

圧電素子を利用した位置決め装置の設計と簡易的補正方法の検討

千葉和彦*・宮脇和人・磯部浩巳**

Design and Evaluation of positioning device using a piezoelectric actuator

Kazuhiko CHIBA *, Kazuto MIYAWAKI and Hiromi ISOBE **

(平成27年12月1日受理)

Demand for miniaturized and higher integration of various optical and electronic elements has increased along with the development and implementation of information technology in recent years. For this study, a prototype precision positioning device of a dual servo mechanism was designed and produced for microtrench processing. The coarse motion actuator incorporates a ball screw and a linear guide. Also, a laminated type piezoelectric actuator is used as a micro-motion actuator. A laser length measuring device was used to evaluate the precision positioning of the device. This study also examined a method for compensation of hysteresis by polynomial function fitted to displacement-voltage data and displacement characteristics of the piezoelectric element. Furthermore, for decreasing voltage, compensation by the lowest ordered second-order polynomial function must be preferred because no great difference in compensation performance was recognized in compensation by three different polynomials.

Keywords : piezoelectric actuator, hysteresis, micro positioning

1. 緒言

近年の情報技術の進歩に伴い、各種光学素子、電子素子の小型化、高集積化などの欲求が高まってきている。例えば、光学素子の分野ではホログラフィック光学素子などがこれらの要求に応えられるものとして注目されている。この素子は微細溝構造による光の回折効果を利用し、レーザービームの分割・偏向・形状変換などの複数の光学素子機能を単一の平板素子で実現できる。CDやDVD、Blu-ray各種ドライブの光ピックアップ装置の部品点数の削減が可能となるため研究が進められている⁽¹⁾。今後この技術は様々な光関連装置に使われることになるが、扱う光学系が複雑化するにつれ、微細溝の形状も複雑化する。そのために高度な加工技術が求められている。微細溝の加工法には、フォトリソグラフィやエッチングといった半導体製造技術を利用するものと、

機械加工によるものの大きく分けて2つある。斜面や曲面の断面形状の加工精度は機械加工の方が良いと言われている。しかし、ミクロン、サブミクロンオーダーの精度が必要な為、刃物の送りには微小な変位が可能なアクチュエータが必要である。微小変位を発生させることのできるアクチュエータの一つに圧電素子がある。ハードディスク装置のトラッキングなどで高速で高精度な位置決めが可能なアクチュエータとして使われている。

そこで本研究は、微細溝を加工することを目標に粗動アクチュエータにはボールネジとリニアガイドを用いたステージ、微動アクチュエータには積層型圧電素子を用いたデュアルサーボ機構の精密位置決め装置を図1のように設計、試作し、評価を行った。圧電素子の変位特性とヒステリシスを考慮した補償方法について検討した。

* 秋田高専卒 (現:いすゞエンジニアリング(株))

** 長岡技科大

2. 実験装置

2.1 精密位置決め装置

今回の実験を行う上で、精密位置決め装置を設計し、試作した。図1で設計した精密位置決め装置、図2に精密位置決め装置の写真を示す。また、表1に仕様を示す。

本装置はX軸とZ軸の2軸によって構成されており、それぞれにボールネジとリニアガイドを用いたステージ（以降、リニアステージと呼ぶ）を採用している。ボールネジによるバックラッシュの影響を減じ、リニアガイドによる精度の高い直線案内面を持っている。微動アクチュエータとしてリニアステージ上に圧電素子を採用している。微動アクチュエータの先には微細溝加工を行える刃物がセットできる。また、その刃物での切削抵抗を計測するための力センサが配置されている。

