

単相駆動型振動子を複数用いた多自由度超音波モータ

A Multi-Degree-of-Freedom Ultrasonic Motor Using Plural Single-Phase-Drive-Type Vibrators

○学 音川佳代 (慶大院) 正 竹村研治郎 (東工大)
正 前野隆司 (慶大)

Kayo OTOKAWA, Graduate School of Keio University, y12456@educ.cc.keio.ac.jp
Kenjiro TAKEMURA, Tokyo Institute of Technology
Takashi MAENO, Keio University

This paper presents a novel type of a multi-degree-of-freedom ultrasonic motor using plural single-phase-drive-type ultrasonic vibrators. A single-phase-drive-type ultrasonic motor is known as easy to miniaturize. On the other hand, it is also known as hard to reverse the vibration direction. Therefore, we proposed to use plural single-phase-drive-type vibrators each one has four patterns of vibration directions. By combing these directions of each vibrator, we can obtain multiple movements of a movable object. At first, we proposed the principles of this motor. Next, we selected vibration modes and designed the size of a vibrator as $10 \times 7.5 \times 0.9 \text{ mm}^3$ using a finite element analysis. Finally, we measured frequency, vibration, and driving characteristics of the vibrators. The maximum thrust was about 3.14 N and the maximum torque was about 6 mN -m.

Key Words: Ultrasonic motor, Multi-degree-of-freedom, Piezoelectric actuator

1. 背景と目的

近年、産業機器における部品の小型化が急速に進んでいる。また、生産・ロボット・医療等の様々な分野において多自由度を有するアクチュエータの需要が高まっている⁽¹⁾。このような背景の中、小型で微小送りが可能であることから、超音波モータを用いたリニアモータや X-Y ステージが数多く開発されてきた。しかし、従来の X-Y ステージでは X・Y 軸方向の案内機構を必要とするため、以下のような問題を抱えている。

- ・機構の小型化・軽量化に限界がある
- ・移動子の運動が X・Y 軸方向の 2 自由度に限られる

このため、Ferreira らは単相駆動型超音波振動子を用いた搬送機構を開発した⁽²⁾。しかし、各振動子を一括に制御しているため、搬送方向は 2 自由度に限られる上、推力が小さい。ここで本研究では、単相駆動型超音波振動子を独立に制御することによって、移動子の多様な運動が可能なる多自由度超音波モータの実現を目的とする。本稿では、まず、本モータの駆動原理を提案する。次に、振動子の高出力化を目指した設計を行う。さらに、設計した振動子を製作し、その基本特性を評価する。

2. 駆動原理の提案

超音波モータは、超音波振動を駆動源とするアクチュエータであり、その駆動方式から主に単相駆動型と 2 相駆動型に大別される。単相駆動型超音波モータの駆動原理を図 1 に示す。圧電素子に 1 相の交流電圧を印加すると、突起の先端が図 1 のように直線的に往復振動し、移動子を右側に駆動する。この単相駆動型は、2 相駆動型のように 2 つの周波数を完全に一致させる必要がないため、製作および小型化が容易である。しかし、振動子単体では移動子を正転逆転させることが困難である。このため、本研究ではこの単相駆動型振動子を複数用い、その合力によって移動子の多自由度運動を実現する多自由度アクチュエータを提案する。本モータの概念図を図 2 に示す。振動子に 4 つの固有振動モードを選択的に励振することによって、各突起を 4 つの方向に振動させることができる。このため、周波数を切り替えることによって、移動

子を所望の方向に移動させることができる。さらに、各振動子を独立に制御し、励振のパターンを組み合わせることによって、移動子に多様な運動を与えることが可能になると考えられる。

3. 振動子の設計

図 3 に使用する固有振動モードを示す。それぞれモード(2, 0), (0, 3), (3, 0), (0, 4)と呼ぶ。図 3 の色の濃淡は紙面垂直方向の変位を意味する。選定された 4 つの固有振動モードは、突起が 4 つの振動パターンを有し、かつアドミッタンスが大きくなるようなモードである。また、選定した固有振動モードのアドミッタンスが大きくなるように振動子の大きさを決定した。

