

ニューラルネットワークを用いた多自由度超音波モータの制御法

Method for Controlling Multi-DOF Ultrasonic Motor using Neural Network

正 竹村 研治郎 (慶大) 正 前野 隆司 (慶大)

Kenjiro Takemura, Dept. of Mech. Eng., Keio University, Yokohama, kenjiro@mmm-keio.net
Takashi Maeno, Dept. of Mech. Eng., Keio University, Yokohama, maeno@mech.keio.ac.jp

Abstract: A multi-DOF ultrasonic motor developed by authors is suitable for constructing a smart multi-DOF motion unit. In this study, a control method for the multi-DOF ultrasonic motor using a neural network is constructed. First, an inverse model of the multi-DOF ultrasonic motor is newly developed by use of transcendental knowledge about ultrasonic motors and neural network technique in order to deal with redundant and non-linear driving characteristics of the motor. Then, the control method of the multi-DOF ultrasonic motor using the inverse model is proposed. Using a method, the spherical rotor of the multi-DOF ultrasonic motor can be rotated around arbitrary rotational axis. Finally, the motion control test using the proposed control method is conducted. As a result, an effectiveness of the control method is confirmed.

Keywords: Ultrasonic motor, Neural network, Control, Multi-DOF actuator, Non-linearity

1. 結論

近年、ヒューマノイドロボットのようにシステムの多自由度化が進むにつれて、アクチュエータ数の増加が小型軽量化に対して問題となっている。筆者らが開発した多自由度超音波モータ[1]は、単一振動子によって球状回転子を直交3軸周りに回転可能であるため、複雑で多自由度な動作を必要とするシステムに利用することが期待される。しかし、本モータの特性には冗長性・非線形性があり、その制御は容易ではない。本研究では、超音波モータに関する先験的知見やニューラルネットワークを用いて本モータの逆モデルを構築し、本モデルを利用した制御法を開発した。

2. 多自由度超音波モータの逆モデル

多自由度超音波モータは円柱の縦振動1次モードと曲げ振動2次モードを利用して、回転子を直交3軸周りに回転させるモータである[1]。駆動特性の冗長性・非線形性を考慮し、以下の手順によって逆モデルを構築した。

2.1. 駆動状態の分類

座標系を Fig. 1 のように取ると、回転子の運動は回転軸ベクトル N^0 によって表現できる。つまり、回転軸ベクトル N^0 の方向が回転軸を、大きさが各座標軸周りの相対回転数を表す(絶対値成分の最大値を1とする)。回転軸 N^0 の各成分を発生させるには、それぞれに対応した固有モードの組合せがあり[1]、その回転方向は固有モードの時間的位相差に依存している。そのため、駆動状態を回転軸 N^0 の存在する象限によって8通りの cls に、その絶対値最大成分によって3通りの subcls に分類した。つまり、cls および subcls の組合せから計24通りの駆動状態を考えることによって、各状態に対応した固有モードの位相関係を Table 1 のように決定することができる。ただし、この位相関係は、超音波モータの効率に関する先験的知見を考慮して、回転軸 N^0 の絶対値最大成分を発生させる2つの固有モードの位相差が $\pi/2$ と成るように決定した。また、Table 1 の駆動状態25~28は、2つの固有モードのみで駆動可能、あるいは3つの固有モードのうち2つが同(逆)

