研究論文

超音波リニアアクチュエータを用いた三自由度 球面モータの研究*

河井元良** 林 巖*** 岩附信行***

Research of a Spherical Motor with Three-Degree-of-Freedom Driven by Ultrasonic Linear Actuators

Motoyoshi KAWAI, Iwao HAYASHI and Nobuyuki IWATSUKI

To realize an actuator with many degrees of freedom which moves like a human wrist, a spherical motor with three-degree-of-freedom is tried, the spherical body of which is driven by ultrasonic linear actuators, and consequently, the spherical motor has no limitation on the position of its rotational axis in principle, and can rotate around an arbitrary spatial axis at an arbitrary speed. The spherical body of the motor is a steel bearing ball of 76.2mm in diameter. The six ultrasonic linear actuators are placed at every sixty degrees on the horizontal outer circumference of the ball; a pair of two actuators lying symmetrically regarding the center of the ball induce a rotational torque. In an experiment the ball rotated around the vertical z-axis at 15rpm, and also rotated around other spatial axes adjusting the outputs of the three pairs of actuator.

Key words: motor, spherical motor, actuator, piezoelectricity, three-degree-of-freedom

1. 緒 言

現在の多くの産業用ロボットでは、多自由度の運動を実現するため、電動モータと減速機からなる1自由度アクチュエータを必要な自由度の数だけ組み合わせで用いている。そのため、駆動部分の構造が複雑かつ大型になる傾向がある。また、機構部分の弾性変形や減速機等のバックラッシュなどによる運動誤差が累積し、先端のハンドの位置決め精度や整定時間などを向上させることが難しい。これに対して、もし駆動部分が共通で直角3軸方向の並進運動やそれらの軸回りの回転運動が自由にできるダイレクトドライブ型の多自由度アクチュエータを実現できれば、小型軽量になるとともに運動の高精度化も可能になると考えられる。このような多自由度アクチュエータの例としては、これまでに直流モータの原理を用いた3自由度球面DCサー

ボモータ¹⁾、多軸型圧電モータ²⁾、超音波モータを利用した3自由度球面モータ³⁾などが提案・試作されている。そして、軸受の構造が複雑で出力軸の可動範囲が狭い、出力が小さい、任意の軸回りに回転させることが難しい、等の点が報告されてきた。

本研究ではこのようなダイレクトドライブ型多自由度アクチュエータの一つとして、人間の手首のような運動ができるモータを目標として、球体を超音波圧電リニアアクチュエータ⁴⁾で駆動し、原理的に可動範囲に制限がなく任意の軸回りに任意の速度で回転できる3自由度球面モータの実現を試みることにした。ベアリングボールを球体として用いたプロトタイプを試作し、駆動実験を行ったので報告する。

2. 試作した3自由度球面モータ

球体を空間の任意軸回りに回転させ、その回転速度を制御できるようにするために、図1のように互いに空間的に角度 α (以下、開き角 α と略す)をなす3つの入力角速度ベクトル $\vec{\omega}_k, \vec{\omega}_l, \vec{\omega}_m$ を与え、これらを合成して出力角速度ベクトル $\vec{\omega}_w$ を取り出す方法を用いるこ

*原稿受付 平成4年6月4日

**学生会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科(横浜市緑区長津田町4259)

***正会員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

とした。球体の出力角速度ベクトル $\vec{\omega}_w$ の大きさおよび方向は、入力角速度ベクトル $\vec{\omega}_k$, $\vec{\omega}_l$, $\vec{\omega}_m$ の大きさを調節することによって制御する。

Fig.1 Rotational principle of a spherical motor

Fig.2 Schematic diagram of a prototype of a spherical motor

このような基本構想を基に試作した、3自由度球面モータの概略を図2に、その写真を図3に示す。球体には、加工精度と入手の容易さとの点から、直径76.2mm、表面粗さ $R_{max} = 1.6\mu\text{m}$ 、重量1.9kgのベアリングボールを用い、駆動用アクチュエータには、構造が簡単で使いやすく、応答性が良く、かつパワー/重量比が高いことの点から、超音波圧電リニアアクチュエータ(以下超音波アクチュエータと略す)を用いた。駆動用超音波アクチュエータで球体を支持しかつ駆動する構造が3自由度球面モータとして理想的であるが、今回用いた球体の重量が大きいため、図2のように3個のスラストボールベアリングで支持し、超音波アクチュエータは球体に駆動力のみ与えることとした。超音波アクチュエータは、球体の中心を含む水平なxy平面上60°ごとの位置に6個配置し、球体の中心を挟んで対称の位置にある3対の超音波アクチュエータ対によって、それぞれ入力角速度ベクトル $\vec{\omega}_k$, $\vec{\omega}_l$, $\vec{\omega}_m$ に対応する駆動トルクを与えた。開き角 α は、超音波アクチュエータ対のxy平面に対する角度を手動で調節して設定した。

