平面 3 自由度インパクト駆動機構の開発 (第 2 報)*

—— 摩擦力制御を利用した移動特性の向上 ——

磯部浩已** 加藤滋康*** 久曾神 煌** 森口貴也†

Development of Piezoelectric XYγ Positioning Device using Impulsive Force (2nd Report)

— Improvement of Motion Characteristic with Friction Control —

Hiromi ISOBE, Shigeyasu KATO, Akira KYUSOJIN and Takanari MORIGUTI

Piezoelectric XYγ positioning device using impulsive force has capabilities of simple construction, no limitation of traverse length and high resolution. The force that maintains the device to be stationary is only static friction force. Furthermore the motion characteristic is extremely influenced by the conditions of sliding surface. In this paper, the friction control devices were manufactured to improve the motion characteristic of the XYγ positioning device and mounted on the positioning device with three feet of steel ball. These were designed to control the friction force between the each foot and sliding surface individually. As a result, the ratio of movement with three friction control devices to that without one was 1.6 in any directions. The experimental results agreed well with the estimated factor of 1.64. It was demonstrated that the positioning device had capability of a fine positioning less than $0.05\mu\text{m}$ in translation and $0.6''$ in rotation. It was able to rotate around any foot by increasing the friction between the sliding surface and one foot that was to be the rotation axis and removing the friction of the others.

Key words: piezoelectric actuator, positioning device, friction control

1. 緒 言

圧電素子は精密位置決め用アクチュエータとして広く利用されている。しかし、それ自身の最大変位量は小さいために、大きな位置決め範囲が必要とされる場合には、何らかの機構と組み合わせる必要がある。その一つは、例えば電動モータとボールねじから構成される粗動位置決め機構に圧電素子を組み込むことで、広いダイナミックレンジを達成する方法である。その一方で、圧電素子の微小変位を累積して大きな可動範囲を実現させる手法が提案されている。圧電素子の急速変形を利用したインパクト駆動機構^{1)~3)}は圧電素子と両端に取り付けられた 2 つの質量で構成される。そして圧電素子の急速変形により発生する慣性力としゅう動面との摩擦力を利用して、微小移動と静止状態を繰り返す。この結果、原理上制限されない可動範囲が得られる。この機構は非常に単純、コンパクトであるので、STM、AFM や電子顕微鏡の試料移動台などに利用できれば、装置や真空チャンバの小型化に有効である。

本研究では、これまでに 4 つのインパクト駆動機構の移動体同士を連結して構成される平面 3 自由度 (XY 方向並進 + γ 方向回転) インパクト駆動機構³⁾を開発してきた。圧電素子の駆動パターンを適宜制御することで、3 自由度に対しての広い可動範囲と高い位置決め分解能 (並進方向: $0.05\mu\text{m}$, 回転方向 $0.6''$) が可能であった。また、位置決め特性は駆動機構の位置、移動速度で変化する摩擦力に大きく影響されることがわかった。したがって摩擦力を制御することは、位置決め特性を安定

化し、向上させる可能性がある。

本報においては、1 つ、もしくは 3 つの摩擦力制御装置を、平面 3 自由度インパクト駆動機構に組み込む。摩擦力制御装置は圧電素子の周期的な伸縮により発生する加速度を垂直抗力 N に変換し、摩擦力 $F = \mu N$ (ただし μ : 摩擦係数) を制御する。その結果、摩擦力を制御しない場合と比べて、1 サイクル当たりの移動量は約 1.6 倍向上し、理論値と非常によく一致した。摩擦力制御装置は、機構を支持している 3 個の鋼球としゅう動面間の摩擦力をそれぞれ独立に制御できるように設計された。ここでは、回転中心となる鋼球下の摩擦力を増加させ、残りの 2 つの鋼球下に対する摩擦力をゼロに近づけることで、任意の接触点を回転中心とする回転動作を試みた。

