

慣性と摩擦を利用した回転機構の開発

Development of a Rotation Mechanism using Inertia and Friction

葛西 昭治, 福田 眞

Shoji KASAI, Makoto FUKUDA

弘前大学

Hirosaki University

キーワード: 慣性 (Inertia), 摩擦 (Friction), 回転機構 (Rotation Mechanism), 圧電素子 (Piezoelectric element), インパクト駆動機構 (Impact Drive Mechanism)

連絡先: 〒036-8561 弘前市文京町3番地 弘前大学大学院 理工学研究科

葛西昭治, Tel.: (0172)39-3728, Fax.: (0172)39-3523, E-mail: skasai@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

工業分野, 医療分野, 生命科学分野など, その対象物の微小化に伴って微細加工技術や精密位置決め技術の確立が求められて久しい. 例えば光通信技術に関連して, 光ファイバと光学レンズとの位置合わせでは $1\mu\text{m}$, アライメントは 0.004rad の精度が要求されている¹⁾.

このような精密位置決めに用いられるアクチュエータとして圧電素子(以下, PZT)を利用することが多い. PZTの変位量は数 μm ~ 数十 μm であるが, 小型で原理的な分解能は無限小で実用的にも nm オーダの微動を得ることができる. また, 大きな力を発生させることが可能で高い応答性もある.

位置決め変位量が数 μm 程度よりも小さい場合, PZTの変位をそのまま利用することが可能で, 小型な微動位置決め機構を構成することができる. しかし, それよりも大きな変位量を必要とする場合には, 別の粗動機構と組み合わせる必要があり全体としては複雑な機構になってしまう. これは

PZTが持つ小型アクチュエータとしての特徴が隠れてしまうことにつながる. 直線移動機構のみならず回転機構においても同様である.

PZTの特徴を活用した粗微動回転機構に関する研究も多くなされている. 例えば東条らは, 2つの摩擦機構の摩擦をON/OFF制御し, かつ, 2つのPZTでその間隔を変化させ粗微動回転させる尺取り虫型の回転機構を提案している²⁾. 磯部らは, 摩擦力とPZTの急速変形による慣性力を利用するインパクト駆動機構(以下, IDM)を応用した平面3自由度駆動機構を提案している³⁾. また岡本らは, IDMを拡張したスムーズインパクト駆動機構(以下, SIDM)を利用した回転モータを報告している⁴⁾. それらは, 複数のアクチュエータを必要とする, 多自由度駆動機構に伴う複雑な構成, 与圧機構が必要, などの特徴も持っている.

今回我々は, より簡便な構造の1自由度回転機構の基礎評価実験を行った. この回転機構は1つのPZTを使用しステータ上にロータを載せただけの単純な構造である. PZTを変形させステータの

一部を移動させることで、ロータの回転運動を得る。ロータの微動回転はステータの一部を微動させることで、粗動回転はIDMとSIDMの原理を利用しステータの一部を緩急移動させることで得ている。PZTの制御電圧波形を工夫することで、1つの機構で粗微動回転を得ることができる。例えば、顕微鏡視野下における試料の粗微動回転などに有用と考えられる。

2. 1自由度粗微動回転機構

2.1 構造

提案する回転機構を図1に示す。

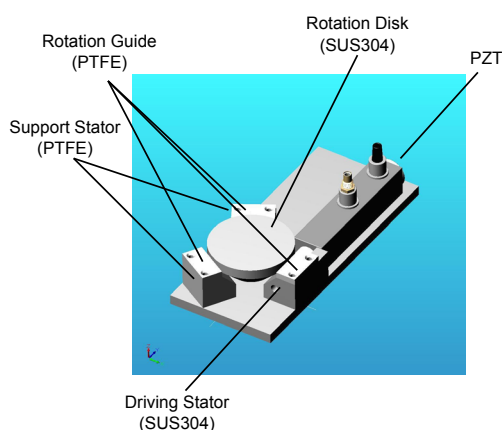


Fig. 1 Rotation mechanism

3点のステータ上に乗せたロータを回転体、PZTに接続され直線運動するステータを駆動体、台座に固定されたステータを支持体と呼ぶことにする。回転体の並進を防ぐため、ステータにはツバ状のガイドを設置しておく。駆動体を直線運動させることによって回転体の粗微動回転運動得る。

