3 自由度小型アクチュエータの開発 (第 2 報)*

— 摩擦駆動のシミュレーションと基礎実験 —

佐々江啓介** 五百井 清*** 大築康生*** 黒崎泰充***

Development of a Small Actuator with Three Degrees of Rotational Freedom (2nd Report)
— Simulation and Experiment of a Friction Drive —

Keisuke SASAE, Kiyoshi Ioi, Yasuo OHTSUKI and Yoshimitsu KUROSAKI

A 3-D.O.F. actuator that is composed of a rotor and several drive units to drive in contact with it has been developed. This paper describes design of the actuator and formulates of the friction drive model for analysis. And also, an experimental motor with one degree of rotational freedom has been made, and its performance driven by one or two drive units was verified. Then, two driving methods (position set driving method and contact force adjustable driving method) were comparatively studied. It was confirmed that rotational speed of the position set driving method can be controlled by driving frequency, and rotational speed of the contact force adjustable driving method can be controlled by change of drive unit trajectory; driving torque by the latter method is higher than that by the former method.

Key words: spherical motor, friction drive, piezoelectric actuator

1. は じ め に

微小空間で作業や移動を行うロボットは、限られた空間内でロボットの形状や形態を自由に変形させる必要がある。そのため、一つの関節で複数の自由度を持つ多自由度アクチュエータの開発が望まれている。

本研究では、積層型圧電素子 3 本を三角トラス状に組み合わせた駆動ユニットによって摩擦駆動する 3 自由度アクチュエータを開発することを目指している。

圧電素子 2 本を剛的に組み合わせた駆動ユニットで平板を摩擦駆動する 1 自由度アクチュエータは、これまでに遠藤ら¹⁾、芥田ら²⁾、小木曾ら³⁾によって試作試験がなされているが、曲面(球面)を有する回転体を駆動した例はない。本 3 自由度アクチュエータはこれらを 3 次元的に拡張し、球状回転体をダイレクトに摩擦駆動することで 3 自由度の回転が得られるアクチュエータである。

本アクチュエータの駆動源である駆動ユニットの運動解析結果は第 1 報⁴⁾で述べた通りである。第 2 報では、本アクチュエータの摩擦駆動特性について、シミュレーションと基礎試験により検討を行った結果について報告する。

2. 3 自由度アクチュエータの駆動原理と構造

本 3 自由度アクチュエータは図 1 に示すように、球状回転体、支持ユニット、駆動ユニット、ハウジングによって構成されている。駆動ユニットは圧電素子を三角トラス状に組み合わせた閉リンク機構を成し、その先端は並進 3 自由度の運動を行うことができる。支持ユニットは滑り軸受的な機構や転がり軸受的な機構を検討している。

このアクチュエータの駆動は、駆動ユニット先端を 3 次元的に高速楕円運動させ、接触時の摩擦力によって直接、回転体を

所望の方向に回転させるダイレクト摩擦駆動である。本駆動ユニットは回転体に対して任意の接線方向に駆動力を作用させることができるため、設計時の自由度が大きく、制御しやすいアクチュエータになるものと考えられる。

3. 球接触摩擦駆動モデルの導出

本 3 自由度アクチュエータの摩擦駆動現象の把握、および設計規範となるパラメータを導出するために、接触摩擦駆動のモデル化を行い、球の運動解析シミュレータを作成した。

n 個の駆動ユニットと m 個の支持ユニットを球面上の任意位置に配置して、それぞれが発生する伝達力の総和により、被駆動球を回転させる運動方程式を導出する。

数式モデルを導出するにあたり、以下の仮定を設ける。

- 「仮定 1」 被駆動球は慣性体とみなすが、駆動ユニットと支持ユニットの慣性効果は無視する。
- 「仮定 2」 駆動ユニット先端の位置と速度は、印加電圧信号に応じて、所望の運動を行う。
- 「仮定 3」 駆動ユニット先端あるいは支持ユニット先端と球面間に発生する法線方向押付け力はその接触点の有する粘弾性効果により決定される。
- 「仮定 4」 被駆動球面に作用する伝達力は接触点間の相対速度と摩擦係数および法線方向押付け力により決定