続いて、圧電素子とステンレスの厚さを決定した。まず、固有振動数が 190 kHz 以下であり、中立面が圧電素子の側にあることを条件として厚さの組み合わせを絞り込んだ。

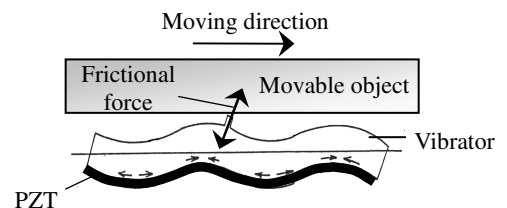


Fig. 1 Principles of a single-phase-drive-type vibrator

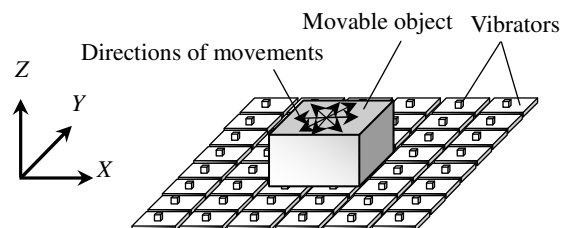


Fig. 2 Schematic diagram of an actuator

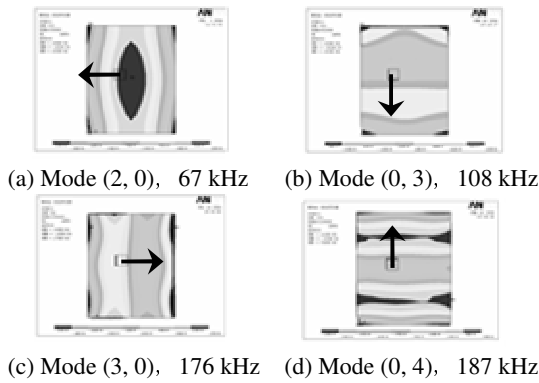


Fig. 3 Patterns of vibration modes (Top view)

Table 1 Thickness combination of PZT and stainless-steel

t_{PZT} [mm]	t_{SUS} [mm]
0.3	0.3, 0.4, 0.5, 0.6
0.4	0.4, 0.5
0.5	0.4

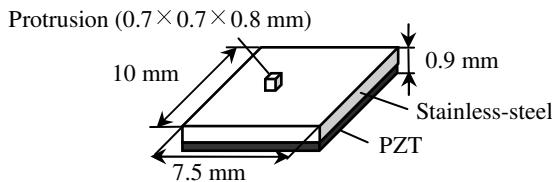


Fig. 4 Measurements of the vibrator

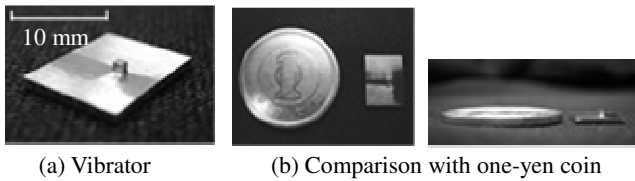


Fig. 5 Manufactured motor

これを表 1 に示す. 次に, この中から力係数が最も大きくなる組み合わせを選定した. 力係数は, 圧電素子に蓄えられる電荷と振動子の振幅の比である. 有限要素解析の結果, 圧電素子の厚さが一定の場合にはステンレスが厚いほど, また, 振動子の厚さが一定の場合には圧電素子が薄いほど力係数が大きくなることがわかった. このため, 圧電素子の厚さは 0.3 mm, ステンレスの厚さは 0.6 mm とした. 以上より決定した振動子の寸法を図 4 に, 実際に製作した振動子を図 5 に示す.

