2315 3室マイクロ空圧ワブルモータの開発

Development of three-chamber micro pneumatic wobble motor

○ 岡本 清秀 (岡山大) 正 鈴森 康一 (岡山大) 正 神田 岳文 (岡山大)
山田 嘉昭 ((財)岡山県産業振興財団)

Kiyohide OKAMOTO, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama

Koichi SUZUMORI, Okayama University Takefumi KANDA, Okayama University

Yoshiaki YAMADA, Okayama Prefecture Industrial Promotion Foundation

The development of miniature high torque motors is essential for the realization of miniature robots which require large driving force. This is the background of this research to develop pneumatic wobble motor, which is high torque stepping motor with reduction function.

Pneumatic wobble motor consists of a donut-shaped wobble generator, which is made of silicone rubber, a wobble ring, which is made of metal, and a rotor. The rotor is encased in the wobble ring, which is covered by the wobble generator. The wobble generator has three chambers and injecting air rotate.

Authors had developed a six-chamber $\phi 10\text{mm}$ pneumatic wobble motor and six-chamber 6.7mm . In this study, the pneumatic wobble motor is miniaturized to $\phi 6\text{mm}$ by applying fine processing technology. Besides the number of pneumatic chambers are decreased from 6 to 3.

1. 緒言

近年, 介護, 医療, 狹隘部点検, さまざまな分野にロボットを応用しようという試みが活発に進められている。これに伴い, アクチュエータに対する期待は, 例えば, 小型軽量, 信頼性, 柔らかさなど多様化し, 従来の電磁モータ以外の新しい原理に基づくアクチュエータの実現が模索されている。

これまで, 筆者らは空圧ワブルモータと呼ぶ新しいモータ構造を考案し, 6室 $\phi 10\text{mm}$ モータや6室 $\phi 6.7\text{mm}$ モータの開発に成功した[1][2]。これは簡単構造, 軽量といった従来の空圧アクチュエータの特徴を生かしたまま, 分解能の高いステッピング動作を行う新しい空圧モータである。

本研究では, 微細加工技術の適用により $\phi 6\text{mm}$ の小型化を実現するとともに, ハーフピッチ駆動によって圧力室を6室から3室にすることに成功した。

2. 空圧ワブルモータの構造と駆動原理

2.1 動作原理

図1にワブルモータの駆動原理を示す。円筒状部材Aと円柱状部材Bがあり, 部材Aの内面を部材Bが滑らずに転がっているのが分かる。これを利用したものが, ワブルモータの原理である。ワブルモータにおいてワブルリングが部材Aの役割を, ロータが部材Bの役割を果たし減速機能を有している。

Fig.1 Driving principle of wobble motor

2.2 空圧ワブルモータの構造

図2に, 今回製作したマイクロ空圧ワブルモータの断面図を示す。ワブルモータは主に,

- (1) シリコンゴム製のワブルジェネレータ (wobble generator)(図3に示す),
 - (2) 内歯車を持つワブルリング (wobble ring)(図4に示す),
 - (3) 外歯車を持つロータ (rotor)(図4に示す)
- の3点から構成される。

Fig.2 Structure of wobble motor

Fig.3 Wobble generator and its metal mold

Fig.4 Wobble ring and rotor

ロータには外歯車、ワブルリングには内歯車が形成されている。また、ワブルジェネレータは内部に3個の圧力室を有している(図3に示す)。

ワブルジェネレータの内面とワブルリングの外表面は密着しており、ワブルリングは自転しない。このためワブルジェネレータの各圧力室を順に加圧すると、ワブルリングが公転運動を行い、歯がかみ合いながらロータが自転を行う。このとき、ロータの歯数をワブルリングの歯数に対して1枚少なく構成しているため、ワブルリングが1公転するたびにロータが1歯数分回転する。

3. 許容トルクの理論特性

図5では、本モータの特性解析を説明する。この図において点C、 O_w 、 O_r はそれぞれ、ワブルリングとロータの接触点、ワブルリングの中心、ロータの回転中心である。また、ワブルリングの内歯車、およびロータの外歯車のピッチ円半径をそれぞれ、 r_w 、 r_r とする。

ワブルリングは、ワブルジェネレータから力 P と点 O_w 周りのトルク T_g を受ける。力 P はワブルジェネレータ内の圧力室の加圧によって生じる力で、加圧した圧力室の中心点Aに働く、点 O_w 方向の集中荷重として表す。また、その作用点Aの位置を $\theta = \angle AO_w C$ で表すことにする。 θ は1ステップの駆動角度で、ステップ角と呼ぶ。 T_g はワブルリングの自転をとめるトルクで、ワブルリングとワブルジェネレータ間の接着または摩擦により生ずる。

Fig.5 Static analysis of pneumatic wobble motor

ワブルジェネレータ内の圧力室加圧によって生ずる力 P は圧力室加圧によって生ずる力の AO_w 方向の成分であるから、次式となる。

$$P = 2r_g t p \sin\left(\frac{n\phi}{2}\right) \quad (4)$$

ただし、 n 、 r_g 、 ϕ 、 t 、 p はそれぞれ、加圧している圧力室の数、ワブルジェネレータ圧力室の半径、一つの圧力室がワブルリングの中心 O_w に対して占める中心角、ワブルジェネレータの圧力室の軸方向の厚み、加圧空気圧である。また、ワブルジェネレータの弾性変形に要する力は空気圧によって生ずる力に比べて十分に小さいので無視した。

一方、ロータには、負荷トルク T と、歯車のかみあいによって生ずる力(接線方向成分 F と径方向成分 R で表す)が働く。ロータはベアリングによって点 O_w 回りに回転支持されているので、上記 F 、 R はベアリングにより受けられる。

