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[†]

加藤 厚生*・伊藤 宏司**・伊藤 正美***

Compliant Motion of Ultrasonic Motor by Phase Difference Control

Atsuo KATO*, Koji ITO** and Masami ITO***

As actuators for a prosthetic arm, we use traveling wave ultrasonic motors because of their light weight, compact size and silent motion.

The prosthetic arm has to better move compliantly around every joint of it according to environmental force the same as the human arm. In order to realize the compliant motion of prosthetic arm we think that the actuator have a compliant characteristic, but the traveling wave ultrasonic motor has no compliant characteristic in itself. Incidentally, the traveling wave ultrasonic motor is driven by two different phase sine-wave electric signals which propagate elastic traveling waves in its stator, then the traveling waves generate torque to its rotor. Though, usually the phase difference is adjusted to just +90 deg or -90 deg to get highest output torque and highest rotation speed, we adjust it in the range of -90 deg to +90 deg to regulate output torque and rotation speed continuously by the phase difference change. Then we control the phase difference with deflection angle of the output shaft from desired angle and with desired elastic coefficient.

We realized adjustable compliant motion on the traveling wave ultrasonic motor using the phase difference control of the two driving sine-wave electric signals. The motor acts as a spring with damping. The damping characteristic is observed as a constant speed response

of the ultrasonic motor to the step change of the phase difference of the driving signals.

This system is useful for actuators of the prosthetic arm.

Key Words: ultrasonic motor, compliance, phase difference

1. はじめに

義手は、限られた重量とスペースの中でヒトと同じ機能を実現すべき高度に技術集約的な機械である。理想的な義手の条件は、ヒトの手と同じ外観、同じ機能を持ち、軽量で、音もなく動作し、しかもエネルギー消費が小さいことである。しかし、今のところ技術的な制約から、その理想のいくつかを切り捨てることによって、実体化せざるをえない。その最大の理由は、現時点ではアクチュエータにある。減速機構まで含めたアクチュエータのトルク-重量比とエネルギー消費量は、理想的な義手を実現するには程遠く、現実の義手はアクチュエータの数を極力制限して作られてきた^{1),2)}。その典型は、たとえば、極限まで単純化された手部の3本指構造に見ることができる。それは、1本の拇指とこれに対向する2本の指を1個のモータで駆動する構造である³⁾。

筆者らは、こうした手部の3本指機構を踏襲しつつ、手首の回転と屈伸も可能とした3自由度の義手を開発している⁴⁾。そのアクチュエータとして進行波型超音波モータを採用した。超音波モータは小型、軽量、低回転速度、高トルク、高応答性など優れた特徴を持ち、しかも動作音はほとんど聞き取れない。

進行波型超音波モータは、固定子と回転子が摩擦接触する構造をもつため静止保持トルクが大きく、一定姿勢を保つ限り動力源からのエネルギー消費を要しない点で義手用アクチュエータとして好適である。反面、この性質は外力に応じて軸角度を変化する柔軟応答性を減じている。ところが、義手に要求される機能の第1はヒトの手らしい柔軟な動きであり、そのため

† 日本ロボット学会第8回学術講演会で発表 (1990・11)

* 愛知工業大学 豊田市八草町八千草 1247

** 広島大学工学部 東広島市鏡山 1-4-1

*** 名古屋大学工学部 名古屋市千種区不老町

* Aichi Institute of Technology, Toyota

** Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima

*** Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya

(Received April 22, 1991)

(Revised June 26, 1991)

には外力に応じて関節角度を変えるコンプライアンス特性が必要とされる。そこで、筆者らは進行波型超音波モータにコンプライアンス特性をもたせ、そのパラメータを調節する技術を開発した⁵⁾。

進行波型超音波モータは指田⁶⁾によって1982年に開発された。その後注目すべき研究は国内で行われている。構造および基本特性に関してはT. Hatsuzawa⁷⁾、永井⁸⁾が報告している。駆動方式については泉野⁹⁾、上羽¹⁰⁾の研究があるが、いずれも2相正弦波の位相差を ± 90 度に限定している。最近になって大熊¹¹⁾は、2相正弦波の位相差を $+90$ 度(CW)と -90 度(CCW)に保つ時間比率を調節して速度制御を行った。秋山¹²⁾は、理論的考察から2相正弦波の振幅比または位相差を連続的に調節すれば速度制御が可能であろうと指摘している。しかしいずれも、出力軸角度との関係に注目してコンプライアンスを調節する、との発想には達していない。

