超音波モータの自己保持力に着目した
PWM 方式による駆動特性*西堀賢司^{*1}, 近藤節哉^{*2}, 大嶋和彦^{*1}

PWM Driving Characteristics with Its Self-Locking of Ultrasonic Motor

Kenji NISHIBORI^{*3}, Setsuya KONDO and Kazuhiko OSHIMA^{*3} Department of Computer Mechanical System Engineering, Daido Institute of Technology,
10-3 Takiharu-cho, Minami-ku, Nagoya-shi, Aichi, 457-8530 Japan

A traveling wave-type ultrasonic motor (USM) has a self-locking characteristic due to a static frictional force present when its power supply is turned off, because its rotor is pressed strongly to the stator in the USM. We propose a pulse width modulation (PWM) method in consideration of this self-locking characteristic in order to control the motion of USM. The vibration waveform and the driving characteristics of USM were examined experimentally at different switching frequencies under PWM. When the period of PWM switching pulse is longer than the time constant of the piezoelectric element in USM, the rest duration appears in the vibration waveform of USM. It was confirmed that the rotor speed of USM was approximately proportional to the duty ratio of the applied voltage under the condition of the low switching frequency of PWM, and the large torque was obtained even when the duty ratio was small.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Actuator, Ultrasonic Motor, Self-Locking, Pulse Width Modulation, Piezoelectric Element

1. ま え が き

超音波モータは圧電素子による超音波振動を利用した摩擦駆動形のモータであり、従来の電磁式モータに比べ巻線が不要で構造が簡単、小形・軽量、ダイレクトドライブが可能、高応答性などの特徴を持つ⁽¹⁾。これらはランジュバン振動子を駆動源として超音波振動でロータ面を少しずつ送り出す定在波方式^{(1)~(3)}と圧電素子を金属の弾性体に貼り付けたステータとロータを対面接触させ弾性体に発生する進行波にて駆動力を得る進行波方式⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾に分類される。進行波形超音波モータはステータとロータが強く密着しているため、静止時において静止摩擦力による自己保持力を持ち、その駆動方式として励振周波数制御方式⁽⁶⁾、位相制御方式⁽⁷⁾⁽⁸⁾などが報告されている。

著者らはさきに、進行波形超音波モータの波動の進む方向を反転させると回転方向が変わることに着目し、正転と逆転を交互に繰返し行い、その時間割合を変化させることにより速度を制御する正逆転パルス幅

変調(PWM: pulse width modulation)方式を提案し、モータの駆動特性に関する実験からほぼ線形な速度制御が可能であることを明らかにした⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。その後、則次ら⁽¹¹⁾は著者らが提案した正逆転 PWM 方式による駆動がアナログ駆動と比較して位置決め精度の向上をもたらすことを明らかにしている。また、進行波形超音波モータの自己保持特性に着目した駆動方式として、正逆転 PWM 方式に OFF 時間を導入しロータとステータとの間に生じる摩擦力を能動的に制御する 2 パラメータ PWM 方式が金子ら⁽¹²⁾によって報告されているが、いまだ、自己保持特性の制御に関して十分に解明されていない。

そこで本研究では第一段階として進行波形超音波モータの休止時における自己保持力に着目し、その自己保持力を駆動に反映させる駆動方法として駆動電圧を印加させる時間割合、すなわち駆動力と保持力の時間割合を変化させる ON-OFF 形 PWM 方式を用い、異なる PWM スイッチング周波数における進行波形超音波モータの振動特性と駆動特性に関する実験から、その有効性について明らかにした。

2. 動作原理と駆動方法

2・1 超音波モータの動作原理 図1に進行波形

* 原稿受付 2003 年 9 月 18 日。

^{*1} 正員、大同工業大学工学部(〒457-8530 名古屋市南区滝春町 10-3)。^{*2} 正員、大同工業大学大学院工学研究科。

E-mail: nishibo@daido-it.ac.jp

超音波モータの動作原理を示す。超音波モータは弾性体の表面に進行波を励振させることによりだ円軌道を描く振動を起こし、移動体であるロータと加圧接触させることにより、その間に生じる摩擦力により駆動力を得る。このとき、ロータは進行波の進む向きと逆向きに力を受けて回転する。また、ロータとステータが加圧接触しているため、停止時に静止摩擦力による保持力、すなわちブレーキ機能を持つ。