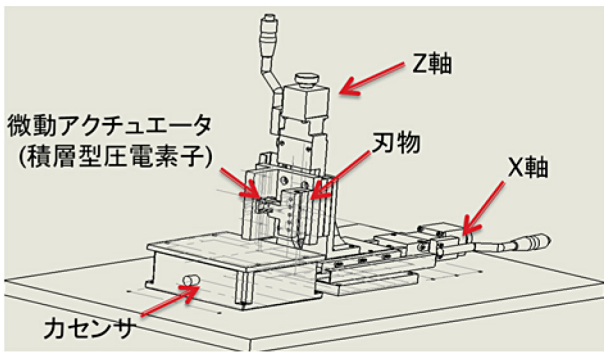


図1 設計した精密位置決め装置

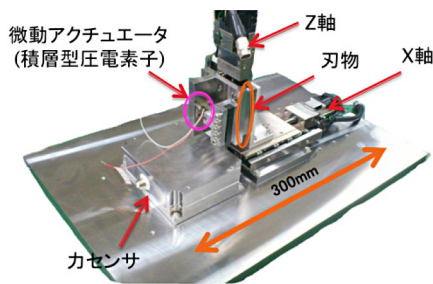


図2 精密位置決め装置

表1 精密位置決め装置の仕様

X軸最大ストローク量	40mm
Z軸最大ストローク量	15mm
分解能	2 μ m/パルス (full)
微動アクチュエータ最大ストローク量	14 μ m

2.2 積層型圧電素子

圧電素子は小型で、微小変位が可能な、高応答性を持つアクチュエータである。一般に、圧電素子の変位は印加電圧を変化させることにより制御される。

積層型圧電素子は、圧電体の薄板と内部電極とが交互に重ねられた構造を持つ圧電素子である。圧電素子の両端にその内部電極と平行に電極を設置する。積層型圧電素子に電源より電圧を印加すると、内部電極に電荷が充電される。このとき、最も外側の内部電極に対向して電極が設置されているため、電極には誘導電荷が発生する。これらの誘導電荷は静電誘導によって生じるので、内部電荷に比例すると考えられる⁽²⁾。積層型圧電素子の特性は発生力、応答速度が高く、耐久性に富むことである⁽³⁾。

圧電材料は、チタン酸ジルコン酸鉛、チタン酸バリウムなどを主成分としたセラミックスと同様の構造を持つ。今回使用した圧電素子の寸法は4×7×10 [mm]で、最大150 [V]印加時に厚み方向に約14 [μ m]程度伸びる。

2.1.1 NMA (Nano-Motion Actuator)⁽⁴⁾

本研究では積層型圧電素子を用いたアクチュエータをNMA (Nano-Motion Actuator)と呼ぶ。NMAの写真を図3に示す。NMAは電圧を印加することによって図3の矢印の方向に変位する。

圧電素子の周囲に付いている枠組みは、積層型圧電素子は積層されている方向に加わる力には強いが曲げ方向には弱いため保護する役割がある。また、左右にはスリットがあり、厚み方向のみ変位する構造となっている。枠組みの材質はチタン合金 (Ti-6Al-V)で、NMA全体の大きさは最長部で21×13.5×21 [mm]である。

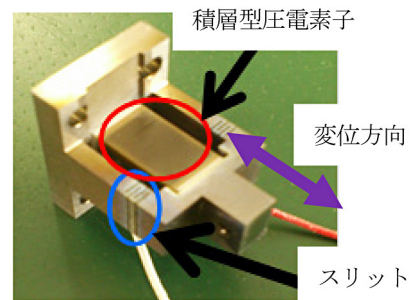


図3 NMA (Nano-Motion Actuator)

2.3 静電容量センサ⁽⁵⁾

口静電容量センサは微小な変位の測定をすることができる。2つの導体面が互いに隣接している時、

その間に静電容量と呼ばれる特性が生じる。2つの導体面の中の静電容量変化をプローブによって測定することで変位の計測を行うことができる。今回は日本エー・ディー・イー株式会社製の静電容量センサを使用した。表2に仕様、図4に静電容量センサのコンソール、図5にプローブを示す。

図6に変位量を静電容量に変換する原理を示す。

表2 静電容量センサの仕様

MicroSense 3401HR-A2 AXIAL-2102	
測定レンジ	10~5000 μ m
センサ径	1.7mm
応答周波数	DC~40kHz@-3dB
測定フルスケール	25 μ m
分解能	フルスケールの0.005%



図4 コンソール



図5 プローブ

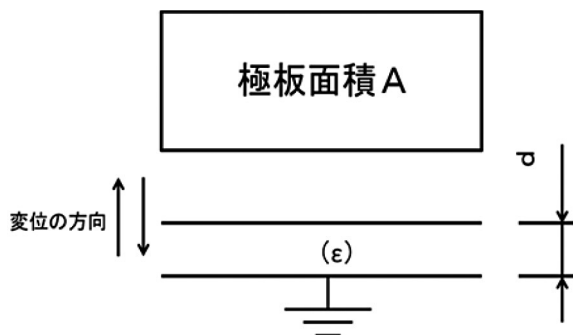


図6 静電容量方式の原理

静電容量は (1)式で表わされる。

$$c = \frac{\epsilon A}{d} \dots (1)$$

ϵ : 比誘電率, A : 断面積を一定として d : 対極距離を変位させると, 静電容量は図7のように変化する。いま d の微小変位に対する c : 静電容量の変化を求めると, (2)式となる。 d が小さいほど感度は高くなっている。直線変換回路により感度を一定として実用化している⁽⁵⁾。

$$\Delta c = \frac{\epsilon A}{d^2} \cdot \Delta d \dots (2)$$

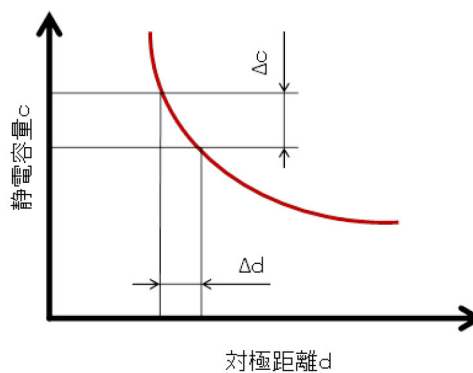


図7 dとcの関係

2.4 レーザー測定器⁽⁶⁾

今回使用したレーザー測定装置はヒューレット・パッカード社製のHP5529A (図8)である。仕様は表3に示す。マイケルソンの干渉システムを基本原理に、光源にはゼーマン効果を応用した2周波方式のレーザー光を用い、また光ヘテロダインの原理とドップラー効果を応用した2周波方式は高精度のレーザー干渉計システムである。



