

位相制御による超音波モータの 可変コンプライアント動作

Adjustable Compliant Motion of Ultrasonic Motor by Phase Shift Control

加藤厚生
Atsuo Kato

It is an important problem to realise a contact task manipulator, for example an prosthetic arm. One approach to that is an adjustable compliance control. We developed an adjustable compliance actuator system for a prosthetic arm using phase control and angle control of a traveling wave ultrasonic motor. The traveling wave ultrasonic motor is driven by two-phase sine wave signals, and the phase difference of two signals is usually selected to 90deg. But in our system, the phase difference is adjusted in the range from +90 to -90deg by angle of the output shaft of the motor. Our system acts as a spiral spring with little damping.

1. はじめに

接触作業ロボットの実現が切望されている。接触作業ロボットは、環境（作業対象）による拘束を受けない自由空間と、拘束を受ける拘束空間を自由に遷移しながら、両空間において高い精度で安定かつ滑らかに動作しなければならない。

そのアプローチの一つとして、コンプライアンス制御¹⁾がある。コンプライアンスは手先からみたロボットの柔軟さを指し、剛性（弾性）の逆数である。これまでのコンプライアンス制御は、環境を同定してマニピュレータの目標コンプライアンスを決定してから作業を行っている。この方法は生産ラインのように環境が限定される場合は有効であるが、環境が刻々変化する場合は対処しきれない。

環境が変化する作業の典型は、ヒトの日常生活にある。いまのところ、ヒトの日常作業を代行できるマニピュレータは実現されていないが、将来実現された時には、家事や子供の相手や老人の介護などを実行できなければならない。こうしたマニピュレータは必然的にヒトそのものを環境とすることになる。

一例として能動的に制御された全腕義手を考えてみよう。この義手は、水の入った紙コップを潰さずに持ち上げ、取り落とさずに口へ運べなければならない

ない。字を書くことができなければならない。ヒトと握手できなければならない。ヒトに当たったとき怪我をさせてはいけない。正確に、滑らかに、何よりも安全に動作しなければならない。

ヒトは、こうした機能を骨格筋の粘弾性係数を調節して実現している。筆者はさきに、骨格筋の粘弾性係数が筋活動レベルに比例して増減する現象を確認した²⁾。伊藤らは、関節周りのトルクが主動筋と拮抗筋の活動レベルの差で発生し、関節周りの粘弾性係数が活動レベルの和で連続的に変化するとしている³⁾。ヒトにならえば、義手も関節粘弾性係数の連続的な調節による可変コンプライアンス制御をなされるべきである。

筆者は、義手や小型のマニピュレータの可変コンプライアンス制御を目的として、超音波モータを用いた可変コンプライアンスアクチュエータを開発した。

2. 進行波形超音波モータの位相制御

進行波型超音波モータは指田⁴⁾によって1982年に開発された。その後注目すべき研究はほとんど国内で行われている。構造および基本特性に関してはHatsuzawa T.ら⁵⁾、永井ら⁶⁾が報告している。駆動方式については泉野ら⁷⁾、上羽⁸⁾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。秋山⁹⁾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。

採用した進行波型超音波モータは、図1に示すように、櫛状に歯を刻んだリング状のステータ弾性体(黄銅)と、この歯にゴムシートと板バネで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。ステータリングの歯面に反対側の平面には2組の圧電素子が貼付けられている。その各組は、同じ極性の電圧に対して伸張する圧電素子4枚と短縮する圧電素子4枚を交互に組み合わせて構成されており、圧電素子1枚の長さが円周の20度に相当するので、1組8枚では160度を占める。2組の圧電素子は円周上に10度のオフセットを付けて互いに重ならないように貼付けられている。

いま、圧電素子の一方の組を約40kHzの共振周波数正弦波電圧で駆動すると伸縮振動を発生し、結果としてステータリングに(1)式で表される1波長40度1周9波のたわみ振動の定在波 ξ_1 を生ずる。

