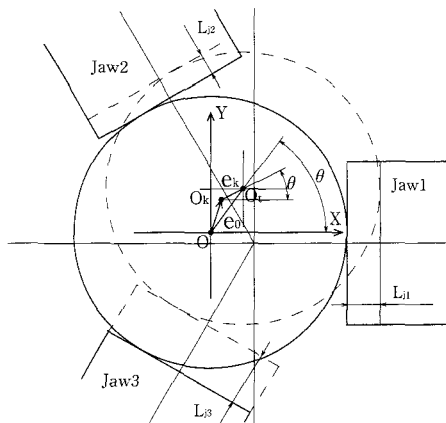


Fig.3 Movement of jaws

2・4 圧電素子への印加電圧の決定

圧電素子に印加している電圧を連続的に変化させると、印加電圧と圧電素子の変位量の間ヒステリシスが発生する。このヒステリシスが位置決め精度に大きな影響を及ぼす。

圧電素子の電圧を変化する際、連続的に電圧を変化させた場合の結果を図4に示す。これは目標位置を X 方向に $7\mu\text{m}$ 、つまり座標 $(0, 7)$ とした場合の結果である。

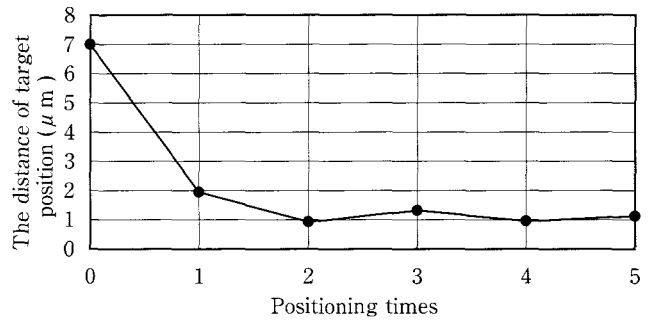


Fig.4 Result of experiment (voltage wasn't returned to 0)

図4によると1回の位置決めで $2\mu\text{m}$ 付近に位置決めされているのがわかる。2回目の位置決めで約 $1\mu\text{m}$ に位置決めされているが、それ以降の位置決めではそれ以上目標位置に近づけることはできなかった。図4の例は2回目と4回目に $1\mu\text{m}$ 以内に位置決めされている。しかし、同様の実験を繰り返した結果、 $1\mu\text{m}$ 以内に位置決めされない場合や、 $1\mu\text{m}$ 以内に位置決めされても、それ以降の位置決めで大きく目標位置から離れる場合があった。

そこで、圧電素子の電圧を変化させる場合に、いったん 0V に戻してから電圧を印加した場合について実験を行った。圧電素子への印加電圧を必ず 0V から印加することで、印加電圧と変位量が線形の関係となることにより、一次関数に当てはめて変位量を制御することができる。

この場合の実験結果を図5に示す。目標位置は図4と同様に $(0, 7)$ の場合である。

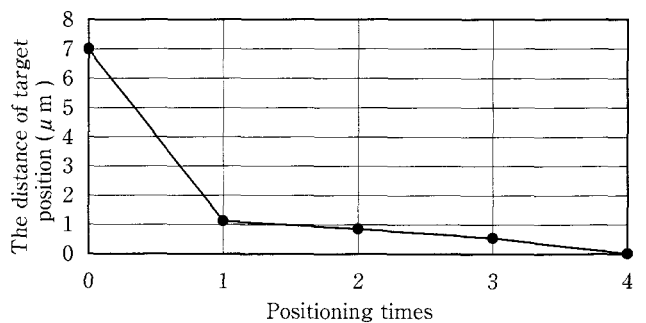


Fig.5 Result of experiment (voltage was returned to 0)