2. 進行波型超音波モータのトルク制御原理

採用した進行波型超音波モータ(新生工業USR-60)は、櫛状に歯を刻んだリング状のステータ弾性体(黄銅)と、この歯に押し付けられて摩擦接触するロータ円盤(アルミ)で構成されている。ステータ弾性体には、伸縮方向が順次逆方向になるように組み合わせた圧電素子8枚が、円周の $4/9$ (160度)にわたって接着されている。この圧電素子を正弦波電圧で駆動すると交互に伸縮し、弾性体に(1)式で表わされるたわみ振動の定在波 ξ_1 を生ずる。

$$\xi_1 = \xi_0 \sin(nX) \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (1)$$

ただし、

ξ_0 : 定数

X : 円周上の位置

n : 円周上の定在波数(=9)

ω_0 : 弾性体の形状・材質で決まる定数

同様に組み合わせた圧電素子を別に1組用意し、たわみ振動について $1/4$ 周期の位相差をもたせて円周の残る $4/9$ 部分に接着し、かつ、上記正弦波に対して 90 度の電氣的な位相差を与えた正弦波で駆動すると、次式の定在波振動 ξ_2 を生ずる。

$$\xi_2 = \xi_0 \cos(nX) \cdot \cos(\omega_0 t) \quad (2)$$

二つの振動は弾性体中で合成され、つぎのようなたわみ振動の進行波となる。

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = \xi_0 \cos(nX - \omega_0 t) \quad (3)$$

(3)式は、弾性体の中性面に対する橢円運動の縦方向(軸方向)変位を表わしている。

中性面が弾性体の厚さ T の中央にあるとすると、

そこから $T/2$ 離れた表面における横方向(円周方向)変位は次式で表わされる。

$$\zeta = \xi_0 n(T/2) \sin(nX - \omega_0 t) \quad (4)$$

(3)式と(4)式は、進行波が弾性体の表面に橢円運動(実際は卵の長軸断面の形に近似した運動)を起こしていることを示す。

つぎに、弾性体の表面から櫛状に歯を立ち上げ、その高さを H とすると、歯の表面における横方向変位は(4)式のほぼ $2H/T$ 倍に増幅される。歯表面の橢円運動は歯面に摩擦接触するロータに回転運動を起こす¹³⁾。歯表面の横方向速度とロータの回転速度は一般に異なるので、摩擦はすべり摩擦となる。摩擦力を効率よく伝達するために、ロータ表面は高分子プラスチックでコーティングされている。

いま、2組の圧電素子に加える2相正弦波電圧の位相差 ϕ を任意の値とすると、(3)式は(5)式に、(4)式は(6)式に一般化される。

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 \\ &= \xi_0 \sin(nX) \cdot \sin(\omega_0 t) \\ &\quad + \xi_0 \cos(nX) \cdot \sin(\omega_0 t + \phi) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \zeta &= \xi_0 n(T/2) \sin(nX) \cdot \sin(\omega_0 t) \\ &\quad + \xi_0 n(T/2) \cos(nX) \cdot \sin(\omega_0 t + \phi) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 ϕ を -90 度から $+90$ 度まで連続的に変えると、ステータ弾性体に発生するたわみ振動は、進行波から次第に定在波へ移行し、やがて逆方向へ移動する進行波になる。

3. 回転速度特性とトルク特性のシミュレーション

3.1 位相差による櫛歯運動の変化

たわみ振動が位相変化とともに進行波から定在波へ移行するにつれて櫛歯の表面が描く軌跡が変化するというを、(5)式および(6)式を計算して求めた。

結果をFig. 1に示す。図において直線 $A_1, A_2, \dots, A_8$ は、たわみ振動の1周期間に含まれる櫛歯の傾きと高さのある瞬間をとって表わしたもので、直線の上端は個々の櫛歯面の中心点を示す。直線の上端に接して点線で描いた軌跡は歯面中心点の運動を表わし、たわみ振動の移動とともに橢円に近似した軌道を描くことがわかる。この軌道から、橢円の長軸の長さは位相差にほとんど依存しないが、長軸の傾きおよび短軸の長さは位相差に強く依存し、 $\phi = 90$ 度で最も円形に近付き、 0 度で直線になることがわかる。 $\phi < 0$ 度については図示しなかったが、歯先の回転方向が逆転するほかは同様の経過をたどって -90 度に至る。歯面中心部が描く軌跡のうち黒丸で示した部分は、たわみ振

Fig. 1 A simulation of teeth motion with phase difference of the driving sine-waves