Fig. 1 General concept of 3-D.O.F. actuator

* 原稿受付 平成 6 年 7 月 29 日

** 正 会 員 川崎重工業(株)システム技術開発センター (野田市二ツ塚 118 番地)

*** 川崎重工業(株)システム技術開発センター

Fig. 2 Model of friction drive actuator

される。

このモデルの全体概念図を図2に示す。

以下、定式化にあたり、駆動ユニットと支持ユニットの区別はせず、単にユニットとして取り扱う。被駆動球の基準位置を決める慣性座標系を右手直交座標系 $^S\Sigma$ とし、第 j ユニットに固有の固定直交座標系を $^{B_j}\Sigma$ とし、その座標系表現のベクトル、テンソルは左上添え字を付すものとする。被駆動球の質量を M_s 、質量中心まわりの慣性テンソルを I_s とすると、球の並進と回転に関して次式が成立する。

$$M_s^S \ddot{\mathbf{P}} = \sum_{j=1}^N {}^S \mathbf{F}_j + M_s^S \mathbf{g} \quad (1)$$

$${}^S I_s \dot{\boldsymbol{\omega}} = \sum_{j=1}^N {}^S \mathbf{R}_j \times {}^S \mathbf{F}_j \quad (2)$$

上式において、 ${}^S \mathbf{P}$ は $^S\Sigma$ の原点からみた球の中心位置、 $\boldsymbol{\omega}$ は球の角速度ベクトル、 $\mathbf{F}_j$ は第 j ユニットが球に伝達する力、 $\mathbf{R}_j$ は第 j ユニットが球面と接触する場合の球中心からその接触点までのベクトル、 $\mathbf{g}$ は重力加速度ベクトルである。また、 N はユニットの総数である。なお、記号の「 $\cdot$ 」「 $\ddot{\cdot}$ 」は時間微分を示す。

「仮定1」、「仮定3」、「仮定4」より第 j ユニットが接触した場合のユニット先端の球面向内法線方向の微小変位量を $\Delta \mathbf{u}_j$ とすると、 $\mathbf{F}_j$ の球面の内向法線方向成分 $\mathbf{F}_{nj}$ 、法線方向等価剛性 K_{nj} 、法線方向等価粘性 D_{nj} として次式が成立する。

$$\mathbf{F}_{nj} = K_{nj} \Delta \mathbf{u}_j + D_{nj} \Delta \dot{\mathbf{u}}_j \quad (3)$$

K_{nj} 、 D_{nj} は、ユニット先端の有する突起方向の等価剛性、等価粘性と被駆動球の法線方向の剛性、粘性から定められる値である。

また、接触点における $\mathbf{F}_j$ の接平面内の成分を $\mathbf{F}_{tj}$ とすると、ユニット先端と球の接触点の相対速度の接平面内への射影成分を $\mathbf{V}_{tj}$ とし、接触材料間の摩擦係数を μ として次式が成立する。

$$\mathbf{F}_{tj} = \mu \|\mathbf{F}_{nj}\| \frac{\mathbf{V}_{tj}}{\|\mathbf{V}_{tj}\|} \quad (4)$$

ただし、 $\|\cdot\|$ はユークリッドノルムであることを示す。

式(4)における μ は動摩擦、静摩擦を考慮しており、近似的に $\mathbf{V}_{tj}$ により変化するとみなす。

最終的に被駆動球の運動をえる方法としては、「仮定2」から任意時刻におけるユニットの先端位置と並進速度がえられるので、その時刻における被駆動球表面との接触/非接触を判定し、接触している場合には式(3)の $\mathbf{F}_{nj}$ と式(4)の $\mathbf{F}_{tj}$ を合成することにより伝達力 $\mathbf{F}_j$ を求め、式(1)、(2)から被駆動球の運動を計算する。また、接触していない場合には $\mathbf{F}_j = \mathbf{0}$ として被駆動球の運動計算を進める。これらの過程をすべてのユ

Fig. 3 Friction drive motor

ニットに対し、所望の時刻までルンゲ・クッタ法で数値積分することにより被駆動球の運動を求める。

4. 摩擦駆動試験装置の試作と基礎試験

本3自由度アクチュエータと同様な駆動方式を有する1自由度摩擦駆動モータを試作し、回転速度、接触現象、発生トルク、パワー性能等の出力特性について検討した。

試作した摩擦駆動試験装置を図3に示す。

回転体の半径を4 cmにし、駆動ユニットと接触する面には鏡面加工を施した。回転体の軸振れは組立後の調整により $\pm 1 \mu\text{m}$ 程度に抑えられている。本摩擦駆動試験に用いた圧電素子の伸び量は $6.5 \mu\text{m}/100 \text{ V}$ で、2本をトラス状に組み合わせた駆動ユニットで曲面駆動時の摩擦駆動基礎データを取得することにした。