図8 HP5529A

表 3 レーザー測定器の仕様

電源		83W (ウォームアップ後)
レーザー特性	種類	He-Ne レーザー
	波長	632.991354nm
	波長確度	±0.1ppm
	最大出力パワー	1mW
	ビーム直径	6mm
安全規格		クラスII レーザー製品

図9に示すようにレーザー光源からは、直線偏光のかかった二つの周波数のレーザー光 (f_1, f_2 とする) が出力される。このレーザー光はビームスプリッターで分けられ、 f_1 は移動鏡へ、 f_2 は固定鏡へ進み、それぞれ反射される。移動鏡で反射されるレーザー光は、移動鏡が移動することによってドップラー効果を受け、その周波数がわずかに変化 ($f_1 \pm \Delta f_1$) する。それぞれの反射鏡で反射されたレーザー光は、重なり合い、干渉計を通してレーザーへ入射され、レーザー上で偏光面が合わせられ、二つのレーザー光が干渉しあって、その周波数の差分の周波数 $f_1 - f_2 \pm \Delta f_1$ のレーザー光となる。

レーザー光源からは $f_1 - f_2$ の周波数の基準信号が出力されているので、基準信号に対する測定信号の位相を比較し、移動鏡の移動距離を求めている⁽⁶⁾。

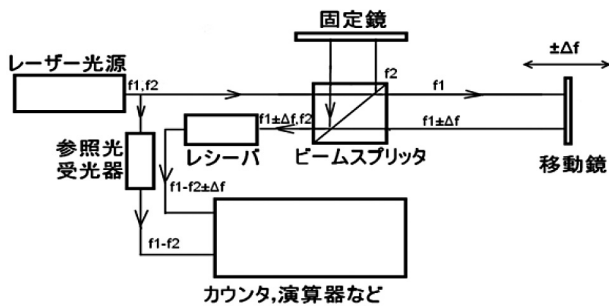


図9 2周波方式レーザー干渉システム

3. 実験

3.1 実験① 「リニア X-Z 軸ステージの位置決め精度測定」

レーザー測定器を用いて精密位置決め装置に使用されているリニア X-Z 軸ステージの変位の位置決め精度を測定した X 軸ステージは全行程を 40mm とし、2mm 間隔で 21 箇所 (0, 2, 4, ..., 40mm)、Z 軸ステージは全行程を 15mm とし、1mm 間隔で 16 箇所 (0, 1, 2, ..., 15mm) の測定を行った。図10にその様

子を示す。破線がレーザーの通り道である。

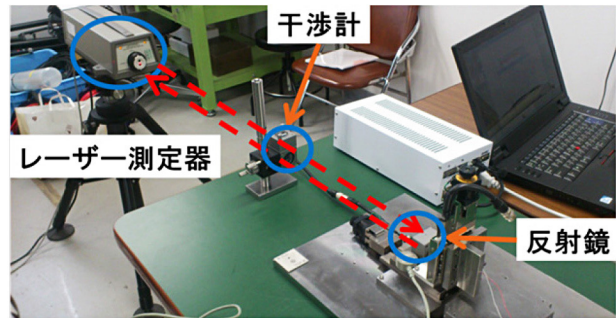


図10 レーザー測定器によるリニア X-Z 軸ステージの位置決め精度測定

3.2 実験② 「NMAの変位特性の測定」

安定化電源もしくはファンクションジェネレータの正弦波の出力をアンプによって電圧を15倍に上昇させ、NMAの圧電素子に印加し、微小変位させる。変位を静電容量センサによって計測、データロガーに保存し変位と電圧の関係を調べた。データロガーには日置電気株式会社製のHIOKI8870メモリハイコーダを使用した。正弦波を出力するファンクションジェネレータは株式会社エー・アンド・デイ社製のAD-8624Aを使用した。図11にNMAの変位測定

