電流パルス駆動によるアザラシ型位置決め機構の 高分解能化*

古 谷 克 司** 太 田 徳 幸*** 古 田 淳†

Improvement of Resolution of AZARASHI (Seal) Mechanism by Current Pulse Drive

Katsushi FURUTANI, Noriyuki OHTA and Atsushi FURUTA

The authors have proposed a driving method of a piezoelectric actuator by using current pulses for the high resolution. It was applied to the driving method of Extension device of AZARASHI (Seal) Mechanism. A device with 1 degree of freedom was designed for the improvement of the resonant frequency and resolution by using the finite element method. A piezoelectric actuator was used for a clamp of the controlled Friction device to improve the response time. The device runs along a double-V guide for the high motion accuracy. In Coarse mode, Extension device repeats the extension and contraction with its full stroke. Then, Friction device for a constant friction is positioned during fixing the controlled Friction device in Fine mode. In the case of the reference position of 100 μm , the settling time within 5 nm was 376 ms.

Key words: piezoelectric actuator, current pulse, positioning, friction, accuracy, resonance frequency

1. は じ め に

積層型圧電アクチュエータの変位は最大でも数十 μm 程度であるが、ナノメートルオーダー以下の高分解能な変位が得られる。圧電アクチュエータの変位は、印加電圧を変化させることで制御することが多い¹⁾²⁾。コンピュータでコントローラを構成する場合には、通常は駆動信号をD/A変換器で出力し、それをアンプで電力増幅して圧電アクチュエータに印加する。変位センサにリニアエンコーダなどを用いることで、変位の測定のダイナミックレンジは大きくとることができる。しかし、駆動側はD/A変換器の分解能によりダイナミックレンジが制限を受ける。また、アンプ出力電圧にノイズが含まれると、それにともなう電流が流れるため、微小変位を安定させることが困難である。一方、圧電アクチュエータに流す連続的な電流を制御することで、充電される電荷量を制御し、ヒステリシスなしに変位を変化させる方法が提案されている³⁾。この場合も、電流値を与えるためにはD/A変換器が必要になるため、電圧源と同様の問題がある。そのため、可動範囲が大きく、分解能が高い駆動は困難であった。

電磁アクチュエータに関しては、パルス幅変調(PWM)により速度制御が行われることも多い。さらに、入力に $\Sigma\Delta$ 変換によるA/D変換を用い、出力にパルス密度変調を適用することで、簡単な構成で高精度に制御することが提案されている⁴⁾⁵⁾。圧電アクチュエータでも、印加電圧をPWM制御することによりヒステリシスが低減されることが報告されている⁶⁾。著者らはフルストロークにわたって高分解能を得るための駆動法として、電流パルスを用いた圧電アクチュエータの駆動法を提案した⁷⁾。固定されたパルス幅の電流値のパルスを印加するため電荷制御となり、フィードバック制御だけでなくオープンループ制御でも使用できるという利点がある。

一方、圧電アクチュエータの伸縮量よりもさらに大きな変位を得るために、さまざまな間欠移動機構が提案されている^{8)~14)}。これらは、走査型プローブ顕微鏡やマイクロマニピュレータの位置決めステージのように、広範囲にわたり高分解能が要求される装置に多く用いられている。著者らもアザラシ型位置決め機構を提案した^{15)~17)}。アザラシ型位置決め機構の粗動モードでは、伸縮素子をオン・オフ制御し、ステップ状に移動する。微動モードではそれを補間するように伸縮素子を伸縮させ、高精度に位置決めする。インチワーム機構のステップ状の移動を補間する機構としては、変位用圧電アクチュエータを連続的に伸縮させるウォーキングドライブ機構が提案されている¹⁸⁾。

本論文では、アザラシ型位置決め機構の伸縮素子の駆動に電流パルス駆動法を用いることで、間欠駆動である粗動モードとそれを補間して連続的に駆動する微動モードを混合した位置決めを行った結果について述べる。