4. 振動子の周波数特性および振動特性の測定

次に, 製作した振動子の周波数特性および振動特性を測定した. まず, インピーダンス・フェーズ・アナライザを用い, 製作した振動子に 1 V_{pp} 印加した際の, 固有振動数およびアドミッタンスを測定した. その結果, 固有振動数は有限要素法による解析結果とほぼ一致した. また, アドミッタンスは 13.0~36.5 mS という比較的大きな値が得られた. このことから, アドミッタンスが大きい固有振動モードを選定するという設計の方針が満たされたといえる. 続いて, レーザ・ドップラ速度計を用い, すべての固有振動モードの場合において, 突起が所望の方向に振動していることを確認した.

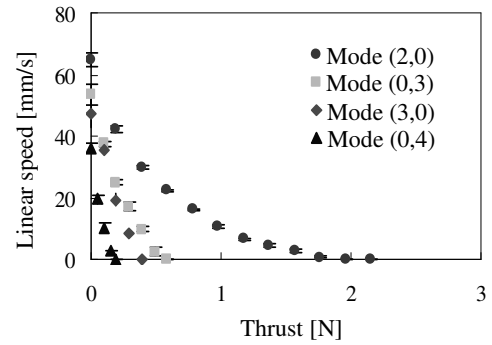


Fig. 6 Linear speed-thrust characteristics

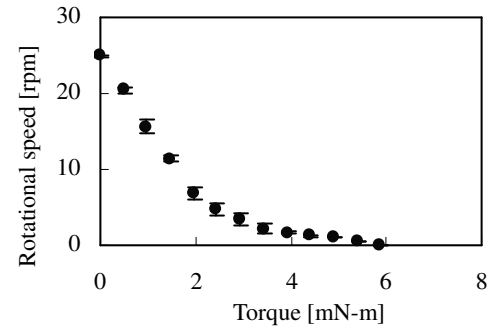


Fig. 7 Rotational speed-torque characteristics

5. 駆動特性の測定

最後に, 振動子の駆動特性を測定した. まず, 各固有振動モード励振時の速度-推力特性を測定した. その結果を図 6 に示す. この時の印加電圧は 100 V_{pp}, 予加圧は 10 N である. 図 6 より, 固有振動モードの次数が低いものほど推力が大きくなる. これは, モードの次数が低いほど振動振幅が大きくなることに依存すると考えられる. また, いずれの固有振動モードにおいても, 印加電圧を大きくすると推力は増大した. 例えば, モード(2, 0)を電圧 150 V_{pp} で励振した場合, 推力 3.14 N を得た. このように, 本振動子は小型かつ高出力を実現できることを確認した. 次に, 振動子 4 つを平面に配置し, 移動子を回転させた際の駆動特性を測定した. この結果を図 7 に示す. なお, 測定時にはモード(2, 0)およびモード(3, 0)を使用した. 印加電圧はそれぞれ 100 V_{pp}, 130 V_{pp}, 予加圧は 10 N である. 図 7 より, 起動トルクが約 6 mN-m だったことがわかる. ただし, 各振動子の振幅に差があることや, 駆動中に振幅が一定でないことなどにより, 測定中に回転中心がずれていたことが考えられる. したがって, センサ相を設け, 振幅が一定になるように制御すれば, より大きなトルクが得られると考えられる.

6. 結論

複数の単相駆動型振動子を用いた多自由度超音波モータの駆動原理を提案した. また, 各振動子が直交する 4 方向へ移動子を駆動できることを確認し, その駆動特性を測定した.

7. 参考文献

- (1) 日本工業技術振興協会固体アクチュエータ研究部会編: 精密制御用ニューアクチュエータ便覧, フジテクノシステム, pp.987, 1994
- (2) Antoine Ferreira, Patrice Minotti: Control of a multi degree of freedom standing wave ultrasonic motor driven precise positioning system, Review of Scientific Instruments, 68(4)pp.1779-1786, 1997