2. 基本構成と動作原理

2.1 インパクト駆動機構の原理

インパクト駆動機構の動作原理を図 1 に示す。圧電素子の両端に質量が取り付けられており、移動体 M はしゅう動面に接し、駆動用慣性体 m_d は宙に浮いている。

- (1) 圧電素子が縮んでいる状態を初期状態とする。
- (2) 圧電素子をゆっくり伸ばす。発生する慣性力は移動体—しゅう動面間の静摩擦力より充分小さい。
- (3) 圧電素子が急停止すると、慣性体の持つ運動量により機構全体は右に移動し始め、機構全体の運動エネルギーがしゅう動面の摩擦により消費されるまで滑り続ける。
- (4) 圧電素子を急激に縮めると、移動体と慣性体は機構全体の重心に引き寄せられ、移動体はさらに右に移動する。

この (1) ~ (4) のサイクルを繰り返すことで長ストロークの移動が可能になる。また圧電素子の駆動波形を逆転させる

* 原稿受付 平成 9 年 7 月 22 日

** 正 会 員 長岡技術科学大学工学部 (長岡市上富岡町 1603-1)

*** 積水化学工業㈱ (蓮田市黒浜 3535)

† ㈱コロナ (柏崎市宝町 2-58)

Fig.1 Principle of impact sliding motion

ことで左方向の移動も可能になる。

2.2 摩擦制御の適用

摩擦を利用したインパクト駆動機構の基本構成を図2に示す。また、その時の圧電素子の変位パターンを図3に示す。ここでは解析の簡単化のために、圧電素子の剛性は充分高く、したがって、圧電素子の変位と発生する垂直抗力の間に時間的な遅れはないものとする。摩擦制御装置は慣性体 m_f と圧電素子で構成される。

(1) 摩擦制御装置の圧電素子は、その伸縮方向が鉛直方向（Z軸）となるように、移動体上面に取り付けられる。そして圧電素子の伸縮により発生する垂直抗力で摩擦力を制御する。

また、変位の急激な変化は駆動機構を励振する可能性があるために、不連続点のない正弦波を採用した。駆動用圧電素子の伸縮量 ε_d 、摩擦制御用圧電素子の伸縮量 ε_f およびしゅう動面からの鉛直上向きの垂直抗力 N を下式に示す。

$$\varepsilon_d = 4\Delta L_{amp} \left(t - \frac{T}{2} \right)^2 f^2 \quad \left(\frac{T}{2} \leq t \leq T \right) \quad (1)$$

$$\varepsilon_f = a_f \sin 2\pi f t \quad (2)$$

$$N = (M + m_d + m_f)g + m_f a_f (2\pi f)^2 \sin 2\pi f t \quad (3)$$

ただし、

M : 移動体の質量 (kg)

m_d : 駆動用慣性体質量 (kg)

m_f : 摩擦制御用慣性体質量 (kg)

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

f : 駆動周波数 (Hz)

とする。摩擦制御装置の発生力が装置の重量を超えた場合、装置はしゅう動面に対して浮上と衝突を繰り返し、不安定な動作を引き起こす。実験においては、装置が浮上しないように摩擦制御装置の振幅 a_f を設定している。

(2) 摩擦制御装置の圧電素子により移動体をしゅう動面に押し付け、摩擦力を大きくする。この結果、望んでいる移動方向と逆方向の滑りは減少し、1サイクル当たりの移動量は大きくなる。同時に単位時間当たりの駆動サイクル数 f を増加させるために、移動速度は向上する。

Fig.2 Principle of operation with friction control

Fig.3 Piezo extension patterns

(3) 移動体がしゅう動面上を滑っているときは、摩擦制御装置により移動体を引き上げ、摩擦力を小さくする。この結果、摩擦によるエネルギーの損失は減少し、1サイクル当たりの移動量は大きくなる。

