スライディングモード制御による
進行波型超音波モータの速度・トルク制御*三 谷 篤 史^{*1}, 秋 下 貞 夫^{*2}Velocity and Torque Control of Traveling-Wave-Type Ultrasonic
Motors Using Sliding Mode ControlAtsushi MITANI and Sadao AKISHITA^{*3}^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ritsumeikan University,
1-1-1 Noji-Higashi, Kusatsu-shi, Shiga, 525-8577 Japan

The traveling-wave-type ultrasonic motor (USM) provides unique utilities; compact size, light weight, and high torque at low speed, which evoke its applicability to an actuator of the light weight and compact size robot mechanisms. However, USM pertains a few of problems resulting from driving mechanisms with frictional forces; non-linearity and uncertain characteristics dependent on temperature, which makes it difficult to construct linear control systems. This paper presents a stable control of USM by using sliding mode control, which yields favorable features; controllability of non-linear system and robust stability against uncertainty of system model. A new model based on the experiment data is exploited for designing torque/velocity servo control system. Though the model contains the uncertainty, the robust stability introduced by the sliding mode control makes the controller compensate the error between the model and the real system of USM. The experiment proves the effectiveness of the sliding mode servo controller.

Key Words: Torsional Vibration, Nonlinear Control, Servo Mechanism, Robust Control, Supersonic Wave, Traveling-Wave-Type Ultrasonic Motor (USM), Sliding Mode Control

1. は じ め に

現在、産業機器のアクチュエータとして主に用いられているのは、直流モータなどの電磁モータである。直流モータは回転子電流に比例して出力を取り出せることから、制御が容易で、様々な分野へ適用されている。その一方で電磁モータは、低速・高トルク駆動では効率が低く、減速機を介して希望の出力を得るのが一般的な使い方である。電磁モータを利用した機械システムでは、減速機による高重量化、大きな設置スペースの確保といった問題への対処を迫られる。また低速・高トルク駆動が可能なモータとしてDDモータがあるが、DCモータに比べてトルク重量比が遙かに小さいため、機構の軽量化には不利であるといわざるを得ない。一方進行波型超音波モータ（以下、超音波モータとする）は、効率が最高でも50%程度であるという欠点があるものの、電磁モータに比して小型かつ大きなトルク重量比を備え、低速・高トルク駆動が可能で

あるという特徴を持つ。そのため機構の軽量化・コンパクト化には非常に有利な条件をもたらす。筆者らは、軽量かつコンパクトなパラレルメカニズムを開発しており、そのアクチュエータのモータとして超音波モータを採用することを検討している。

超音波モータは圧電セラミック及び弾性体からなるステータと、これに加圧接触するロータから構成される。ステータ側の圧電セラミックに高周波電圧を印加することにより、ステータ表面に進行波を発生させる。その運動を摩擦によってロータに伝えることで駆動する。この駆動原理は従来の電磁モータにない特徴をもたらしたが、摩擦駆動による非線形性や圧電セラミックの温度特性による速度特性変動、またステータ・ロータ接触面のそりやうねりによる回転むらといった問題を抱えており、従来の線形制御では安定した制御系を設計することは困難である。

これまで超音波モータの制御法として様々な提案がなされてきた。千住らは適応制御に繰り返し制御を組み合わせた制御系及び適応制御にPI制御を組み合わせた制御系を提案した⁽²⁾⁽³⁾。また、小林らは繰り返し補償器を併用した H_∞ 制御を用いた制御法について

* 原稿受付 2000年11月20日。

^{*1} 立命館大学大学院(☎525-8577 草津市野路東1-1-1)。^{*2} 正員、立命館大学理工学部(☎525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)。

E-mail: sme20167@se.ritsume.ac.jp

Table 1 USR60 specification

Rated output	5.0 [W]
Rated torque	0.5 [Nm]
Maximum torque	1.0 [Nm]
Rated rotational speed	100 [rpm]
Weight	275 [g]

Fig. 1 USM control system

考察した⁽⁴⁾。西堀らは非線形性への対応のためにファジィ推論を取り入れ、その有用性を確かめた⁽⁵⁾。しかし超音波モータの制御にスライディングモードを適用しようとする試みは他に例を見ない。また超音波モータのトルク制御についての検討はこれまでにほとんど行われておらず、接触作業を行うアクチュエータとしての検討も行われていない。