図2に進行波形超音波モータのステータの構造と圧電体の分極配置を示す。ステータの下面に接着された圧電体は2種類の電極 A, B を持ち、固有振動数の半波長 $\lambda/2$ の間隔で分極処理されている。ここで電極 A, B は位置的に $\lambda/4$ ずれて弾性体の円周方向に配置されている。電極 A に弾性体の固有振動数に等しい角周波数 ω の高周波電圧 $E_a = E_0 \sin \omega t$ を印加すると、図2の弾性体表面に実線で示す定在波が生じる。

Fig. 1 Principle of traveling wave-type ultrasonic motor

Fig. 2 Structure of stator and generation of traveling wave

Fig. 3 Driving signal of ON-OFF type PWM

同様に、電極 B に電極 A に対して時間的位相が $\pi/2$ 進んだ電圧 $E_b = E_0 \cos \omega t$ を印加すると、破線で示す定在波が生じる。このとき、互いに空間的および時間的位相が $\pi/2$ ずれた2種類の定在波が弾性体中にて合成されることにより進行波を得る⁽⁹⁾。

2.2 PWM 駆動 図3に進行波形超音波モータの PWM による駆動方式を示す。超音波モータの電極 A, B に印加する位相の異なる高周波電圧 $E_a = E_0 \sin \omega t$, $E_b = E_0 \cos \omega t$ を PWM スwitchングパルスにて同時に ON, OFF の切換えを行い、進行波による駆動と休止状態の時間割合を変化させる PWM 方式について検討する。ここで、PWM スwitchングパルスの周期 $T_s (=1/f_s)$ に対して電圧を印加する時間を T_{s1} とし、デューティ比 α を $\alpha = T_{s1}/T_s$ と定義する。

3. 実験装置および方法

図4に進行波形超音波モータの駆動ブロック図を示す。超音波モータの速度およびトルクを制御するため電極 A, B に印加する高周波電圧を PWM スwitchングパルスによりアナログスイッチにて同時に印加の有無 (ON, OFF) の切換えを行う。なお、超音波モータの正転、反転は PWM スwitchング回路の前において、位相を π ずらした高周波電圧 $E_a = -E_0 \sin \omega t$ を CW/CCW 信号によりアナログスイッチにて切換えて行った。

図5に本研究で用いた実験装置を示す。超音波モータの回転軸にはアームとスリット板が取り付けられてい

Fig. 4 Schematic diagram of ON-OFF type PWM drive for ultrasonic motor

Fig. 5 Schematic outline of experimental apparatus

る。発生トルクはアームに取付けられたひずみゲージの出力電圧を A/D コンバータを介して測定し、回転速度はスリット板の外周にホトセンサを用いて測定した。また、超音波モータに配置されているフィードバック相の出力電圧を測定し、ステータにおける進行波の振動状態を調べた。さらに、超音波モータのトルク-回転数特性を調べるため、回転軸に重りによる負荷トルクを与えて回転速度を測定した。

実験は、表 1 におもな仕様を示す新生工業製の超音波モータ USR-45 を共振周波数 $f_s=43$ kHz、駆動電圧 280 V_{p-p} で動作させた。PWM のスイッチング周

Table 1 Specification of ultrasonic motor USR-45

Rated torque	12 N · cm
Rated speed	130 rpm
Rated output	1.5 W
Self-locking torque	>12 N · cm
Contact force of rotor	60 N

Fig. 6 Changes in vibration waveform of ultrasonic motor for duty ratio α

波数 $f_s (=1/T_s)$ は $f_s=200$ Hz, 1 kHz, 10 kHz の 3 種類に設定して行った。

4. 実験結果および考察

4・1 振動特性 図 6(a)～(c) はスイッチング周波数 $f_s=200$ Hz, 1 kHz, 10 kHz においてそれぞれデューティ比を変えた場合の超音波モータのフィードバック相による振動状態の変化を示す。図 6(a) に示すスイッチング周波数 $f_s=200$ Hz の場合、デューティ比 $\alpha \leq 0.5$ でわかるように PWM スwitching パルスの状態が ON から OFF に変わると振動はすみやかに減衰し、OFF 時に対応する振動の休止時間が明確に存在する。これは、PWM のスイッチング周期 T_s が超音波モータを構成する圧電体の時定数 T_u に比べて大きい ($T_s > T_u$) ことを示し、駆動力が得られない OFF 時において静止摩擦力による保持力が作用することが考えられる。ただし、スイッチング周波数 $f_s=200$ Hz による超音波モータ出力軸のジッタは目視では全く現れない。

