

# 超音波モータを使用した ダイレクトドライブマニピュレータの制御

## Control of Direct Drive Manipulator using Ultrasonic Motor.

近藤直樹<sup>†</sup>  
Naoki.KONDO

成田秀樹<sup>††</sup>  
Hideki.NARITA

加藤厚生<sup>†††</sup>  
Atsuo.KATO

The traveling wave ultrasonic motor (USM) has many good characteristics that is compact size, light weight, low speed rotation, high speed response and silent motion. The many characteristics are good for the direct drive manipulator, but it is not easy to control the speed and torque of the USM from zero to the maximum value continuously by the usual method. So we have developed a new method for the torque and speed control system for the USM, and also developed a compact size light weight direct drive manipulator, which use the USM for the actuators.

The manipulator has two vertical axis joints and moves in the horizontal plane. The torque and speed of the USM were controlled by the phase difference of the two-phase driving signals of the motor. To realize the contact tasks by the compact size and light weight manipulator, we developed the control system that the actuator has the characteristics of compliance and damping in itself. The adjustable compliant motion was realized by the feedback of the output shaft angle and angular velocity of the output shaft. It is realized that the compliant motion likes a dash pot with spring. With the compliance control, some contact tasks were carried out.

### 1. はじめに

ダイレクトドライブマニピュレータは、アクチュエータと関節の間に介入する減速機構をもたないため、これに起因する非線形摩擦やバックラッシュ等がなく、コンプライアント動作を実現するに有利である<sup>1) 2)</sup>。反面、低回転速度で高トルクを要求されるアクチュエータは大型で大重量となり、これを搭載するマニピュレータもこの傾向をまぬがれない、大型で大重量を余儀なくされる。

筆者らは小型軽量でコンプライアントに動作する義手の開発をすすめるなかで<sup>3)</sup>、進行波型超音波モータをアクチュエータとして採用し、これにコンプライアント特性をもたせる技術を開発した。進行波型超音波モータは小型・軽量・低回転速度・高いトルク重量比の特長をもちダイレクトドライブモータとして優れている。反面、トルクや速度の制御が困難であるためサーボモータとしては使いにくい。そこで筆者らは、このモータを駆動する2相正弦波

節する技術を開発し、この技術を使って、出力軸の角度フィードバックにより係数を自由に調節できるコンプライアンス動作と角速度フィードバックにより粘性係数を自由に調節できる粘性摩擦動作を実現した<sup>1) 2)</sup>。

並行して、この技術を応用し可変粘弾性マニピュレータの開発をすすめてきた。

### 2. 進行波型超音波モータの可変粘弾性制御

#### 2.1 位相差一トルク、速度制御

進行波型超音波モータは90度位相の異なった2相正弦波で駆動され、そのときステータに発生するたわみ振動の進行波によってロータにトルクを発生する。このとき、駆動正弦波の位相差を+90度から-90度にわたって連続的に変化すると、進行波の速度も連続的に変化する。速度は、+90度のとき時計回りに最大値をとるとすれば、-90度のとき反時計回りに最大値となり、0度のとき停止して定在波となる。進行波の速度変化にともなってロータに発生するトルクとロータの回転速度も変化する。

次式は、ステータ歯面に生じる楕円振動の円周方向成分と垂直方向成分を表す。

<sup>†</sup> 愛知工業大学 大学院生 (豊田市)

<sup>††</sup> 三幸電子 (名古屋市)

<sup>†††</sup> 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

の位相差を制御して回転速度とトルクを連続的に調

$$\xi = \xi_0 \sin(nX) \sin(\omega t) + \xi_0 \cos(nX) \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$\zeta = \zeta_0 n(H + T/2) \sin(nX) \sin(\omega t) + \zeta_0 n(H + T/2) \cos(nX) \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