2. 原 理

2.1 電流パルスによる駆動

電流パルスを用いた圧電アクチュエータの駆動回路の構成を図1に示す。複数の供給用電流源(カレント・ソース)と吸い込み用電流源(カレント・シンク)を切り替えスイッチを介して並列に接続し、それぞれのスイッチを導通させることで圧電アクチュエータを駆動する。1パルスあたりの駆動量は、電流値とパルス幅の積である電荷量により決まる。したがって、変位をフィードバックしなくてもヒステリシスの少ない駆動が可能となる。

変位センサで圧電アクチュエータの変位を測定することでフルクロードフィードバックを構成する。目標値に対して偏差が大きき場合には、電流値の大きい電流源 I_{p1} , I_{m1} で駆動し、高速な伸縮を得る。偏差が小さい場合には I_{pn} , I_{mn} で駆動する。偏差が変位センサで検出できる分解能以下になると、電流パルスは印加されない。電流源の内部インピーダンスは非常に大きいため、駆動アンプは切り離された状態と見なすことができ、変位が保持される。このように、分解能の高い伸縮量を得ることができるパルス状の電流が圧電アクチュエータに流れるため、

* 原稿受付 平成 19 年 6 月 14 日

** 正 会 員 豊田工業大学(名古屋市中天白区久方 2-12-1)

*** 学生会員 豊田工業大学大学院(現、プレサイスゲージ(株); 浜松市北区三方原町 283-4)

† 正 会 員 (株)ナノコントロール(東京都品川区南大井 6 丁目 17 番 17 号)

(a) Configuration of circuit

(b) Displacement

Fig. 1 Principle of driving method by using current pulse

電流値とスイッチのオン時間を調整することで、精密な値の電荷量を与えることができる。したがって、ステッピングモータのように、与えるパルス数により変位を制御することができる。

電圧パルスで駆動する場合には、一定変位で保持される場合でも常に電流が流れる。そのため、電力損失が発生する¹⁹⁾。この点で、電流パルス駆動のほうが優れていると考えられる。

2.2 アザラシ型位置決め機構

一自由度アザラシ型位置決め機構の構造と移動原理を図2に示す^{15)~17)}。

一軸用移動機構は2個の摩擦機構A、Bと1個の伸縮素子から構成される。伸縮素子の両端に摩擦機構を取り付け、それをベース上に置く。摩擦機構Aは一定摩擦力とされており、摩擦機構Bのみがオン・オフ制御される。摩擦機構Aにおける一定摩擦力を F_C 、摩擦機構Bの摩擦力を強めた時の摩擦力を F_{On} 、弱めた時の摩擦力を F_{Off} とすると、

$$F_{Off} < F_C < F_{On} \quad (1)$$

の関係が成り立つように調整しておく。摩擦機構Bがオンの時に圧電アクチュエータを伸縮させると、摩擦機構Aが変位する。摩擦機構Bがオフの時に圧電アクチュエータを伸縮させると、摩擦機構Bが変位する。

粗動モードでは、以下のサイクルを繰り返すことにより左に進む。最初は伸縮素子を縮めておく。

- (1) 制御用摩擦機構Bをオフにする。

Fig. 2 Principle of movement of AZARASHI mechanism with 1 degree of freedom.

- (2) 摩擦機構Aにおける摩擦力のほうが摩擦機構Bにおける摩擦力より大きい場合、伸縮機構を伸ばすと摩擦機構Aは止まったまま摩擦機構Bが左に移動する。

- (3) 摩擦機構Bをオンにする。

- (4) 摩擦機構Aにおける摩擦力のほうが摩擦機構Bにおける摩擦力より小さい場合、伸縮機構を縮めると摩擦機構Aが摩擦機構B側に引きつけられるため、機構全体は左に進む。

これで1周期の移動が完了する。

伸縮機構の伸縮を逆にすることで、反対向きへ移動することも可能である。この動作は、アザラシが後足をすりながら移動する様子に似ているため、アザラシ型機構と呼ぶことにする。摩擦機構Aが後ろ足に相当する。

