短ストローク 6 自由度アクチュエータの実験評価

Experimental Evaluation of Short-Stroke Six-Degree-of-Freedom Actuator

元辻 友彰^{*1}, 部矢 明^{*1}(学生員), 平田 勝弘^{*1}(正員)

Tomoaki MOTOTSUJI, Akira HEYA (Stu. Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.)

Recently, six-degree-of-freedom mechanisms are demanded in various applications such as positioning systems for semiconductor exposure equipment and camera stabilizer for a drone. The conventional systems are required some actuators and links to drive six-axis. Therefore, the size and weight increase. In order to solve these problems, we proposed the short-stroke six-degree-of-freedom actuator. The proposed magnetic structure and operating principle were verified by a magnetic field analysis using a three-dimensional finite element method. This paper describes the static thrust and torque characteristics that are experimentally clarified by using a prototype. The experimental results show that the proposed actuator can drive to six-axis and that the analysis results are valid by the comparison of the analysis results.

Keywords: actuator, six-degree-of-freedom, short-stroke, axial-gap structure, finite element analysis.

(2020 年 11 月 19 日受付, 2021 年 3 月 10 日再受付)

1 緒言

半導体露光装置, 微細造形 3D プリンタの位置決め機構[1]やドローンのカメラスタビライザ[2]には高精度駆動が可能だけでなく小型・軽量な多自由度駆動機構が求められる。これらの機構には回転 3 自由度・並進 3 自由度を合わせた 6 自由度駆動が必要とされる。しかし, 6 自由度駆動のためには, 複数のアクチュエータを 3 次元上に配置する必要があり, 構造の大型化や重量化などが課題となる。

そこで著者らは, 1 台で多自由度駆動が可能な多自由度アクチュエータに着目した。これまでに, 提案されている多自由度アクチュエータとして, 二自由度動作が可能な二自由度振動アクチュエータ[3-7], Kato らにより試作されたベクトル制御により 4 相で駆動する三自由度振動アクチュエータ[8], Higuchi らにより試作された非接触 5 自由度手首アクチュエータ[9]がある。しかし, 6 自由度機構を構成するためには, これらのアクチュエータを複数搭載する必要がある。Rossini らにより試作された半径 103 mm の 6 自由度球体型アクチュエータ[10]は, 6 自由度の駆動が可能である。あらゆる方向に連続回転が可能である一方で, 可動子が固定子に内包された構造により, 構造的に並進方向への

ストロークが短くなる課題がある。また, Verma らにより試作された 6 自由度パラレルリンク型アクティブ吸振器[11]は, 多数のリニアアクチュエータを組み合わせたパラレル構造となっており, 全長が 60 mm となり構造が大型化する課題がある。

これらの課題解決を目的として, 著者らは新しい 6 自由度アクチュエータを提案した[12]。提案アクチュエータはアキシアルギャップ構造を採用することで可動子が固定子に内包されず, 平面方向のストロークを大きくとることができる。また, 弾性要素を用いた無摺動支持機構を可動子の内側に配置することで摩擦なく小型・軽量な特徴を持つ。これまで, 有限要素法を用いた磁場解析により, その静特性を明らかとてきた。しかしながら, 実験評価はまだ行われていない。

本稿では, 提案した 6 自由度アクチュエータの試作機を用いた静特性評価について述べる。各軸のディテント力・コギングトルクを測定するとともに, 駆動用コイルに電流を印加し, 各軸方向への推力・トルクを測定した。その結果, 提案したアクチュエータは動作原理に従って, 推力・トルクを発生可能であることを明らかとした。また, 解析と実測結果との比較により, 解析結果が妥当であることを確認したので報告する。

2 短ストローク 6 自由度アクチュエータ

2.1 基本構成

Fig. 1 に本アクチュエータの基本構成を示す。本ア

連絡先: 元辻 友彰, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学吹田キャンパス R3-232,
e-mail: tomoaki.mototsuji@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*1}大阪大学