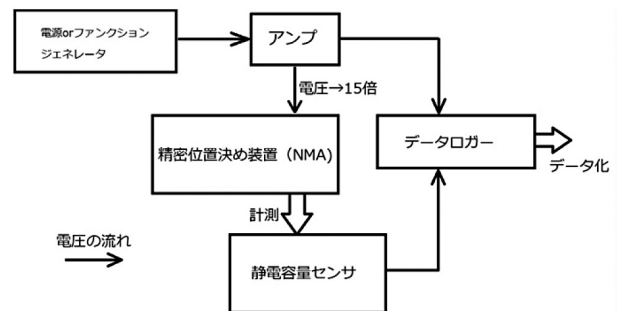


図11 変位測定システムの構成

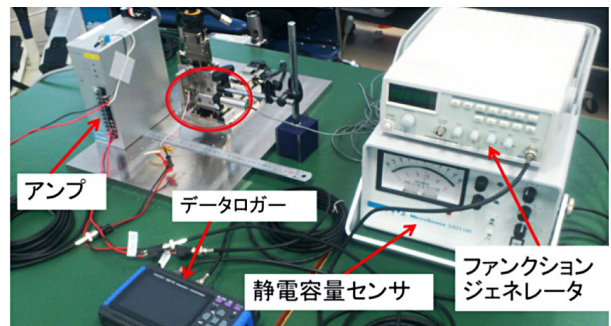


図12 実験装置の配置

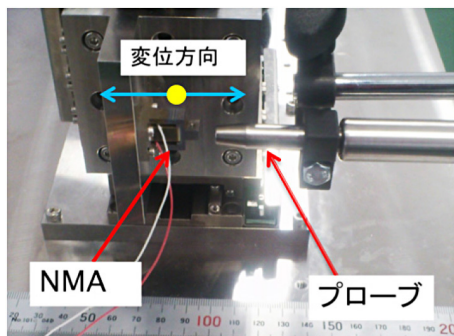


図13 NMAとプローブの位置関係

のシステム構成を示し、図12、図13にその様子を示す。図12における丸で囲んだ部分は図13でNMAと静電容量型センサプローブの位置関係を示している。

3.3 実験③ 「多項式近似によるNMAのヒステリシス補償の実験」

実験②で得たNMAの変位と電圧の関係より電圧の上昇、降下のそれぞれで2次、3次、4次の多項式の近似曲線を得る。0.5 μm 間隔で26箇所の目標変位 (1, 1.5, 2, …13.5, 14 μm) を得る為に必要な電圧を近似曲線により予め算出し、NMAに印加して変位の測定を行った。これにより基準変位と補償によって得られた変位を比較する

4. 実験結果

4.1 リニアステージX-Z軸の位置決め誤差

リニアステージX軸の位置決め誤差の結果を図14、Z軸の位置決め誤差の結果を図15にそれぞれ示す。図14、15のグラフの横軸は測定箇所[mm]、縦軸は偏差[mm]である。X軸は目標値との最大誤差が3.6 μm 、Z軸は1.6 μm となった。

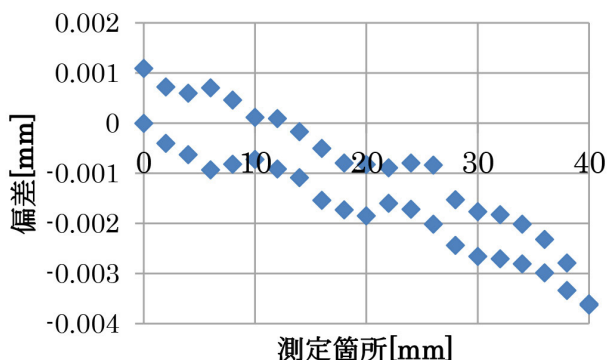


図14 リニアステージX軸の位置決め誤差

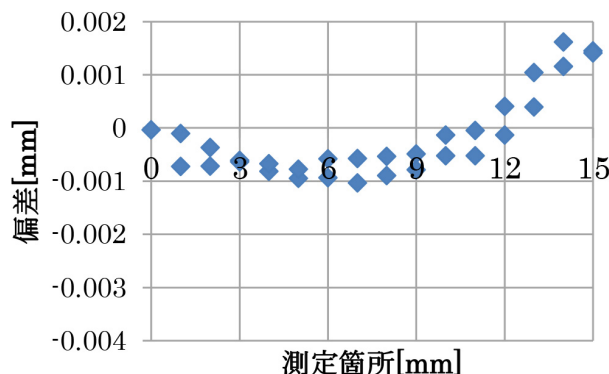


図15 リニアステージZ軸の位置決め誤差

4.2 NMAの変位特性の測定

4.2.1 入力電圧を0Vから150Vまで変化させた場合の変位

入力電圧を0Vから150Vまで変化させた場合の変位の結果を図16, 17に示す。図16は0[V]から150[V]まで印加電圧を変化させた場合の変位の測定結果を示し、縦軸は圧電素子に印加した電圧[V]、横軸はNMAの変位[μm]である。図17では縦軸は基準変位とNMAの変位との偏差[μm]、横軸は基準変位[μm]である。ここで、図16の破線は基準変位を示す。

図16では電圧を上昇させた場合と下降させた場合では同じ電圧の値であっても変位が異なり、ヒステリシス特性がある事がわかる。特に電圧の中心付近ではヒステリシス特性が大きく、75[V]では1.375[μm]の差があった。また、NMAの変位と印加電圧の関係は印加電圧を0[V]から150[V]に上昇させた時に比べ、印加電圧を150[V]から0[V]に下降させた場合の方が非線形である事がわかる。

図17では偏差の大きさは印加電圧を0[V]から150[V]まで上昇させた場合に比べ、印加電圧を150[V]から0[V]まで下降させた場合が大きいことがわかる。また、電圧上昇の場合は基準変位より大きい変位を取る傾向にあり、電圧下降の場合は基準変位より小さな変位を取る傾向にある事がわかる。電圧を上昇させた場合の最大偏差は0.345[μm]、電圧下降時の最大偏差は-1.67[μm]であった。

