

学術論文

球面電磁共振アクチュエータに関する研究

A Study of A Spherical Resonant Actuator

長谷川 祐也^{*1,*2} (正員), 平田 勝弘^{*1}(正員), 光武 義雄^{*2}, 太田 智浩^{*2}

Yuya HASEGAWA (Mem.), Katsuhiko HIRATA (Mem.), Yoshio MITSUTAKE, Tomohiro OTA

This paper proposes the new small-sized spherical resonant actuator. The basic construction and the operating principle of the actuator are described. The torque characteristics of the actuator are clarified by the 3-D FEM analysis. In addition, the geometry of the mover is investigated to improve the torque characteristics. Furthermore, dynamic characteristics are confirmed through the measurement.

Keywords: 3-D finite element method, multi-dimensional actuator, spherical resonant actuator.

1 はじめに

産業応用分野において、2自由度以上の駆動を実現するには1自由度アクチュエータを複数用いた構造が多く、構造が大型化する等の問題がある。最近では、多自由度駆動が可能なアクチュエータの研究[1,2]が盛んに行われており、中でも球面モータ[3]は球面全方向の駆動が可能で、三次元位置決め装置、ロボットアイの駆動装置への搭載が期待されている。

一方、電子計算機の発展に伴い、設計段階でシミュレーションを用いてあらかじめ諸特性を把握することが可能となり、本稿で取り上げる複雑な球面形状を有したアクチュエータに対しても、三次元有限要素法による磁界解析[4]は有効な解析手段の一つとなっている。

本稿では、小型の球面電磁共振アクチュエータの構造を提案し、その動作原理を示した。また三次元有限要素法を用いてそのトルク特性を明らかにすると共に、磁石寸法の最適化を行った。実験により、試作機の動作特性を明らかにし、本アクチュエータの有効性を確認したので報告する。

2 球面電磁共振アクチュエータの基本構造と動作原理

Fig. 1 (a) に提案した球面共振型アクチュエータの全体図を、Fig. 1 (b) に $y=0$ での $x-z$ 断面図を示す。可動部分は球面形状を有し、上下方向に着磁さ

れたリング状の磁石 ($B_r=1.42T$) が挿入されている。固定部は底面が十字型でその各端部が上方に凸状となっており、その凸部分の磁極の上面が可動部の

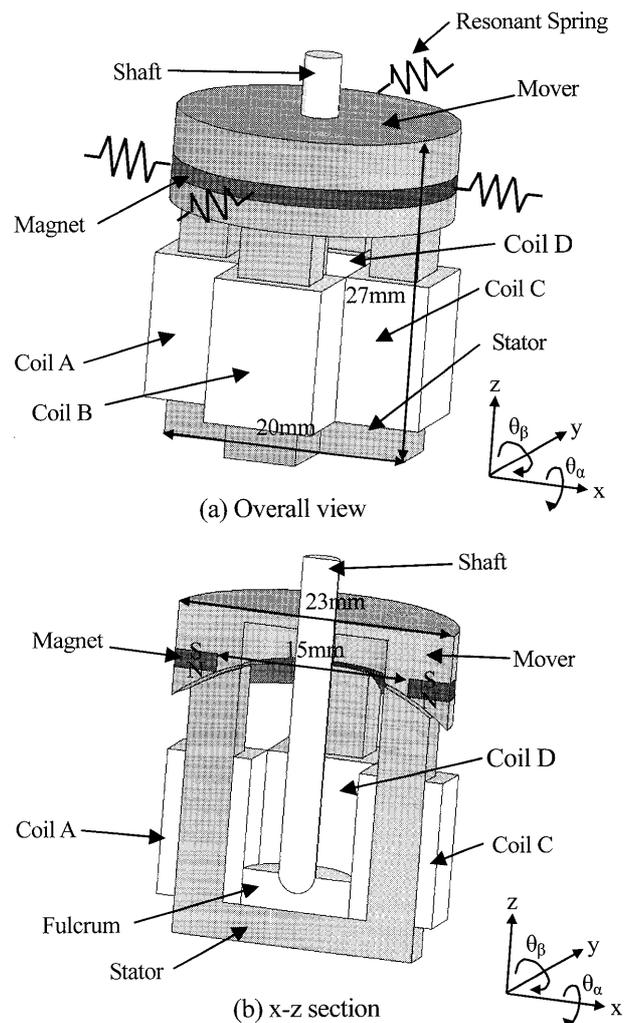


Fig. 1 Construction of the spherical resonant actuator.

