

二本の圧電素子を直交して配置するマイクロアクチュエータ

A Microactuator with Two Piezoelectric Elements Placed at Right Angles

松田 伸也*
Matsuda, Shinya

松尾 隆*
Matsuo, Takashi

要旨

本報では二本の圧電素子を直交して配置するマイクロアクチュエータについて述べる。駆動回路を一系統に簡略化できる単相駆動法を提案している。

力学モデルを用いて単相駆動法の原理を明らかにすると共にその成立条件を求めている。

Abstract

This paper describes a microactuator with two piezoelectric elements positioned at right angles. Single-phase drive is proposed, which can simplify the drive circuit. Through kinetic models, the principle of the single-phase drive and necessary conditions are described.

1 はじめに

圧電素子には容積あたりの発生力が大きいという特徴があり、携帯機器やウェアラブル機器に応用が期待されている。しかし、その変位は小さく、所望の出力を得るには数十ボルトの高い駆動電圧を必要とする^{1), 2)}。

この欠点を克服するため、共振現象を利用して駆動電圧の低減と効率の向上を実現する手法がいくつか提案されている^{3), 4), 5)}。

しかしながら、いずれの手法においても位相の異なる二系統の駆動信号が必要となる（以下、位相差駆動法と呼ぶ）。さらに、共振現象を利用するには、周波数に追従するための複雑で高価な回路が必要となる。

論文では、変位部材である二本の圧電素子を直交して配置するマイクロアクチュエータについて述べる。共振現象を利用して電圧や効率の課題を解決すると共に、駆動回路を一系統に簡略化できる単相駆動法を提案し、その原理と成立条件を明らかにする。

2 アクチュエータの構成

Fig. 1 に、マイクロアクチュエータの構成を示す。

直交して配置された圧電素子の交点には駆動体である

* コニカミノルタテクノロジーセンター(株)
デバイス技術研究所 イメージングデバイス開発室

本報は平成13年度に開催された電磁力関連のダイナミクスシンポジウム論文集に掲載された論文を編集したものである

チップが固定されており、他端はベースに固定されている。

圧電素子が任意の単振動を行うと、チップはリサージュ曲線と言われる楕円軌跡を描く。このチップの動きを被駆動体であるロータに加圧接触することにより駆動力を伝達する。

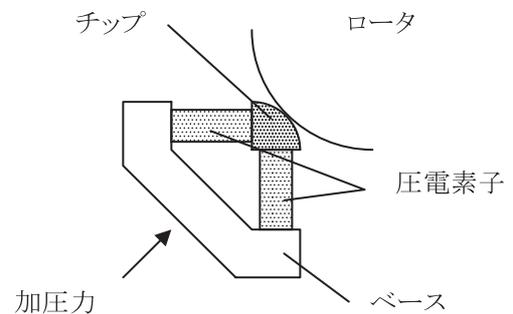


Fig.1 Configuration of microactuator

3 固有モードと振動数

アクチュエータでは系の共振現象を利用しているため、固有モードを力学モデルに置き換え、振動数を数式で記述する。Fig. 2 に、有限要素法で解析した系の固有モードを示す。

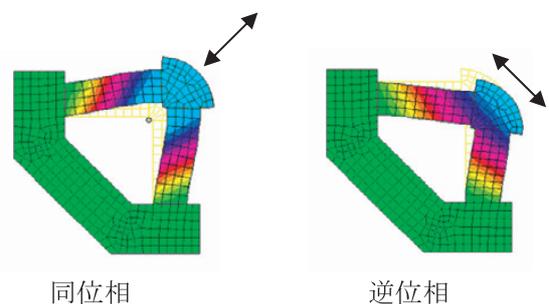


Fig.2 Natural modes obtained through FEM

圧電素子が伸び振動する固有モードには、位相が一致する同位相モードと位相が反転する逆位相モードがある。前者においてチップは対称軸方向に振動し、後者においてチップはこれに垂直な方向に振動する。

逆位相モードにおいては、素子の伸び変形とチップの並進運動が生じる。伸び変形により素子が傾斜しても素子間の挟み角はほぼ90度に保たれるため、素子のチップ側の端部に曲げの力は働かない。

素子は伸び変形を行う質量バネであると同時にベース側が固定された片持ちはりの状態となる。しかし、はりのバネ定数は伸び変形と比べて十分に小さいため、その影響は無視できる。