回転体の回転状態はエンコーダにより計測し、起動トルク及び保持トルクに関してはトルク計を使用した。

4.1 位置調整駆動

位置調整駆動は、回転体と駆動ユニット間の相対位置を調節して駆動する方法である。この手法の利点は、必要に応じて回転体と駆動ユニットを常に非接触な状態にすることができるので、本アクチュエータを受動的なボールジョイントとして機能させることも可能である。しかし、加工精度や軸ぶれの影響を受けやすいという欠点も同時に持ち合わせている。この位置調整には、くさびを利用した微動位置調整機構を用いている。

再現性のある実験を行うために、駆動ユニット先端と回転体表面間のギャップ X_{set} の調整を接触抵抗を用いて行うことにする。その調整方法を以下に記す。

○位置調整手順

- ① 2本トラス型駆動ユニットの2つの圧電素子に等しい電圧 V ($V = V_1 = V_2$)を印加し、印加電圧 V と駆動ユニット先端変位 X の関係を下式と想定して、測定により係数 a, b を決定する。

$$X = aV + b \quad (5)$$

- ② 設定したいギャップ量 X_{set} を式(5)に代入し、印加電圧 V_{set} を逆算する。
- ③ 各圧電素子に電圧 V_{set} を印加する。
- ④ 回転体と駆動ユニット間の接触抵抗を調べながら、駆動ユニットを回転体に近づける。
- ⑤ 抵抗値がほぼ 0Ω の位置に駆動ユニットを固定する。

以上の方法で駆動ユニット位置を調整すれば、印加電圧 0 V の時のギャップを X_{set} に設定できる。

手順①の測定の結果、印加電圧と先端変位の間には、ほぼ

Fig. 4 Friction drive characteristic

Fig. 5 Effect of driving frequency

線形の関係があり、 $a=0.1 \mu\text{m}/\text{V}$ 、 $b=0 \mu\text{m}$ として位置調整を行うことにする。また、今後下式のように定義される S を接触量 S と呼ぶことにする。

$$S = r + 5 \mu\text{m} - X_{\text{set}} \quad (6)$$

ただし、 r は駆動ユニット先端運動半径、 $5 \mu\text{m}$ はバイアス電圧(50 V)分の伸び量である。

4.1.1 摩擦駆動状態

前述の位置調整法を使用して接触量 S が $4 \mu\text{m}$ になるように調整し、回転体の駆動を試みる(駆動ユニットは回転体上部に1個、駆動ユニット先端は駆動周波数1 kHzで半径 $3 \mu\text{m}$ の円運動を行わせる)。その時の回転状態を図4に示す。この結果より、本位置調整駆動によって安定した回転が得られることが確認できる。

4.1.2 駆動周波数と回転速度

図5に駆動周波数と回転速度の関係を示す。なお、駆動ユニットは回転体上部に1つだけ配置し、先端は半径 $3 \mu\text{m}$ の円運動を行わせ、接触量 S は $4 \mu\text{m}$ とした。この結果より、駆動周波数と回転速度の間には、ほぼ比例の関係があることがわかる。また、駆動周波数が2 kHzのときに、回転体が回転しないという現象が生じているが、この現象は駆動ユニットの取付け架台の固有振動が影響している。このように回転体の回転には、各部の固有振動が大きく影響するため、駆動周波数領域内で各部が共振しないような設計が望まれる。

4.1.3 負荷トルク特性

駆動ユニット先端に半径 $3 \mu\text{m}$ の円運動を行わせた時の接触量 S と回転角速度の関係を図6に示し、接触量 S が $5 \mu\text{m}$ の

Fig. 6 Effect of contact length

Fig. 7 Relationship between rotational speed and torque (contact length; $5 \mu\text{m}$)

ときの負荷トルク特性を図7に示す。

図6で接触量が $2 \mu\text{m}$ 以上でない回転しない理由は、回転体の軸振れが $\pm 1 \mu\text{m}$ あるためと支持ユニットの摩擦抵抗があるためだと考えられる。また、接触量が駆動ユニット先端運動直径 $6 \mu\text{m}$ 以上においても回転する理由は、駆動時に回転体が駆動ユニットに押されて逃げるためである。この現象はシミュレーションでも認められ、接触量 S を $5 \mu\text{m}$ に設定しても被駆動球の並進移動のため実際の変形量 δ は約 $0.9 \mu\text{m}$ 程度ではない。