図5によると1回目の位置決めで $1\mu\text{m}$ 付近に位置決め

められている。4回目の位置決めで 0.1 μm 以内に位置決めされている。同様の実験を繰り返した結果、1回目の位置決めで 1 μm 付近へ位置決めされ、3回から4回の位置決めで 0.3 μm から 0.1 μm 以内の位置決めができた。この結果、圧電素子への印加電圧を変化する際、一度 0V に戻してから電圧を印加することによりヒステリシスの影響を回避できることが確認できた。

また、本実験に使用した圧電素子に印加する電圧は 0~100V であるため、初期電圧として 50V を印加しておき、チャック爪の押し引きに対応できるようにした。また、印加電圧が 0V 以下及び 100V 以上になる場合は 0V 及び 100V として実験を行った。

圧電素子の特性実験から、チャック爪の移動量に対する圧電素子の印加電圧は次のようになる。

$$V_{i+1} = \frac{L_j}{0.213} + V_i \quad (i=0,1,2,\dots) \quad \dots\dots(8)$$

ここで、

$V_{i=0}$: 初期の印加電圧 (50V)

L_j : チャック爪の移動量

V_{i+1} : チャック爪の移動量に対する印加電圧である。

2・5 位置の測定方法

CCD カメラを用いて工作物モデルを上面から撮影することにより位置を測定する。本研究に用いた工作物モデルの形状を図 6 に、材質及び精度を表 1 に示す。なお、初期位置と位置決め後の位置については、それぞれ10回の測定を行い、その平均値を工作物モデルの位置の測定値とした。

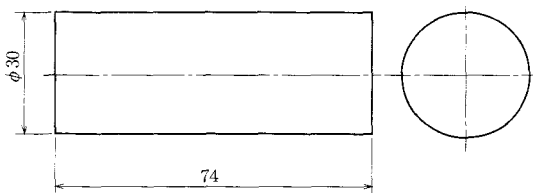


Fig.6 Work

Table 1 Work (μm)

material	surface roughness	roundness	squareness
S45C	Ra = 0.20	0.57	2.36

3. 実験結果及び考察

3・1 実験結果

本研究では、目標位置の座標を、初期位置から半径 7 μm 上の座標 (7, 0), (4.95, 4.95), (0, 7), (-4.95, 4.95), (-7, 0), (-4.95, -4.95), (0, -7), (4.95, -4.95) の

8点とした。目標位置をこの様に設定したのは、爪 1 が X 軸に平行に配置され、爪 2 と爪 3 が爪 1 を基準に 120° 間隔に配置されているため、どの方向にも位置決めが可能であることを確認するためである。また、移動距離を 7 μm としたのは、圧電素子で移動可能な距離と、チャック爪調整ボルトで位置決め可能な距離を考慮したためである。そして、工作物モデルの目標位置までの距離が 0.5 μm 以内になるまで位置決めを行った。各目標位置における位置決め結果の一例を表 2 に示す。

表 2 によると、目標位置までの位置決め後の距離は、最小で (0, 7) の場合の 0.07 μm であり、最大で (-7, 0) の場合の 0.39 μm である。

位置決め回数は、最小で 2 回、最大で 4 回となり、どの目標位置においても、これ以降の位置決めでこれ以上目標位置に近づけることはできなかった。

目標位置 (7, 0) における位置決め回数、目標位置までの距離、各爪の必要な移動量及びそれに対する印加電圧を表 3 に示す。位置決め回数と目標位置位置決め回数 0 の時は初期状態であり、各圧電素子に初期電圧の 50V を印加している。1 回目の位置決めでは目標位置までの距離は 0.85 μm である。この時の爪 1 の移動量は -7 μm であるが、これは爪 1 を引く方向へ 7 μm 移動することであり、圧電素子への印加電圧は 17.1V である。爪 2 と爪 3 の移動量はともに 3.5 μm であるが、これは爪 2 と爪 3 を押す方向へ 3.5 μm 移動することであり、その時の印加電圧は 66.4V である。1 回目の位置決めは工作物モデルを X 軸に平行移動することであるが、図 8 によると Y 軸方向へ

Table 2 Result of experiment (μm)