ただし、

$\xi$  : 楕円運動のステータ円周方向成分

$\xi_0$  :  $\xi$  の最大値

$\zeta$  : 楕円運動のステータ垂直方向成分

$\zeta_0$  :  $\zeta$  の最大値

$\phi$  : 駆動正弦波の位相差

$\omega$  : たわみ振動の角周波数

$n$  : ステータリングに発生するたわみ波の数

$H$  : ステータリングの歯の高さ

$T$  : ステータリングの厚さ

$X$  : 円周方向上の位置

$t$  : 時間

上式では、 $\phi$  を変化させることによって  $\xi$  と  $\zeta$  が共に変化する様子がわかる。

進行波型超音波モータでは、トルクはステータとロータ間に働くクーロン摩擦力に依存し、非駆動状態では静止摩擦、駆動状態ではすべり摩擦によって発生すると考えられる。すなわち、トルクはステータとロータ間の垂直抗力によって変化する。非駆動状態ではステータのたわみ運動が停止し、ステータに刻まれた72個の櫛歯全てがロータに接触し、ステータとロータ間の摩擦は静止摩擦となりこのとき発生するトルクは言わば静止保持トルクで、最大値を示す。

一方、駆動状態ではステータ上に9波のたわみ振動の進行波が発生し、1波あたり8個ある櫛歯の1個がロータに押しつけられて垂直抗力を発生する。Fig. 4の結果はすでに報告したシミュレーション結果と良く一致している<sup>1) 2)</sup>。垂直抗力はロータがステータの櫛歯に弾性力で押しつけられているため、櫛歯の表面が描く楕円運動の垂直方向成分；式(2)の $\zeta$ に比例するとし、回転速度は櫛歯の楕円運動の円周方向成分；式(1)の $\xi$ に比例するとした。

## 2.2 超音波モータの可変粘弾性制御

Fig. 1にモータ軸角度を検出し、トルク・速度制御系に位相制御信号を与えるPD制御系を示す。P

D制御により軸の回転に対して粘弾性特性を持たせた。さらに、PDゲインを環境に応じて独立に調整し、モータの出カインピーダンス<sup>4)</sup>を制御する可変粘弾性制御を採用した。

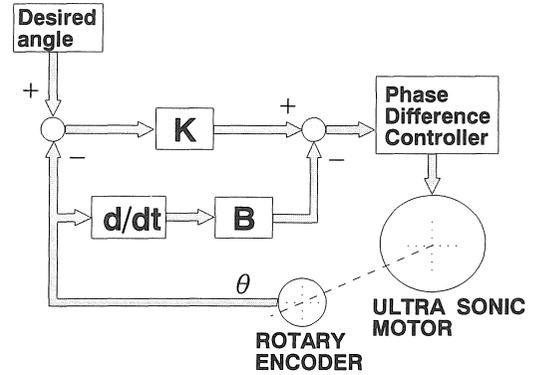


Fig. 1 PDコントロール系

## 3. 制御系の構成

Fig. 2に基本的な制御系の構成を示す。大別して位相制御系はデジタル回路で構成し、PD制御系はソフトウェアで構成した。使用した進行波型超音波モータは新生工業製USR60Wで角度検出用ロータリ磁気エンコーダを搭載している。起動トルク約1.2Nm、位相差90度の時の定格回転数90rpm、定格出力5.5Wである。

このモータを駆動する正弦波の周波数は約40kHzであり、この1周期を256分の1の精度で位相制御するため、システムのクロック周波数を約40kHz  $\times$  256 = 約10.24MHzとした。位相シフト回路は2組のカウンタで構成した。一方を固定位相とし、クロック128カウントで出力パルスを得ている。他方は可変位相とし、クロック1カウントから256カウント、すなわち固定位相の128カウントに対し-127から+128カウントの範囲で出力パルスを得ることが可能である。実際には-64から+64カウントの範囲で使っている。この範囲は位相差-90度から+90度に対応する。カウント値指令はコンピュータからカウンタへプリセット値として与えられ駆動信号1周期毎に更新される。