2.3 移動量増加率の算出

ここでは摩擦制御装置を用いた平面3自由度インパクト駆動機構の移動量とその増加率を概算する。なお、解析の簡略化のため、静摩擦係数と動摩擦係数は等しいものとする。

図2(b)において、駆動力が摩擦力を超えた場合には、望んでいる方向とは逆方向への滑りとして損失が起きるために好ましくない。このため、駆動用圧電素子の伸縮量を ε_d とすると、変形の加速度 $d^2\varepsilon_d/dt^2$ は下記の条件を満たす必要がある。

$$\frac{d^2\varepsilon_d}{dt^2} \leq \frac{\mu N_z}{m_d} \quad (4)$$

ただし、 N に付けられた下付きの $+$ は、摩擦制御装置によりしゅう動面との摩擦力が増加していることを示す。圧電素子の剛性が充分であるとする、圧電素子の変形加速度を受けた慣性体 m_d は $T/2$ 秒後に速度 v に達した直後、圧電素子の伸縮は急停止する（図2(c)）。この瞬間、駆動機構の得る速度 V は運動量保存則により

$$V = \frac{m_d v}{M + m_d + m_f} = \frac{4m_d \Delta L_{amp} f}{M + m_d + m_f} \quad (5)$$

(a) With one friction control device

(b) With three friction control devices

Fig.4 Schematic view of positioning mechanism

となる。機構は運動エネルギーが摩擦により消失するまで移動する。この時、摩擦力は引き上げ力により減少するので、しゅう動面からの垂直抗力を N_- と記述する。これより、移動量 x_1 は

$$x_1 = \frac{V^2(M + m_d + m_f)}{2\mu N_-} \quad (6)$$

となる。これに式(5)を代入すると

$$x_1 = \frac{8m_d^2 \Delta L_{amp}^2 f^2}{\mu N_- (M + m_d + m_f)} \quad (7)$$

式(4)が等号のとき、すなわち駆動力と摩擦力が等しいときに最大移動量 x_{1max} が得られる。この条件を考慮して式(1)および(4)を上式へ代入する。

$$x_{1max} = \frac{m_d}{(M + m_d + m_f)} \frac{N_+}{N_-} \Delta L_{amp} \quad (8)$$

図2(d)において、圧電素子を摩擦力よりも充分速い加速度で急激に縮めると、慣性体と移動体は機構全体の重心位置へ引き寄せられる。この時、移動体は

$$x_{2max} = \frac{m_d}{(M + m_d + m_f)} \Delta L_{amp} \quad (9)$$

だけ移動する。1サイクルあたりの最大移動量 x_{max} は

$$(x_1 + x_2)_{max} = \frac{m_d}{(M + m_d + m_f)} \left(1 + \frac{N_+}{N_-}\right) \Delta L_{amp} \quad (10)$$

Fig.5 Constructed device

となる。また、摩擦力制御を用いない場合の垂直抗力は

$$N_+ = N_- \quad (11)$$

となるので、摩擦力制御装置を利用した場合の理論的移動量増加率 η_{th} は下式となる。

$$\eta_{th} = \frac{N_+ + N_-}{2N_-} \quad (12)$$

3. 平面3自由度インパクト駆動機構

3.1 装置概略

摩擦力制御装置を用いた平面3自由度インパクト駆動機構の概略図を図4に示す。図4(a)は前報で試作した駆動機構の重心位置に摩擦力制御装置を1つだけ取り付けただものである。前報では、しゅう動面と駆動機構はそれぞれラップ仕上げ面同士で接触していたため、真実接触領域は定まっていなかった。図4(b)においては、しゅう動面との接触部分を一定領域とするために、インパクト駆動機構下面に3つの鋼球を取り付けた。鋼球は機構全体の重心を中心として120°間隔で配置される。3つの摩擦力制御装置がそれぞれ鋼球の鉛直線上に配置される。この結果、制御機構の発生力はその直下にある鋼球にのみ影響を与え、それぞれの鋼球としゅう動面間の摩擦力のみを制御することができる。

3.2 実験装置

図5に実際に試作した実験装置の概略図を示す。ここでは3個の摩擦力制御装置を持つ機構を例に示す。積層型圧電素子は破壊防止のためにホルダ内に圧入されている。摩擦力制御装置は装置を支持している鋼球の真上に取り付けられ、それぞれの鋼球に対して独立に摩擦力を制御できる。圧電素子ホルダの斜線部は慣性体として作用する。駆動用圧電素子の伸縮に伴い、慣性体は弾性ピボットを中心に回転し、矢印の示す方向に力を発生する。摩擦力制御装置においては、円弧ばねによる4節リンク機構が構成され、矢印の示す方向に力を発生する。機構全体の質量は $M + m_d = 1.4\text{kg}$ であり、駆動用慣性体の質量の総和は $m_d = 0.2\text{kg}$ である。摩擦力制御用慣性体の質量は各 0.15kg で、総和は $m_f = 0.45\text{kg}$ となる。しゅう動面は研削仕上げされており、表面粗さは $R_{a75} = 0.3\mu\text{m}$ である。圧電素子は印加電圧100Vに対して駆動用は $15\mu\text{m}$ 、摩擦力制御用は $7\mu\text{m}$ 変位する。