変位-電圧における多項式による近似曲線を表4に示す。xは変位[μm]、yは電圧[V]である。

4.2.2 正弦波入力に対するNMAの変位

正弦波の入力電圧を与えた場合のNMA変位を示す。図18は入力正弦波10Hzの場合、図20は400Hzの場合である。図18, 19の左の縦軸は印加電圧[V]、

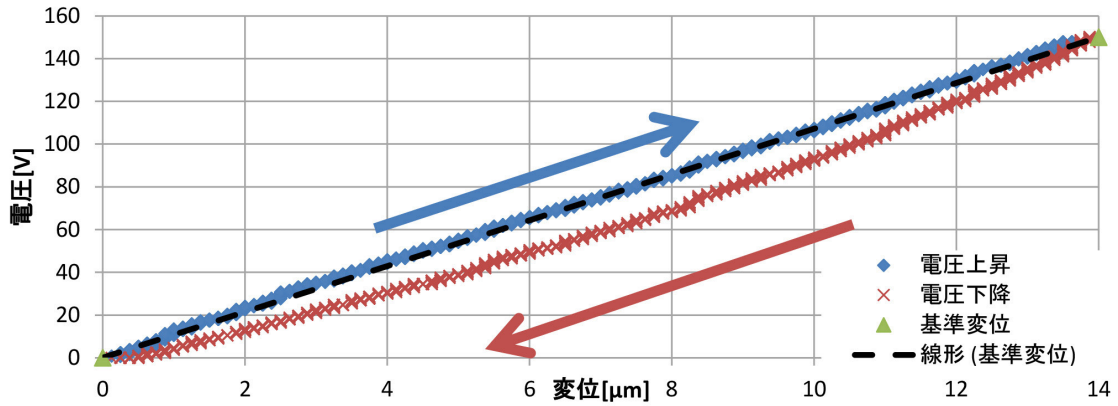


図16 0Vから150Vまで入力電圧を変化させた場合の変位

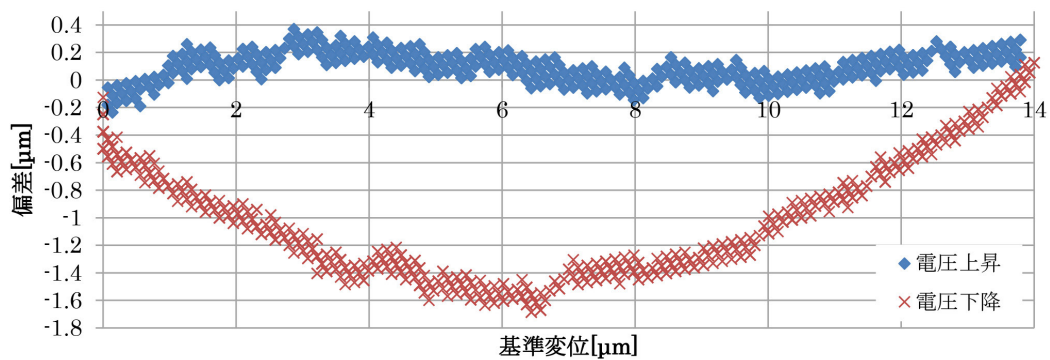


図17 基準変位と偏差

表 4 NMAの変位－電圧近似曲線

	電圧上昇	電圧下降
2次式	$y = 0.006x^2 + 10.644x + 1.0856$	$y = 0.3035x^2 + 6.5627x - 2.0083$
3次式	$y = 0.0175x^3 - 0.3602x^2 + 12.669x - 1.201$	$y = 0.0145x^3 - 0.0006x^2 + 8.2001x - 3.423$
4次式	$y = -0.0023x^4 + 0.0798x^3 - 0.9091x^2 + 14.318x - 2.3502$	$y = 0.0006x^4 - 0.0034x^3 + 0.1605x^2 + 7.7156x - 3.1626$

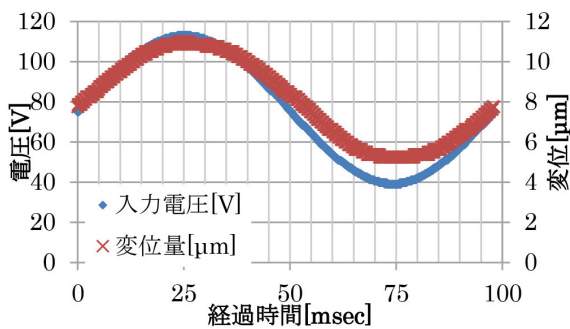


図18 正弦波入力の変位 (10Hzの場合)