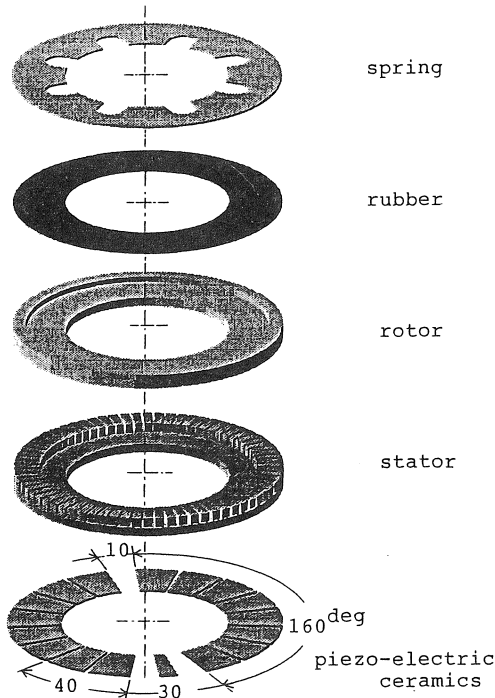


図1 進行波型超音波モータの構造

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

ただし、 ξ_0 : 定数

X : 円周上の位置

n : 円周上の定在波数(ここでは、9)

ω_0 : 弾性体の形状・材質で決まる定数

他方の組の圧電素子を正弦波電圧で駆動すると、先のとわみ振動に対して1/4波長のオフセットをもったたわみ振動を発生する。このとき駆動正弦波の位相差を(1)式のそれに対して90度を設定すると、次式の定在波振動 ξ_2 を生ずる。

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

2つの振動はリング中で合成され、次式で表される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)式はまた、たわみ振動の中性面に対する楕円運動の縦方向(軸方向)変位を表している。

いっぽう、横方向(円周方向)変位は、中性面が弾性体の厚さ T の中央にあるとすれば、そこから $T/2$ 離れた表面における値となり次式で表される。

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

ここで、弾性体の表面から高さ H の歯を立ち上げると、横方向変位を(4)式のほぼ $2H/T$ 倍に増幅できる。

(3)式と(4)式は、進行波が弾性体の表面に近似的な楕円運動を起こしていることを示す。歯表面の楕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。このとき、歯表面の横方向振動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。

つぎに、2組の圧電素子に加える2相正弦波電圧の位相差 ϕ を任意の値としてみよう。すると、(3)式は(5)式に、(4)式は(6)式に一般化できる¹⁰⁾。

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

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

ここで、 ϕ を-90度から+90度まで連続的に変わると、ステータ弾性体に発生するたわみ振動は、進行波から次第に速度を落として $\phi = 0$ でいったん

定在波になり、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歯の表面が描く軌跡が変化するようすを、(5)式および(6)式から算出した。

結果を図2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周期間に含まれる歯の傾きと高さのある瞬間をとって表したもので、直線の上端は個々の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し、たわみ振動の移動とともに近似的な楕円軌道を描くことがわかる。特に $\phi = 0$ のときは直線的な軌道になる。

歯は、たわみ振動の一周期当り8個刻まれている。波の進行につれて、この内1個が他より突出してロータを持ち上げ、トルクを発生する。

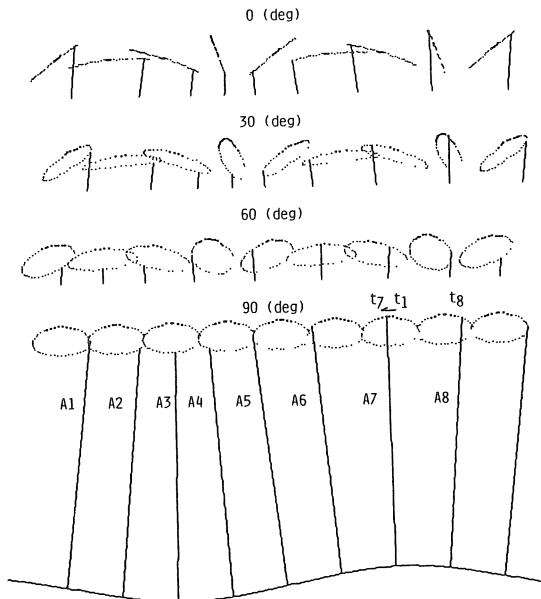


図2 駆動正弦波の位相差と歯の運動

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

場合であり、このとき全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）は全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)式で表される楕円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（約40 kHz）の周期で正弦波状に変動するが、ロータ回転速度（最大180 rpm）はこの間ほぼ一定値をとるので、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、図2に示したように歯面はロータを左右斜方向へ突き上げるが、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）を発生するが、その値は静止保持トルクに比べて小さい。