位相差決定用カウンタ出力のパルスは次段のパルス幅決定用カウンタのゲートをオープンする。パルス

ス幅決定用カウンタはシステムクロックを0から128カウントの範囲でカウントし、駆動正弦波の源となる方形波のデューティーファクタを決定する。

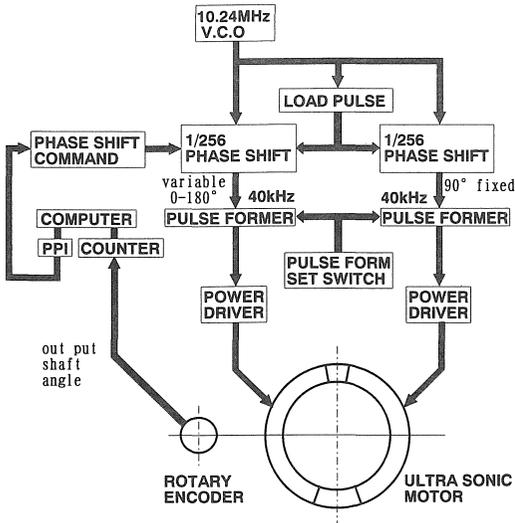


Fig. 2 超音波モータコントローラ

この源方形波は駆動正弦波1個につき128クロックの位相差で2組作られ、それぞれ電力増幅回路を経て1個のパルストランスへ供給され合成されて、超音波モータの共振特性によって波形整形されて正弦波になる。正弦波の歪率は源方形波のデューティーファクタを調節して低減している。デューティーファクタを0にするとモータは非駆動状態となり、停止して保持トルク1.4Nmを発生する。

モータ軸の回転角度はロータリーエンコーダで検出し、カウンタ回路を経てコンピュータへ取り込んだ。コンピュータでは数値微分によって回転角速度を算出し、弾性動作の目標角、弾性ゲイン、粘性ゲインを決定して、位相差目標値を算定する。

#### 4. 超音波モータの制御特性

##### 4.1 位相差-トルク特性

Fig. 3は、駆動二相正弦波の位相差に対するトルク特性の測定値である。最大トルクの範囲内で連続的な調節が可能であることを示している。この位相差-トルク特性曲線をもとに、PD制御による粘性弾性動作時に使用される位相差データを算出する。

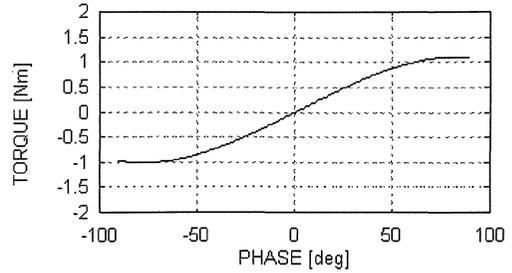


Fig. 3 位相差-トルク特性

##### 4.2 弾性特性

Fig. 4は角度フィードバック系による弾性トルク特性の実測値である。弾性係数を適当な値に設定した状態で、モータ軸を外部トルクにより変移させて測定した。図は3つの弾性係数について角度-弾性トルク特性を示している。最大トルクの範囲内で良好な線形性をもつことがわかる。