2.2 粗動回転

駆動体を緩急移動させることで回転体の粗動回転を得る。駆動体はPZTを介して台座に接続されている。また、回転体は摩擦を介して駆動体と接続されている。Fig.2にその構成と駆動原理を示す。

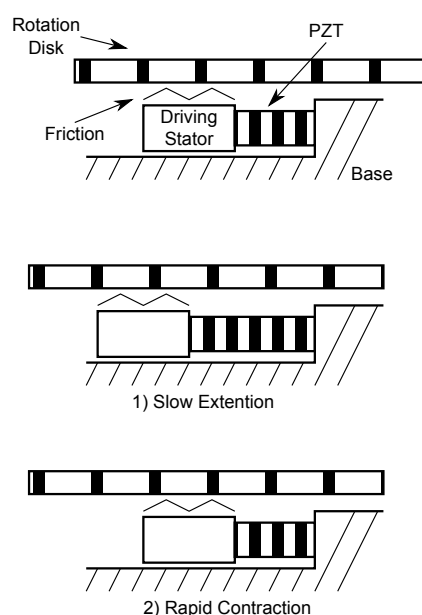


Fig. 2 The coarse rotation mechanism

1)~2)のように駆動体の緩急運動を繰り返すことによって、回転を持続させることができる。

- 1) 回転体が駆動体上を滑らないようにゆっくりと駆動体を移動させる。回転体は駆動体と一体となって回転する。
- 2) 駆動体を急速に逆方向に移動させ初期位置に戻す。回転体は駆動体上を滑り、ほぼその位置にとどまる。

PZTの駆動電圧波形をのこぎり波形とし、その立上り時間と立下り時間を適切に設定すればよい(Fig.3)。緩急の順番を逆にすると逆回転も可能である。

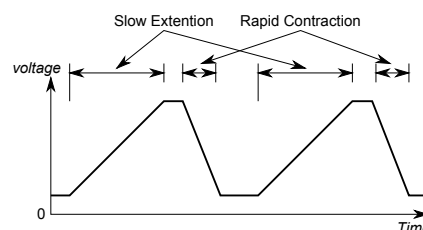


Fig. 3 Driving signal of the coarse rotation

概念図をFig.4に示す．回転体の半径と質量を R, m ，駆動体と支持体の支持点における摩擦係数をそれぞれ μ_d, μ_s ，重力加速度は g とする．

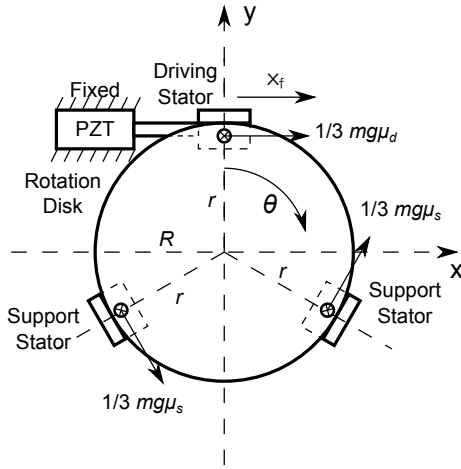


Fig. 4 Model of rotation mechanism

回転体の運動は駆動体の運動と相対的なものとして考えることができる．駆動体が t_f 間に x 軸の正の方向に x_f だけ等速移動する場合，駆動点と円板との摩擦力が回転体の駆動力として作用する．駆動力の向きは，駆動体の移動方向と同一になるから，回転体はCW方向に回転しようとする．また，支持点と回転体との摩擦力は回転体の回転を妨げるように働く．駆動体が停止する t_f 以降，回転している回転体は駆動体と支持体から摩擦力を受け停止する． $\mu_s < \frac{\mu_d}{2}$ となるようにそれぞれの材質を選定すれば，駆動体の移動によって回転体が回転することになる．