本研究では、超音波モータの非線形性および特性変動に十分に対応しうる制御法として、スライディングモード制御を適用し、超音波モータの速度制御及びトルク制御を試みる。超音波モータをパラレルメカニズムに適用するに際しては、接触作業に伴うトルク制御が要求される。しかし超音波モータの場合、入出力関係を表す有効な解析的モデルが導出されておらず、トルク制御は困難である。そこで本研究では、超音波モータの駆動実験を行うことによって入力変数とトルク・駆動速度の関係を導出し、それを元に指令トルクに対する駆動周波数を求める方法を検討する。本稿では、超音波モータをパラレルメカニズムのアクチュエータとして組み込み、接触作業や速度指令による駆動を行う場合を想定し、一定負荷での速度制御、負荷変動がある場合の速度制御、目標速度及びトルクが同時に与えられた場合などを検討する。

Fig. 2 T-N curve

2. 実験装置

本研究における超音波モータとして、新生工業製のUSR-60を用いる。表.1にその特性、図.1に実験装置の概要を示す。モータの速度制御のため、圧電セラミックスに印加する高周波信号の周波数を変化させる方法を採用する。制御用コントローラは計算機上のプログラムとして実装される。高周波発信源はモータドライバ上の電圧制御型オシレータ (以下 VCO とする) であり、計算機は DA コンバータを介して加振周波数 ω に応じた電圧 V_f を VCO に出力する。 V_f の範囲は $0 \sim 3.2$ [V] とし、 $V_f = 3.2$ [V] において超音波モータは最高速で駆動される。モータドライバは、分配器 (Distributor) によって擬似的な正弦波を生成し、それをトランス (Transmitter) により増幅し超音波モータへ出力する。超音波モータの回転角検出には分解能 0.18 [deg] のエンコーダを用い、その出力をカウンタボードにより読みとり、回転角を計算する。また、実験におけるサンプリング時間を 0.0025 [s] とした。

3. 超音波モータの出力トルク-モータ速度特性⁽¹⁾

本研究では超音波モータのトルク制御を実現するために、モータへの入力信号とモータの回転速度・出力トルクの間を知る必要がある。しかし超音波モータでは、進行波を励起するための高周波電圧信号とモータ出力間関係式が複雑である。そこで本研究では実験的に入出力関係を表すモデルの導出を試みる。

まずはじめに、モータドライバの VCO に対する入力 V_f を与え、超音波モータの負荷を $L = 0$ [Nm] から 0.25 [Nm] まで変えつつモータ速度を計測する。そして計測結果から出力トルク-モータ速度特性を明らかにする。実験では $V_f = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$ [V] と設定して実験を行った。実験結果の一例を図.2 に示す。

超音波モータの出力トルク-モータ速度特性は、トルクの増加に伴って回転数がほぼ直線的に減少する垂下特性となる⁽⁶⁾。ここで、出力トルク-モータ速度特性の近似式を導出し、その導出結果を図.2 内の実線で示す。このようにして得られたモデルは非線形性や

温度特性への考慮が十分でなく、実システムに対して誤差が生じる。しかし、制御則としてスライディングモード制御を適用することにより、誤差によるモデルの不確かさに対する補償が十分になされる。

4. スライディングモードによる制御系の設計

ここでは、超音波モータをスライディングモード制御に適用するための線形化モデルとサーボ系の設計について述べる。

4.1 モデリング ここでは、超音波モータの線形化モデルを示す。超音波モータのロータの運動方程式は、一般に次式で表される。

$$I\dot{\omega}_u = -D_1\omega_u + T_u - T_D \quad (1)$$

ここに I は慣性モーメント、 D_1 は粘性摩擦係数、 T_D は外乱である。また T_u は入力トルクであるが、駆動回路による時間遅れを考慮すれば、 T_u は入力トルク u に対する 1 次遅れ系で表される。

$$\dot{T}_u = -D_2(T_u - u) \quad (2)$$

ここに D_2 は時定数の逆数である。式 (1) 及び (2) における各パラメータは駆動実験によって推定する。本実験では $I = 0.0850[\text{kgm}^2]$ 、 $D_1 = 1.72[\text{kgm}^2/\text{s}]$ 、 $D_2 = 301[1/\text{s}]$ とした。

