1309 ニューテーションモータの開発

(第8報 空圧ニューテーションモータの駆動系最適化による特性向上)

Development of Nutation Motors

(8th Report, Improvement of Pneumatic Nutation Motor by Optimizing Pressure Control)

○小田 慎治 (岡山大)

正 宇塚 和夫 (トックベアリング)

榎本 勇生 (トックベアリング)

正 鈴森 康一 (岡山大)

Shinji ODA, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama

Kazuo UZUKA, TOK BEARING CO.,LTD. 2-21-4 Azusawa, Itabashi-ku, Tokyo

Isao ENOMOTO, TOK BEARING CO.,LTD.

Koichi SUZUMORI, Okayama University

In this paper, we report a new control method for Pneumatic Nutation Motor. This method is based on the speed control of pressurization because the delay for pressurization causes decreasing motor torque when the motor rotated in hi-speed. In this report, first, we describe the difference between the previous control methods which are called Full-Pitch Drive and Half-Pitch Drive and the new control method. Second, the characteristics of motor torque are compared for these methods. Third, the characteristics of motor vibration are also compared. As a result, applying a new type of control method realizes (1)success in keeping torque, and (2)success in decreasing vibration.

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

1. 緒言

小型ロボット等を開発する場合、小型かつ高トルクなモータが必要となる。しかし、一般的なモータは小型化すると高速、低トルク化する傾向があるため、高トルクを得る場合はモータに減速機を装着する必要があり、駆動部全体として大型化するという問題がある。

本研究では減速機を内蔵し、低速、高トルクなニューテーションモータを開発している。前報⁽¹⁾では、出力側のかさ歯車を固定し、半径方向への余分な部品を排除したかさ歯車対と、1枚のダイヤフラムを用いて、複数の直動型のアクチュエータを構成した新しい空圧ニューテーションモータについて報告した。しかし、従来のニューテーションモータには、回転速度の増加に従いトルクが顕著に低下するという問題がある⁽²⁾。

そこで本実験では、従来のニューテーションモータのトルク低下の原因と考えられる、電磁ソレノイド弁とモータを繋ぐチューブの管路抵抗に注目した。この管路抵抗による空気圧の伝達遅れを補う駆動方式を考案することで、モータの回転速度上昇に対するトルクの低下を抑え、また、滑らかなニューテーション運動を発生させることで、同時に振動を低下させることが可能となった。

2. 試作モータの理論特性

本実験で用いた試作モータの外観図を図1に示す。モータの歯車材質は、低振動、低騒音を目標にアルミニウムを使用している。

モータの中心軸方向のモーメントのつり合いを図2に示す。本実験で用いた試作モータの理論最大トルク値は、前報⁽¹⁾と同様に、①空圧アクチュエータの押圧力によって働く力、②負荷トルクによって歯に働く力、③歯面の摩擦抵抗の3種類の力のバランスによって算出される⁽¹⁾。モータの力のつり合いは、許容トルク内の

場合は式(1)、許容トルクを超えて歯飛びが生じる場合は式(2)で表される。

$$F_H > t_2 + F_A \quad (1)$$

$$F_H < t_2 + F_A \quad (2)$$

ここで、

$$F_H = \cos(\psi - \theta) F_1 L / r_2 \quad (3)$$

$$t_2 = T / r_1 \sin \alpha \cos \alpha \quad (4)$$

$$F_A = \mu_1 T / r_1 \cos^2 \alpha \quad (5)$$

ただし、

r_1 : 固定かさ歯車の中央ピッチ円半径

r_2 : 章動かさ歯車の中央ピッチ円半径

T : 負荷トルク

t_2 : 章動かさ歯車の歯の中心軸方向に働く力

θ : $\angle AOC$

ψ : $\angle AOB$

μ_1 : 歯面の摩擦係数

L : 空圧アクチュエータの中心からの距離

F_H : 章動かさ歯車の歯に生じる力

F_A : 歯面に生じる摩擦力の中心軸方向分力

とする。

Fig.1 Appearance of the FN type pneumatic nutation motor

Fig.2 Balance of moment in direction of motor axis

Fig.3 Analysis of pneumatic nutation motor

3. 駆動方式の改良

従来の加圧パターンとして、フルピッチ駆動とハーフピッチ駆動がある⁽²⁾。フルピッチ駆動時の分解能 h_1 を式 (6) に、ハーフピッチ駆動時の分解能 h_2 を式 (7) に示す。

$$h_1 = n \cdot Z_2 / (Z_2 - Z_1) \quad (6)$$

$$h_2 = 2n \cdot Z_2 / (Z_2 - Z_1) \quad (7)$$

ただし、

n : モータに搭載されている空圧アクチュエータ数

Z_1 : 固定かさ歯車の歯数

Z_2 : 章動かさ歯車の歯数

とする。

これらの駆動方式は電磁ソレノイド弁によって制御されるが、チューブの管路抵抗のため、弁開放から空圧アクチュエータの押圧力が最大となるまでに時間差が存在する。つまり、空圧ニューテーションモータの回転速度増加によるトルク減少は、1つの空圧アクチュエータへの弁開放時間が、押圧力最大となるまでの時間より短くなることで発生すると考えられる。電磁ソレノイド弁の動作ピッチが2倍になるハーフピッチ駆動は、より管路抵抗の影響を受けるため⁽¹⁾、本論文ではフルピッチ駆動について述べる。