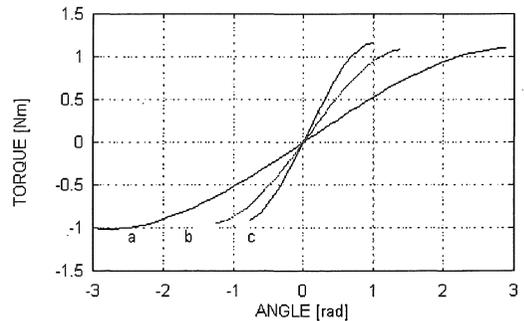


Fig. 4 弾性トルク特性

##### 4.3 粘性特性

Fig. 5は速度フィードバック系による粘性トルク特性の実測値である。

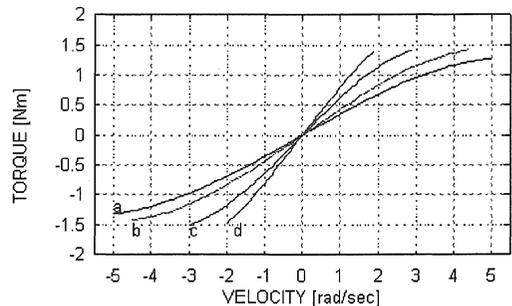


Fig. 5 粘性トルク特性

粘性係数を任意の値に設定した状態で、モータ軸を外部トルクにより回転しながら測定した。グラフ a、b、c の順に係数の高い状態を示す。最大トルクの範囲内で良好な線形性を示すことがわかる。グラフ a は、粘性係数ゼロの状態に測定した結果であり、モータ固有の粘性を示す。グラフよりモータは、約  $0.33 \text{ Nm} \cdot \text{s} / \text{rad}$  の粘性を持つことがわかる。

5. 二軸型DDマニピュレータの可変粘弾性制御

5.1 垂直二軸型DDマニピュレータ

進行波型超音波モータ自身の持つ特徴（低速高トルク、高応答性、小型軽量）を生かし開発した可変粘弾性モータシステムをアクチュエータとして垂直二軸（SCARA型<sup>6)</sup>）直列駆動型マニピュレータを製作した。直列駆動型としたのは、並列駆動型に比べて機構が簡単で設計しやすくまた可動範囲が広いからである。また、当初の目的としたコンプライアンス動作、接触作業実験等を行うには二自由度で十分であり、重力項を無視できることなどから垂直二軸型を採用した。Fig. 6 に構造を示す。

Fig. 7 はマニピュレータのモデル図である。物理的な定数を表. 1 に示した。定数  $l_i, l_{gi}, I_i, m_i$  はそれぞれリンクの長さ、重心位置、アーム重量、慣性性能率である。

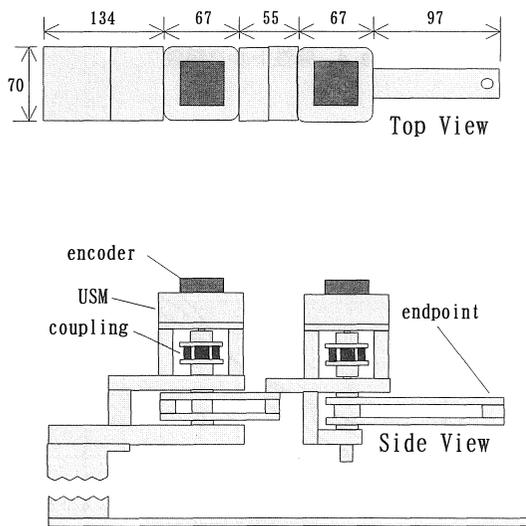


Fig. 6 二自由度SCARA型マニピュレータ

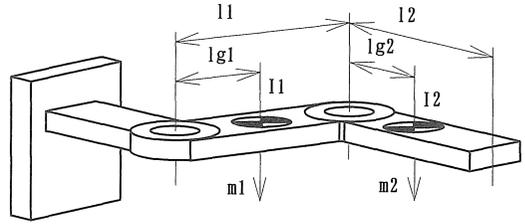


Fig. 7 マニピュレータのモデル図

表. 1

	LINK1	LINK2
m (kg)	1.0785	0.0625
l (m)	0.12	0.12
lg (m)	0.102	0.089
I (kgm <sup>2</sup> )	0.015	$6.6 \times 10^{-4}$

5.2 動作特性

Fig. 8、Fig. 9 にマニピュレータのステップ応答特性の実測値を示す。肘関節を固定した状態で肩関節に任意のコンプライアンスを与え目標角を変化させて計測した結果である。

Fig. 8 は粘性係数を一定にし弾性係数のみを変えた場合である。グラフ a の状態が弾性係数が大きく、b、c の順に係数が小さい状態を示す。弾性係数が小さくなるにつれて、振動周波数の下がる様子がわかる。

Fig. 9 は、弾性係数を一定にした状態で粘性係数を変えた場合の応答を示している。グラフ a は、モータの固有粘性を打ち消すために粘性係数を負にして等価粘性を零にした状態（自由振動状態）で測定したものである。