3. 球体駆動用超音波アクチュエータの基礎実験

3.1 超音波アクチュエータ⁴⁾

Y型またはII型の超音波アクチュエータの構造部はアルミニウム製で、45°にカットした両肩の部分に5mm×5mm×20mm、16μm/150Vの圧電素子Aが接着してある(図5参照)。脚部は5mm×5mm×10mmの角柱形状で、圧電素子によって誘起される高周波振動によりこの先端が楕円運動する。以下の実験では、図4のように周波数 $f_d = 50 \sim 100\text{kHz}$ 、振幅 $V_0 = 3 \sim 10\text{V}$ の矩形波駆動電圧を、周波数 $f_g = 0.5 \sim 3\text{kHz}$ の範囲でDUTY比を50~100%に変化できるON/OFFゲート回路をととして圧電素子に印加した。

3.2 超音波アクチュエータの支持法

図2のように本研究の球面モータでは超音波アクチュエータを6個用いるので、その個体差ができるだけ小さい方が望ましい。そこでホルダに支持する方法

Fig.3 A prototype of a spherical motor

として、エポキシ系接着剤による接着固定、ねじ固定および貫通ピンによる支持法について検討した(図5)。なお、本節では、球体駆動に用いる圧電素子Aの代わりに出力の小さい5mm×5mm×10mm, 8 μ m/150Vの圧電素子Bを接着した超音波アクチュエータを用いた。

水平に置いた鋼製レール(10mm×20mm×300mm, 表面粗さ3 μ m)に滑車を介して吊り下げた重りにより負荷(1~2N)を与え、超音波アクチュエータで駆動しその出力特性を測定した。超音波アクチュエータの予圧力 P はいくつかの簡単な実験を行った後4.9Nとし、駆動電圧振幅 $V_0 = 10V$, DUTY比100%で測定した。得られた結果の一例を図6に示す。図中黒記号は右方向に駆動したとき、白抜き記号は左方向に駆動したときの測定値である。接着固定は、良好な場合には図の(a)のように鋼製レールの移動速度(以下出力速度と呼ぶ)が一番大きかった。しかし接着時のホルダに対する超音波アクチュエータの姿勢の影響が大きく、現在の実験条件では性能をほぼ均一にすることは困難であることがわかった。次に貫通ピン支持は、図の(d)のようにねじ固定より出力速度がやや小さいか同程度であったが、貫通ピンの部分で超音波アクチュエータ自体の超音波振動が吸収されて出力が取り出しにくいことや、超音波振動で貫通ピンがはずれる等の欠点があることがわかった。一方、図の(b), (c)のねじ固定は、出力速度は貫通ピン支持と同程度かやや大きい程度であったが、取り扱いやすくかつ調節が容易であり、個体差が少なかった。以上の点から、超音波アクチュエータのホルダへの支持法としてねじ固定を採用した。

次に、超音波アクチュエータの単体駆動と突合せ駆動の出力を比較した結果を図7に示す。Y型超音波アクチュエータでは、最高出力速度(無負荷時)はほとんど同じであるが、突合せ駆動の最高負荷は単体駆動の

Fig.5 Various fixing methods of actuator

Fig.6 Output velocity for various fixing methods

Fig.4 Driving circuit for piezoactuator

Fig.7 Output velocity for single and pair drive

最高負荷の約3.5倍となった。Ⅱ型超音波アクチュエータにも同様な傾向があり、突合せ駆動時の方が良い特性を示した。この特性の良い突合せ駆動どうしの比較では、Y型超音波アクチュエータはⅡ型超音波アクチュエータに比較して最高出力速度が約1.3倍、最高負荷が約3.5倍大きい結果が得られた。以上の点から、3自由度球面モータにはY型の超音波アクチュエータを突合せ駆動で用いることとした。

3.3 超音波アクチュエータの出力制御法

前節の実験装置を用いて、圧電素子Aを用いねじ支持したY型超音波アクチュエータ単体について予圧力 P による出力の変化を測定した。得られた結果の一例を図8に示す。いずれの負荷の場合にも予圧力4.9N、