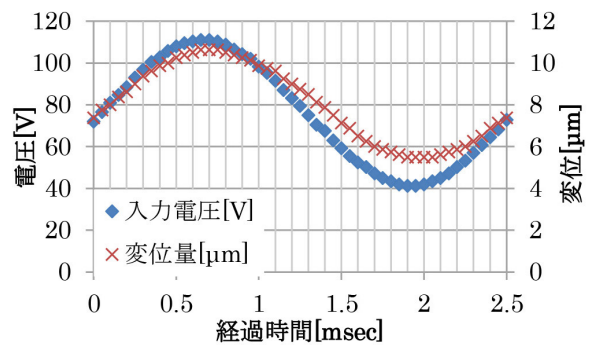


図19 正弦波入力の変位 (400Hzの場合)

圧電素子を利用した位置決め装置の設計と簡易的補正方法の検討

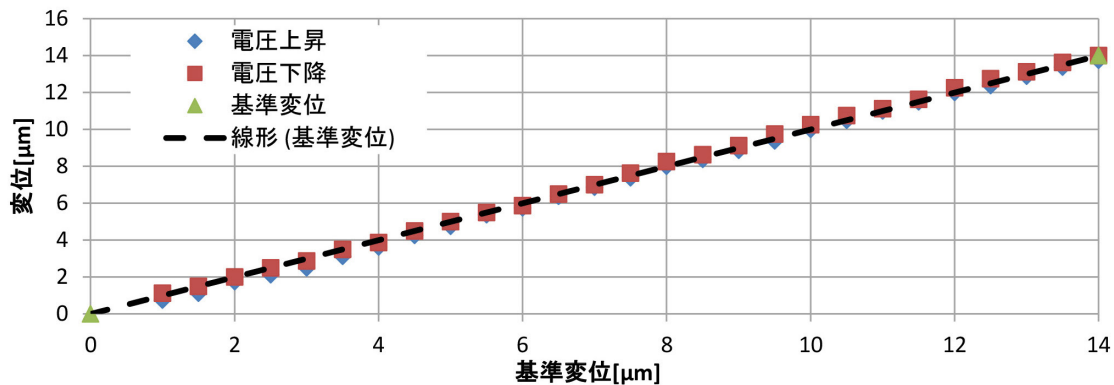


図20 基準変位と多項式 (2次) による補償を行った場合の変位

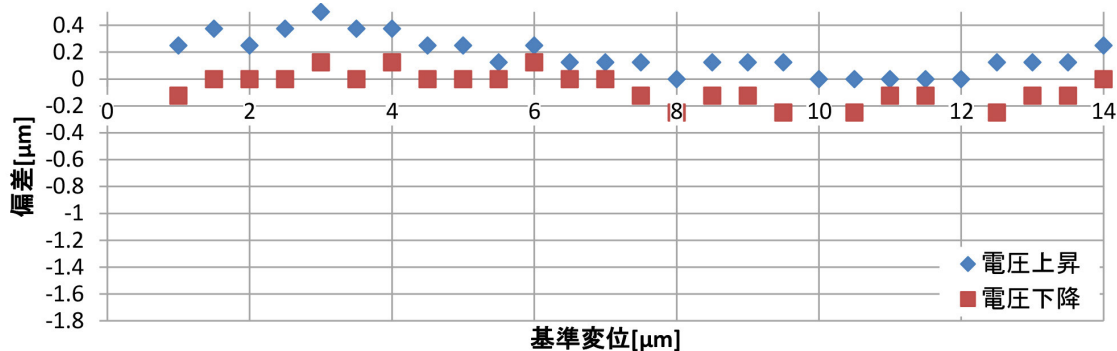


図21 基準変位と多項式 (2次) による補償を行った場合の偏差

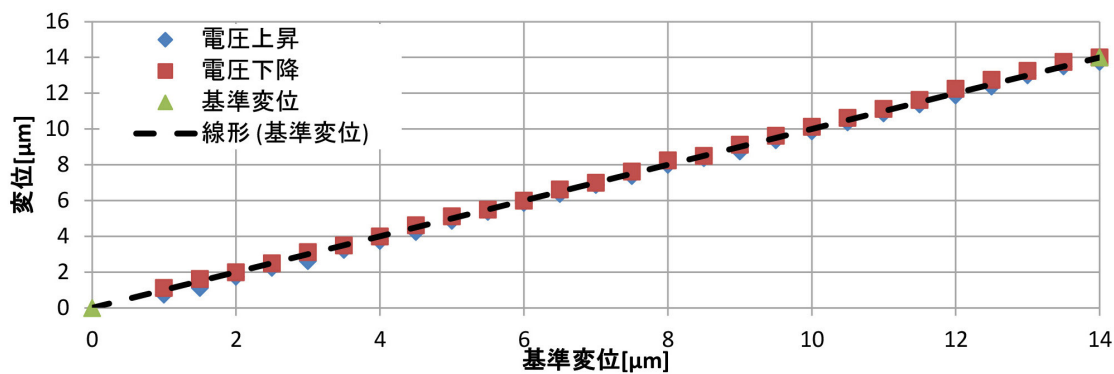


図22 基準変位と多項式 (3次) による補償を行った場合の変位

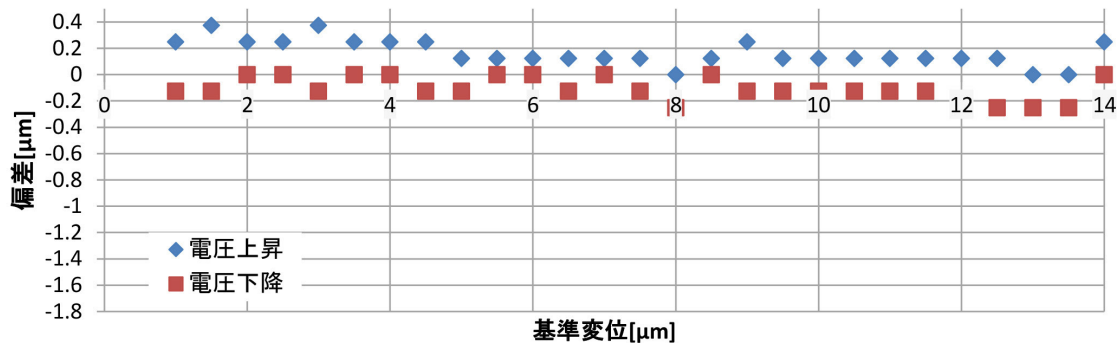


図23 基準変位と多項式 (3次) による補償を行った場合の偏差

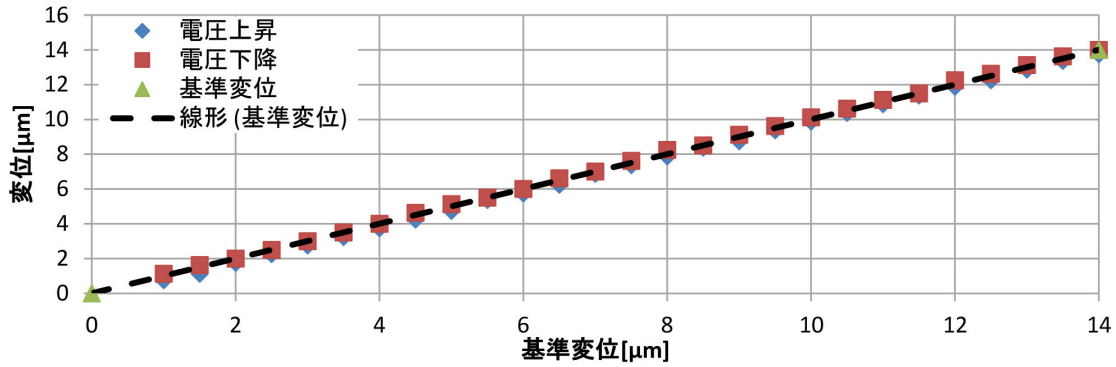