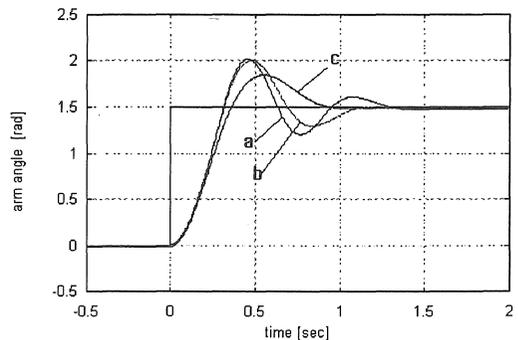


Fig. 8 弾性ステップ応答

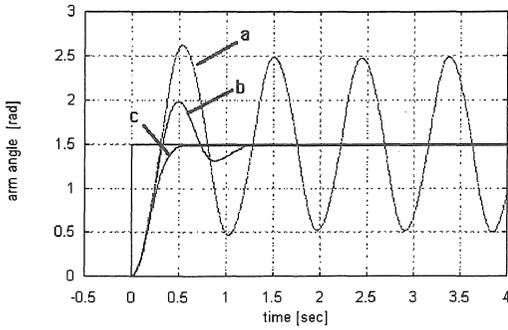


Fig. 9 粘性ステップ応答

グラフbは、粘性係数をゼロにしモータの固有粘性を残した状態である。グラフcは、正の粘性力を持たせた応答であり、臨界制動の状態を表わしている。

6. 二自由度ロボット制御

6.1 剛性制御

第5節の実験はマニピュレータの一軸のみのステップ応答特性であり、二自由度ロボットの制御をしていない。この節ではマニピュレータに搭載された二つのモータを使い、マニピュレータの手先にコンプライアンスをもたせることを考える。

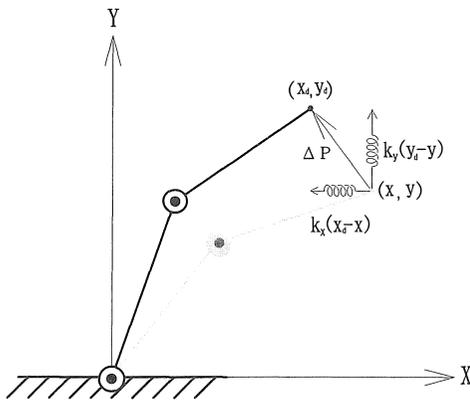


Fig. 10 剛性制御

コンプライアンス制御の実現法の一つに、サーボ剛性を調節することにより手先にバネ特性を実現する剛性制御(Stiffness Control)がある。PD制御が関節角変位をもとにトルクを生成しモータ軸にバネ特性を実現するのにに対し、剛性制御は手先の位置変

位により発生する手先の力を各関節に搭載されたモータが発生するトルクに配分することでロボットの手先にバネ特性を実現する。Fig. 10に剛性制御の概念を示す。

図に示すように、手先の位置変位に剛性ゲイン、 $k_x$ 、 $k_y$  をかけることにより変位に応じた力を手先に発生させ、あたかもバネのように動作させる。この剛性ゲインを変化させることにより、サーボ剛性の硬さ(あるいは柔らかさ)を変化し、手先に発生する力を制御することができる。剛性ゲインはx、y方向に任意の値を設定できる。

以下に考え方を示す。外部トルクによる手先の位置変位を、

$$\Delta P = \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix}$$

とおく。ここに、P は手先位置を表す直交座標系のベクトルであり、 $\Delta P$ は手先変位ベクトルを表すとす。x、y は手先座標、 $x_d$ 、 $y_d$  は目標手先座標を表している。

実現したい手先剛性を、

$$K_p = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}$$

とおく。手先の変位により発生する力を、

$$F = K_p \Delta P$$

とすると、手先力とアクチュエータの発生するトルクは、 $\tau = J^T F$  の式により関係づけられるので、制御入力は、

$$\tau = J(\theta)^T K_p \Delta P$$

の式で求められる。マニピュレータのヤコビ行列の転置行列をとると、

$$J(\theta)^T = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

であるので、各アクチュエータへの制御入力は、

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = J(\theta)^T \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \end{bmatrix}$$

となる. ここに  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  は各モータの発生するトルク,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  は関節角度である.

