複合振動子型超音波モータの回転速度制御

正員 中村 健太郎 (東京工大)
 正員 黒澤 実 (東京工大 現 東京大)
 非会員 上羽 貞行 (東京工大)

Speed Control of a Hybrid Transducer-type Ultrasonic Motor

Kentaro Nakamura, Member, Minoru Kurosawa[†], Member, and Sadayuki Ueha, Non-member
 (Tokyo Institute of Technology, [†]Currently, The University of Tokyo)

A hybrid transducer-type ultrasonic motor serves a high controllability, since the driving force can be controlled independently of the friction controlling component. The torsional vibration velocity has a direct effect on the speed, while the longitudinal vibration controls the traction transmission through friction. We can change the speed smoothly, if we vary the torsional vibration velocity, with the longitudinal vibration being maintained at the optimum value.

This paper presents an experimental study of a speed control system for a hybrid transducer-type ultrasonic motor. First, we utilize an optical rotary encoder to measure the speed of the rotor, and it is feedbacked to the excitation magnitude of the torsional vibration. Stability and transient responses of the speed are improved. Second, we point out that the speed has a linear relation to the current of the torsional port. Then, by monitoring the current, a feedback system can be built without any auxiliary encoders.

キーワード：超音波モータ，複合振動子，回転速度制御，ロータリエンコーダ，定電流制御

1. まえがき

超音波モータは，圧電素子で励振した弾性振動から摩擦力を介してロータの回転運動を得るモータであり，低速・高トルク，低イナーシャ，自己保持機能などの特徴により，制御用アクチュエータとして注目されている。超音波モータには，1)駆動力源となる円周方向の振動と，2)この振動をロータ回転に変換するために，ロータ・ステータ間の摩擦力を同期的に制御する軸方向の振動，の2つの振動成分が必要である。これまでに報告例の多い進行波型¹⁾ではこれら2成分が結合しているのに対して，著者らが提案している複合振動子型 (HTUSM)²⁾では，独立に制御可能な2つの振動成分を利用しているので，さらに高い制御性が期待される。すなわち，ねじり振動をロータの駆動力源とし，これと独立な縦振動で摩擦力を制御するのが，HTUSMの基本概念であり，最適な摩擦力制御を保ったままで，駆動力成分のみを変化できるので，不感帯も比較的小さく，回転速度と印加電圧の関係も滑らかで，円滑な回転制御が可能である。

このモータを用いた角度精度1秒の精密位置決め系についてはすでに報告したが³⁾，回転速度の制御も併用すれば，その精度をさらに向上できることが分かっている。そこで，

本論文ではロータ回転速度のフィードバック制御について検討を行った。まずは，光学式ロータリエンコーダを用いて回転速度を検出し，駆動力源であるねじり振動の強さを变化させる方法を試み，回転速度の変動や，過渡応答特性の改善に効果があることを確かめた。次いで，ねじり振動系の電気端子の電流とロータ回転速度が線形関係にあることに注目して，外部検出器を用いずに回転速度の安定化を行う方法を提案した。

2. HTUSMの構造・動作原理

複合振動子型超音波モータ (HTUSM) の基本構造を図1に示す。縦振動を励振する圧電素子とねじり振動を励振する圧電素子がステータに組み込まれており，これらは個別の電気端子を有している。ロータはこのステータにコイルばねによって押し付けられている。縦振動によりロータとステータ間の垂直抗力が周期的に変化し，摩擦力により伝達可能なトルクの値が周期変化する。この変化量が十分であれば，同じ周期で励振されたねじり振動の半周期分のみがロータに駆動力として作用し，ロータの回転が得られる。縦振動とねじり振動の位相差を反転すると，回転方向も反転する。このように，縦振動で摩擦力を制御し，ねじり振動がロータ駆動力となっており，モータ出力に直接