伸縮機構を粗動モードのステップ状の移動を補間するように伸縮させる微動モードと組み合わせることで、高精度な位置決めが可能になる¹⁶⁾。

3. アザラシ型移動機構の設計

これまでに製作したアザラシ型移動機構は、伸縮素子に圧電アクチュエータ、摩擦機構に電磁石を用いていた^{15)~17)}。使用した電磁石は応答が遅く、オフしてから圧電アクチュエータを動作させるまでに約10msの時間が必要であった。また、発生できる摩擦力が弱く、圧電アクチュエータを高速に伸縮させると電磁石が滑ることがあった²⁰⁾。そのため、粗動モードでは1ステップあたりの移動量が減少し高速移動が困難になり、微動モードでは高分解能な位置決めが困難になる恐れがあった。

そこで、摩擦機構の応答性の改善と摩擦力の向上を図るために、電磁石の代わりに積層型圧電アクチュエータを用いた。積層型圧電アクチュエータは電磁石に比べ応答性が高く、発生力も大きい。そのため、機構を強力に保持し、高速に動作させることが可能となる。

伸縮素子である積層型圧電アクチュエータの伸縮量は10 μ m程度であるため、速度を増大させるためには駆動周波数を高くする必要がある。そこで、伸縮素子と制御用摩擦機構の固有周波数が1kHz以上となる構造となることを設計指針とした。構造の決定には、有限要素法による解析結果を利用した。

製作したアザラシ型位置決め機構の構造を図3(a)に示す。伸縮機構とオン・オフ制御する摩擦機構、そして一定摩擦力を与える一定用摩擦機構から構成される。伸縮機構と制御用摩擦機

(a) Whole device.

(b) Friction device for constant friction

(c) Expanded view of flexure hinge.

Fig. 3 Structure of AZARASHI device with 1 DOF

構は炭素鋼(S50C)製で、アクチュエータには積層型圧電アクチュエータ(NEC トーキン製 AE0505D16, 静電容量 1.2 μ F)を用いた。摩擦力を発生させるために機構の外側にガイドを設け、それに摩擦機構を押し付けることで摩擦力を発生させた。機構の直進性を向上させるために、ガイドは両Vガイドとした。

同図(b)に示した一定摩擦機構では、ねじを締めることにより中央のくさびが押し込まれ、両側のV字形突起がガイド側に押される。制御用摩擦機構では、先端をV字形突起にしたことにより圧電アクチュエータの変位を拡大する。支点と力点は同図(c)に示す弾性ヒンジにした。アクチュエータを伸ばすと先端がアクチュエータの伸長方向に対して垂直方向に変位し、ガイドに押し付けられる。圧電アクチュエータを伸ばしていない状態では、突起とガイドとの間にはわずかなギャップがあるため、摩擦力は低い。先端に生じる変位は、この寸法比から計算すると圧電アクチュエータ単体の変位の2倍となる。

伸縮機構の側面には弾性ヒンジを設けることで圧電アクチュエータの伸縮が可能になるとともに、圧縮応力がかかるようにした。そして、圧電アクチュエータの全長に対して20 μ m短くした機構にはめ込むことで、圧電アクチュエータに予圧をかけて固定した。

有限要素解析に用いたモデルを図4に、物性値を表1に示す。圧電アクチュエータを弾性体として扱い、その両端が機構の枠に固定された状態とした。メッシュ分割には、主に8節点四角形要素を使用し、部分的に三角形要素を用いた。設計に当たっ

Fig. 4 FEM model of movable part

Table 1 Properties of materials used in FEM model

	S50C	Piezoelectric actuator
Density kg/m ³	7870	8000
Poisson's ratio	0.3	0.3
Young's modulus GPa	210	44
Damping coefficient	0.01	0.01

Table 2 Natural frequency (1st mode) of device

	FEM analysis	Experiment
Extension device	5.627 kHz	5.25 kHz
Friction device	5.499 kHz	5.47 kHz