図3は、2相正弦波電圧の位相差に対する起動トルクと回転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、横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無いとした。

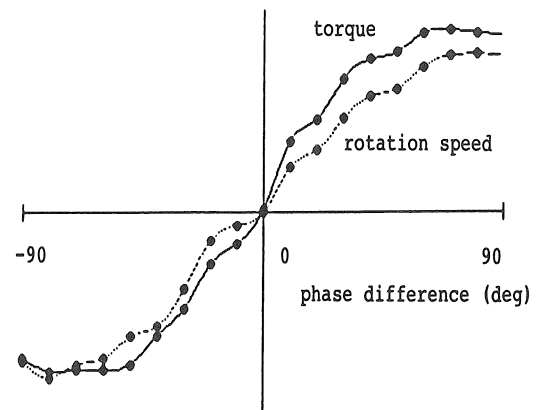


図3 速度と起動トルク（シミュレーション）

4. コンプライアンス制御系の構成

コンプライアンス動作を実現する角度制御系をメインループとし、トルク制御のための位相制御系をマイナーループとしてデジタル制御系を構成し、制御装置を実現した。図4に概要を示す。

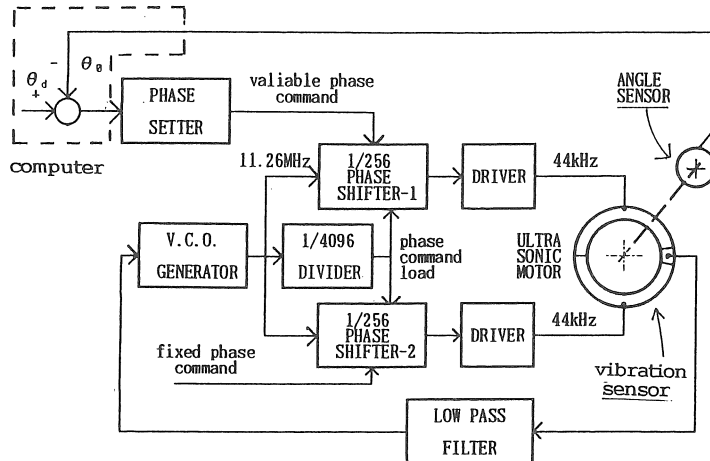


図4 制御系の構成

トルク制御系へ加える位相制御信号を ϕ とすると、

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

ここに、 θ_d は角度目標値、 θ_o 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 $(\theta_o - \theta_d)$ 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、 $-90^\circ \leq \phi \leq +90^\circ$

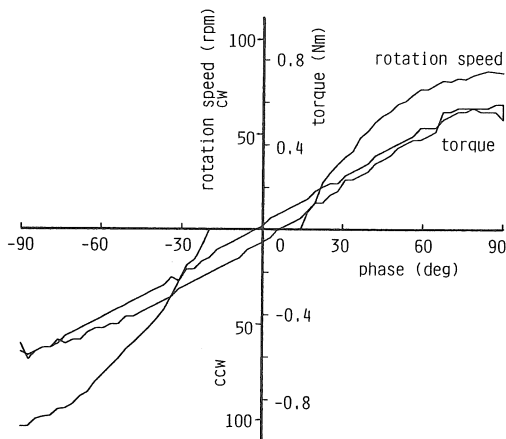


図5 速度と起動トルク (実測値)

とすれば、

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

となる。ここに、 k は弾性係数である。

5. 結果および考察

5.1 コンプライアンス特性

図5はトルク制御系について測定した位相-起動トルクおよび位相-無負荷回転速度の実測値である。実線は起動トルク、点線は回転速度を表す。前掲したシミュレーション結果(図3)と実測値の間に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。