ロータの負荷トルク T は次式で表される。

$$T = r_r F \quad (5)$$

ただし r_r はロータの外歯車のピッチ円半径である。歯車の圧力角 α とすると次式が成り立つ。

$$R = F \tan \alpha \quad (6)$$

空圧ワブルモータでは、ロータに過大な負荷トルクがかかると、接触点Cにおいてロータの歯がワブルリングの歯を乗り越える現象が生じることがある。これをラチェッティング(歯飛び)現象と呼ぶ。

モータが動作するには、

- (1) P によって生ずるロータのトルクが負荷トルクよりも大きいこと、
- (2) ラチェッティングトルクが生じないこと、

の二つの条件を満足する必要がある。

上記二つの条件は、それぞれ図のX方向、Y方向の力のバランス式に対応しており、以下のように記述できる。

すなわち、上記(1)の条件として、

$$F < P \sin \theta \quad (7)$$

ラチェッティングトルクが生じない条件(2)は、

$$R < P \cos \theta \quad (8)$$

式(5)、(6)を用いて書き換えると、それぞれ、以下となる。

$$T < r_r P \sin \theta \quad (9)$$

$$T < r_r P \cos \theta / \tan \alpha \quad (10)$$

さらに式(4)を用いて書き換えると、それぞれ、以下となる。

$$T < 2r_r r_g t \sin\left(\frac{n\phi}{2}\right) \sin \theta \cdot p \quad (11)$$

$$T < 2r_r r_g t \sin\left(\frac{n\phi}{2}\right) \frac{\cos \theta}{\tan \alpha} \cdot p \quad (12)$$

式(11)かつ式(12)を満たすものが空圧ワブルモータのトルクとなる。

4. 機構設計と制御

4.1 設計

今回試作した3室マイクロ空圧ワブルモータは、直径6mm、長さ5.6mm、シャフト径1mm、質量0.46gである。

ワブルリングの歯数は36、ロータの歯数は35で、モジュールは0.067、圧力角は60degである。歯車の歯形はインボリュート歯形を基本とした。また $r_r=1.172\text{mm}$ 、 $n=1$ 、 $r_g=2\text{mm}$ 、 $\phi=99.1^\circ$ 、 $t=2.8\text{mm}$ とした。

ワブルジェネレータはシリコンゴムを使用した。硬度28、引張強さ4.0MPa、切断時伸び450%の透明のものである。

Fig.6 Wobble motor

Fig.7 Wobble motor mechanism removing the cover

Fig.8 All parts of wobble motor

4.2 制御

ハーフピッチ駆動と呼ばれる加圧パターンを図 9 に示す。このとき 1 ステップは $\theta/2$ となる。つまり 1 ステップは 60° である。図 9 で 1 は加圧状態 0 は大気圧への開放状態を示している。圧力制御には電磁ソレノイド弁を用い、今回はこのパターンで試験を実施した。

CH.	1	2	3
	1	0	0
	1	1	0
Time	0	1	0
	0	1	1
	0	0	1
	1	0	1

Fig.9 Driving pattern

5. 評価実験

開発したモータの出力に直接負荷を掛けて、特性実験を行った。0.4MPa のとき、無負荷時の最大速度 57rpm, ラチェッティングトルク 0.6mNm, 減速比 1/35, 分解能 210 step/rev.を確認した。このときの理論最大トルクは、1.15mNm 未満となった。図 10 に回転数 10rpm 時の空気圧と最大トルクの関係について、理論トルクと実測トルクを併せて示す。

Fig.10 Relation between pneumatic pressure and torque at 10rpm

図 10 より、実測トルクは理論トルクの半分ほどしかない。これは想定よりもラチェッティングが生じやすいためと考えられる。ラチェッティングトルクは歯車の圧力角に大きく影響を受ける。特に微細加工による歯車設計のため、小さな誤差が大きく影響している可能性がある。

6. 結言

微細加工技術とゴムの微細成型の工夫により圧力室 3 室 $\phi 6$ mmのマイクロ空圧ワブルモータを開発した。このモータの特徴として以下が挙げられる。

- (1) 小型、軽量、簡単構造、
- (2) 高トルク、
- (3) 高分解能のステッピング動作、
- (4) ラチェッティングによる過負荷防止機能。

実測トルクは理論トルクの半分ほどしかなく、これは想定よりもラチェッティングが生じやすいためと考えられる。歯車の圧力角が大きく影響していると考えられるため、今後改善を進める。

今回開発したモータと、市販のほぼ同外径の典型的な電磁モータの比較を表 1 に示す。マイクロ空圧ワブルモータは、従来の電磁モータに比べ、軸方向に極端に短い構成が可能であることがわかる。

Table.1 Comparison of a pneumatic wobble motor with an electromagnetic motor

	Size (mm)	Torque (mNm)	Torque/volume (Nm/mm ³)
micro pneumatic wobble motor	$\phi 6 \times 5.6$	0.6	3.8
electromagnetic motor (no reduction gear)	$\phi 6 \times 15.6$	0.21	0.49
electromagnetic motor (1/221 reduction ratio)	$\phi 6 \times 30.3$	30	35

参考文献

- [1] 鈴森康一・堀光平空圧ワブルモータの研究, 日本機械学会論文集(C 編)(1998-6), 236-241
- [2] 都甲良平・鈴森康一・神田岳文・山田嘉昭, $\phi 6.5$ mm マイクロ空圧ワブルモータの開発, 第 46 回自動制御連合講演会 (2003), 22