4.2 マッチング条件 スライディングモード制御は、マッチング条件が成立する場合には強いロバスト性を発揮する。図.1 に示すように、モータドライバは V_f に応じた高周波電圧 $A\sin\omega t$ 、 $A\cos\omega t$ を生成する。ステータ表面に発生する進行波の振幅 W は、電圧 A 及び周波数 ω の関数となる。

$$W \equiv W(A, \omega) = W(A(V_f), \omega(V_f)) \quad (3)$$

しかし、圧電セラミックスの温度特性の影響により、進行波の振幅は変動する。振幅のノミナルな状態を W_0 、変動を ΔW とすれば、進行波振幅は以下ようになる。

$$W = W_0 + \Delta W \quad (4)$$

文献 (6) にあるように、ステータからロータに伝わるトルクはロータ予圧 F_c と摩擦係数 μ で表される。ロータ予圧 F_c は進行波振幅 W の関数である。摩擦の非線形性による不確かさを $\Delta\mu$ とおくと、入力 u は以下の式で表される。

$$u = (\mu_0 + \Delta\mu)F_c(W + \Delta W) = u_0 + \Delta u \quad (5)$$

ただし、 $\mu = \mu_0 + \Delta\mu$ 、 $u_0 = \mu_0 F_c(W)$ 、 Δu は $\Delta\mu$ 及び ΔW を含む項である。これを式 (2) に適用すると、

以下ようになる。

$$\dot{T}_u = -D_2(T_u - (u_0 + \Delta u)) \quad (6)$$

ここで $\Delta u \equiv \lambda u_0$ とおくと

$$D_2(u_0 + \Delta u) = D_2(1 + \lambda)u_0 \quad (7)$$

となる。これは非線形性や温度特性によるパラメータ変動が入力と同じチャンネルから入ることを意味しており、マッチング条件が成立する⁽⁸⁾。

4.3 サーボ系設計 スライディングモード制御をサーボ系に適用するために、式 (1) 及び (2) で表されるシステムに目標位置に関する関数 z を付加する。

$$\dot{z} = \omega_r - \omega_u \quad (8)$$

ω_r は目標速度である。このときシステムは、外乱を無視すれば以下のように表すことができる。

$$\dot{x} = Ax + Bu + E\omega_r \quad (9)$$

ただし

$$x = [z, \omega_u, T_u]^T, A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & -\frac{D_1}{I} & \frac{1}{I} \\ 0 & 0 & -D_2 \end{bmatrix}$$

$$B = [0, 0, -D_2]^T, E = [1, 0, 0]^T$$

また、切換え超平面 σ を以下のように定義する。

$$\sigma = Sx = S_1z + S_2\omega_u + T_u \quad (10)$$

ただし

$$S = [S_1, S_2, 1] \quad (11)$$

システムがスライディングモード状態にあるとすると、切換え超平面は

$$\sigma = 0 \quad (12)$$

と表すことができる。式 (10) に代入すると

$$T_u = S_1x - S_2\omega_u \quad (13)$$

となり、式 (9) より T_u を消去したシステムが得られる。これを等価制御系と呼び、スライディングモードが発生しているときのシステムの動特性を表すことになる。以下に等価制御系を示す。

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\omega}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -\frac{S_1}{I} & -\frac{D_1 + S_2}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \omega_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \omega_r \quad (14)$$

このとき等価線形入力 u_{eq} は次式となる。

$$u_{eq} = -(SB)^{-1}(SAx + SE\omega_r) \quad (15)$$

4.4 切換え超平面の設計 システムがスライディングモード状態にある場合、式(14)の等価制御系で表される。従って、式(14)が望ましい動特性を持つように切換え行列 S を設計すれば、システムの安定性は保証される⁽⁸⁾。本研究においては、切換え行列 S の設計に極配置法を適用する。式(14)の特性根が安定な重根を持つように設計するとすれば、 S_1, S_2 は以下の関係式で表すことができる。

$$S_1 = -\frac{(D_1 + S_2)^2}{4I}, S_2 > -D_1 \quad (16)$$

本実験においてはパラメータの調整のために複数回試験を行い、 $S_1 = -175$, $S_2 = 6.00$ とした。

4.5 スライディングモードコントローラの設計 本研究においては、最終スライディングモード制御法⁽⁸⁾によってコントローラを設計する。最終スライディングモード制御入力、システムがスライディングモード状態にあるときの線形制御項 u_l と、システムの状態を切換え超平面に到達させスライディングモード状態に拘束するための非線形制御項 u_{nl} をそれぞれ独立に構成する。すなわち

$$u = u_l + u_{nl} \quad (17)$$

ここに u_l は式(15)で表される u_{eq} と見なすことができる。また u_{nl} は、スライディングモード到達条件 $\sigma \rightarrow 0$ を満たすように設計する必要がある。そこで σ に関するリアプノフ関数を次のように定義する。

$$V = \frac{1}{2}\sigma^2 \quad (18)$$

このリアプノフ関数の $\dot{V}$ が負定関数すなわち $\dot{V} < 0$ であれば、リアプノフ関数の漸近安定定理を満たし σ は 0 に収束する。 $\dot{V} = \sigma\dot{\sigma}$ に式(10)を代入することによって以下の関係が導出される。