寄与するねじり振動は共振周波数で駆動する。縦振動は共振駆動する必然性は必ずしも無いが、強力な摩擦力制御のために共振周波数を近付ける工夫をすることが多い⁴⁹⁾。

ねじり振動励振用素子電圧、縦振動励振用素子電圧、それらの位相差、駆動周波数など、いずれもロータ回転速度を変化させるが⁹⁾、本モータの回転速度を円滑に制御するためには、摩擦力制御を最適な状態に保ちつつ、ねじり振動速度のみを変化させるのが最も適した方法である。すなわち、縦素子電圧、位相差は固定とし、ねじり振動の駆動力を操作する。駆動周波数をずらす方法は、位相差や縦振動にも影響を与える上、効率を低下させるので好ましくない。したがって、ここでは、ねじり素子の電気端子の電圧や電流のみを制御することとする。

なお、本論文では、縦素子として積層型圧電素子を採用した直径20mmのHTUSM[®]を利用している。

3. ロータリエンコーダを用いる制御

本節では、ねじり素子電圧を調節することで回転速度制御が行えることを示すために、ロータリエンコーダでロータ回転速度を検出し、それを一定に保つようにねじり素子電圧 V_T を変化させるフィードバック制御を試みる。このときの制御系は図2のようにかける。制御直流電圧 V_c でねじり素子に印加する高周波交番電圧の振幅 V_T を変化させるために、制御電圧 V_c に比例して出力電圧振幅 V_T が変化する増幅器であるVCA (Voltage Controlled Amplifier) を利用した。 V_T (Vrms)と V_c (V)の関係は次式のとおりである。

$$V_T = AV_c \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、構成した駆動系では $A=60$ であった。誤差増幅器のゲイン G は可変であり、回転速度検出装置 (ロータリエンコーダ及び双極性 f/V コンバータ) の感度 β は1 rps 当たり-1 Vである (時計方向回転CWを正の回転速度と定義する)。

まず、開ループでの特性を図3に示す。VCA制御電圧 V_c を横軸としてあるが、印加電圧が小さい部分に不感帯があり、大きな印加電圧では回転速度が飽和する傾向があることがわかる。また、回転方向によって特性に若干の差異がみられる。回転速度1~4 rpsの範囲では比較的線形で、傾きは4.3 rps/V程度である。次に、 $G=2$ 、 $G=10$ としてループを閉じた場合の特性を図4に示す。ループゲインを増すと、ゲイン無限大とした理想値に近づいてゆき、不感帯も狭くなって直線性が增大するので、かなり低速でも安定した動作が可能となる。また、回転速度が一定になるように制御系が印加電圧を調整するので、負荷がかかっても図5のように回転速度の変化が小さく抑えられる。 $G=10$ の場合、負荷トルクが0.8 kgf・cm程度までは回転速度はほぼ3 rpsに保たれていることがわかる。一方、図6のように過渡特性も改善される ($G=10$ 、負荷の慣性モーメント $J=850 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$)。ねじり素子への入力電力も同時に示してあるが、駆動開始直後には大きな電圧が印加されて大きな電力が投入され、回転速度の立ち上がりが速くなっていることが確認できる。ま

図1 複合振動子型超音波モータの基本構成
Fig.1 Basic configuration of a hybrid transducer type ultrasonic motor.

図2 ロータリエンコーダを用いた制御系
Fig.2 Speed control system with a rotary encoder.

図3 開ループ特性
Fig.3 Open loop characteristic.

図4 閉ループ特性

Fig.4 Closed loop characteristics.

図5 速度-負荷特性

Fig.5 Speed-load characteristics.

図6 過渡特性

Fig.6 Transient characteristics.

た、HTUSMのロータ回転速度の過渡特性は1次遅れ型でオーバーシュートが無いが⁷⁾、フィードバックをかけた場合もオーバーシュートは発生していない。このように、この制御系により負荷変動に対して回転速度が安定し、その応答速度も速いので、回転むらの抑圧効果も大きい。誤差増幅器の利得Gを変化させた場合の回転むらのようすを図7に示すが、制御をかけることにより、6~11%の回転むらを1~2%以下に抑圧できていることが確認できる。なお、ここでは、回転検出器の軸とモータの出力軸の設置精度を低下させて、故意にむらのある負荷トルクを生じさせている。ここで、10s間駆動した場合の回転速度の最大値、最小値、平均値をそれぞれ N_{max} 、 N_{min} 、 N_{av} として回転むら ΔN を次式のように定義した。

$$\Delta N = \frac{N_{max} - N_{min}}{2 N_{av}} \times 100 \quad (\%) \quad \cdots (2)$$

図7 回転むらの抑圧効果

Fig.7 Suppression of wow and flutter.