同位相モードにおいても、素子の伸び変形とチップの並進運動が生じる。伸び変形により素子が傾斜するとその挟み角が変化し、チップ側の端部に曲げの力が働く。

素子は伸び変形を行う質量バネであると同時に、一端が固定され他端の角度が保持されたはりとなる。一方、チップにも曲げの力が働くが、素子と比べてバネ定数が十分に大きいため変形量が少なく、その影響は無視できる。

簡略化のためモデル解析ではベースを固定端とみなし、各部材を結合している接着剤は省略する。また、高次の振動を扱わないため、部材の質量は集中荷重として扱う。

3.1 逆位相モード

Fig. 3に、逆位相モードの運動モデルを示す。ここで、モデルは質量ばねと重りによる振動系とみなすことができる。質量： m 、バネ定数： k_l のばねの固有振動数は、質量のない同じ定数のばねの先端に等価質量： $m_l = m/3$ の重りを取り付けた系と一致する。

素子の張力： T 、バネ定数： k_l 、応力： σ 、弾性率： E 、歪み： ε とおくと、フックの法則より、 $T = k_l x$ 、 $\sigma = E\varepsilon$ と表される。素子の長さ： L 、断面積： S とおくと、 $\sigma = T/S$ 、 $\varepsilon = x/L$ より、 $k_l = SE/L$ となる。

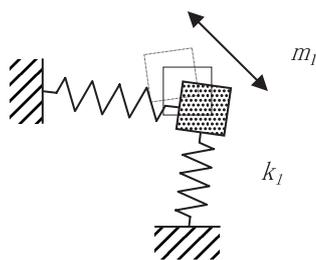


Fig.3 Kinetic model of cross-phase mode

従って、逆位相モードの角振動数： ω_l は式1で表される。

$$\text{式1} \quad \omega_l^2 = \frac{k_l}{M + m_l} = \frac{SE}{L(M + m/3)}$$

ここで、 M ：チップ質量

3.2 同位相モード

Fig. 4に、同位相モードの運動モデルを示す。

モデルは質量ばねと重りによる伸び振動と、一端が固定され他端の角度が保持された質量はりによる曲げ振動が複合された系とみなすことができる。

復元要素は並列に、慣性要素は直列に連結されているため、複合系の固有振動数は孤立系のバネ定数と質量を各々加算することで求められる。

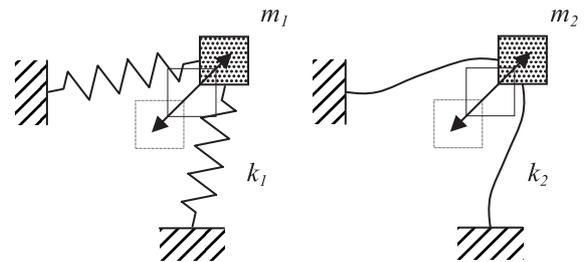


Fig.4 Kinetic models of same-phase mode

一端が固定され他端の角度が保持されたはりによる曲げの振動数は、両端固定のはりと一致する。断面二次モーメント： I とおくと、バネ定数と等価質量は、 $k_2 = 12EI/L^3$ 、 $m_2 = m/2.63$ と表される。従って、同位相モードの角振動数： ω_2 は式2で表される。

$$\text{式2} \quad \omega_2^2 = \frac{SE/L + 12EI/L^3}{M + m/3 + m/2.63}$$

4 単相駆動法の原理

固有モードの振動数が一致する場合には、単一の強制振動により生じる両モードの位相は等しくなるため、その軌跡は直線となる。これが、位相差駆動法に必要なモードが縮退して素子が独立して振動できる状態である。

一方、モードの縮退が解け、共振点が一致しない場合には、両モードの振幅、位相には差が生じる。固有モードの振動方向は互いに直交しているため、ここでもリサージュの関係が成立する。従って、両モードの振幅と位相差が適切に設定されれば、チップは楕円軌跡を描く。

単相駆動法をモデル化するため、固有モードをバネ、重り、ダッシュポットを備えた1自由度の粘性減衰振動系に置き換える (Fig. 5)。圧電素子の励振力はモードの対称軸方向に働く。