図 6(b) に示すようにスイッチング周波数を高めて $f_s=1$ kHz とした場合、振動波形は PWM スwitching パルスの ON, OFF に対して遅れが見られる。このため、デューティ比 $\alpha=0.5, 0.75$ では振動の休止状態は存在しなくなることから、デューティ比 α の増加に伴い保持力は発生しないことが予想される。図 6(c) に示すようにさらにスイッチング周波数が高い $f_s=10$ kHz では、進行波が OFF 状態においても振動が減衰せず、スイッチング周期内の振動振幅はほぼ一定となる。さらにその振幅はデューティ比 α の増加とともに大きくなることがわかる。これはスイッチング周期 T_s が短く、超音波モータの時定数 T_u に対して $T_s < T_u$ であることを示し、いずれのデューティ比

Fig. 7 Relationship between duty ratio α and rotor speed n at different switching frequency f_s

α においても振動の休止状態が存在しないことがわかる。

4・2 回転速度特性 図7に3種類のスイッチング周波数 f_s におけるデューティ比 α と回転速度 n の関係を示す。ここで、回転速度 n はデューティ比 $\alpha=1.0$ における最大回転数 n_0 で無次元化してある。こ

(a) $f_s=200$ Hz

(b) $f_s=1$ kHz

(c) $f_s=10$ kHz

Fig. 8 Hysteresis in characteristic curves of rotor speed n vs. duty ratio α at different switching frequency f_s

の無次元化はモータの振動系の特性変化による影響を抑える効果もある。スイッチング周波数 $f_s=200$ Hz の場合、デューティ比 α の増加に伴い回転速度 n はほぼ直線的に増加している。これは図6(a)で示したデューティ比 α と振動状態の関係から、駆動と静止状態が明確に繰返されているためと考えられる。高いスイッチング周波数 $f_s \geq 1$ kHz の場合、回転速度 n はデューティ比 $\alpha=0.5$ 付近から急激に増加し、 $f_s=200$ Hz の場合の値よりも大きくなるのがわかる。これは図6(b)で示した $\alpha=0.5, 0.75$ における振動状態から推測されるように、デューティ比 α の増加に伴い静止状態が消滅し、保持力によるブレーキが消失するためと考えられる。さらに高いスイッチング周波数 $f_s=10$ kHz の場合、デューティ比 $\alpha < 0.3$ ではほとんど回転しないオフセットが生じ、 $\alpha=0.6$ 付近から急激に回転速度 n が増加している。これは図6(c)から明らかなように、低いデューティ比 $\alpha=0.25$ ではステータの振動振幅が極めて小さくなっており、ロータを回転させる駆動力が得られないためと考えられる。

図8(a)~(c)は3種類のスイッチング周波数 f_s においてデューティ比 α を増減させたときの回転速度 n の変化を示す。図8(a)に示す低いスイッチング周波数 $f_s=200$ Hz の場合、デューティ比 α に対する回転速度 n の関係はほぼ線形でヒステリシスも小さい。一方、図8(b), (c)に示すスイッチング周波数 $f_s=1$ kHz, 10 kHz の場合、デューティ比 α に対する回転速度 n の変化には大きなヒステリシスが生じていることがわかる。これは、図6(a)~(c)に示した振動波形から、低いスイッチング周波数では、いずれのデューティ比 α においても ON 時には大きな振動振幅で駆動され、OFF 時には静止状態が明確になるため、デューティ比 α の増減に対する回転速度 n の

Fig. 9 Relationship between duty ratio α and output torque T at different switching frequency f_s

ヒステリシスは小さくなることが考えられる。これに対し、比較的高いスイッチング周波数では OFF 時における明確な静止状態がなくなり、一周期にわたって振動振幅が小さくなることから超音波モータ特有の摩擦力の影響で回転速度のヒステリシスが大きくなることが考えられる。

以上の結果から、低いスイッチング周波数で進行波形超音波モータを駆動すると、デューティ比 α に対して回転速度は線形に近くなり、ヒステリシスも低く抑えられることが明らかになった。