4. ねじり素子電流による回転速度制御

<4・1> ねじり素子電気端子の諸量と回転速度 高精度の制御を行うためには、ロータリエンコーダ等の回転検出装置を利用するのが一般的であるが、廉価に簡単な制御ができればよい場合には、外部装置を用いずに何らかの方法でモータの電気端子から回転情報が得られると有益である。例えば、DCモータでは電気端子の起電力を測定して回転速度を検出する方法が行われている⁸⁾。まず、ねじり素子電気端子の諸量とモータ回転速度の関係を考える。図8はねじり素子からみたHTUSMの電気等価回路であり、トルク-電圧対応により、ねじり振動系とロータ、接触面の摩擦特性を表す要素から成る。 A_r はトルク係数と呼ばれ、その左側の電気系と右側の機械系をトランスのような形式で結び付ける。

$$T_v = A_r V_r \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$I_v = A_r \Omega_v \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 V_r はねじり素子印加電圧、 T_v は発生トルク、 I_v は動電流、 Ω_v はステータ先端のねじり振動角速度である。 C_d は $\Omega_r = 0$ とした場合の電気容量で、制動容量と呼ばれる。

図8 ねじり素子からみた電気等価回路
Fig.8 Electrical equivalent circuit with respect to the torsional vibration system.

R_d はその損失である。ここで、この C_d に流れる電流と動電流 I_v とのベクトル和がねじり素子の全電流 I_T になることに注意しなければならない。一方、利用するねじり振動モードは I_m 、 c_m 、 r_m で表現されている。 J_R はロータの慣性モーメントであり、 Ω_R はロータ回転角速度である。こ

図9 ねじり素子電気端子の諸量と回転数

Fig.9 Relations between the revolution speed and electrical parameters of the torsional port.

で、縦振動により制御される摩擦特性によって、滑り $\Omega_r - \Omega_n$ が変化するが、ロータの定常的な回転速度はねじり振動速度 Ω_r にほぼ比例することが確かめられている。式(4)から明らかなように、圧電振動系では、振動速度 Ω_r と動電流 I_r が比例関係にあるので、ロータ回転速度は動電流と比例関係にあることが予想される。これは、電磁現象を利用した従来のモータと正反対の性質であり、注意する必要がある。なお、トルクはねじり素子印加電圧に比例することが知られている⁹⁾。

さて、次に、測定値によって以上の考察を検証する。ねじり素子の電気端子の諸量と回転速度の関係を測定した結果を図9に示す。このように、印加電圧と回転速度の関係(図9(1))に比べて、駆動電流と回転速度の関係(図9(2))の方が線形性が高く、電圧制御よりも電流制御の方が滑らかな速度調節が可能であると考えられる。しかし、電気端子の電流には制動容量 C_d に流れる電流も含まれるので、動電流だけを取り出すことがより望ましい。これは、ふつう、制動容量の誘電体損 R_d が無視できるので、入力電力(図9(3))を印加電圧で割算すれば近似的に求められる。この動電流に対する回転速度特性は、図9(4)のように、線形性がさらに高く、不感帯もほとんど存在しないことがわかる。

<4・2> ねじり素子電流による制御 以上のように動電流を検出すれば円滑な回転速度制御が可能であるが、回路がやや複雑化するので⁹⁾、ここでは簡単のために電気端子の全電流 I_r で制御する方法を試みた。大負荷時など、動電流の割合が小さい場合には誤差が大きくなるので、検出回路が必要である。制御系は図10のように構成し、ねじり素子駆動電流の大きさを直流電圧に変換して誤差増幅器にフィードバックさせている。ここで用いた電流検出器は100mArms 当たり 1V の出力電圧が得られる。制御結果を図11に示す。制御系の利得を大きくするに従って、線形性が増大していることがわかる。 $G=51$ でほぼ図9(2)の特性になっており、制御電圧に比例してねじり素子の電流が制御されていることがわかる。同じようにして、動電流を検出すれば不感帯を無くすことができると考えられる。以上のように、ねじり素子の電流で制御を行うと回転速度の調節がしやすいことがわかった。これは、摩擦制御成分が一定のとき、回転速度とねじり振動速度の比が定まってくる性質によるものである。このことから、駆動回路は定電流制御とし、その電流値を外部から容易に制御できる機構を取り入れると、モータの速度可変が円滑に行える。