図24 基準変位と多項式（4次）による補償を行った場合の変位

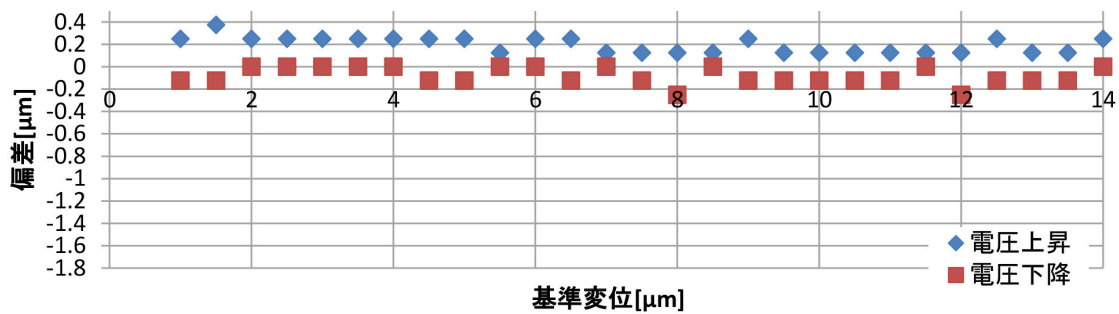


図25 基準変位と多項式（4次）による補償を行った場合の偏差

右の縦軸は変位 [μm]，横軸は経過時間 [sec] を示す。電圧上昇時では印加電圧に追従してNMAは変位していることがわかる。また，周波数が高くなってもよく追従している。

4.3 多項式の近似曲線による圧電素子ヒステリシス補償

多項式の近似曲線による圧電素子ヒステリシス補償の実験結果を図20から25に示す。図20，21は2次の多項式の結果，図22，23は3次の多項式の結果，図24，25は4次の多項式の近似式の結果である。また，図20，22，24の縦軸は近似曲線で補償後のNMA変位 [μm]，横軸は基準変位 [μm] である。図21，23，25の縦軸は基準変位と補償後のNMAの変位の偏差 [μm]，横軸は基準変位 [μm] である。図20，22，24の破線は基準変位を示す。