ての制約条件は以下の3点である。

- (1) 降伏を防ぐために最大ミーゼス応力は350MPaを越えない。
- (2) 変位拡大率が大きくなる。
- (3) 固有振動数が高い。

その結果、制御用摩擦機構と伸縮機構の弾性ヒンジは、最細部の幅が0.5mm、半径が0.5mmの円弧状となった。固有振動数を解析した結果を表2に示す。解析結果より機構の固有振動数は5kHz台となった。

ステップ応答時の自由振動を周波数解析して求めた伸縮方向の1次固有振動数を表2に示す。圧電アクチュエータに高さ100Vの電圧を印加したときの各部の変位を静電容量式変位計(周波数帯域100kHz)で測定し、共振周波数を求めた。これらは解析結果と一致した。圧電アクチュエータの剛性が高いため、弾性ヒンジを用いても固有振動数は高かった。

4. 実験

システムの構成を図5に示す。電流源はソース、シンクともに0.5mA、20mA、1Aの3種類を並列に接続した。すべてのパルスの1周期を100 μ sで一致させた。この場合の1パルスあたりの圧電アクチュエータの変位量を表3に示す。1Aの場合にはパルス幅が短く、立ち上がりの遅れの影響がでたため、ほかの電流値による駆動よりも変位が小さくなった。アザラシ型位置決め機構の粗動モードにおける伸縮素子の駆動にも電流パルスを用いた。制御用摩擦機構は通常の電圧源のリニアアンプ(周波数帯域500kHz, 最大電流5.66A_{pp})でオン・オフ制御した。コントローラにはパーソナルコンピュータを用いた。電流パルス駆動回路へはデジタルI/Oボードから、リニアアンプへはD/A変換ボードから信号を与えた。変位はリニアスケール(分解能0.07nm)で測定し、デジタルI/Oボードからデータを取得した。

圧電アクチュエータは容量性負荷であるため、電流パルスは積分される。そこで伸縮素子へ電流パルスを与えるために Δ 変換を用いた。一つの電流値分のブロック線図を図6に示す。しきい値を超えた場合には、ソースまたはシンクを駆動するためのパルスを出力するとともに1ビットD/A変換器からパルスを出

(a) Settling time within 5 μm .

(b) Settling time within 100 nm.

(c) Settling time within 5 nm

Fig. 9 Settling time (reference: +100 μm)

18ms だけ時間が延びたことが原因であると考えられる。位置決め精度が高くなるほど整定時間のばらつきが大きくなった。これは、上で述べた残留振動の影響が大きいと考えられる。

伸縮素子も制御用摩擦機構を駆動したのと同じリニアアンプで駆動した場合には、駆動周期を 6ms まで短縮できた。そのときの最高速度は 1.8mm/s であった。

5. 結 言

本論文では、アザラシ型位置決め機構の伸縮素子の駆動に電流パルス駆動を適用した結果について述べた。

(1) 摩擦機構にも圧電アクチュエータを用いることで固有振動数が 5kHz 以上となる機構を製作した。

Table 4 Settling time (reference position: +100 μm).

	Average ms	Standard deviation ms
$\pm 5 \mu\text{m}$	219.0	4.4
$\pm 100 \text{ nm}$	237.6	7.5
$\pm 5 \text{ nm}$	375.7	16.4

