ニューテーションモータの開発*

(第1報, 空圧ニューテーションモータの動作原理と基本特性)

宇塚和夫^{*1}, 榎本勇生^{*2}, 鈴森康一^{*3}

Development of Nutation Motors

(1st Report, Driving Principle and Basic Characteristics of Pneumatic Nutation Motor)

Kazuo UZUKA^{*4}, Isao ENOMOTO and Koichi SUZUMORI

^{*4} TOK BEARING CO., LTD., Development Section,
2-21-4 Azusawa, Itabashi-ku, Tokyo, 174-8501 Japan

A new type of pneumatic stepping motor, named pneumatic nutation motor was developed. Pneumatic nutation motor consists of some pneumatic cylinders, an input bevel gear and an output bevel gear. Injecting air into each cylinder causes nutation of the input bevel gear, which makes the output bevel gear to rotate. In this report, first, the driving principle and design of this motor are presented. Next, its characteristics are analyzed theoretically. The prototype of pneumatic nutation motor is fabricated and tested. Experimental results are very promising. The features of pneumatic nutation motor are (1) simple structure, (2) big torque and (3) low speed operation.

Key Words: Actuator, Pneumatic Actuator, Stepping Motor, Nutation Motor, Mechatronics, Bevel Gear

1. 緒 言

空圧アクチュエータは、簡単構造でクリーン、防爆、電磁ノイズを発生しないといった特徴を持っているため、工場エアーやコンプレッサが使用できる環境では広く普及している。しかし、空気の圧縮性やシール部の摩擦のために、精密な位置決めや低速動作を要する作業にはあまり用いられてこなかった。また、直動形の空圧アクチュエータに比べて回転形の空圧アクチュエータは、構造が複雑になりがちであった。

このような空圧アクチュエータの短所を考慮し、これまで減速機能を内蔵した空圧モータがいくつか開発されている。減速機構には、サイクロイド方式や一对のクラウンギヤを用いたものなどの研究が行われている。^{(1)~(3)}

今回著者らは、かみあいが理論的に正確で、歯車自身の揺動運動を出来るだけ小さくした一对のかさ歯車を

減速機構に使用し、これに直動形の空圧アクチュエータを組みあわせることで、簡単構造で低騒音、低振動な、滑らかな回転が実現出来る空圧モータ（以下、空圧ニューテーションモータと呼ぶ）を開発した。

使用したかさ歯車対は、出来るだけ軸角を大きく設計することで、かさ歯車自身の揺動運動を小さくしている。さらにこのモータは、加圧パターンを変えるごとに一ステップずつ回転するステッピングモータなので、従来のペーンモータ等とは異なり、低速回転が可能で、分解能の高いステッピング動作が実現でき、本体には電気、磁気を使用していないため、それらを嫌う用途や水中、高温雰囲気中での使用も可能である。

本報では、この空圧ニューテーションモータの動作原理、理論特性、試作実験結果について報告する。

2. 空圧ニューテーションモータの動作原理

2.1 ニューテーション運動 図1は、円すい部材Aとすりばち状の円すい面をもつ部材Bが、それぞれの円すい面を滑らずに転がる運動を示している。ここで、それぞれの円すい面の表面積は異なるので（円すい部材Aの方が表面積が小さい）、一方の円すいは他方に対して、勢いのなくなってきたコマのように、中心軸

* 原稿受付 2005年8月3日。

^{*1} 正員、トックベアリング(株) (〒174-8501 東京都板橋区小豆沢2-21-4)。

^{*2} トックベアリング(株)。

^{*3} 正員、岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)。

E-mail: chizai@tok-bearing.co.jp

Fig.1 Driving principle of nutation motors

Fig.2 Appearance and structure of a pneumatic nutation motor

が振れ回りながら回転することになる。この運動のことをニューテーション運動と呼ぶ。

この運動を利用した出力形式はAとBの固定の方法によりいろいろ考えられる。例えばAを固定するとBは中心軸の振れ回りを伴う自転を行う。またBの自転を防止し揺動のみをさせると、Aが自転を行う。

広瀬らは、後者の運動を利用したモータ（クラウンモータ）の研究を行っている^{(2)・(3)}。一方著者らは、前者の運動のニューテーションモータ^{(5)・(6)}及び後者の運動のニューテーションモータ⁽⁴⁾の試作、評価を進めている。