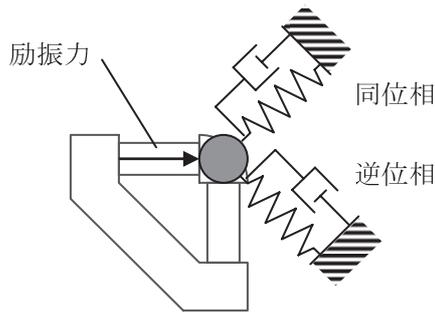


Fig.5 Kinetic models of natural vibrations

1自由度の振動系（バネ定数： k 、重りの質量： m 、粘性： η ）に正弦波の励振力： $f(t)=F_0 \cos \omega t$ を加えた時の変位： $x(t)$ は式4で表される。

式4 $x(t)=X \cos(\omega t-\phi)$
 ここで、振幅： $X=\frac{X_0}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega n}\right)^2\right]^2+\left[2\zeta\frac{\omega}{\omega n}\right]^2}}$
 位相遅れ： $\phi=\tan^{-1}\frac{2\zeta\frac{\omega}{\omega n}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega n}\right)^2}$

但し、角振動数： $\omega n=\sqrt{k/m}$ 、減衰比： $\zeta=\eta/2\sqrt{mk}$ 、静的変位： $X_0=F_0/k$ である。

圧電素子の発生力： $f(t)$ を固有モードの方向に分解すると、励振力は $F_0 \cos \omega t/\sqrt{2}$ となる。これらを式4に代入すると、各振動系の変位が求められる。

5 単相駆動の成立条件

固有モードは互いに直交しているので、両者の振幅が等しく位相差が90度になる条件でチップの軌跡は円形となる。静的変位と減衰比を等しいと仮定し、上式から ω を消去すると、この条件は式5で表される。

式5 $R_\omega=(\alpha\pm\sqrt{\alpha^2-1})$ 但し、 $\frac{1-2\zeta}{1-4\zeta^2}=\alpha$

ここで、 R_ω ：振動数の比率

また、このときの駆動周波数： f_3 は式6で表される。

式6 $f_3=\frac{\omega_3}{2\pi}$ 但し、 $\omega_3^2=\frac{2\omega_1^2\omega_2^2}{\omega_1^2+\omega_2^2}(1-2\zeta^2)$

このように、固有モードの振動数を一定の比率に設定することにより、円形の軌跡が得られる。式1、2に示す通り、この比率はチップ質量： M により調節できる。

6 実験結果

Fig.6に、試作したアクチュエータを示す。

圧電素子には厚み方向に分極した積層型のセラミック製素子を用いた。チップとベースはタンゲステンカーバイド製で、各部材の固定にはエポキシ系接着剤を用いた。また、チップの質量はその厚みを変化させることで調節した。



Fig.6 Appearance of microactuator

Fig.7に、チップ質量と固有振動数との関係を示す。モデル解析に示した通り、チップの質量により逆位相モードと同位相モードの振動数の比率を調節できている。

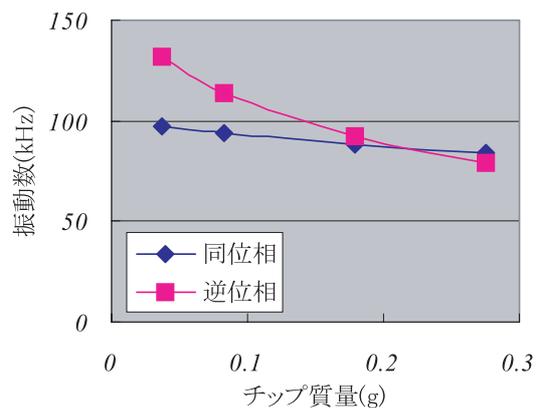


Fig.7 Effect of tip on natural frequencies

チップ質量を調節し、両モードの振動数の比率を同位相：逆位相=1：1.03と設定した。この状態で双方の素子に周波数と振幅が等しい同位相、逆位相の駆動信号を与え、各モードの振幅と位相を測定した。