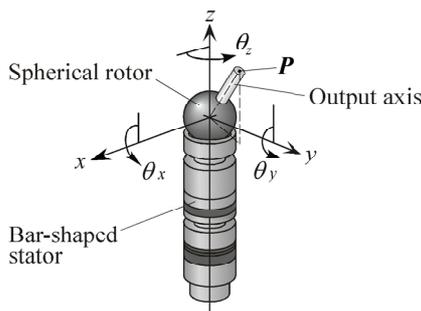


Fig. 1 Definition of coordinate and output axis

位相で駆動可能な特殊な場合である。

2.2. 非線形特性の写像

前節の分類によって、各駆動状態に対する2つの固有モードの位相関係および相対振幅を決定した。残る1つの固有モードに関する位相および相対振幅と回転子の駆動状態との非線形関係[2]を写像するために、ニューラルネットワークを用いた。つまり、各駆動状態に対して回転軸 N^0 の絶対最大成分以外の2成分を入力し、未定な位相あるいは相対振幅を出力する3相ニューラルネットワークを構築した。教師信号を多自由度超音波モータの駆動状態推定法[2]を用いて制作し、学習には誤差逆伝播法とモーメント法を併用した。中間層を5ユニットとした場合の学習結果の一例を Fig. 2 に示す。

2.3. 逆モデルの構築

2.1 節での分類および2.2 節で作成したニューラルネットワークを用いて多自由度超音波モータの逆モデルを構築した。逆モデルのブロック線図を Fig. 3 に示す。分類器で駆動状態を分類し、NN 変換器および線形変換器で駆動状態1~24および25~28に対する固有モードのパラメータを決定する。なお、本モデルは、ある回転軸 N^0 を実現する3つの固有モードの位相および相対振幅を出力するものであるため、回転数の大小は考慮していない。

Table 1 Combination of phases and amplitudes for each class

State ID	cls	subcls	N^0			Maximum ingredient	Phase [rad]			Relative amplitude		
			N_x^0	N_y^0	N_z^0		ϕ_{3ax}	ϕ_{3ay}	ϕ_{3az}	A'_{3ax}	A'_{3ay}	A'_{3az}
1	I	(i)				$ N_x^0 $	$-\pi/2-0$	$\pi/2$	0	0-3	1	1
2		(ii)	+	+	-	$ N_y^0 $	0	$\pi/2-\pi$	$\pi/2$	1	0-3	1
3		(iii)				$ N_z^0 $	0	$\pi/2$	$0-\pi/2$	1	1	0-3
4	II	(i)				$ N_x^0 $	$\pi/2-\pi$	$\pi/2$	0	0-3	1	1
5		(ii)	+	-	+	$ N_y^0 $	$\pi/2$	$0-\pi/2$	0	1	0-3	1
6		(iii)				$ N_z^0 $	$\pi/2$	0	$-\pi/2-0$	1	1	0-3
7	III	(i)				$ N_x^0 $	$0-\pi/2$	$\pi/2$	0	0-3	1	1
8		(ii)	+	-	-	$ N_y^0 $	$\pi/2$	$\pi/2-\pi$	0	1	0-3	1
9		(iii)				$ N_z^0 $	0	$\pi/2$	$-\pi/2-0$	1	1	0-3
10	IV	(i)				$ N_x^0 $	$0-\pi/2$	0	$\pi/2$	0-3	1	1
11		(ii)	-	+	+	$ N_y^0 $	0	$-\pi/2-0$	$\pi/2$	1	0-3	1
12		(iii)				$ N_z^0 $	$\pi/2$	0	$\pi/2-\pi$	1	1	0-3
13	V	(i)				$ N_x^0 $	$-\pi/2-0$	0	$\pi/2$	0-3	1	1
14		(ii)	-	+	-	$ N_y^0 $	0	$0-\pi/2$	$\pi/2$	1	0-3	1
15		(iii)				$ N_z^0 $	0	$\pi/2$	$\pi/2-\pi$	1	1	0-3
16	VI	(i)				$ N_x^0 $	$\pi/2-\pi$	0	$\pi/2$	0-3	1	1
17		(ii)	-	-	+	$ N_y^0 $	$\pi/2$	$-\pi/2-0$	0	1	0-3	1
18		(iii)				$ N_z^0 $	$\pi/2$	0	$0-\pi/2$	1	1	0-3
19	VII	(i)				$ N_x^0 $	$-\pi-\pi/2$	$\pi/2$	0	0-3	1	1
20		(ii)	+	+	+	$ N_y^0 $	0	$-\pi-\pi/2$	$\pi/2$	1	0-3	1
21		(iii)				$ N_z^0 $	$\pi/2$	0	$-\pi-\pi/2$	1	1	0-3
22	VIII	(i)				$ N_x^0 $	$\pi/2-\pi$	$-\pi/2$	0	0-3	1	1
23		(ii)	-	-	-	$ N_y^0 $	0	$\pi/2-\pi$	$-\pi/2$	1	0-3	1
24		(iii)				$ N_z^0 $	$-\pi/2$	0	$\pi/2-\pi$	1	1	0-3
25			1,-1	0	0	$ N_x^0 $	0	$0,\pi/2$	$\pi/2,0$	0	1	1
26			0	1,-1	0	$ N_y^0 $	$0,\pi/2$	0	$\pi/2,0$	1	0	1
27			0	0	1,-1	$ N_z^0 $	$0,\pi/2$	$\pi/2,0$	0	1	1	0
28			N_x^0	N_y^0	0	—	$0,\pi/2$	$\pi,\pi/2$	$\pi/2,0$	$0-\pi$	$0-\pi$	1