本報では、Bを揺動のみさせ、Aの自転を取り出した後者のタイプのニューテーションモータについて、

(1) 理論特性を明らかにし、(2) 最適な歯形の選定および(3) コンパクトで有効な試作品の設計、製作、初期性能評価を実施した。

2・2 動作原理 図2に今回試作した空圧ニューテーションモータの断面図と外観図を示す。空圧ニューテーションモータは、基本部品として、直動形の空圧アクチュエータ、減速部、出力軸から構成される。図2における減速部の、入力かさ歯車と出力かさ歯車が、図1における部材Bと部材Aにそれぞれ相当する。

モータの動作は入力かさ歯車と出力かさ歯車とがかみ合って動作するが、このとき歯数を例えば1枚違いに構成すると、入力かさ歯車が1揺動するたびに歯のかみ合わせが1枚ずつずれていき、出力かさ歯車が自転する。また入力かさ歯車には、自転せずに揺動させる為、中心に球面軸受、歯車の外側に自転防止のためのガイドピンが設けてある。そうすることで、出力かさ歯車に取り付けられた出力軸から、回転運動のみを取り出せる。

一方、直動形の空圧アクチュエータは入力かさ歯車

Fig.3 Driving patterns

の背面を押圧する位置に複数配置されている。この複数の空圧アクチュエータを順次駆動することで、入力かさ歯車を揺動させることができる。

このように、空圧ニューテーションモータは、複数の空圧アクチュエータの直動運動によって発生した、入力かさ歯車の揺動運動を、出力かさ歯車の回転運動に変換して、それを出力として取り出しているモータである。

2.3 歯車設計 出力かさ歯車の回転数 N_1 と入力かさ歯車の揺動回数 N_2 の間には幾何学的に次の関係が成り立つ。

$$N_1/N_2 = (Z_1 - Z_2)/Z_1 \quad (1)$$

ただし、 Z_1 , Z_2 はそれぞれ出力、入力かさ歯車の歯数を表す。式 (1) が負値をとる場合は、入力かさ歯車の揺動回転と出力かさ歯車の自転の回転が逆向きであることを示す。今回は高減速比を得るために、入出力かさ歯車の歯数差を 1 とした。また軸角をできるだけ大きくすると、入力かさ歯車の揺動移動距離が小さくなり、空圧アクチュエータの空気消費量も減少するので、高効率のモータが実現する。

2.4 制御 空圧アクチュエータの加圧パターンを図 3 に示す (空圧アクチュエータは 3 個)。図 3 中、1 は加圧状態を 0 は大気圧への開放状態を示している。また圧力制御には電磁ソレノイド弁を使用している。

加圧パターンには 2 通り考えられる。1 つは加圧する空圧アクチュエータの数を一定のまま、順に加圧パターンを 1 個分ずつシフトしていく方式で、フルピッチ駆動と呼ぶことにする {図 3 (a)}。もう 1 つは、加圧する空圧アクチュエータの数を 1 個から 2 個に交互に変えていながらシフトしていく方式で、ハーフピッチ駆動と呼ぶことにする {図 3 (b)}。

フルピッチ駆動時の駆動分解能 h_1 [step/rev.] とハーフピッチ駆動時の駆動分解能 h_2 [step/rev.] は、

Fig.4 Analysis of pneumatic nutation motor

1 個のモータに搭載されている空圧アクチュエータの数を n とすると、次のようになる。

$$\begin{aligned} h_1 &= n \cdot |Z_1/(Z_1 - Z_2)| \\ h_2 &= 2n \cdot |Z_1/(Z_1 - Z_2)| \end{aligned} \quad (2)$$

3. 最大トルク値の理論特性

3.1 最大トルク値の概要 空圧ニューテーションモータの最大トルクは、歯と歯のかみ合いが外れる歯飛び現象が生じる限界トルクのことで、この歯飛び現象が生じるか否かは、負荷トルクと空圧アクチュエータの押圧力との力のバランスによって決まってくる。そこで本報では、次項に示す 4 種類の力のバランスによって最大トルク値を算出した。

3.2 モータ各部に生じる力の詳細

〔1〕空圧アクチュエータの押圧力によって働く力

図 4 に入力かさ歯車と出力かさ歯車に作用する力の解析モデルを示す。図 4 (a) は、空圧アクチュエータのピストン (以下、空圧ピストン) B の加圧が始まり、それによって空圧ピストン A が押し戻されている状態を示している。点 O, C, C' はそれぞれ、入力かさ歯車の中心、入出力かさ歯車の接点、点 C の

Fig.5 Balance of moment in direction of motor axis

中心軸に平行で入力かさ歯車の中心と同一平面上の点である。また、空圧ピストンの中心からの距離、および入力かさ歯車の中央ピッチ円半径をそれぞれ r_o 、 r_2 とする。