Target position	Positioning times				
	0	1	2	3	4
(7.0)	7	0.85	0.25	—	—
(4.95, 4.95)	7	1.93	0.08	—	—
(0, 7)	7	1.04	1.23	0.79	0.07
(-4.95, 4.95)	7	0.72	0.21	—	—
(-7.0)	7	1.93	0.83	0.39	—
(-4.95, -4.95)	7	1.59	0.55	0.19	—
(0, -7)	7	1.25	0.68	0.08	—
(4.95, -4.95)	7	0.84	0.11	—	—

Table 3 Result of experiment (μm)

Times	Distance	Jaw 1		Jaw 2		Jaw 3	
		Movement	Voltage	Movement	Voltage	Movement	Voltage
	(μm)	(μm)	(V)	(μm)	(V)	(μm)	(V)
0	7	0	50	0	50	3.5	50
1	0.85	-7	17.1	3.5	66.4	3.5	66.4
2	0.25	0.65	20.2	0.15	67.1	-0.8	62.7

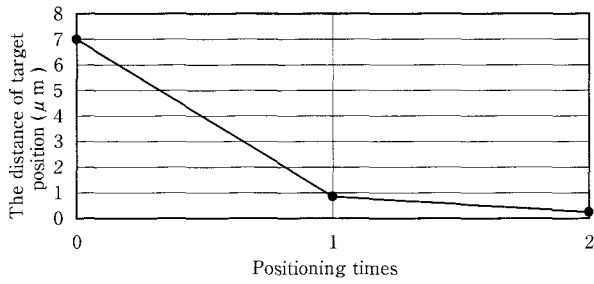


Fig.7 Result of experiment (7, 0)

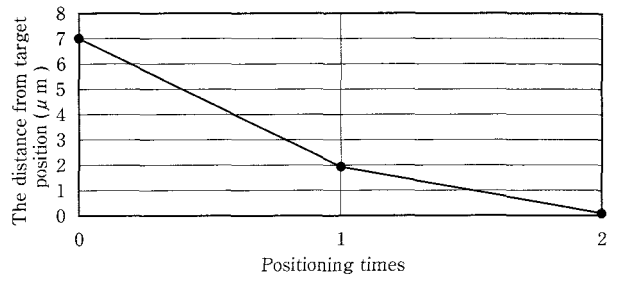


Fig.9 Result of experiment (4.95, 4.95)

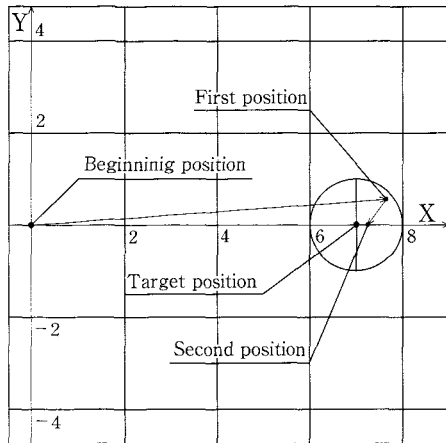


Fig.8 Result of experiment (7, 0)

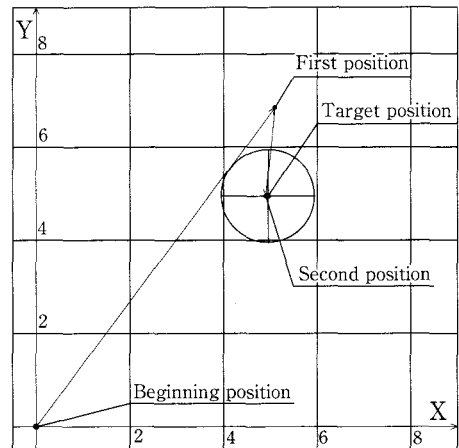


Fig.10 Result of experiment (4.95, 4.95)