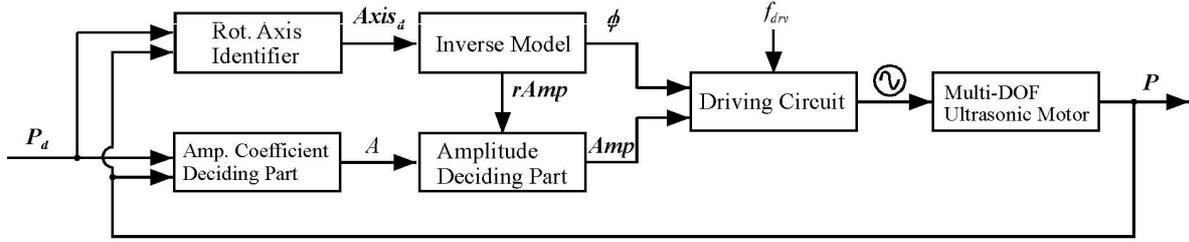


Fig. 4 Block diagram of control method

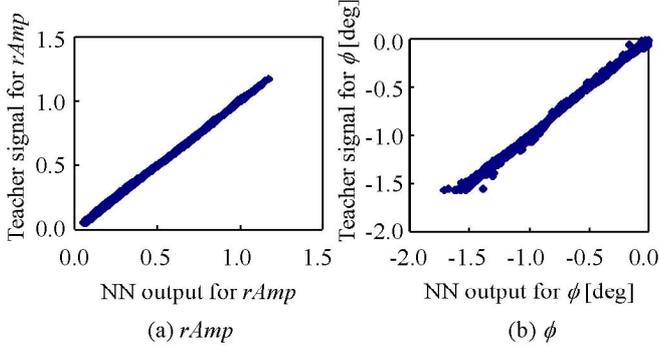
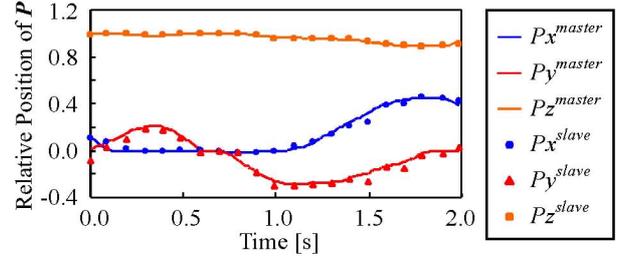
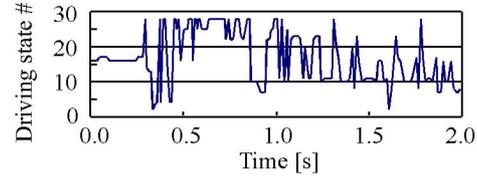