駆動体の移動速度を \dot{x} ，時計方向の回転角度を θ ，中心から駆動力と摩擦力の作用点までの距離を r とする．駆動点での回転体の周速度 $r \cdot \dot{\theta}$ が \dot{x} と等しいとき駆動体と回転体とは一体運動する．また， $r \cdot \dot{\theta} < \dot{x}$ では，回転体は回転運動が遅れ駆動体上を滑り，駆動体と一体運動しているほどの回転角度に達することはできない．なお， $\dot{x} < r \cdot \dot{\theta}$ になることは無い．

回転体の慣性モーメントを I としたとき，回転体の回転運動を次式であらわすことができる．

$$I \cdot \ddot{\theta} = \begin{cases} \frac{1}{3} mg(\mu_d - 2\mu_s) \cdot r & (0 \leq t \leq t_f) \\ -\frac{1}{3} mg(\mu_d + 2\mu_s) \cdot r & (t_f < t) \end{cases} \quad (1)$$

したがって，初期値を0としたとき θ は次式となる．ただし $\dot{\theta}(t_f)$ は t_f における $\dot{\theta}$ を表わす．

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \frac{1}{I} \cdot \frac{1}{3} mg(\mu_d - 2\mu_s) \cdot r \cdot t & (0 \leq t \leq t_f) \\ \dot{\theta}(t_f) - \frac{1}{I} \cdot \frac{1}{3} mg(\mu_d + 2\mu_s) \cdot r \cdot t & (t_f < t) \end{cases} \quad (2)$$

$0 \leq t \leq t_f$ では θ は等角加速度で増加し，その最大値は $\frac{\dot{x}}{r}$ である．以上の関係をFig.5に図示した．

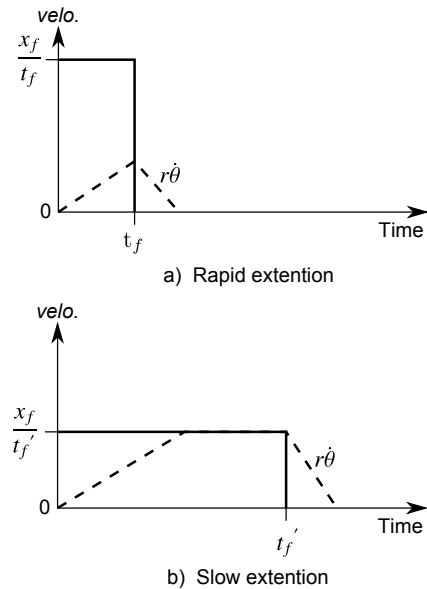


Fig. 5 Velocity of the Driving Stator and Peripheral velocity of the Rotation Disk

回転体が円板の場合，その慣性モーメントは $I = (1/2)mR^2$ で表わされるから式2より $\dot{\theta}$ は次式で表わされる．

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{R^2} g(\mu_d - 2\mu_s) \cdot t & (0 \leq t \leq t_f) \\ \dot{\theta}(t_f) - \frac{2}{3} \cdot \frac{r}{R^2} g(\mu_d + 2\mu_s) \cdot t & (t_f < t) \end{cases} \quad (3)$$

2.3 微動回転

回転体の微動回転は，駆動体と回転体とを一体運動させることで得ることができる． $\dot{x} = r \cdot \dot{\theta}$ のと

き駆動体と回転体は一体運動するから、すぐに $r \cdot \dot{\theta}$ が x に達するよう駆動体をゆっくりと駆動すればよい。この場合、 $x \approx r \cdot \theta$ が成立つからPZTの微動で回転体の微動回転を得ることができる。