$$\sigma D_2 u > \sigma G \quad (19)$$

ただし

$$G = SAx + SE\omega_r \quad (20)$$

ここで、 u を以下のように定める。

$$u = u_l + u_{nl} \equiv -D_2^{-1}G - D_2^{-1}k \frac{\sigma}{|\sigma|} \quad (21)$$

k は切換幅であり、非線形制御入力項のゲインである。このとき、 $\dot{V} < 0$ を満たすための k の条件は

$$k > 0 \quad (22)$$

となる。これより非線形制御入力 u_{nl} は次式のように符号関数として表される。

$$u_{nl} = -K \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (23)$$

Fig. 3 Sliding mode control block diagram

ただし $K = D_2^{-1}k > 0$ である。また、チャタリング対策として式(23)に平滑化定数 η を導入する。

$$u_{nl} = -K \frac{\sigma}{|\sigma| + \eta}, \eta > 0 \quad (24)$$

η を大きくしすぎると、超平面近傍で切換え関数に定常偏差を生じて外乱抑圧性能が悪化する⁽⁷⁾。本研究では試験を行うことにより最適な η を選択した。本稿では $K = 150$, $\eta = 0.250$ として実験を行った。本研究にて用いたスライディングモード制御のブロック線図を図.3 に示す。

5. 速度制御実験

超音波モータに対する入力式(17)で表されるが、実際には VCO 入力電圧 V_f を与えなければならない。本研究では、 u と V_f の関係式が以下の関数で表されると仮定し、図.2 の結果より定数の設計を行った。

$$u = \alpha e^{\beta(2.5 - V_f)} \quad (25)$$

ここに $\alpha = 1.59$, $\beta = -0.880$ とした。

超音波モータをアクチュエータとして組み込んだ場合、超音波モータに対する負荷変動は避けられない。また、制御中に指令速度が変更されることも考慮すべき点である。本稿ではこれらのことを考慮し、以下の実験を行った。

5.1 速度のステップ応答 超音波モータをアクチュエータとして組み込んだ場合、超音波モータに何らかの負荷がかかることが予想される。どのような負荷状況に対しても、目標入力に対する応答は高速であることが望まれる。ここでは負荷を $0.25[\text{Nm}]$ とし、以下に示す目標速度 $\omega_r[\text{rad/s}]$ を設定した。

$$\omega_r = \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq 1.0) \\ 3.0 & (1.0 \leq t \leq 2.0) \\ 5.0 & (2.0 \leq t \leq 3.0) \end{cases} \quad (26)$$

図.4 に実験における速度 ω_u と制御出力 V_f の時間応答を示す。収束までの時間は約 $0.1[\text{sec}]$ であり、安定し

(a) Time history of velocity

(b) Time history of control voltage

Fig. 4 Experimental results of step response of velocity at load = 0.25[Nm]

(a) Time history of velocity

(b) Time history of control voltage

Fig. 5 Experimental results of velocity control at load change

た制御結果が得られた。実験結果の微小振動はチャタリングによるものではないかと考え、パラメータ調整による低減を試みた。しかし、パラメータ調整ではこれ以上の低減が不可能であったため、筆者はチャタリングによる微小振動ではないと推定する。制御出力変動は、超音波モータのパラメータ変動の影響を受けて生じたものであるが、その場合でも速度 ω_u の応答はステップ入力に十分追従していることがわかる。

5.2 負荷変動時の速度制御 次に負荷変動がある場合の速度制御についての検討を行う。ここでは指令速度を $\omega_u = 3.0$ [rad/s]に設定し、速度制御中に負荷変動がステップ的に加わったとして実験を行った。負荷は初期状態で $Load = 0.25$ [Nm]とし、 $t = 2.0$ [sec]付近で $Load = 0.0$ [Nm]にステップ的に変化することとする。図.5に実験結果を示す。負荷変動の瞬間に速度が 0.3 [rad/s]程度上昇しているが、約 0.14 [sec]後には指令速度に収束しているのがわかる。これにより負荷変動がある場合においても安定した制御が可能であることが証明された。

6. トルク制御実験

パラレルメカニズムによるロボットを用いてグライディングなどの接触作業を行う場合には、接触点における作用力の制御を行う必要がある。その場合モータにはトルクサーボ制御が求められる。超音波モータのトルク制御のための出力トルクを T_q 、トルク制御入力を u_{tq} とすれば、式(1)および(2)はそれぞれ以下