連絡先: 長谷川 祐也, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1, 大阪大学知能機能創成工学専攻,
e-mail: yuya.hasegawa@ams.eng.osaka-u.ac.jp

*1大阪大学 *2松下電工株式会社

球面部と一定ギャップで対向するように、球面状にカットされた形状となっている。この4つの磁極それぞれにコイル（各 100Turn）が巻かれている。また可動部と固定部は 0.3mm ギャップとなるように保持されている。さらに可動部には4つの共振用ばねが配置されている。可動部に圧入されたシャフトは固定部の軸受けによって支持されている。

Fig. 2に本アクチュエータの $y=0$ での $x-z$ 平面の断面図を示し、その動作原理を説明する。無励磁状態では実線で示した磁石によって発生する磁束のみが存在し左右のギャップ中の磁束分布はバランスがとれており可動部は中心の位置で静止している。次に図のようにコイルを励磁すると破線に示すように電流による磁束が生じ、左右のギャップでアンバランスとなり時計回りにトルクが生じる。励磁電流の方向を反転することで反時計回りにトルクが生じる。交流励磁することで往復運動が可能となる。互いに対向するコイル (Coil A

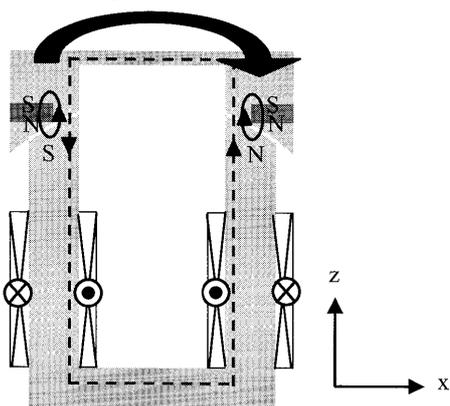


Fig. 2 Magnetic circuit in the cross section of x-z plane.

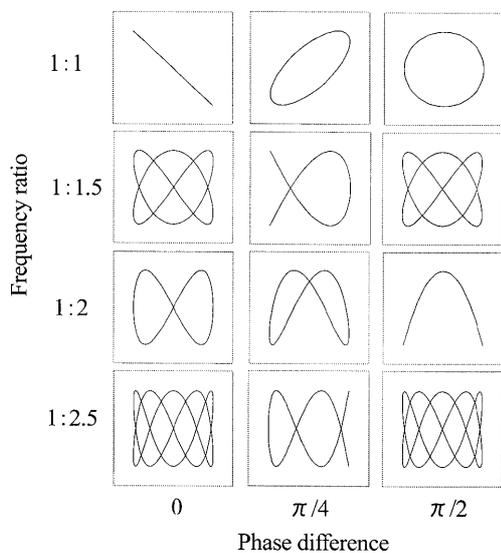


Fig. 3 Trajectory of end of shaft.

とC, Coil BとD) を直列に接続し、この2セットのコイルの周波数比, 位相差を変えることでFig. 3に示す軌跡を描くことが可能である。

また、本アクチュエータは、磁石によって発生する磁束と電流によって発生する磁束の磁路を分離することで高効率を図れるハイブリッド構造[5]を有している。

3 球面電磁アクチュエータ特性解析および実験検証

3.1 静トルク特性解析結果

次に、三次元有限要素法を用いて静トルク特性を計算した。解析に用いたメッシュ分割図をFig. 4に示す。ただし、外部空気領域は省く。要素数は 506581, 節点数は 86632 である。 θ_β 方向に $0 \sim 4^\circ$ の範囲で 1° ごと可動部を回転させた時の y 軸回りのコギングトルク, およびコイルA, Cに起磁力を計 100A入力した時のトルク, さらにコギングトルクを省いた電流トルクをFig. 5に示す。コギング特性から本アクチュエータは $\theta_\beta=0^\circ$ で安定となることがわかった。さらに平均トルク定数は $15.2 \times 10^{-2} \text{mN}\cdot\text{m}/\text{A}$ となった。Fig. 6 (a) に無励磁時の, Fig. 6 (b) にコイルA, Cを励磁した時の磁束密度ベクトル分布

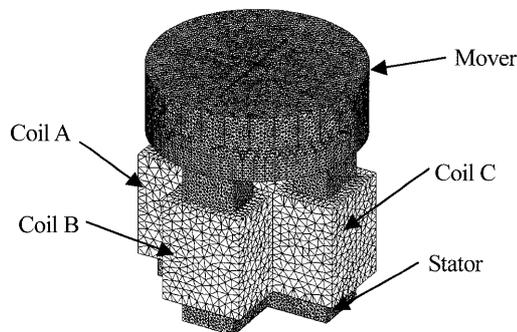


Fig. 4 Mesh of analyzed model.