3. 回転機構の試作

回転体は $R = 20\text{mm}$, 厚さ $t = 15\text{mm}$ の大きさで $m = 107.4\text{g}$ である。駆動体の移動によって回転体が並進することを避けるため、テフロン材による回転体ガイドを設置し、回転体と駆動体や支持体との接触は45度の斜面接触とする構成とした。また、それぞれの斜面の平均表面粗さ $Ra = 0.4$ で製造指示している。材質として、回転体と駆動体にはSUS304を使用し、支持体とガイドには低摩擦係数を得るためテフロン材を使用した。表1には使用したPZTの主たる仕様を示す。ここで使用したPZTドライ

Table 1 Main Characteristics of the used PZT⁵⁾

| | |
|------------------------|------------------------------------|
| Displacement / Voltage | $80 \mu\text{m} / 1000 \text{V}$ |
| Electric capacitance | 340nF |
| Force PUSH / PULL | $2000 \text{N} / 50 \text{N}$ |
| Dimensions | $15 \times 15 \times 68 \text{mm}$ |

P-178.K002, Physik Instrumente

バは、制御入力 $0 \sim 10\text{V}$ のときPZT駆動電圧が $0 \sim 1000\text{V}$ を得ることができる。制御入力に対するPZTの変位は $80\mu\text{m}/10\text{V}$ である。

4. 実験

4.1 粗動回転実験

粗動回転のための構成をFig.6に示す。PICで構成した波形生成器を作製しPZTの制御信号を得ている。制御信号の最大値を 5V とし、駆動体の最大移動量は $40\mu\text{m}$ である。周期は 22msec で、緩急移動時間は 10msec , 1msec である。Fig.7にその制御電圧波形の模式図を示す。

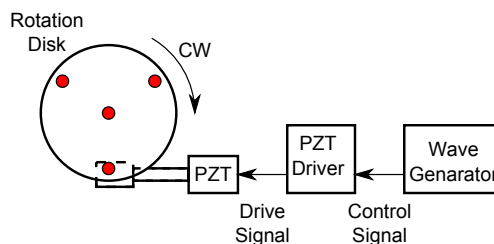


Fig. 6 Measurement system of the coarse rotation

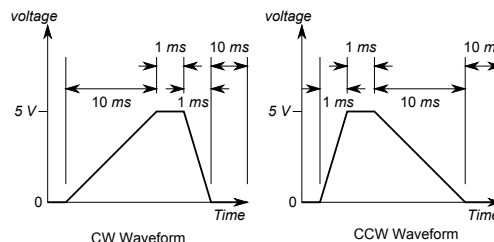


Fig. 7 Waveform of Control Signal

回転角度計測は画像処理によった。回転体上に4つのマーカを設置し、その相対位置を検出し回転角度を求めている(Fig.8)。

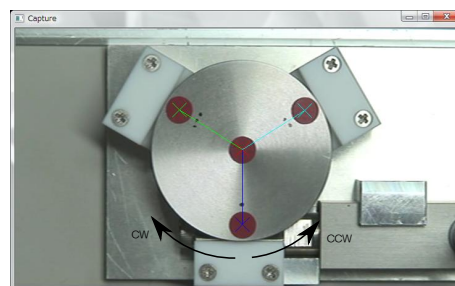


Fig. 8 Image processing (720 x 420px)

Fig.9に結果を示す。CW, CCWともに $15\text{deg}/\text{min}$ 程度の平均角速度で広範囲な粗動回転を得ている。回転途中の角速度はばらつきを伴っている。これは、ステータとロータの接触状態が安定していない事が原因と考えられる。

4.2 微動回転実験

微動回転のための構成をFig.10に示す。制御電圧に対する回転体の回転角度を測定する。回転体にロッドを装着し、その先端部の変位量を非接触変位計を用いて測定し回転角度を算出した。