図20では2次の多項式によるヒステリシス補償によって，図16のヒステリシス補償をしなかった場合に比べ，目標とする変位である基準変位に近づいている。ヒステリシス補償をしなかった図17に比べヒステリシス補償を行った図21偏差が小さくなっている事がわかる。最大偏差は電圧上昇時で0.5 [μm]，電圧下降時で0.176 [μm] となっている。

図22では3次の多項式によるヒステリシス補償によって，図24では4次の多項式によるヒステリシス補償によって，図16のヒステリシス補償をしなかった場合に比べると，目標とする変位である基準変位に近づいている事がわかる。ヒステリシス補償を行っていなかった図17と比べヒステリシス補償を行った図23，図25の偏差が小さくなっている事がわかる。3次，4次どちらの多項式においても最大の偏差は電圧上昇時に0.375 [μm] となり，電圧下降時で-0.25 [μm] となっていた。

5. 考察

リニアステージX-Z軸の位置決め誤差に関しては，図14と図15を見ると偏差が直線的に現れており，通常のねじに比べボールねじのバックラッシュが小さいという特性が出ていることがわかる。また，X軸は目標値との最大誤差が3.6 [μm]，Z軸は1.6 [μm] と粗動としては十分な位置決め特性であると考えられる。

次にNMAの変位－電圧特性に関しては，図16を見ると，電圧を上昇させる場合と電圧を下降させる場合では得られる変位に違いがある事がわかる。こ

れはヒステリシス特性があるという。そのために単純に電圧を操作するだけでは目標とする変位が得にくいと考えられる。特に、電圧を降下させた場合の変位は非線形であり、線形な変化をすると仮定した場合に比べて最大で $-1.67 [\mu\text{m}]$ ずれるという結果だった。そのためヒステリシスを補償することが必要である。正弦波入力をした場合もその入力にある程度は追従して変化していた。

最後に多項式によるヒステリシス補償に関しては、非常に単純な方法であったが有効な手段であったと考えられる。図16と図20, 22, 24をそれぞれ見比べるとヒステリシス特性を減じることができた事がわかる。図17と図21, 23, 25をそれぞれ比べると電圧下降時での各測定点での偏差は小さくなっている。逆に電圧上昇時の最大偏差は補償をしなかった場合に比べ大きくなった。電圧を上昇させる場合は2次の多項式では最大偏差が特に大きくなったが、3次の多項式、4次の多項式ではほとんど変わりはなかった。そのため、より次数の低い3次の多項式で近似するのが良いと考えられる。また、電圧を降下させる場合には2次の多項式、3次の多項式、4次の多項式で大きな違いは見られなかった。そのため最も次数の低い2次の多項式で近似するのが良いと考えられる。

6. 結言

本研究では精密位置決め装置を設計、試作し、評価を行った。精密位置決め装置におけるNMA変位特性の測定、ヒステリシス補償の実験を行った結果、以下のようなことが言える。

1. 今回試作を行った精密位置決め装置に使用したリニアステージはバックラッシュの影響が小さく、良い位置決め精度を持っていることがわかった。そのため、粗動機構としては十分な性能であると考えられる。
2. 圧電素子は $150 [\text{V}]$ の入力で最大 $14 [\mu\text{m}]$ の変位を得る事ができるが変位と電圧の間にはヒステリシス特性があり、印加電圧を $0 [\text{V}]$ から $150 [\text{V}]$ に上昇させる場合と印加電圧を $150 [\text{V}]$ から $0 [\text{V}]$ に下降させる場合とでは電圧の値が同じでも変位量は異なることがわかった。その特性は正弦波電圧を入力した場合にも現れた。そのため、精密位置決め装置として目標の変位を得るためにはヒステリシスを補償することが必要であると考えられる。
3. 圧電素子の変位特性であるヒステリシスの補償

に、変位と電圧の関係を多項式で近似することは有効であることがわかった。変位と電圧の関係を一度計測する必要があるが、非常に単純な手順でヒステリシス補償をすることが可能である。

粗動アクチュエータと微動アクチュエータを組み合わせたデュアルサーボ機構の精密位置決め装置を試作することはできたが、目標である微細溝の加工には至っていない。今後は圧電素子によって刃物を動かし微細溝の加工を可能にすることが必要である。

本研究は「高専－長岡技科大共同研究」の支援を受けて行いました。

参考文献

- (1) 竹内芳美, 超精密マイクロ切削加工, 日刊工業新聞社, (2008), pp.117
- (2) 引用元URL
<http://www.keystone-intl.co.jp/products/encyclopedia/index.html>
- (3) 内野研二, 圧電/電歪アクチュエーター基礎から応用まで一, 森北出版株式会社, (1988), pp.79
- (4) 長縄明大他, ナノモーションアクチュエータに対するPID制御器の設計, 日本機械学会論文集(C編) 75巻754号, (2009), pp236-241
- (5) マイクロセンス非接触微小変位計 取扱説明書, 日本エー・ディー・イー株式会社, pp15
- (6) HP5529A 超精密レーザー測長器セミナテキスト, 横河ヒューレットパッカード株式会社, pp.6-13