5. むすび

複合振動子型超音波モータは、原理上の本来の特徴を生かして、摩擦力の制御を行う縦振動は一定に保ち、駆動力源であるねじり振動の振動速度を変化させると、回転速度を円滑に制御することが可能であり、ロータリエンコーダを用いた簡易な制御系で良好な制御が可能であることを示した。さらに、回転速度はねじり振動系の電気端子の動電流に比例することを指摘して、ロータリエンコーダを用い

図10 電流監視による回転速度制御回路

Fig.10 Speed control system by constant current drive.

図11 定電流駆動による回転速度制御特性

Fig.11 Characteristics of the speed control system by constant current drive.

ない回転速度制御系を提案した。このように、圧電現象を利用した超音波モータでは、電流が回転速度と対応関係にあり、回転速度については、電圧よりも電流を制御するという考え方が必要であるといえよう。既報の位置決め制御系と組み合わせることで、より安定した精密位置決め制御が可能であると考えられる。なお、電流と回転速度の対応関係を支配する係数には、圧電素子の材料定数など温度の影響を受ける要素が含まれる。今後は、これらの影響についても検討する必要がある。

(平成5年10月18日受付、平成6年3月25日再受付)

文 献

- (1) 例えば、見城・指田：超音波モータ入門(平3)総合電子出版
- (2) M.Kurosawa and S.Ueha: "Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **38**, No.2, pp.89-92 (1991).
- (3) 中村, 他: 「複合振動子型超音波モータによる精密位

- 置決め制御」, 電学論C, 111, 462-469 (平3-9)
- (4) 高橋, 他: 「縦-振り複合振動を利用した超音波モータ」, 昭和63年秋季日本音響学会講演論文集, 2-4-10, 821-822
- (5) 中村・黒澤・上羽: 「縦振動系に関する考察(複合振動子型超音波モータ)」, 平成3年秋季日本音響学会講演論文集, 1-Q-21, 1049-1050.
- (6) K.Nakamura, M.Kurosawa and S.Ueha: "Characteristics of a Hybrid Transducer-Type Ultrasonic Motor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 38, No.3, pp.188-193 (1991).
- (7) K.Nakamura, et al.: "An Estimation of Load Characteristics of an Ultrasonic Motor by Measuring Transient Responses," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 38, No.5, pp.481-485 (1991).
- (8) 例えば, 谷腰: DCモータの制御回路設計(昭60), CQ出版
- (9) 実吉編: 超音波技術便覧(昭46), 日刊工業新聞社, pp.570-571.

中村 健太郎 (正員) 昭和38年7月3日生。平成4年東京工業大学大学院総合理工学研究科電子システム専攻博士課程修了。同年同大学精密工学研究所助手, 平成5年同大学院総合理工学研究科講師, 現在に至る。超音波モータなどの波動応用デバイス, 光ファイバによる音場・振動測定などの研究に従事。日本音響学会, 電子情報通信学会会員。

黒澤 実 (正員) 昭和34年4月24日生。59年東京工業大学大学院総合理工学研究科電子システム専攻修士課程修了。同年同大学精密工学研究所助手, 平成4年東京大学工学部精密機械工学科助教授, 現在に至る。工学博士。超音波モータの研究などに従事。62年度日本音響学会栗屋学術奨励賞受賞。日本音響学会, 電子情報通信学会, 精密工学会会員。

上羽 貞行 (非会員) 昭和18年2月28日生。40年名古屋大学電気工学科卒業。45年東京工業大学大学院博士課程修了。同年同大学助手, 55年同助教授, 平成4年同教授。工学博士。現在, 超音波アクチュエータ, 振動モード制御などの研究に従事。51年度応物学会光学論文賞, 59年度音響学会佐藤論文賞受賞。応物学会, 音響学会, 超音波医学会会員。