動の 1 周期間で最も大きくロータ側へ突き出している歯の状態を表わしている。突き出した歯は 1 周期間 8 歯中に 1 個だけある。たとえば、図中位相差 90 度に注目すると、時点 t_1 から t_7 までは歯 A_7 が最も突き出しているが、 t_8 から歯 A_8 が突き出し、やがて A_8 も右隣の歯にその状態をゆずることがわかる。

3.2 位相差によるトルクと回転速度変化

位相差変化によるトルクと回転速度変化をシミュレーションによって求めた。進行波型超音波モータのトルクは歯面とロータ間の摩擦によって伝達される。この摩擦は歯面とロータ間の速度差が 0 のとき静止摩擦となり、0 でないとき動摩擦（すべり摩擦）となる。

静止摩擦となるのは駆動電圧を印加しない場合である。このときすべての歯の運動が停止し歯面とロータ間の総接触面積も最大となる効果も加わって、発生するトルク（静止保持トルク）はすべての動作状態を通じて最大値をとる。

動摩擦となるのは駆動電圧を印加した場合である。位相差が 0 でない駆動電圧を印加すると、歯面は(5)式と(6)式で表わされる首振り運動をしてロータに起動トルクを発生する。この運動による円周方向速度は駆動周波数の周期で正弦波状に変動するが、ロータ回転速度はこの間ば一定値をとるので、歯面とロータ間に速度差が生じすべりが発生する。したがって、起動トルクは動摩擦によって伝達される。

駆動電圧を印加したままその位相差を 0 にすると、Fig. 1 に示すように歯面はロータを左右方向斜めに突き上げるが、平均すると起動トルクは 0 になる。このとき保持トルク（仮に動的保持トルクと呼ぶ）を

Fig. 2 Characteristics of torque and rotation speed with phase difference of the driving sine-waves (by simulation)

生するが、その値は静止保持トルクに比べて小さい。

つぎに動摩擦力について考えよう。動摩擦力は、接触面積と接触面にかかる垂直抗力の大小によって変わり、すべり速度によっては変わらない。接触面積は、駆動電圧を 0 にするとすべての歯がロータと接触して最大となる。駆動電圧を印加するとたわみ振動の 1 周期あたり一つの歯が突き出してロータに接触してトルクを発生する。

垂直抗力は、ロータがゴムとバネによる弾性力で歯面に押し付けられているため、しかも、ロータ表面が弾性のある高分子プラスチックでコーティングされているため、歯面の縦方向（軸方向）変位におおむね比例するとした。

Fig. 2 は、以上の考えに基づいて、2 相正弦波電圧の位相差に対する起動トルクおよび速度をシミュレーションによって求めた結果である。ここでは、歯の縦方向変位に比例して起動トルクが変わり、単位時間当り円周方向変位に比例して回転速度が変化するとした。位相差変化による接触面積変化はないとした。

4. コンプライアンス制御系の構成

4.1 位相差制御系

超音波モータのコンプライアンス制御は、出力軸角度に応じて 2 相駆動電圧の位相差を制御することによって実現した。Fig. 3 に制御装置のブロック図を示す。

図において VCO (Voltage Controlled Oscillator) は、超音波モータの固有振動周波数（約 40 kHz）より 4 kHz ほど高めに設定した駆動周波数（約 44 kHz）の 256 倍（約 11.26 MHz）の周波数をもつ原振動パルスを発生する。超音波モータの共振特性のスロープを利用して周波数-電圧変換を行い、この電圧を VCO へ帰還して発振周波数を制御した。

1/256 移相器-1 は可変位相方形波信号を作る。この信号は基準位相信号に同期し、かつ -90 度から +

Fig. 3 Block diagram of the compliance control system for the traveling wave ultrasonic motor

90度の半周期間を1/128の精度で位相偏移できる。1/256移相器-2は基準位相信号を作る。この信号は、可変移相方形波信号と同じ周期、同じ波形をもつ。1/4096分周器は駆動周波数の16周期ごとに位相偏移量を更新する信号を出力する。ドライバは、pp10Vの方形波信号を波形変換増幅し、pp100Vの正弦波信号とする。

4.2 角度制御系

つぎに、位相制御系をマイナーループとし、これに超音波モータ出力軸角度を帰還するメインループを付加して角度制御系とし、全体としてコンプライアンス制御系を構成する。ここでは、可変位相信号の位相差 ϕ を次式によって変化させる。

$$\phi = f(\theta_d - \theta_0) \quad (7)$$

ここに、 θ_d は角度目標値、 θ_0 はモータ出力軸角度である。また f は量子化関数で、連続量 $(\theta_0 - \theta_d)$ を128段階の位相差に量子化する。