クチュエータは八角形の構造である (Fig. 1(a))。Fig. 1(b)に示すように、固定子はステータヨークと 16 個のコイルからなる。Fig. 1(c)に可動子を示す。可動子は 2 つのバックヨークと 16 個の永久磁石からなる。また、2 つのバックヨークは 8 本の支柱で固定している。支持部品は 8 個のコイルばねを組み合わせた構造である (Fig. 1(d))。この支持部品を 2 個用いることで本アクチュエータの可動子を支持している。なお、本アクチュエータではアキシシャルギャップ平面を x - y 軸平面、その垂直方向を z 軸とする。

Fig. 1 Short stroke six-degree-of-freedom actuator.

2.2 磁気回路

本アクチュエータは構造の対称性から、磁気回路を 4 つに分類することができる。Fig. 2 に分割した磁気回路の断面図を示す。Fig. 2 より、本アクチュエータの磁石の磁化方向は白矢印のようになっており、黒矢印のように磁気回路を構成する。

2.3 動作原理

本アクチュエータは対称構造であり、駆動用コイルは Fig. 3(a)のように分類できる。Fig. 3(b)と Fig. 3(c)にそれらの断面図を示す。駆動用コイル A を励磁することでステータヨークを磁化し、永久磁石とステータヨークの磁極間で並進方向の推力が発生する。同様に、駆動用コイル B では垂直方向の推力が発生する。そして、各磁極間で発生した推力を合成することにより各軸に並進、回転できる。Table 1 に各駆動の電流の励磁方向を示す。

Fig. 2 Magnetic circuit of the actuator.

Fig. 3 Force and torque generation.

Table 1 Excitation pattern for driving.

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
x-direction	+		—	
y-direction		+		—
z-rotation	+	+	+	+
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
z-direction	+	—	+	—
x-rotation	+	—	—	+
y-rotation	—	—	+	+

Fig. 4 Prototype.

2.4 試作機

静特性評価に用いた 6 自由度アクチュエータの試作機を Fig. 4 に示す。本アクチュエータのエアギャップは可動子と固定子の接触時の耐久性や安全性を考慮して 1.8 mm を採用している。また、巻線には丸線を採用している。本アクチュエータの仕様を Table 2 に示す。また、各部品の寸法情報を Fig. 5 と Table 3 に示す。

Table 2 Specification and material of the actuator.

Description	Material and value
Material of back yoke	SUY
Material of stator yoke	SUY
Material of the pole	A2017
Material of spring	sus304-WPB
Material of support parts 1	A2017
Material of support parts 2	A2017
Mass of mover [g]	70.1
Number of coil turns	50
Residual flux density Br [T]	1.4
Thickness of magnet [mm]	1.8
Spring constant [N/mm]	12
Coil diameter [mm]	0.315
Resistance of coil [Ω]	0.48
Inductance of coil [μ H]	79.4

Fig. 5 Design parameters.

Table 3 Design parameter values.

Description	Value
l_1 Length of the actuator [mm]	36
l_2 Length of the back yoke [mm]	3.8
l_3 Length of the air gap [mm]	1.8
l_4 Length of the coil [mm]	7.5
l_5 Length of the stator [mm]	6
w_1 Width of the actuator [mm]	40
w_2 Width of the back yoke [mm]	16.5
ϕ_1 Diameter of the layout [mm]	25.2
ϕ_2 Diameter of the magnet [mm]	6.8
ϕ_3 Diameter of the space [mm]	8

3 実験評価

これまでに、有限要素法を用いた磁場解析により本アクチュエータの静特性を明らかとしてきた[12]。本章では、実測により本アクチュエータの静特性を明らかとするとともに、実験・解析結果の比較から解析結果が妥当であることを明らかにする。