のように書き換えられ、ここでもスライディングモード制御が適用できる。

$$\begin{cases} I\dot{\omega}_u = -D_1\omega_u + T_u - T_D - T_q \\ \dot{T}_u = -D_2\{T_u - (u + u_{tq})\} \end{cases} \quad (27)$$

ここに T_u は速度制御及びトルク制御を含んだ入力トルクである。 u_{tq} については以下の制御則を適用した。

$$u_{tq} = \int K_f \{T_r - T_q\} dt \quad (28)$$

ここに K_f はゲイン、 T_r は目標トルクである。なお、実験は超音波モータを文献(9)の平面型パラレルメカニズムの直動型アクチュエータに組み込んで行った。エンドエフェクタには力/トルクセンサが取り付けられており、超音波モータの出力トルク値は、ピッチ比に基づいてセンサ出力値から計算される。

6.1 トルク制御 図.6に超音波モータの回転を固定し、 $T_r = 0.3$ [Nm]とした場合の実験結果を示す。出力トルクは収束しているが、約 0.03 [Nm]の偏差が存在する。これはスライディングモード制御を適用したモデルには、超音波モータを組み込んだ構造体が含まれておらず、構造体のがたつきや摩擦に対してはロバスト制御の対象外であることに由来すると考える。

6.2 トルク/軌道同時制御 図.7に超音波モータの速度及び出力トルクを同時に制御した場合の実験結果を示す。なお、超音波モータの目標トルクが $T_r = 0.125$ [Nm]、目標速度が初速度 $\omega_{n0} = 1.91$ [rad/s]、加速度 1.5 [rad/s²]のランプ入力となるようにパラレルメカニズムの目標値を与えた。

(a) Time history of output torque

(b) Time history of control voltage

Fig. 6 Experimental results of step response of torque control

この実験においても、前節と同じ理由によると考えられるふらつきがあるが、出力トルク・速度とも目標値に追従している。

7. お わ り に

本稿においては、超音波モータの制御にスライディングモード制御を適用し、その有効性を実験によって検証した。その結果以下の結論が得られた。

(1) アクチュエータのモータとして組み込んだ場合を考慮して、負荷状態での速度制御実験を行った。その結果、負荷状態においても無負荷の場合と同様な速度応答が得られた。

(2) また、制御中に負荷変動がある場合の制御を行い、負荷変動に対してロバストな制御を実現した。

(3) トルク制御実験を行い、指令トルクに対して追従できることを証明した。

(4) トルク/軌道同時制御実験を行い、指令速度・指令トルクに対して安定な応答結果が得られた。

その一方で問題点としては以下の項目が挙げられる。

(5) 制御結果にエンコーダの分解能に起因すると推定される微振動が存在する。

(6) 超音波モータを組み込んだ構造体はロバスト制御の対象外であり、構造体のたつきや摩擦の影響はロバスト制御の効果を受けず、トルク制御及びトルク/速度制御の実験結果にこれらによる偏差やふらつきが生じたと考える。

今回の実験において多大なる助言とご協力をいただいた(株)新生工業の土屋氏に謝意を表明いたします。

(a) Time history of output torque

(b) Time history of control voltage

(c) Time history of velocity

Fig. 7 Experimental results of torque/motion control

References

- (1) 三谷, 秋下: 入力信号の振幅制御による超音波モータの力制御第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.1, (2000) pp293-294
- (2) 千住, 平良, 上里: 適応制御による超音波モータの速度制御, 電学論 D, 113-10, (1993), pp1226-1227
- (3) 千住, 上里: ハイブリット制御による超音波モータの速度制御, 計測自動制御学会論文集, 30-7, (1994) pp877-879
- (4) 小林, 木村, 矢鍋: 線返し補償器を併用した H_∞ 制御に基づく超音波モータのロバスト定速度制御, 機論, 64-627, C(1998), pp4271-4277
- (5) 西堀, 大熊, 江龍, 境: 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), pp2052-2056
- (6) 黒澤, 上羽: 進行波型超音波モータの効率, 日本音響学会誌, Vol.44, No.1, (1988) pp40-46,
- (7) 北村, 岩淵, 野波, 西村, 小林: 弾性アームの周波数成形型スライディングモード位置決め制御, 機論, 63-606, C(1997), pp.431-437
- (8) 野波, 西村, 平田: MATLAB による制御系設計, 東京電機大学出版局, (1998), pp.163
- (9) 三谷, 成原, 秋下: 冗長な自由度を持つ平面パラレルメカニズムの力制御, ROBOMEC'00 予稿集, (2000), 2A1-53-066