本実験では管路抵抗によるトルク減少を低減するため、弁開放中の空圧アクチュエータの次に弁開放予定の空圧アクチュエータを、管路抵抗による時間差だけ早く開放する駆動方式を考案した。この駆動方式をモータに適用することで、モータ回転中は常に、いずれかの空圧アクチュエータの押圧力が最大となるような駆動になると考えられる。

弁開放からモータに空気が到達するまでの平均時間 τ は、電磁ソレノイド弁とモータを繋ぐチューブを流れる空気の流量を計測することで、近似的に求める。

τ は流量と流速の関係、流速と時間の関係より、式 (8) で表される。

$$\tau = \lambda \cdot \pi \cdot d^2 / Q \quad (8)$$

ただし、

λ : チューブ長さ

d : チューブ断面積

Q : 流量

τ : 弁付近の空気がモータに到達するまでの時間とする。

つまり、空圧アクチュエータの加圧を τ 早めることで、最適な駆動になると考えられる。

4. トルク特性

図4に本実験で用いたモータの圧力と最大トルクの関係を示す。理論トルクと共に示す。理論トルクは摩擦係数を0.1と仮定して算出したものである。また、回転速度は管路抵抗の影響を受けずに安定した回転が得られる2rpmとした。最大トルクは空気圧に比例し、理論トルクとも一致していると考えられる。

次に、従来のフルピッチ駆動と、管路抵抗を考慮した場合の新駆

Fig.4 Relation between pneumatic pressure and torque of the $\phi 80$ pneumatic nutation motor

Fig.5 Relation between rotational speed and torque for FPD and NCM
FPD: Full-Pitch Drive, NCM: New Control Method

Fig.6 Relation between rotational speed and torque for different values of τ

動方式でモータを駆動させた場合の、回転速度とトルクを図5に示す。本実験で用いたチューブは長さ 650mm、内径 2.5mm、印加圧力は 0.5MPa であるため、 τ の値は 5ms を用いている。これより、新駆動方式によるトルク低下防止効果として、回転速度 8rpm 時に約 15%のトルク向上が確認された。しかし、回転速度 16rpm を超えると、トルクが従来駆動方式より低下した。原因として、空

Fig.7 Relation between time and vibration of the $\phi 80$ pneumatic nutation motor

Fig.8 Relation between rotational speed and vibration for different values of τ

Fig.9 Relation between rotational speed and vibration for different gear material

圧アクチュエータの膨張、収縮に必要な時間や、排気に要する時間が影響していると考えられる。

同様に、 τ の値を 4ms、6ms にした場合の新駆動方式での回転速度とトルクを図6に示す。これより、本実験での駆動条件では、モータのトルクが低下し始める回転速度において、 τ の最適値が 5ms であることが確認された。

5. 振動特性

従来の空圧ニューテーションモータは、駆動時の歯のかみ合いにより振動が発生するという問題がある。その原因は、空圧アクチュエータが歯車を押圧することにより発生する章動運動に起因するが、今回考案した新駆動方式を適用することで、章動運動がより滑らかになると考えられる。

従来のフルピッチ駆動により生ずるモータの振動について、加速度計を用いて計測した結果を図7に示す。これより、ニューテーションモータの振動に関して、振幅、周期ともに不定であり、短時間での計測は不可能であると考えられる。そこで、50秒間モータを駆動させたときの、モータの振動による1秒あたりの絶対変位量の平均値を算出することで振動を評価した。従来駆動方式と、 τ の値を4ms, 5ms, 6msとした場合の新駆動方式による振動量の変化を図8に示す。これより、回転速度5rpm時に振動が約53%減少したことが確認された。また、新駆動方式によりトルクが向上した回転速度域において、同時に振動量が減少するといえる。

同様の条件で、モータの歯車素材をアルミニウムからステンレスにしたものについて振動を計測した結果を図9に示す。これより、ニューテーションモータの振動特性は歯車素材に大きく依存すると考えられる。

6. 結言

空圧ニューテーションモータの実用化を目的に、電磁ソレノイド弁を用い、空気圧の伝達遅れを考慮した駆動方式を考案した。また、その駆動方式をモータに適用し、評価および最適化を行い、以下の結果を得た。

- (1) モータの回転速度増加に伴うトルク低下の抑止
- (2) 滑らかな章動運動を実現することによる振動量減少

またこれらの効果は、 τ を求めることで、全ての空圧ニューテーションモータで実現可能であると考えられる。

参考文献

- (1) Uzuka, K. et al., Development of Nutation Motors, (7th report: Design and development of Practical Model), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No.701 (2005), pp. 1-4.
- (2) Uzuka, K. et al., Development of Nutation Motors, (1st report: Driving Principle and Basic Characteristics of Pneumatic Nutation Motor), *The 6th. Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME*, 2301, (2006-5), pp.255-258.