3.1 実験方法

実験装置の外観を Fig. 6 に示す。また、実験構成の模式図を Fig. 7 に示す。本実験では、並進ステージと回転ステージの移動により可動子を強制的に変位させることで、各軸方向の静特性を測定する。可動子の変位をレーザ変位計 (KEYENCE Corp., LK-G35) によって測定する。その際、可動子に発生する力をロードセル (IMADA Corp., LMU-50N) もしくはトルクセンサ (TOHNICHI Corp., TCF02N) により測定する。また、ファンクションジェネレータ (NF Corp., WF1974) とアンプ (NF Corp., HSA4014) により直流電圧を駆動用コイルに印加する。その際、コイルに流れる電流を電流プローブ (Tektronix Corp., TCP312) で測定する。なお、レーザ変位計、ロードセル、トルクセンサ、電流プローブの出力はオシロスコープ (LeCroy Corp., WaveJet324) を介してパソコンへ取り込む。

本実験ではまず、試作機の可動子を強制移動させることで磁気力とバネ力との合力を測定する。磁極部分だけを取り除いてバネを測定し、差分を取ることでディテント力・コギングトルクを算出する。磁気バネ定数はディテント力とコギングトルクの線形近似から求めた。また、推力・トルクは、電流の無印加時と印加時の差分から算出する。推力定数・トルク定数は推力・トルクを印加電流値で除して求める。

Fig. 6 Experimental condition.

Fig. 7 Diagram of the experimental condition.

3.2 解析条件

可動子を駆動方向に強制移動させた場合の各姿勢でのディテント力、コギングトルク、電流印加時に発生する推力とトルクを有限要素法によって求める。姿勢は、x 軸並進では-1.0 mm～1.0 mm まで 0.1 mm ずつ、z 軸並進では-0.5 mm～0.5 mm まで 0.1 mm ずつ、x 軸回転では-2 deg.～2 deg.まで 0.1 deg.ずつ、z 軸回転では-4 deg.～4 deg.まで 1 deg.ずつ変化させるものとする。また、有限要素モデルと解析条件を Fig. 8 と Table 4 に示す。

3.3 実験結果

3.3.1 x 軸並進

x 軸並進駆動の範囲内での可動子に発生するディテント力と推力定数を Fig. 9(a)に示す。Fig. 9 においては、実線がディテント力・コギングトルクの実験結果で、○印がディテント力・コギングトルクの解析結果、点線が推力定数・トルク定数の実験結果、□印が推力定数・トルク定数の解析結果を示す。磁気バネ定数の実験結果は、-2.4 N/mm で、解析結果と平均 12 % の誤差がみられた。これは、可動子が z 軸並進方向、x,y 軸回転方向に不安定であり、x 軸並進方向のみに強制変位

Fig. 8 Three-dimensional mesh model.

Table 4 Analysis condition.

Number of elements	8,100,000
Number of nodes	1,400,000
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-2600
Number of turns of coils [turn]	50
Residual flux density Br [T]	1.4
Analysis time [min/step]	18.45

できず、バネ定数の測定誤差が大きいためである。推力定数の実験結果は、0.5 A 印加時に平均 0.3 N/A で、駆動範囲内で常に正の値を持つ。また、製作誤差により、エアギャップが解析モデルと異なるため解析結果と平均 16 % の誤差がみられた。

3.3.2 z 軸並進

z 軸並進駆動の範囲内での可動子に発生するディテント力と推力定数を Fig. 9(b)に示す。磁気バネ定数の実験結果は、22.1 N/mm で、解析結果と平均 16 % の誤差がみられた。これは、z 軸並進方向、x,y 軸回転方向に可動子が不安定となり、z 軸並進方向のみに強制変位できず、バネ定数の測定誤差が大きいためである。推力定数の実験結果は、0.3 A 印加時に平均 1.9 N/A で、駆動範囲内で常に正の値を持つ。また、解析結果と平均 28 % の誤差がみられた。これは、x 軸と同様に製作誤差により、エアギャップが解析モデルと異なるためである。