出力軸に現れる起動トルク τ は、s字状の飽和特性と摩擦損失に起因するヒステリシス特性をもつが、ここで線形化関数 g を導入して、

$$\tau = g(\phi) \quad (8)$$

ただし、 $-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$

とすれば、

$$\tau = k(\theta_d - \theta_0) \quad (9)$$

となる。ここに、 k は弾性係数であり、最大トルクの範囲内で任意の値に調節できる。

5. 結果および考察

5.1 コンプライアンス特性

Fig. 4は位相制御系について測定した位相差に対する起動トルクと出力軸回転速度の実測値である。実線は起動トルクを、点線は無負荷出力軸回転速度を表

わす。前掲したシミュレーション結果(Fig. 2)と実測値の間に位相差零付近を除いて、良好な相似性が見られることから、シミュレーションの妥当性を確認した。現実の系では、位相差零付近で起動トルクの低下にともなって非線形摩擦様の摩擦が強まり、これを無視したシミュレーションとは、やや異なる結果を得ている。

Fig. 5は角度制御系について測定した出力軸角度対起動トルク特性である。この系はバネのように動作し、出力軸を外部トルクによって回

転すると、目標角度(弾性動作の平衡角度)からの偏位角に比例して引き戻しトルクが発生する。測定にあたり、出力軸を捻り棒型トルクセンサを介してフレームに固定した。そのため θ_0 も固定されるので、代わりに位相制御系入力端子には別に用意した発振器出力を接続し、三角波信号を加えて周期的等速度運動を模擬している。角度目標値 $\theta_d = 0$ とし、3種類の弾性係数を選んで例示した。ここでは、(8)式の線形化関数

Fig. 4 Characteristics of torque and rotation speed with phase difference of the driving sine-waves (by measurement)

Fig. 5 Elastic characteristics of the compliance control system (lower speed case)

を導入していない。

図から、この系が弾性特性をもち、その係数を変化できることがわかる。弾性係数は 0.067, 0.10 および 0.12 Nm/rad を示した。もちろん、弾性係数は 0 から最大値の範囲で自由に調節できる。この測定では三角波の周波数を低く選び、出力軸を比較的ゆっくり回転した状態を再現している。

5.2 粘性摩擦特性

つぎに、三角波信号の周波数を高めて、出力軸を速く回転した場合を模擬する測定を行った (Fig. 6)。Fig. 5 と Fig. 6 を比べると、出力軸の回転速度を高めたことによってヒステリシスが大きくなることがわかる。一般にヒステリシスは、系内部の等価摩擦損失によって発生し、損失が純粋なすべり摩擦に起因するときは速度依存性はない。ところが、ここに観測されたヒステリシスは速度依存性をもつことから粘性摩擦の影響を受けている可能性がある。粘性摩擦は歯歯とロータ間の相対運動によって発生するものと考えられるが現時点では解明されていない。そこで、ここでは見かけの粘性と呼ぶ。

見かけの粘性摩擦係数を同定する目的で起動トルクによる出力軸の加速状況を測定した。出力軸を無負荷とし、起動トルクは駆動 2 相正弦波の位相差を調節して設定した。Fig. 7 は結果の一例であり、位相差が -40 度の場合を示す。出力軸を含むロータの無負荷慣性モーメントは $0.07 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$ と小さいため、起動後加速してただちに終速度 (等速度) に達しているようすが観測される。終速度は見かけの粘性に依存するので、起動トルクから次式により等価粘性係数を同定できる。

$$B = \tau / \omega \quad (10)$$

ただし、

τ : 起動トルク

ω : 終速度

Fig. 6 Elastic characteristics of the compliance control system (higher speed case)

Fig. 8 は、算出した等価粘性係数を 2 相駆動正弦波の位相差に対して描いてある。全体として 0.1 Nms/rad 程度の粘性係数を示し、その値が位相差 0 度に近付くにつれてやや大きくなる傾向をもつことがわかる。

つぎに、本システムの過渡特性を調べた。Fig. 9 は角度目標値のステップ変化に対する出力軸角度応答を示す。出力軸を垂直に立て、慣性モーメント 0.43 kgm^2 のレバーを付け、弾性係数を 0.12 Nm/rad に設定した。目標値を変化すると、2 相正弦波の位相差が増え起動トルクも増加して速やかな加速が行われる。出力軸が目標値に接近するにつれて位相差および起動トルクも減少しながら目標値 (新しい平衡角) に達する。この間、終始安定を保っている。いうまでもなく、負荷トルクによってレバーを変位させたのち、このトルクを取り去った場合も同様の応答を示す。