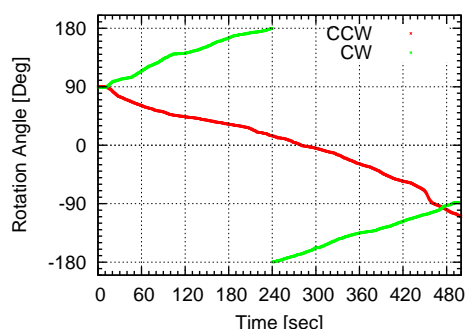


Fig. 9 Angle of coarse rotation of CW and CCW

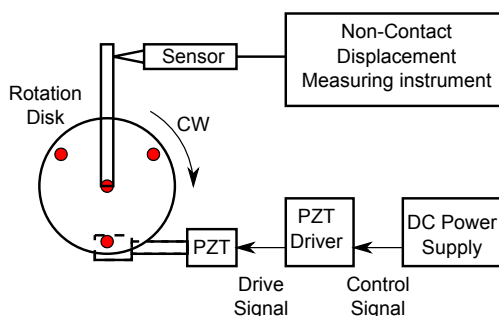


Fig. 10 Measurement system of the fine rotation

Fig.11に結果を示す．結果より，制御電圧に対する微動回転角度は約 $0.02\text{Deg}/\text{V}$ である．

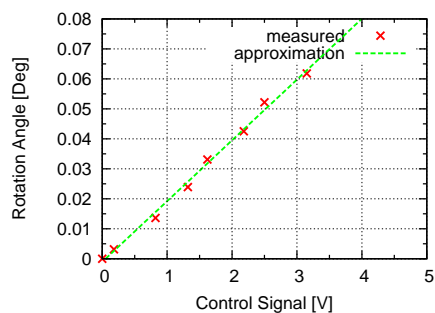


Fig. 11 Angle of the fine rotation

5. まとめ

1つのPZTを使用し，ステータ上部にロータを載せるだけの単純な構造からなる1自由度粗微動回転機構を提案し，その基礎評価実験を行った．

ロータの粗動回転はIDMとSIDMの原理を利用してステータの一部を緩急移動させることで得ることができることを確認した．

ロータの微動回転は，ステータの一部を微動させることで得ることができることを確認した．

以上から，単純な構造でありながらも，PZTの制御電圧波形を工夫するのみで微動回転と粗動回転の両方を得ることができることが確認できた．また，粗動回転では，角速度にばらつきがみられた．これはステータとロータの接触状態がばらついていることが原因と考えられる．今後は，接触面の表面粗さや回転負荷が回転性能に及ぼす影響を明確にし，顕微鏡視野下粗微動回転システムとして構築していく方針である．

弘前大学技術職員の佐久間一行氏，堀井智実氏には，本回転機構における機械部品の製作に関して討議と協力をいただいたことを感謝する．

参考文献

- 1) 葛西 真生, 福田 真, 大木 茂久: ワイヤ駆動による顕微鏡下でのマニピュレーション機構, 精密工学会学術講演会講演論文集, Vol. 2007A, 381/382 (2007)
- 2) 東条 徹, 杉原 和佳: 圧電素子を用いた高精度回転機構(第1報), 精密工学会誌, Vol. 53, 6, 879/884 (1987)
- 3) 磯部 浩巳, 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, Vol. 62, 4, 574/578 (1996)
- 4) 岡本 泰弘, 吉田 龍一, 谷尻 靖: スムーズインパクト駆動機構(SIDM)の開発(第7報)-回転モータの試作-, 1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 554 (1998)
- 5) P-170・P-178 Open-&Closed-Loop Piezo Translators(HVPZT), http://www.physikinstrumente.com/en/pdf/P170_178_Datasheet.pdf, Physik Instrumente. (2011)