Fig.8に、結果を示す。90 kHz付近において振幅が拡大すると共に、位相差も拡大し90度に達している。

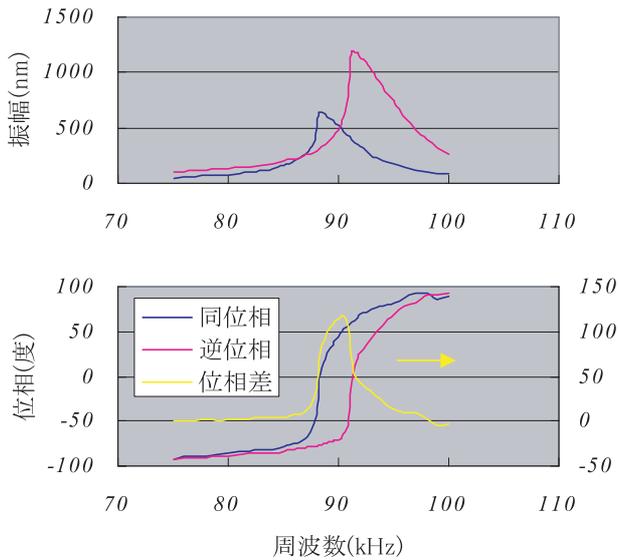


Fig.8 Amplitude and phase of natural vibrations

以上の条件において、一方の素子に駆動信号を与え軌跡を観察した。レーザ振動計を用いて測定したチップ先端の軌跡をFig. 9に示す。軌跡は中心軸にほぼ対称な楕円形を描いている。

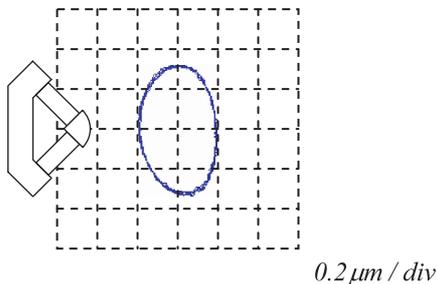


Fig.9 Measured orbit of tip

最後に、直径：30mmの鉄製ロータにアクチュエータを加圧力：1.5Nで接触させ、出力特性を測定した。なお、加圧により固有振動数の関係が変化するため、チップの質量は再調節している。

Fig.10に、電圧：7Vで駆動したときの結果を示す。起動力で0.3~0.4N、無負荷速度で200mm/s程度の出力が得られている。

比較のため双方の圧電素子に同じ電圧：7Vで90度の位相差を有する二系統の駆動信号を与えたときの出力結果を示す（位相差駆動法）。

一系統の駆動信号を与える単相駆動法において、位相差駆動法の50%以上の出力速度が得られている。また、効率の点でも位相差駆動法と同等以上の数値が得られることを確認している。

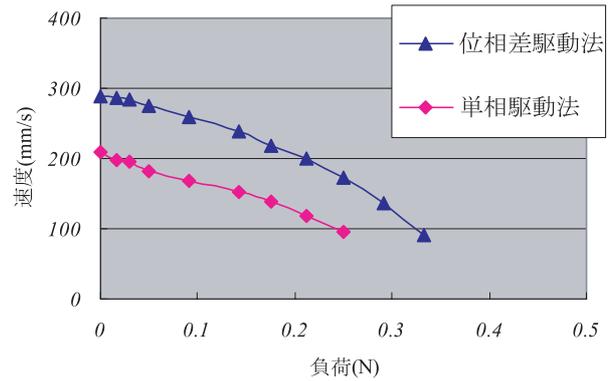


Fig.10 Measured output

7 結論

- ・力学モデルにより単相駆動法の原理と成立条件を明らかにした
- ・試作品により力学モデルを検証し、軌跡と出力特性を測定した
- ・単相駆動法により、駆動電圧の低減、効率の向上、及び駆動回路の簡略化の実現に目処をつけた

●参考文献

- 1) 遠藤晃、佐々木信俊、富川義朗、“縦効果圧電素子を2次元配置した超音波モータ”、1985年度電気学会講演予稿集
- 2) 芥田友彦、杉本康宏、深沢良雄、“積層型圧電素子を用いたリニアアクチュエータの開発”、1991年度精密工学会春講演論文集
- 3) 森健次、“高トルク圧電モータの研究”、1986年日本機械学会論文集
- 4) 小木曾敏夫、森健次、岡田祐子、“斜交型圧電モータステータの動力学モデル”、日本ロボット学会誌 Vol10, No3, 1991
- 5) M.K.Kurosawa, O.Kodaira, Y.Tsuchitoi, T.Higuchi, "Transducer for high speed and large Thrust ultrasonic linear motor using two sandwich-type vibrators", 1998 IEEE transactions on UFFC vol.45