Fig. 2 Result of NN training



(a) Position history of the tip of output axis



(b) History of driving state

Fig.5 Result for master-slave control test

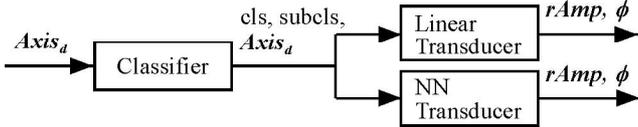


Fig. 3 Construction of inverse model

3. 多自由度超音波モータの制御法

2章で構築した逆モデルを用いて、多自由度超音波モータの制御法を提案する。Fig. 4に本制御法のブロック線図を示す。ただし、制御量 P および目標量 P_d は Fig. 1 に示した出力軸の先端位置およびその目標位置である。各ブロックの役割は以下のとおりである。

回転軸決定器では、式(1)に従って制御量 P および目標量 P_d から回転子の所望の回転軸 N_d を決定する。

$$N_d = \frac{P \times P_d}{|P \times P_d|} \quad (1)$$

逆モデルは回転軸 N_d から多自由度超音波モータへの3相入力信号の相対振幅 $rAmp$ と位相 ϕ を決定する (cf. 2章)。

振幅係数決定器は制御量 P および目標量 P_d から入力信号の振幅係数 A を決定する。たとえば、式(2)のような比例制御則によって構成されればよい。

$$\begin{cases} A = K_p \cdot \Delta\theta \\ \Delta\theta = \frac{|P \cdot P_d|}{|P| |P_d|} \end{cases} \quad (2)$$

振幅決定器は逆モデルの出力である相対振幅 $rAmp$ と振幅係数決定器からの出力である振幅係数 A から、式(3)によって3相入力信号の振幅 Amp を決定する。

$$Amp = A \cdot rAmp \quad (3)$$

駆動回路は、3.1 から 3.4 節に示した各ブロックによってパラメータが決定された3相交流信号を発生させる。ただし、交流信号の周波数 f_{drv} は多自由度超音波モータで利用する縮退した3つの固有モードの固有振動数 f_0 とほぼ一致させる。

4. 実験

3章で提案した制御法を用いて、Fig. 1 に示した出力軸先端位置を制御した。つまり、ジョイスティックをマスター装置、本モータをスレーブ装置としてマスタースレーブシステムを構築し、制御実験を行った。Fig. 5 に実験結果を示す。ただし、駆動周波数は 39.8 kHz、最大入力電圧は 24 V である。(a)より、出力軸先端位置がマスターの動きに追従していることが確認された。(b)は各瞬間ごとに逆モデル内で求められる駆動状態の履歴である (cf. Table 1)。本手法により、駆動状態が切り替えられつつ制御が実現されていることがわかる。

本研究で提案した逆モデルおよび制御法は、筆者らが開発した多自由度超音波モータ以外のモータ (たとえば[3]) にも適用可能である。

5. 結論

本研究では、多自由度超音波モータの逆モデルを構築し、本モデルを用いた制御法を開発した。振動子への3相入力信号のパラメータのうち、振幅および位相の計6つを操作パラメータとして扱うことによって、回転子に3次元直交座標系での任意軸周りの駆動を実現した。

参考文献

- [1] K. Takemura *et al.*: Design and Control of an Ultrasonic Motor Capable of Generating Multi-DOF Motion, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol. 6, No. 4, pp. 499-506, 2001.
- [2] 竹村, 前野: 多自由度超音波モータの駆動状態推定法, 日本音響学会誌, Vol. 57, No. 7, pp. 445-452, 2001.
- [3] Amano *et al.*: An Ultrasonic Actuator with Multi-degree of Freedom Using Bending and longitudinal Vibrations of a sSingle Stator, Proc. IEEE Ultrasonics Symposium, Vol. 1, pp. 667-670, 1998.