Fig.6 Fine step motion

また移動量、回転量の測定は静電容量型変位センサを利用して、測定分解能 ($0.03\mu\text{m}$, $\pm 0.6''$)、ノイズレベル ($0.05\mu\text{m}$, $\pm 1.0''$) を得ている。

4. 摩擦力制御による駆動実験

4.1 最小ステップ移動量

前報において、本機構の最小ステップ移動量としてX、Y方向並進運動に対して $0.05\mu\text{m}$ 、 γ 方向回転に対して $0.6''$ を得ている。しかしながら、本報においては鋼球による3点接触への変更や摩擦力制御装置による質量の増加がある。特に微小な滑り領域において、接触状態の変更は位置決め特性に大きな影響を与えると考えられる。図6はX方向と γ 方向に対するステップ送りの結果である。駆動周波数 $f=500\text{Hz}$ であり、1ステップの微小移動が終了後、振動が減衰した後に次のステップを行う。駆動用圧電素子の最大伸縮量 ΔL_{amp} をパラメータとしている。ここでは最小ステップ幅の確認が目的であるので、摩擦力制御装置は利用しない。この結果、 ΔL_{amp} の減少に伴って、ステップ幅は小さくなっていく。そして、X方向への移動に対して、 $\Delta L_{amp}=2.8\mu\text{m}$ の場合に最小ステップ幅 $0.05\mu\text{m}$ を確認した。 γ 方向の回転に対して、 $\Delta L_{amp}=3.5\mu\text{m}$ の場合に最小ステップ幅 $0.6''$ を確認した。以上の結果、装置の改良（摩擦力制御装置の追加およびラップ面同士の接触から鋼球支持への変更）に伴う微小移動特性の影響は見られなかった。

4.2 移動量の増加率

ここでは摩擦力制御装置を利用してしゅう動面との摩擦力を変化させることにより、1ステップ当たりの移動量の増加を

Fig.7 Improvement in displacement through one operating cycle

試みる。同一の駆動条件の場合、1ステップ当たりの移動量が増加すれば、移動速度が向上したことになる。駆動周波数は $f=500\text{Hz}$ で、原点を中心として $\pm X$ 、 $\pm Y$ の方向にそれぞれ移動させた。摩擦力制御用圧電素子の振幅は $a_f=2.5\mu\text{m}$ とした。これより移動量増加率（摩擦力制御による移動量/摩擦力を制御なしの移動量）の理論値は式(12)より $\eta_{th}=1.64$ となる。ただし、摩擦力 N は正弦波状に変化しているので、ここでは半周期に対しての時間平均で算出した。実験結果を図7に示す。それぞれの軸は移動量増加率 η_{α} を示し、5回の実験結果を重ねてプロットしてある。摩擦力制御装置が1つの場合（図4(a)）、増加した移動量は $-X$ 方向に偏る傾向が見られる。これは摩擦力制御装置の発生する力が鉛直方向から $-X$ 方向へ傾いていることが原因である。しかし、この装置においては、発生力の方角を補正することは非常に困難である。同様に、摩擦力制御装置が3つの場合（図4(b)）、それぞれの機構が発生する力のベクトルが正確に鉛直方向を向くとは限らない。ここでは、それぞれの圧電素子の変位振幅をソフトウェアで調整することで、その合力が鉛直方向を向くように補正した。この結果、移動量の増加率 η_{α} はすべての駆動方向に対して約1.6倍となり、理論値 $\eta_{th}=1.64$ とほぼ一致することがわかった。さらに移動量のばらつきは測定器の分解能以下であった。この結果、3つの摩擦力制御装置を利用することにより、方向性のない移動量の向上が可能となり、移動量のばらつきも大きく減少した。