3.3.3 x 軸回転

x 軸回転駆動の範囲内での可動子に発生するコギングトルクとトルク定数を Fig. 9(c)に示す。磁気バネ定数の実験結果は、40 mNm/deg.で、製作誤差による平均 24 % の誤差がみられた。トルク定数の実験結果は、0.2 A 印加時に平均 30 mNm/A で、駆動範囲内で常に正の値を持つ。また、解析結果と平均 18 % の誤差がみられた。これも同様に、製作誤差によるものである。

3.3.4 z 軸回転

z 軸回転駆動の範囲内での可動子に発生するコギングトルクとトルク定数を Fig. 9(d)に示す。磁気バネ定数の実験結果は、-6 mNm/deg.で、解析結果との誤差(平均 5 %) がみられた。これは、製作誤差によるものである。トルク定数の実験結果は、0.5 A 印加時に測定範囲内で常に正の値(平均 5.4 mNm/A)であった。また、製作誤差による解析結果との誤差(平均 11 %) がみられた。

4 結言

本稿では、試作機を用いて、提案アクチュエータの静特性を測定し、各軸のディテント力・コギングトルクを明らかとした。また、提案した動作原理により、駆動用コイルに電流を印加することで推力・トルクを発生可能であることを示した。さらに、解析・実測結

果の定性的な一致から解析結果が妥当であることを明らかとした。提案アクチュエータは既存の 6 自由度球体型アクチュエータに比べ x 軸方向において 2.3 倍の推力密度となった。今後は、各部品の誤差を考慮した有限要素解析と実験結果との比較から定量的に誤差の

影響を評価する。そして、製作誤差が少なく容易な製作が可能な支持ばね部品や磁極形状を検討するとともに、さらなる高推力化を行い、提案アクチュエータの優位性を示す。

参考文献

- [1] 鳥海, 半導体製造装置における位置決め技術, JSPE, Vol. 57, No. 10, pp. 1726-1730, 1991.
- [2] 吉元, 浅井, 太田, 3D アクチュエータを用カメラスタビライザの動作特性解析, LD-18-32, pp. 43-46, 2018.
- [3] K. Hirata, T. Yamamoto, T. Yamaguchi, Y. Kawase and Y. Hasegawa, Dynamic analysis method of two-dimensional linear oscillatory actuator employing finite element method, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 43, No. 4, pp. 1441-1444, 2007.
- [4] Y. Kono, T. Yoshimoto and K. Hirata, Characteristics analysis of a haptic device using a 2-DOF linear oscillatory actuator, *IJAEM*, Vol. 45, No. 1-4, pp. 909-916, 2014.
- [5] 佐藤, 高, 清野, 一体型 θ -Z アクチュエータに関する研究, 精密工学会秋季大会学術講演会, pp. 471-472, 2005.
- [6] Y. Hasegawa, K. Hirata, T. Yamamoto, Y. Mitsutake and T. Ota, New Spherical Resonant Actuator, *IEEJ*, Vol. 12 8-D, No. 5, pp. 642-647, 2008.
- [7] 加藤, 平田, 三自由度共振アクチュエータの新しいベクトル制御法の提案, 日本 AEM 学会誌, Vol. 26, No. 2, pp. 292-2a97, 2018.
- [8] 樋口, 津田, 藤原, 磁力支持方式精密自動組立用ハンドの開発, 日本ロボット学会, Vol. 7, No. 2, pp. 28-36, 1989.
- [9] L. Rossini, S. Mingard, A. Boletis, E. Forzani, E. Onillon and Y. Perriard, Rotor Design Optimization for a Reaction Sphere Actuator, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No. 3, pp. 1706-1716, 2014.
- [10] M. Verma, V. Lafarga, T. Dehaeze and C. Collette, Multi-degree of freedom isolation system with high frequency roll-off for drone camera stabilization, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 176188-176201, 2020.
- [11] T. Mototsuji, A. Heya and K. Hirata, Design and Analysis of a Six-degree-of-freedom Oscillatory Actuator, *ICEMS*, 2019.

Fig. 9 Static characteristics.