4.3 トルク特性 図 9 は 3 種類のスイッチング周波数 f_s においてデューティ比 α を零から増加させたときの発生トルク T の変化を示す。スイッチング周波数が低い $f_s=200$ Hz の場合、デューティ比 α を $\alpha=0$ から増すとトルク T は急激に増加し、 $\alpha>0.5$ でほぼ最大トルク T_0 に達する。低いデューティ比 α において高トルクが得られることは、図 6(a) で示した超音波モータの振動状態から説明できる。すなわ

ち、デューティ比 α が低い場合においてもスイッチングパルスの ON 状態ではほぼ最大の振動振幅が得られており、この瞬間の駆動力によるトルクが振動の休止時における超音波モータ特有の摩擦力による保持力で Lock されるためと考えられる。これは、綱引きに例えると、引張っては止まり、引張っては止まる動作と考えられる。これに対し、高いスイッチング周波数 $f_s=10$ kHz では、低いデューティ比 $\alpha<0.3$ でトルク T は零のままでオフセットが生じ、 $\alpha=0.3$ 付近からほぼ直線的に増加することがわかる。これは、図 6(c) から明らかなように超音波モータの振動波形には休止状態が見られず、デューティ比 α の増加とともに振動振幅が増すことにより、トルク T も増加することが考えられる。しかし、 $\alpha<0.3$ の振動量ではモータの駆動力が摩擦力に打ち勝てず、トルクは得られないと考えられる。スイッチング周波数 $f_s=1$ kHz の場合、 $f_s=200$ Hz と $f_s=10$ kHz の中間の特性を示す。すなわち、トルク T はデューティ比 $\alpha=0.3$ 付近まで急激に増加するが、 $0.3<\alpha<0.7$ の範囲における増加割合は小さくなる。これは、図 6(b) から明らかなようにデューティ比 $\alpha=0.3$ 付近から振動の休止時間が減少して保持力が消失することにより振動振幅が増加し、 $\alpha=0.7$ 付近でほぼ最大になるためと考えられる。

図 10(a), (b) はスイッチング周波数 $f_s=200$ Hz, 10 kHz においてデューティ比 α を増減させたときのモータの出力トルク T のヒステリシスを示す。図 10(a) に示すスイッチング周波数が低い $f_s=200$ Hz の場合、デューティ比 α を $\alpha=1.0$ から減少させて $\alpha=0$ としたときのトルクは零にならず、最大トルクの約 80% の値(約 20 N・cm)を保持している。これは、図 6(a) の $\alpha=0.25$ における振動波形で休止の状態が明確に現れていることから超音波モータに特有な静止摩擦力による自己保持力と考えられる。図 10(b) に示すスイッチング周波数が高い $f_s=10$ kHz の場合、デューティ比を $\alpha=1.0$ から減少させると $0\leq\alpha\leq0.5$ の範囲でほぼ一定なトルクとなり、 $\alpha=0$ では最大トルクの約 20% の値を保持する。 $f_s=200$ Hz と比較して $\alpha=0$ に戻ったときのトルク値が低いのは、図 6(c) の振動波形からわかるように休止状態がなくなり、静止摩擦力による保持力が弱くなるためと考えられる。

図 11(a)~(c) は 3 種類のスイッチング周波数 f_s におけるトルク T と回転速度 n の関係を異なるデューティ比 α に対して示したものである。スイッチング周波数 $f_s=200$ Hz の場合 [図 11(a)], いずれのデ

Fig. 10 Hysteresis in characteristic curves of output torque T vs. duty ratio α at different switching frequency f_s

(a) $f_s = 200$ Hz (b) $f_s = 1$ kHz (c) $f_s = 10$ kHzFig. 11 Changes in torque characteristic of ultrasonic motor at different switching frequency f_s

ューティ比 α においてもトルク-回転数の特性曲線はトルク T の増加に伴って回転数 n はほぼ直線的に減少する垂下特性を示し、低速において高トルクが得られる。これは図 6(a) から明らかなように、いずれのデューティ比 α においても ON 時にほぼ最大の振動振幅が得られており、ON 時における大きな駆動力とその直後の OFF 時の保持力によってステータとロー

タとの間に滑りが生じないためと考えられる。図 8(a) で見たようにデューティ比に対してほぼ線形な回転数特性と併せて、低速で高トルクの特性はロボット用アクチュエータとして高精度な位置決めに有利と考えられる。