剛性制御は位置制御と力制御の中間的な特性であるバネ特性を手先に実現することで, 不確定な作業空間内での不意の外乱に対して, 常に制御動作が安定であるという特徴をもつ.

この剛性制御を, 開発した二軸マニピュレータに適用し, 自由空間内での位置制御性と, 障害物との接触作業による拘束空間での制御安定性の実験を行った.

## 6.2 制御実験

Fig. 11とFig. 12は実験結果である. ロボットに作業空間内で任意に設定した目標軌道円上を運動させ, ロボットの手先軌道を一定時間間隔で測定した.

自由空間での位置制御性は高精度を求めなければ, ほぼ目標軌道を追従できる. また拘束空間との接触動作では制御性に問題なく安定動作が可能である.

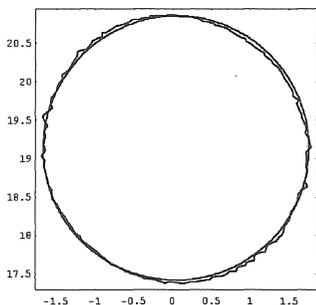


Fig. 11 自由空間での位置制御特性

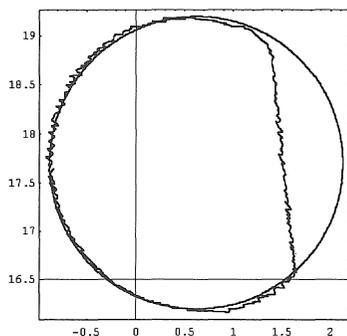


Fig. 12 拘束空間での接触動作

拘束空間での接触作業動作はカフィードバックを用いていないため, 力制御についてはオープンループである. このため接触対象物との接触力が調節できない. よって, 手先剛性が高い場合には接触対象物やロボットの手先自身に余計な力が加わるという欠点がある. カフィードバックを行い制御系に加えれば, 力制御が可能となるはずである.

## 7. まとめ

製作したマニピュレータは, カフィードバック機構を持たず各関節角度による姿勢情報のみによって制御されている. 各関節に付けられた超音波モータの可変粘弾性制御によってマニピュレータの手先にコンプライアンスを持たせることができた. そして, 手先のコンプライアンスを水平方向に対して自由に制御することを実現した. またマニピュレータに剛性制御を適用することにより手先にバネ特性を実現し, 自由空間での位置制御と拘束空間での接触動作の実験を行い, ほぼ良好な結果を得た.

現段階では接触作業の一例であるクランク回し<sup>7)</sup>や二台のマニピュレータによる対象物との接触動作も成し遂げている. これについては稿を改めて述べる.

### 【参考文献】

- 1) 加藤, 伊藤 (宏), 伊藤 (正) : 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, 1290/1295 (1991)
- 2) A. Kato, K. Ito, M. Ito : Adjustable Compliant Motion of Ultrasonic Motor, Journal of Robotics and Mechatronics, 5-5, 434/437, (1993)
- 3) 伊藤 (宏), 永岡, 辻, 加藤, 伊藤 (正) : 超音波モータを用いた3自由度前腕筋電義手, 計測自動制御学会論文集, 27-11, 1281/1289 (1991)
- 4) N. Hogan : Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2, 1047/1054 (1987)
- 5) 泉野, 中岡 : 進行波型超音波モータ駆動系の適応制御技法による高性能化, 電気学会論文誌D, 110-11, 1147/1153 (1990)
- 6) 牧野, 村田, 古屋 : SCARAロボットの開発, 精密機械学会論文集, 48-3, 92/97 (1982)
- 7) 伊藤, 辻, 杉野 : 回転作業における生体運動系のインピーダンス調節, 計測自動制御学会論文集, 26-4, 443/450 (1990)

(受理 平成8年3月19日)