Fig.8 Preload and output velocity

Fig.9 Driving frequency and rotational speed

6.9Nのときの出力速度が、予圧力3Nおよび8.8Nのときの出力速度より高く、4.9~6.9Nの範囲が予圧力として適する範囲であることを確認した。

次に、前節に述べた直径76.2mmの球体をY型超音波アクチュエータで突合せ駆動し、超音波アクチュエータの出力制御法として、(1)駆動周波数 f_d を制御する方法、(2)駆動電圧振幅 V_0 を制御する方法、(3)ゲート信号のDUTY比を制御する方法について検討した。

予圧力 $P=4.9$ N、駆動電圧振幅 $V_0=5$ V、ゲート信号周波数 $f_g=1$ kHz、DUTY比100%で、駆動周波数を55~65kHzの範囲で1kHzごとに設定し、球体の回転速度を測定した。その結果を図9に示す。1kHzごとの回転速度は、時計方向および反時計方向ともに、60kHz前後の変化が小さいところと、その両側で大きく変化するところがあり、駆動周波数と球体の回転速度の間に線形関係を見いだすことは難しい。したがって、所定の回転速度が得られるように駆動周波数を調節する方法は適さないことがわかった。

予圧力 $P=4.9$ N、駆動周波数 $f_d=61$ kHzとし、駆動電圧振幅 V_0 を3V、5V、7Vに変化させ、ゲート信号周波数 f_g を1kHz、DUTY比を100%、80%および60%として回転速度を測定した。得られた結果を図10および表1に示す。表中 N_7-N_3 は $V_0=7$ Vと $V_0=3$ Vのときの回転速度の差、 $N_{100}-N_{60}$ はDUTY比100%と60%のときの回転速度の差を示す。この測定結果から、DUTY比80%のときの回転速度の変化が11rpmであり、DUTY比100%のときと60%のときの回転数の変化20rpmに比較して小さかったが、いずれの場合にも駆動電圧と球体の回転速度の間にはほぼ線形関係があり、駆動電圧の調節により回転速度を調節することが可能であることがわか

Fig.10 Driving voltage and rotational speed when driven by a pair of linear piezoactuator

った。また、DUTY 比を 100% から 60% に小さくしたとき、回転速度は 20rpm ($V_0=5V$) ~ 22rpm ($V_0=3V, 7V$) 低下した。このことから DUTY 比の調節により約 20rpm 程度回転速度を調節できることがわかった。

以上の実験結果から、本研究では超音波アクチュエータの駆動電圧振幅の調節により球体の大略の回転速度を設定し、ゲート信号の DUTY 比の調節により回転速度の微調整を行う方法を採用することとした。

4. 3 自由度球面モータの駆動実験

3 組の超音波アクチュエータ対を用いて球体の駆動実験を試みた (図 2 参照)。予圧力 $P=4.9N$ 、駆動周波数 $f_d=61kHz$ 、ゲート周波数 $f_g=1kHz$ 、DUTY 比 100% とし、3 組の超音波アクチュエータ対の駆動電圧振幅をすべて等しく $V_0=(5V, 5V, 5V)$ (対応する回転速度は (31rpm, 31rpm, 31rpm)) として z 軸回りの回転駆動を試みた。測定した負荷トルクと回転速度の関係を図 11 に、無負荷時と $14.6 \times 10^{-3}Nm$ 負荷時の回転数を表 2 に示す。なお負荷トルクは、図 3 のように球体に接着した出力軸にひもを巻きつけ、その他端に滑車を介して重りを吊り下げることによって与えた。

開き角 $\alpha=0^\circ$ 、つまり 3 組の超音波アクチュエータ対のそれぞれの対による球体の回転軸をすべて等しく z 軸としたときの回転速度は 24rpm (無負荷時) となり、1 組の超音波アクチュエータ対で駆動した前節の回転速度 31rpm (駆動電圧 $V_0=5V$ 、無負荷時) より低下した。この原因は、現在のところ十分に明らかになっていないが、3 組の超音波アクチュエータ対の駆動電圧がそれぞれ独立の電源基板から供給されるために同期しておらず、そのため 3 組の超音波アクチュエータ対はそれぞれ駆動力を発生するものの、1 組の超音波アクチュ

エータ対に対して他の 2 組の超音波アクチュエータ対がやや抵抗として働くのではないかと考えている。

開き角 α を 81.8° から 101.5° と大きくするにつれて、表 2 のように無負荷時の回転数が 20rpm から 6rpm に低下し、また負荷 ($14.6 \times 10^{-3}Nm$) を加えたことによる回転数の低下も 6~8rpm となり、開き角 $\alpha=0^\circ$ のときの回転数の低下 3rpm より大きくなった。しかし、このように開き角 α を 0° 以外の大きな角度に設定しても球体を十分に駆動できることがわかった。