図7より、本駆動方式の負荷トルク特性は通常の発電機にみられる垂下特性と同様な傾向を示すことが確認できる。また、この図で駆動周波数を1 kHzから1.5 kHzに上げてても起動トルクが $0.25 \text{ N}\cdot\text{m}$ と一定であることから考えて、このトルクが駆動ユニット1つ当たりで発生することができる最大トルクであると考えられる。

そこで、このトルクをもとにして駆動ユニットの摩擦係数の推定を試みる。このトルクには、支持ユニットの摩擦トルクが考慮されていないので支持ユニット摩擦トルク(実測値 $0.022 \text{ N}\cdot\text{m}$)を加算すると最大トルク T_{max} は $0.27 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。摩擦による最大発生トルク T は、接触部の変形量 δ で表すと下式で表される。

$$T = R\mu k\delta \quad (7)$$

ここで R は回転体半径、 μ は摩擦係数、 k は接触部のばね定数を表している。式(7)の変形量 δ は先に述べた $0.9 \mu\text{m}$ を代

Fig. 8 Relationship of theory and experiment

Fig. 9 Effect of driving frequency

入するとして、 μ と k が未知数である。そこで k はヘルツの接触式を使って計算したばね剛性 $2.06 \times 10^7 \text{ N/m}$ を式(7)に代入すると摩擦係数 μ は0.36となり、通常の鋼同士の摩擦係数(0.35~0.40)とほぼ合致している。

4.1.4 球の運動シミュレーションの検証

運動解析シミュレータを検証する場合には、球に相当する回転体の運動と駆動ユニットの接触現象を実際の試験によって測定することができないために、時間平均された回転速度と発生トルクのみで判断する。そこで、実際の試験装置から得られた各パラメータと素子のカタログ値、配置、駆動条件等を忠実に再現しシミュレーションを実施した。その結果を図8に示す。この結果より、本運動解析シミュレータは実際の現象を良く再現しているものと思われる。

4.2 接触圧調整駆動

接触圧調整駆動は、通常の超音波モータと同様にロータとステータ間の押付け圧力を予圧ばねによって調整し駆動する方法である。この手法の利点は、加工精度や軸振れなどの影響を受けにくいことである。しかし、回転する駆動周波数領域が決まっているので駆動周波数の管理が必要になる。この接触圧の調整は、駆動ユニット後部にコイルばねをはさむことで達成している。以下にその駆動試験結果を記述する。

4.2.1 駆動周波数と回転速度

図9に接触圧調整駆動時の駆動周波数と回転速度の関係を示す。なお、図中の k は予圧ばねのばね定数を表し、 F_k は予圧

Fig. 10 Driving radius and rotational speed

Fig. 11 Elliptical form and rotational speed

ばねの押付け力を表している。この実験結果をみても明らかに、回転することのできる駆動周波数の下限は予圧状態によって決まり、接触圧調整駆動は低周波数で回転体を回転駆動することができないことがわかる。また、可動周波数領域においても駆動周波数と回転速度の間に安定した関係があるように思えない。以上の結果により、接触圧調整駆動では駆動周波数の管理が必要になることを再確認した。

4.2.2 回転体の速度制御

接触圧調整駆動の場合には、先述の駆動周波数と回転速度の所でも述べたように、駆動周波数によって回転速度を調節することが難しいので、別の方法で回転速度を制御する方法について検討を行う。

通常の超音波モータの場合には、駆動周波数をステータの共振周波数に固定し、印加電圧の振幅または位相差を調節して回転速度を調整する方法を採っている。この超音波モータの制御方式を本1自由度摩擦駆動モータの回転制御に当てはめて考えると印加電圧振幅は駆動ユニット先端運動半径を変えることであり、電圧の位相差は駆動ユニット先端の楕円運動形状を変えることに等価である。よって、この2つの制御方法について実際の試験による検証を行う。

駆動ユニット先端運動半径と回転速度の関係を図10に示す。また、駆動ユニット先端の楕円運動形状と回転速度の関係を図11に示す。なお、駆動周波数は駆動時の振動が最も小さい2.9 kHzに設定した。

図10より、駆動ユニット先端運動半径と回転速度の間にはほぼ線形関係があることがわかるが、先端運動半径が1.8 μm

Fig. 12 Relationship between rotating speed and torque

Fig. 13 Effect of cooperative control

以下では回転しなくなる。これは駆動ユニットの加速度と質量の積で表される回転体を押す力が予圧ばねの押付け力よりも小さくなり、駆動ユニットが回転体から離れないためである。また、正回転と逆回転で回転速度が異なるのは方向性を有するコルゲーションの発生や取付けの位置ずれが原因であると考えられる。また、図 11 の駆動ユニット先端楕円形状と回転速度の間にもほぼ線形関係があることがわかる。