も移動し、X 軸方向への移動量も大きい。2 回目の位置決めで、工作物モデルの目標位置までの距離は $0.25 \mu\text{m}$ となった。

次に、目標位置 (4.95, 4.95) における位置決め回数、目標位置までの距離、各爪の必要な移動量及びそれに対する印加電圧を表 4 に示す。

位置決め回数と目標位置からの距離の関係を図 9 に、位置決め軌道を図 10 に示す。これは爪 1 を基準に 45° の方向に位置決めした場合である。1 回目の位置決めは X 軸、Y 軸方向共に $4.95 \mu\text{m}$ の移動であるが、図 9 によると、Y 軸方向への移動量の方が多少大きい。2 回目の位置決めで Y 軸のマイナス方向へ位置決めされ、目標位置までの距離は $0.08 \mu\text{m}$ となった。目標位置 (0, 7) における位置決め回数、目標位置までの距離、各爪の必要な移動量及びそれに対する印加電圧を表 5 に示す。

目標位置 (0, 7) における位置決め回数、目標位置ま

Table 4 Result of experiment (7, 0)

Times	Distance (μm)	Jaw 1		Jaw 2		Jaw 3	
		Movement (μm)	Voltage (V)	Movement (μm)	Voltage (V)	Movement (μm)	Voltage (V)
0	7	0	50	0	50	0	50
1	1.93	-4.95	26.8	-1.81	41.5	6.76	81.8
2	0.08	0.16	27.5	1.59	49	-1.75	73.5

Table 5 Result of experiment (0, 7)

Times	Distance (μm)	Jaw 1		Jaw 2		Jaw 3	
		Movement (μm)	Voltage (V)	Movement (μm)	Voltage (V)	Movement (μm)	Voltage (V)
0	7	0	50	0	50	0	50
1	1.04	0	50	-6.06	21.5	6.06	78.5
2	1.23	-0.4	48.1	1.03	26.4	-0.64	75.5
3	0.79	1.23	53.9	-0.7	23.1	-0.53	73
4	0.07	-0.78	50.2	0.39	25	0.39	74.8

での距離、各爪の必要な移動量及びそれに対する印加電圧を表 5 に示す。位置決め回数と目標位置からの距離の関係を図 11 に、位置決め軌道を図 12 に示す。これは爪 1 を基準に 90° の方向に位置決めした場合である。

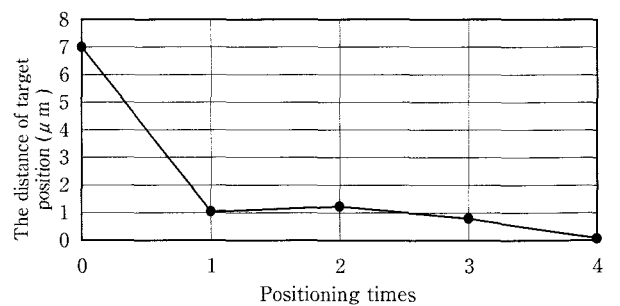


Fig.11 Result of experiment (0, 7)

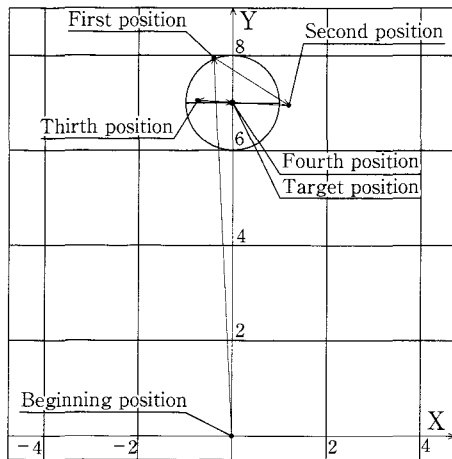


Fig.12 Result of experiment (0, 7)

表5によると1回目の位置決めは工作物モデルがY軸に平行移動するように行ったが、図12によるとX軸方向へも移動している。1回目の位置決めで目標位置までの距離は $1.04\mu\text{m}$ となった。そして、2回目の位置決めで $1.23\mu\text{m}$ となった。図12より、2回目の位置決め際、X軸方向への移動量が大きかった。しかし、3、4回目のX軸方向への位置決めを行った結果、最終的な目標位置までの距離は $0.07\mu\text{m}$ となった。