次に、上の実験で回転数の低下が一番少なかった開き角 $\alpha=81.8^\circ$ の場合について、駆動電圧振幅を調節し、 z 軸以外での回転駆動を試みた。 $V_0=(5V, 5V, 5V)$ 、 $V_0=(5V, 5V, 3V)$ (対応する回転速度: (31rpm, 31rpm, 23rpm)) および $V_0=(5V, 3V, 3V)$ (対応する回転速度: (31rpm, 23rpm, 23rpm)) としたときの回転数と負荷トルクの関係を測定した結果を図 12 に、無負荷時と $14.6 \times 10^{-3}Nm$ 負荷時の回転数を表 3 に、さらにそれ

Fig.11 Rotational characteristics for various relative angle α

Fig.12 Rotational characteristics around z - and other spatial axes

Table 1 Rotational speed when controlled by driving voltage and duty ratio

Duty ratio	Driving voltage V_0			$N_7 - N_3$
	3V	5V	7V	
100%	23rpm	31rpm	43rpm	20rpm
80%	17rpm	23rpm	28rpm	11rpm
60%	1rpm	11rpm	21rpm	20rpm
$N_{100} - N_{60}$	22rpm	20rpm	22rpm	

Table 2 Rotational speed around z -axis with and without load

Relative angle α (deg)	Load Nm		Decrease of speed
	0	14.6×10^{-3}	
0	24rpm	21rpm	3rpm
81.8	20rpm	12rpm	8rpm
90	12rpm	6rpm	6rpm
101.5	6rpm	0rpm	6rpm

Fig.13 Rotational axes obtained controlling driving voltage

Table 3 Rotational speed around an arbitrary spatial axis with and without load

Driving voltage V_0 V	Load Nm		Decrease of speed
	0	14.6×10^{-3}	
(5,5,5)	20rpm	12rpm	8rpm
(5,5,3)	16rpm	11rpm	5rpm
(5,3,3)	14rpm	10rpm	4rpm

それぞれのときの回転軸の測定位置を図13に示す。図12からわかるように、駆動電圧振幅 V_0 を (5V,5V,5V) から (5V,5V,3V) あるいは (5V,3V,3V) に変化することにより、つまり超音波アクチュエータ対による回転速度の調節によって球体の回転軸を空間内の任意の一つの位置に変化させて回転できることが確認できた。ただしこのとき、表3からわかるように駆動電圧振幅を一つずつ5Vから3Vに低くしたために、 $V_0=(5V,5V,5V)$ のときに比較して無負荷時には20rpmから16rpm、14rpmに、負荷時には12rpmから11rpm、10rpmにそれぞれ回転数が低下した。

5. 結 言

人間の手首の運動をモデルとして、球体を空間の任意軸回りに任意の速度で回転させる3自由度球面モータを実現するため、直径76.2mmの鋼製ベアリングボールを球体とし、3組の超音波圧電リニアアクチュエータ対を駆動部とするプロトタイプを試作し、駆動実験を行った。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 3組の圧電アクチュエータ対で同時駆動し、駆動電圧振幅つまりそれぞれの組の超音波アクチュエータ対による回転速度を調節することにより、球体をZ軸回り和其他の任意の位置の軸回りに回転させることができた。
- (2) 駆動電圧振幅を(5V,5V,5V)とし、開き角 α を 0° としたとき24rpmで、また開き角 α を 81.8° としたとき20rpmで、それぞれZ軸回りに球体が回転した。
- (3) 開き角 α を 81.8° とし、駆動電圧振幅を(5V,5V,3V)としたとき16rpmで、駆動電圧振幅を(5V,3V,3V)としたとき14rpmで、それぞれ空間内の任意の一つの軸回りに回転した。

本研究を実施するに当たり、アルプス電気(株)には超音波圧電リニアアクチュエータおよびその駆動回路をご援助いただくとともに、積層圧電素子を提供していただいた。東京工業大学精密工学研究所 林 輝教授には日ごろ本研究に対して貴重なご助言をいただいている。以上、記して深甚の謝意を表する。

文 献

- (1) K.Kaneko, I.Yamada and K.Itao: A Spherical DC Servo Motor With Three Degrees of Freedom, Dynamic Systems, Measurement and Control(ASME), 111(1989)398.
- (2) 安達日出夫: 多軸型圧電モータ, 公開特許広報(A), 昭和62年-141978(1987).
- (3) 遠山茂樹, 波多江茂樹, 芳賀 是: 超音波モータによるロボット用アクチュエータの開発, 日本ロボット学会第9回学術講演予稿集, No.1(1991)39.
- (4) 大西一正: 平成2年東京工業大学学位論文, 精密位置決め用超音波アクチュエータに関する研究.