スイッチング周波数 $f_s = 1$ kHz の場合 [図 11 (b)], デューティ比 $\alpha \geq 0.8$ ではその特性曲線は垂下特性を示すものの $\alpha = 0.6$ では負荷トルク $T = 10$ N·cm 付近にて急激に回転数 n が低下する。これは図 6(b) からわかるように、デューティ比 $\alpha \geq 0.75$ ではほぼ最大の振動振幅が得られているのに対し、 $\alpha = 0.5$ では振動振幅が時間的に変化する紡錘形を示すためその振動振幅の最小振幅の領域にてステータとロータとの間で滑りが発生するためと考えられる。スイッチング周波数 $f_s = 10$ kHz [図 11 (c)] では、デューティ比 $\alpha \leq 0.6$ にて負荷トルク T を増すと急激に回転数 n が低下する。これも同様に駆動力のみの駆動で保持力がないためステータとロータとの間で滑りが発生するためと考えられる。

5. 結 論

進行波形超音波モータの駆動方法として休止時に生じる自己保持特性に着目し、交流駆動電圧を印加する時間割合を変化させる ON-OFF 形 PWM 方式において、実験的に以下のことを明らかにした。

(1) PWM のスイッチング周波数を超音波モータがジッタを生じない程度に低くすると、スイッチングパルス一周期に駆動と休止の振動状態が生じ、モータの回転速度はデューティ比に対してほぼ線形でヒステリシスの少ない特性が得られる。

(2) 低いスイッチング周期数では、低いデューティ比においても休止状態における自己保持力により高トルクが得られ、デューティ比 $\alpha > 0.5$ ではほぼ一定で最大トルクとなる。

(3) 低いスイッチング周期数におけるトルク-回転数の特性曲線は垂下特性を示し、低いデューティ比においても低速・高トルクの特性が保持される。

(4) ON-OFF 形 PWM 方式による超音波モータの駆動特性は、フィードバック相の出力電圧から推測される振動状態によってよく説明できる。

以上のように低いスイッチング周期数でデューティ比に対してほぼ線形な回転数特性が得られること、低速で高トルクの特性はロボット用アクチュエータとして高精度な位置決めに有利と考えられる。また、超音波モータは基本的に摩擦駆動のモータであり、本研究の定性的な特性については一般性があると考えられ

る。次報では、デューティ比 $\alpha=0$ に戻したときの自己保持力を低減する方式について報告する予定である。

文 献

- (1) 見城尚志・指田年生, 超音波モータ入門, (1991), 1-15, 総合電子出版.
- (2) 西堀賢司・大熊繁・小幡洋久, 超音波モータを指にもつロボットハンドの駆動特性, 機論, **60**-575, C (1994), 2358-2363.
- (3) 西堀賢司・小幡洋久・近藤節哉・大熊繁, 超音波モータを指にもつロボットハンドの駆動特性(第2報, PWMによる駆動特性), 機論, **64**-623, C (1998), 2557-2562.
- (4) 内野研二・熊田明生(秋山勇治監修), 超音波モータ/アクチュエータ, (1986), 47-91, トリケップス.
- (5) 内野研二, 圧電/電歪アクチュエータ, (1986), 180-183, 森北出版.
- (6) 谷腰欣司, 超音波とその使い方, (1994), 153-161, 日刊工業新聞社.
- (7) 加藤厚生・伊藤宏司・伊藤正美, 位相差制御による超音波モータのコンプライアント動作, 計測自動制御学会論文集, **27**-11 (1991), 1290-1295.
- (8) 永井正夫・片桐正大・藤森大介, 超音波モータのコンプライアンス制御, 第5回電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集, (1993-6), 399-403.
- (9) 西堀賢司・大熊繁・江龍康雄・杉本利孝, ロボット用超音波モータの正逆転パルス幅変調による速度制御, 機論, **57**-538, C (1991), 1956-1960.
- (10) 西堀賢司・大熊繁・江龍康雄・酒井哲, 超音波モータを用いたロボットマニピュレータの PWM とファジィ推論による位置決め制御, 機論, **60**-574, C (1994), 2052-2056.
- (11) 則次俊郎・加門嘉樹・押目雄一, 進行波形超音波モータを用いた小形マニピュレータの制御性能, 機論, **61**-581, C (1995), 124-130.
- (12) 金子真・西原敏晴・辻敏夫, 2パラメータ PWM 制御による超音波モータの機能拡大, 計測自動制御学会論文集, **31**-8 (1995), 1152-1159.