3・2 考察

本研究では、各目標位置について位置決め実験を5回ずつ行った。すべての実験結果において、位置決め4回以内で $0.5\mu\text{m}$ 以内に位置決めすることができた。目標位置を初期位置を中心とした円周上の8点とし実験を行った結果、どの方向にも同じ様に位置決めできることが確認できた。また、最終的な工作物モデルの目標位置までの距離は最小で $0.07\mu\text{m}$ 、最大で $0.39\mu\text{m}$ となった。

実験結果によると、どの方向への位置決めも1回で位置決めするのに適切な電圧を印加しているにもかかわらず、1回目の位置決めで $1\sim 2\mu\text{m}$ 程の誤差が生じている。また、位置決めに必要な各爪の移動量及びそれに対する印加電圧と工作物モデルの位置決め軌道を比較すると、爪を移動させていない方向への工作物モデルの移動や、圧電素子の変位量と工作物モデルの移動量の間誤差が確認できる。

この原因としては次のような事が考えられる。ダイヤモンドチャックは構造の特性上、工作物モデルを回転主軸中心方向に引き込む力が発生する。その状態で圧電素子に電圧を印加し工作物モデルを移動させるため、工作物モデルの底面とバックングプレートとの間に摩擦力が生じる。摩擦力に比べて圧電素子が各爪をおす力は十分に大きい、この摩擦力が各爪のチャック力を変化させる。その結果、工作物モデルが微小に傾き、CCDカメラによって工作物モデルを上から測定する際に影響を及ぼしていると考え

られる。今回実験した位置決め精度においては、このような影響を考慮しても、測定に大きな問題はないと考えられる。

本研究に用いた位置決め装置において、外乱となる主なものは振動と明るさの変動である。振動については実験装置内部からの振動や音はほとんど無かった。これはダイヤモンドチャックに圧電素子を組み込み、初期電圧として50Vを印加していることによりつねに圧電素子に負荷がかかっていることより生じなかったものと考えられる。また、明るさの変動については、高周波点灯照明を用いることにより変動を回避した。また、実際に実験装置を使用し加工すると、実験装置から発生する熱や環境温度、塵の侵入などが影響してくるので、その対策も必要である。

4. 結 言

工作物モデルの位置をCCDカメラによって測定し、3本爪ダイヤモンドチャックに把持された工作物モデルをアクチュエータである圧電素子に電圧を印加することにより自動的に精密位置決めする装置を構築した。そして、その実験装置を使用し、位置決め実験を行った。その実験結果から次のようなことが明らかになった。

1. CCDカメラを用いて工作物モデルの位置を視覚的にとらえることにより、位置決め時間が短縮する。
2. 圧電素子の印加電圧を変化させる場合に、一担0Vに戻すことによって、位置決め精度が向上する。
3. 試作したCCDカメラを用いた自動位置決め装置は、圧電素子で移動可能な範囲であれば、いずれの方向へも最大で $0.39\mu\text{m}$ 以内に精密位置決め可能である。

文 献

- 1) 井澤實, 精密位置決め技術, (1989), 13-18, 工業調査会.
- 2) 次世代精密位置決め技術, 精密工学会, 超精密位置決め専門委員会, 次世代精密位置決め技術編集委員会, (2000), 51-54, フジ・テクノシステム.
- 3) 土屋裕, 画像計測, (1994), 3-5, 昭晃堂.
- 4) 涌井伸二, ピエゾ素子を使った微動機構に対する高速位置決め的手法, 機論, 63-612, C (1997), 2693.
- 5) 樋口俊郎・山形豊, 圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構(第2報), 精密工学会, 58-10, (1992), 1759-1760.
- 6) 寺谷忠朗, 圧電素子による精密位置決めの研究, 日本設計工学会中国支部講演論文集, No.15, (1997), 43-47.