(2) 粗動モードと微動モードを組み合わせることでナノメータオーダーの位置決めをした。

今後はパルス印加法を変更することで、駆動時に発生する振動の減衰を試みる予定である。

謝 辞

実験の遂行にあたりナノコントロール・飯田克彦氏、森浩一氏にご協力いただきました。

本研究の一部には、文部科学省平成 16～20 年度科学研究費補助金特定領域研究「アクチュエータ」(16078214)を用いました。記して感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) W. L. Xu and L. Han: Piezoelectric actuator based active error compensation of precision machining, *Meas. Sci. Technol.*, **10**, 2 (1999) 106.
- 2) D. Zhang, C. Chang, T. Ono, M. Esashi: A piezodriven XY-microstage for multiprobe nanorecording, *Sens. Actuators*, **A108**, 1/3 (2003) 230.
- 3) C. V. Newcomb and I. Flinn: Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators, *Electron. Lett.*, **18** (1982) 442.
- 4) T. Fukui, M. Segawa, M. Kurosawa, K. Oka, T. Higuchi: A control System with single-bit digital processing, *Proc. Int. Conf. Control, Autom. Rob. Vision*, Singapore (1996) 1992.
- 5) 東条啓一郎, 黒澤 実, 岡 宏一, 樋口俊郎: 1 ビットデジタル信号処理を用いた制御の分解能と情報量についてのシミュレーション, *電学論*, **118-D**, 5 (1998) 623.
- 6) 池辺 洋, 中田 毅: 電圧素子を用いたサーボ弁の研究, *計測自動制御学会論文集*, **7**, 5 (1971) 480.
- 7) K. Furutani, K. Iida: Driving method of piezoelectric actuator by using current pulse, *Meas. Sci. Technol.*, **17**, 9 (2006) 2387.
- 8) W. G. May, Jr.: "Piezoelectric Electromechanical Translation Apparatus," US Pat., 3902084 (1975)
- 9) 青山尚之, 岩崎隆之, 佐々木彰, 深谷次助, 下河辺明: 小型自走機械群による超精密生産機械システム(第1報) 自走機械の設計と試作, *精密工学会誌*, **59**, 3 (1993) 1007.
- 10) S. J. Ball, C. Folsom, and A. B. McLean: A compact nanopositioning stage with high vibrational eigenfrequencies, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 113702 (2005)
- 11) 樋口俊郎, 渡辺正浩, 工藤健一: 圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構, *精密工学会誌*, **54**, 11 (1988) 2107.
- 12) G. Mariotto, M. D'Angelo and I. V. Shvets: Dynamic behavior of a piezowalker, inertial and frictional configurations, *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 9 (1999) 3651.
- 13) J. Y. Shim, and D. G. Gweon: Piezo-driven metrological multiaxis nanopositioner, *Rev. Sci. Instrum.*, **72**, 11 (2001) 4183.
- 14) G. Shang, X. Qiu, C. Wang and C. Bai: Piezoelectric Push-pull Micropositioner for Ballistic Electron Emission Microscope, *Rev. Sci. Instrum.*, **68**, 10 (1997) 3803.
- 15) K. Furutani, M. Furuichi, N. Mohri: Coarse motion of 'seal mechanism' with three degrees of freedom by using difference of frictional force, *Meas. Sci. Technol.*, **12**, 12 (2001) 2147.
- 16) K. Furutani, N. Ohta, and K. Kawagoe: Coarse and Fine Positioning Performance of L-shaped Seal Mechanism with 3 Degrees of Freedom, *Meas. Sci. Technol.*, **15**, 1 (2004) 103.
- 17) 古谷克司, 河越克己: 3 自由度アザラシ型位置決め機構の移動特性の改善, *電学論*, **126-E**, 4 (2006) 131.
- 18) 社本英二, 申 興哲, 森脇俊道: Walking Drive による精密送り機構の開発(第1報) Walking Drive の駆動原理と基本特性, *精密工学会誌*, **59**, 2 (1993) 317.
- 19) 古谷克司, 古田 淳: 電流パルスによる圧電アクチュエータの駆動(第4報)駆動のシミュレーション, 2007 年度精密春季予稿 (2007) 1009.
- 20) 河越克己, 古谷克司, 鈴木教夫: アザラシ型精密位置決め機構の性能評価, 第 44 回自動制御連合講演会前刷 (2001) 88.
- 21) R. L. Norton: *Machine Design - An Integrated Approach*, Prentice-Hall Int., Upper Saddle River, NJ, USA (2000) 254.