図6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。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)式の線形化関数を導入していない。

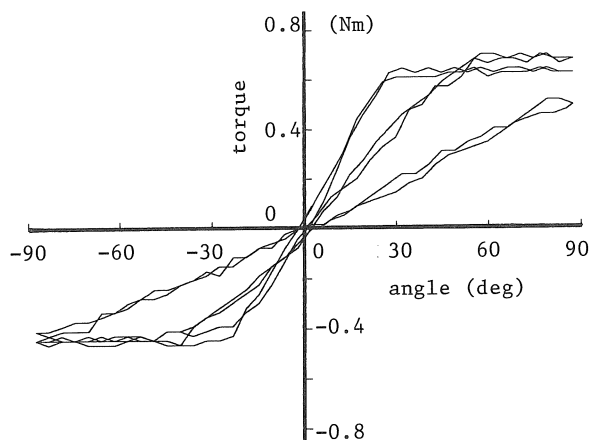


図6 系の弾性特性

図から、この系が弾性特性を持ち、その係数を変化できることがわかる。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。

5. 2 粘性摩擦特性

見かけの等価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無負荷加速特性を測定した。起動トルクは位相差を調節して設定した。出力軸を含むロータの無負荷慣性モーメントは $0.07 \times 10^{-4} \text{Kg} \cdot \text{m}^2$ と小さいため、起動後加速して直ちに終速度（等速度）に達する。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した。

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

ただし、 τ : 起動トルク

ω : 終速度

図7は、位相差—等価粘性係数特性である。全体として 0.05Nms/rad 程度の粘性係数を示し、その値が位相差0度に近づくにつれてやや大きくなる傾向をもつことがわかる。

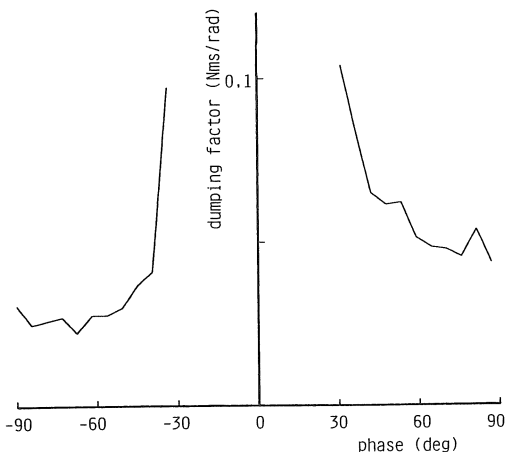


図7 位相差による等価粘性係数の変化

6. あとがき

進行波型超音波モータを駆動する2相正弦波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¹¹⁾。その弾性係数は、0から最大値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、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、目標角度に近付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。

参考文献

- 1) M. T. Mason : " Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", IEEE SMC-11-6, 418/432(1981)
- 2) 加藤厚生, 伊藤正美 : " 等速度運動中の筋粘弾性の調節", 電子情報通信学会論文誌 A, J74-A, No. 3, 560/567(1991)
- 3) 伊藤宏司, 辻敏夫 : " 筋骨格系の双線形制御と義肢制御への応用", 電気学会論文誌, 105C, 202/208(1985)
- 4) 見城尚志, 指田年生 : 超音波モータ入門, 総合電子出版, (1991)
- 5) Hatsuzawa T., Toyoda K. and Tanimura Y. : Speed Control Characteristics and Digital Servo-system of a Circular Traveling Wave Motor, Rev. Sci. Instrum. 57(11), 2886/2890 (1986)
- 6) 永井正夫, 日比浩一, 山田敏夫 : 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)
- 7) 泉野有司, 川瀬透, 中岡睦雄 : 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)
- 8) 上羽良行 : 回転型超音波モータ, 日本音響学会誌, Vol. 44, 7, 519/524(1988)
- 9) 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)
- 10) メカトロニクス編集部編 : 最先端のアクチュエータ, 技術調査会発行, 145/150(1986)
- 11) 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ス動作", 計測自動制御学会論文集, 27-11, 1290/1295 (1991)

(受理 平成4年3月20日)