5. 鋼球を支点とした回転動作

5.1 動作原理

本機構においては、機構を支持している3つの鋼球としゅう動面間の摩擦力を、それぞれ別々に制御できる。従って、ある1つの鋼球—しゅう動面間の摩擦力を増加し、他の2点の摩擦力を0にした場合、原理的には機構は摩擦力が増加している鋼球を中心に回転し、回転中心を装置の重心から偏心させることができる。図8において、Piezo Cの真下の鋼球C回りの回転を例に挙げる。また、すべての圧電素子の変位パターンを図9

Fig.8 Principle of operation around specific steel ball

に示す。駆動機構は回転運動を行う。駆動機構が回転中に Piezo A, B は引き上げ動作を行い、摩擦力を小さくする。Piezo C はそれらとは逆位相で駆動され、摩擦力を大きくする。この結果、Piezo C の真下の鋼球が滑らずに機構は回転する。運動の軌跡を問題としない P T P 位置決めの場合、並進動作と重心回りの回転動作を組み合わせた移動と比べて、より少ない駆動回数で位置決めできる場合がある。

5.2 鋼球を支点とした回転結果

図10に回転動作の駆動結果を示す。それぞれの鋼球を回転中心として5回のステップ送りを行った場合の装置重心の軌跡が描かれている。図中の記号は、回転中心とする鋼球、回転方向および機構の最終的な回転角度を表す。これより、実際の重心の移動方向と鋼球を瞬間中心と考えた場合の理想的な移動方向（破線矢印）とは大きく異なっていることがわかる。本研究では摩擦力制御波形に正弦波を用いたため、垂直抗力が駆動サイクル中で一定ではなく、時間的に正弦波状に変化する。また、引上げ動作により摩擦力を小さくしているが、2.2節に述べられたように、鋼球はしゅう動面から浮上していないため、摩擦力は完全にゼロではない。その結果、本駆動方式において、鋼球—しゅう動面の接触点と装置の回転中心とを完全に一致させることは困難であった。また、重心が移動した距離が、支点とした鋼球により異なっている。これは、個々の摩擦力制御装置の発生する力のベクトルが鉛直方向を向いていないためである。

6. 結 論

本研究ではインパクト駆動機構の移動体としゅう動面間の摩擦力を制御するための摩擦力制御装置を試作した。そして従来の平面3自由度インパクト駆動機構に取り付け、移動量の増加を試みた。装置は底面に取り付けられた3つの鋼球でしゅう動面と接しており、摩擦力制御装置によりそれぞれの摩擦力を別々に制御できる。実験の結果、以下の結論を得た。

(1) 最小ステップ移動量は X, Y 方向並進に対して

Fig.9 Piezo displacement patterns

Fig.10 Trajectory of C.G. and rotational angle around specific steel ball

0.05μm およびγ方向回転に対して0.6°を得た。摩擦力制御装置の追加および鋼球による点接触支持への変更に伴う微小移動特性の影響は見られなかった。

- (2) 摩擦力を制御することで1ステップ当たりの移動量を増加できた。増加率は摩擦力を制御しない場合と比較して約1.6倍であった。
- (3) 移動量の増加率を概算した結果、その値は $\eta_{\mu}=1.64$ であり、実験値と一致した。
- (4) 摩擦力制御装置により鋼球—しゅう動面間の摩擦力を独立に制御して、特定の鋼球を回転中心として装置を回転させることを試みた。その結果、鋼球と回転中心軸は完全に一致しなかった。

本研究は文部省科学研究費奨励研究（A）No.08750170のご援助によることを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 樋口俊郎, 渡辺正浩, 工藤謙一：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.
- 2) 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）—摩擦力の大きさと移動特性—, 精密工学会誌, 58, 10 (1992) 1759.
- 3) 磯部浩己, 森口貴也, 久曾神 煌：平面3自由度インパクト駆動機構の開発, 精密工学会誌, 62, 4 (1996) 574.