Fig. 7 An acceleration characteristic of the ultrasonic motor. Phase difference is fixed to one value

Fig. 8 A plot of the viscous frictional coefficient to the phase difference

Fig. 9 A step response of the output shaft angle of the compliance control system

ところで、超音波モータを一定駆動条件で回転させ、回転速度を増加すると出力トルクは単調な垂下特性を示して低下する。こうしたトルク低下は多くのモータで観測され、内部トルクの一部が等価内部粘性摩擦によって減殺される結果と解釈できる。等価粘性係数は、一般に、速度の増加とともに線形関係を超えて増加する傾向を示す。

前掲した Fig. 8 は、負荷トルク一定（ここでは無負荷）とし位相差を調節して起動トルクと回転速度を変化したときにも、超音波モータの見かけの粘性係数が変化することを示している。このとき粘性係数は位相差が ± 90 度に近づくにつれて小さくなり、 0 度へ近づくにつれて大きくなる傾向を示した。位相差の正負（回転方向の正逆）によって特性が異なる傾向は、Fig. 4, 5, 6 および 8 に見られた。この原因は超音波モータの内部的な原因（材料や加工の非対称性）または外部的な駆動正弦波の非対称性に求めることができるが現時点では不明である。

6. あとがき

進行波型超音波モータの駆動 2 相信号の位相差を制御して、出力軸に可変コンプライアンス特性を実現した。すなわち、目標角度を一定に保ちながら出力軸を外側から回転させると、バネのように動作して目標角度へ戻り、目標角度を変化させると、角度偏差と設定弾性係数に比例する起動トルクを発生して新しい目標角へ移動する。弾性係数は、 0 から最大値（ここでは 0.12 Nm/rad ）の間で自由に変化できる。

このとき、採用した超音波モータが見かけの粘性特性をもち、その値が、位相差を 0 に近づけるにつれて増加する傾向を示すことを実測によって明らかにした。この結果からは、出力軸が目標角度から離れると位相差が増加して粘性係数が減少し、目標角度に近づ

くと位相差が減少して粘性係数が増加することがわかる。すなわち、応答の初期には粘性係数が減少して速応性を高め、応答の終期にはこれが増加して安定性を高める。この効果は小さいとはいえ、義手のアクチュエータとして望ましい特性である。

本稿に示した技術は、一般にコンプライアンス制御マニピュレータのアクチュエータに用いて有用である。

おわりに、この研究は文部省科研費（01850088）の助成を得て行われたものであることを記し謝辞とします。

参 考 文 献

- 1) 加藤一郎編：メカニカルハンド，工業調査会（1977）
- 2) 日本ロボット学会編：ロボット工学ハンドブック，297/320，コロナ社（1990）
- 3) 東原，斎藤：全腕式電動義手（TDU ys-86）のメカニズムと工学的評価，バイオメカニズム，10，227/237（1990）
- 4) 永岡，ほか：筋電制御による 3 自由度前腕動力義手，信学技報，BME 90-135，87/94（1991）
- 5) 加藤，伊藤(宏)，伊藤(正)：超音波モータのコンプライアンス調節，日本ロボット学会第 8 回学術講演会予稿集，985/986（1990）
- 6) 見城，指田：超音波モータ入門，総合電子出版（1991）
- 7) T. Hatsuzawa, K. Toyoda and Y. Tanimura: Speed Control Characteristics and Digital Servo-System of a Circular Traveling Wave Motor, Rev. Sci. Instrum., 57-11, 2886/2890（1986）
- 8) 永井，日比，山田：進行波型リニア超音波モータの基礎特性，電気学会研究会資料，LD-89-4，31/40（1989）
- 9) 泉野，川瀬，中岡：進行波型超音波モータの適応制御方式(1)，電子情報通信学会秋季全国大会，1-81（1989）
- 10) 上羽貞行：回転型超音波モータ，日本音響学会誌，44-7，519/524（1988）
- 11) 西堀，大熊：ロボット用超音波モータの速度制御，日本機械学会東海支部第 39 期講演会，189/190（1990）
- 12) 秋山勇治：屈曲波振動形超音波モータの各種速度制御方式の検討，電気学会研究会資料，RM-89-11，25/33（1989）
- 13) メカトロニクス編集部編：最先端のアクチュエータ，145/150，技術調査会（1986）