入力かさ歯車は空圧ピストンから F_I の押圧力を受ける。また、その力の作用点Cの位置を $\theta = \angle AOC'$ で表すことにする。この F_I の力は空気圧、空圧ピストンの受圧部の半径をそれぞれ P 、 r_p とすると次式となる。

$$F_I = P \cdot \pi \cdot r_p^2 \quad (3)$$

一方、この押圧力 F_I によって、入力かさ歯車と出力かさ歯車がかみ合うが、そのとき入力かさ歯車の歯に生じる力 F_H は、 ψ をピストンの間隔を示す角度とすると、次式で表される。

$$F_H = \cos \{(\psi - \theta)/2\} \cdot F_I \cdot r_o / r_2 \quad (4)$$

〔2〕 負荷トルクによって歯に働く力

負荷トルク T によって出力かさ歯車の歯の回転方向に生じる力 t は、 r_i を出力かさ歯車の中央ピッチ円半径とすると次式となる。

$$t = T / r_i \quad (5)$$

図4(b)は入出力かさ歯車の歯のかみ合いを表しているが、ここで、出力かさ歯車の歯面の垂直方向に働く力 t_1 、入力かさ歯車の歯の中心軸方向に働く力 t_2 および回転方向に働く力 t_3 は、圧力角を α とすると次式で表される。

$$t_1 = t \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

$$t_2 = t_1 \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

$$t_3 = t_1 \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

〔3〕 歯面の摩擦抵抗

歯面に生じる摩擦力 F_G は歯面の摩擦係数を μ_1 とすると次式となる。

Table 1 Specification of bevel gears

	Output bevel gear	Input bevel gear
Module	0.3	
Pressure angle	20°	
Tooth number	120	121
Tooth width	5	
Axis angle	178°	
Pitch circle	36	36.3
Tooth depth	0.675	
Addendum	0.3	
Dedendum	0.375	
Cone distance	18.582	
Pitch cone angle	75.628°	102.372°
Root tooth cone angle	74.472°	101.216°
Tip tooth cone angle	76.553°	103.297°

N.B.) A unit of length is mm.

Fig.6 Appearance of bevel gears

$$F_G = \mu_1 \cdot t_1 \quad (9)$$

F_G の中心軸方向分力 F_A および回転方向分力 F_B は次式で表される。

$$F_A = F_G \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

$$F_B = F_G \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

〔4〕 ガイドピンの摩擦抵抗

ガイドピンは入力かさ歯車に生じる回転方向の力を受けている部分で、その力によって摩擦抵抗が生じる。ガイドピンに生じる回転方向の力 N は次式で表される。

$$N = (t_3 + F_B) \cdot r_2 / r_m / K \quad (12)$$

ただし、 r_m は中心からガイドピンと溝との接触点までの距離、 K はガイドピンの本数である。またガイドピンの摩擦係数 F_H は μ_2 をガイドピンの摩擦係数とすると次式となる。

$$F_H = \mu_2 \cdot N \quad (13)$$

Fig.7 Appearance of test machine

Table 2 Test patterns

	Pressure (MPa)	Rotation (r/min)	Tube Length (mm)	Driving Pattern
①	0.1~0.5	2	400	FPD
②	0.5	1~10	400, 800	FPD, HPD

3・3 力のつりあい モータの中心軸方向のモーメントのつりあいを図5に示す。これより、許容トルク内または歯飛び現象が生じるときは次式のように表せる。

$$F_H > t_2 + F_A + F_H \cdot r_m / r_2 \quad (\text{許容トルク内}) \quad (14)$$

$$F_H < t_2 + F_A + F_H \cdot r_m / r_2 \quad (\text{歯飛びが生じる}) \quad (15)$$

4. 試作と実験

4・1 試作品の仕様 図2に今回試作した空圧ニューテーションモータの断面図および外観図、表1にかさ歯車の仕様、図6にかさ歯車の外観図を示す。

それぞれのかさ歯車は、インデックス付のフライス盤で、専用のシングルカッタを使用して作成した。この加工法では歯形は近似的なものになるが、入力かさ歯車のようなすりばち状のかさ歯車も作成できる。

入力かさ歯車は、自転を防止し揺動運動のみができるように、中心に球面軸受、外側に放射状に4本のガイドピンを設けている。出力かさ歯車は出力軸に固定されていて、モータ本体のハウジングに固定しているラジアルおよびスラスト軸受によって、回転自在に支持されている。また歯車部、ガイドピンおよび軸受部はグリースで潤滑している。