以上の結果より、接触圧駆動時に回転速度を制御するためには、駆動ユニット先端の楕円運動形状を変える方法が有効であることがわかった。

4.2.3 予圧の影響

ばねによる押付け予圧 F_k を変化させたときの負荷トルク特性を図 12 に示す。この図より、予圧を大きくすると起動トルクも大きくなることがわかる。一般に発生トルク T_s は、回転体半径を R 、接触部の垂直抗力を F_n とすれば

$$T_s = R\mu F_n \quad (8)$$

いま、動摩擦係数 μ を 0.36 とし、垂直抗力 $F_n (= F_k)$ が 9.8 N の場合、 $R = 4$ cm とすると、

$$T_s = 0.14 \text{ N}\cdot\text{m}$$

これは、実験結果とはほぼ一致する。しかしながら、予圧の大きい場合、式 (8) では、実験値よりも大きな値となるため、式 (8) による発生トルクの推定は、低予圧の場合にのみ有効と考える。

4.2.4 駆動ユニットの数と協調制御

各駆動ユニットの先端が回転体と接触するタイミングが回転

に及ぼす影響について調べる。

実験条件としては 2 つの駆動ユニットを対向配置し、1 つだけ駆動したとき（もう一方は強制的に非接触状態にする）と 2 つ同時に駆動したとき、それぞれの負荷トルク特性を測定する。その結果を図 13 に示す。図中の A and B というのは 2 つの駆動ユニットを同時に接触するように駆動した場合で、A or B とは 1 つの駆動ユニットが接触しているときもう一方の駆動ユニットは非接触になるように 180° 位相をずらして駆動したことを意味している。この結果、単独駆動の場合の起動トルクが約 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ であるのに対して、2 つの駆動ユニットで駆動した場合には 2 倍以上の起動トルクになっていることがわかる。A と B の接触タイミングの違いで比べた場合には同時に接触するように駆動した方が起動トルクが大きくなる。この理由は、対向した 2 つの駆動ユニットを同時に接触させると回転体に働く内力がキャンセルされ、回転に寄与する偶力のみしか発生しないようになる。このため、並進運動に費やされていたエネルギーが軽減され、純粋な回転運動に変換されるエネルギー量が多くなるためだと考えられる。

以上の結果より、発生トルクを最大限に引き出すためには、お互いに対向する駆動ユニットのペアを被駆動球の周囲に数多く配置し、同期させて駆動すればよいことがわかる。

5. おわりに

摩擦駆動モータを試作して、基礎検討を行った。その結果、以下に示す成果が得られた。

- (1) 球の摩擦駆動シミュレータを作成し、実際の摩擦駆動試験によってその有効性を確認した。
- (2) 位置調整駆動と接触圧調整駆動の 2 つの駆動法に関して実際の試験で比較検討を行った。その結果、接触圧調整駆動の方が位置調整駆動よりも発生トルクを大きくできることがわかった。
- (3) 摩擦駆動モータの負荷特性が通常の電磁モータの垂下特性と同様な傾向を示すことを確認した。
- (4) 摩擦駆動アクチュエータの出力性能を決定する駆動ユニット 1 つ当たりの最大摩擦トルクデータを取得した。

今後は、この摩擦駆動シミュレータによって設計パラメータの許容範囲について検討し、その結果を基に 3 自由度アクチュエータを試作する。その後、所望の方向へ回転させる協調制御手法の検討及び性能試験を行う予定である。

なお、本研究開発は、財団法人マイクロマシンセンターが NEDO から委託を受けた「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、川崎重工業(株)が財団法人マイクロマシンセンターから再委託を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 遠藤 晃, 佐々木信俊, 富川義郎: 縦効果圧電素子を 2 次元配置した超音波モータ, 昭和 63 年度電気学会全国大会講演予稿集, (1985) 899.
- 2) 芥田友彦, 杉本康宏, 深沢良雄: 積層型圧電素子を用いたリニアアクチュエータの開発, 1991 年度精密工学会春季大会講演予稿集, (1991) 203.
- 3) 小木曾敏夫, 森 健次, 岡田祐子: 斜交型圧電モータステータの動力学モデル, 日本ロボット学会誌, **10**, 3 (1991) 63.
- 4) 佐々江啓介ほか: 3 自由度小型アクチュエータの開発 (第 1 報), 精密工学会誌, **61**, 3 (1995) 386.