出力かさ歯車および入力かさ歯車の歯数はそれぞれ120, 121のため、出力かさ歯車を1回転させるには、

Fig.8 Relation between pneumatic pressure and torque

Fig.9 Relation between rotation and torque

入力かさ歯車を120回揺動させる必要がある。空圧ピストンは3箇所配置されているため、入力かさ歯車を1回揺動させるのに3パルス信号が必要である。よって駆動分解能はフルピッチ駆動で360step/rev. ハーフピッチ駆動で720step/rev.となる。

{式(2)参照}。

かさ歯車対の軸角は、歯形の加工性を考慮しつつ、入力かさ歯車の揺動移動距離を出来るだけ少なくし、高効率のかみ合いを実現するため178°に設定した。

空気を供給するチューブは内径2.5mm、外径4mm、長さ400または800mmのウレタンチューブで、空圧アクチュエータと電磁ソレノイド弁とをそれぞれ接続した。

なお今回試作品は、同仕様のものを6個製作した。試作品の質量は1個あたり約580gである。

4・2 試験機 今回使用した試験機の外形図を図7に示す。この試験機は、試験するモータとトルク測定器、ブレーキが直列に配置している構成であり、任意の負荷トルクを試験モータに与えることができる。

4・3 試験条件 表2に試験条件を示す。いずれの条件でも、最大トルクは、ブレーキに無負荷の状態から徐々に負荷をかけていき、歯飛びが生じる直前の負荷トルクから求めた。

4・4 試験結果 図8に試験条件①の試験結果と3章による計算結果をあわせて示す。ここで、試験結果は6個の試作品の平均値であり、計算結果は摩擦係数を0.1と仮定して算出したものである。

最大トルクは空気圧にほぼ比例し、実測値は3章による計算値とよい一致が見られる。

図9に試験条件②の試験結果を示す。回転数の上昇に伴ってトルクの低下がみられるが、この傾向はチューブの長いものの方がより顕著である。これは、チューブの管路抵抗が大きく、モータの回転数が高い場合、十分な空気が空圧アクチュエータに流入して空気圧が十分高くなる前に、次の加圧ステップに移ってしまうためと考えられる。さらに管路抵抗は、電磁弁の動作ピッチが倍になるハーフピッチ駆動のほうが、より影響を受けるので、トルク低下がフルピッチ駆動より著しくなっている。

いずれの試験でも、最大トルク以下での歯飛びはまったく生じなかった。歯飛びの発生の有無は、歯飛びに伴って生じる音から明確に判断できる。このことから、式(2)で計算される理論値通り、完全なステッピング動作が実現できることを確認した。

5. 結 言

軸角を大きくした一対のかさ歯車を減速機構に使用し、これに直動形の空圧アクチュエータを組みあわせた空圧モータを開発した。また、その特性式を理論的に導き、試作機を用いた測定結果と良く一致することを確認した。

この結果、以下の特徴を持つ空圧ニューテーションモータを実現することができた。

- (1) 小形、軽量、簡単構造
- (2) 高トルク
- (3) 低速回転が可能
- (4) 高分解能のステッピング動作
- (5) 歯飛び現象による過負荷防止機構

文 献

- (1) Suzumori, K., Hori, K., A Study of Pneumatic Wobble Motors, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)*, 64-622(1998-6), 236-241.
- (2) Kimura, H., Hirose, S., Development of Crown Motor, *Robotikusu Mekatoronikusu Koenkai '00 Koen Ronbunshu(JSME Annual Conference '00 on Robotics and Mechatronics)*, (2000-5), 2P2-47-067.
- (3) Kimura, H., Hirose, S., Development of Crown Motor, *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C (Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C)*, 69-677,(2003-1), 117-125.
- (4) Uzuka, K. et al., Development of Nutation Motors, (1st report: Design and Basic Characteristics of Pneumatic Nutation Motor), *Dai2kai Kiso Junkatsu Sekkei Bumon Koenkai Koen Ronbunshu (The 2nd. Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME)*, (2002), 159-162.
- (5) Uzuka, K. et al., Development of Nutation Motors, (3rd report: Design and Basic Characteristics of Electromagnetic Nutation Motor), *Dai3kai Kiso Junkatsu Sekkei Bumon Koenkai Koen Ronbunshu (The 3rd. Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME)*, (2003), 159-160.
- (6) Uzuka, K. et al., Development of Nutation Motors, (5th report: Design and Basic Characteristics of $\phi 10$ Pneumatic Nutation Motor), *Dai4kai Kiso Junkatsu Sekkei Bumon Koenkai Koen Ronbunshu (The 4th. Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME)*, (2004), 159-160.