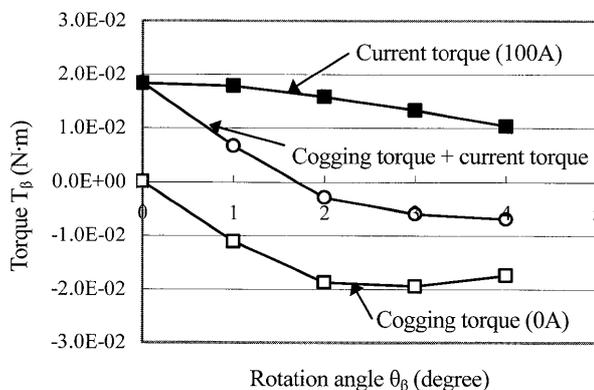


Fig. 5 Torque characteristics.(Basic model)

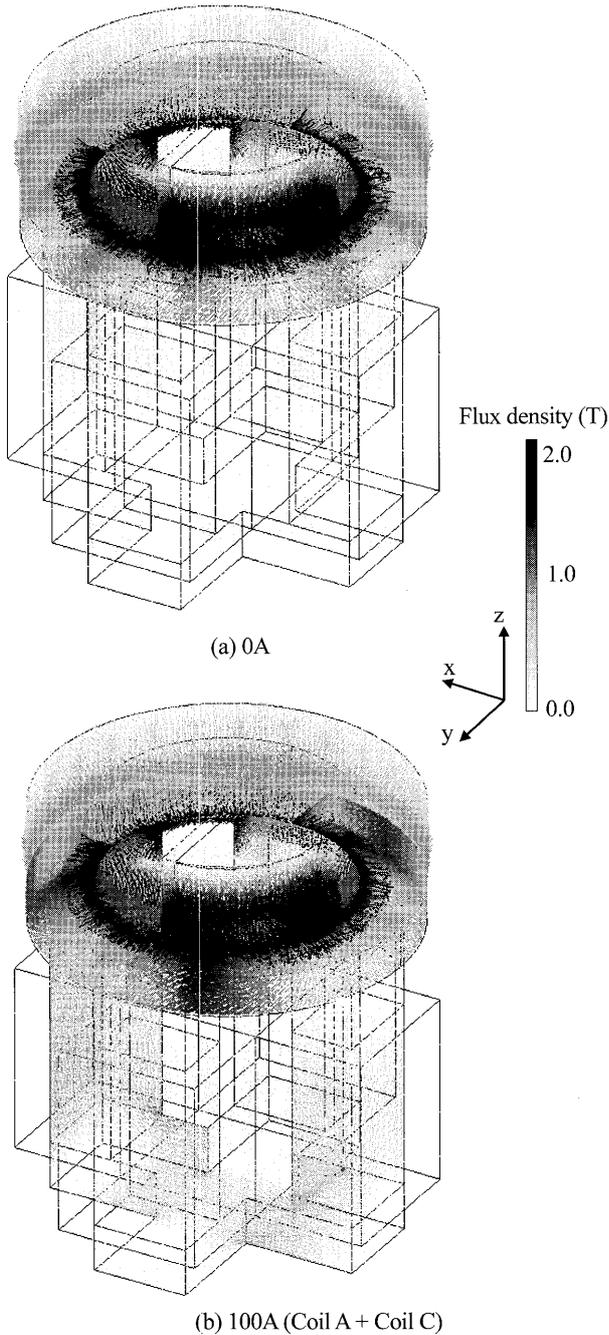


Fig. 6 Distributions of flux density vectors.

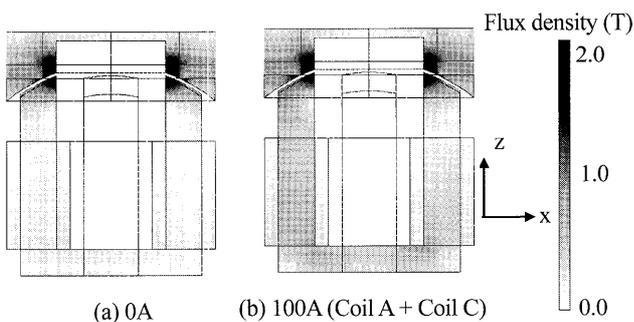


Fig. 7 Flux density in the cross section of x-z plane.

を示す。無励磁時は固定部各磁極の上部で磁石によって発生した磁束が小さな閉ループを形成していることがわかる。一方、励磁時はコイル A, C が巻かれた磁極と十字底面を通る磁路が形成されているのがわかる。これにより磁石と電流により発生する磁束の磁路が分離されていることが確認された。また、Fig. 7 (a) に無励磁時の、Fig. 7 (b) にコイル A, C に励磁した時の $y=0$ 時の $x-z$ 断面の磁束密度コンター図を示す。励磁時に固定部の磁束密度が高くなっていることがわかる。

3.2 有限要素法を用いたトルク改善検討

次にトルクを向上させるために、形状パラメータの検討を行う。Fig. 7より、磁気飽和が生じていることが分かる。それを改善するため、Fig. 8に示す磁石の内径を $\phi 14 \sim 18$ まで 1mm ずつ変化させ (このときのモデルを model 14~model 18 と呼ぶ)、静トルク計算を行った。Fig. 9にコイル A, C に起磁力 100A 入力した場合の電流トルク (コギングトルクを除いたトルク) を示す。

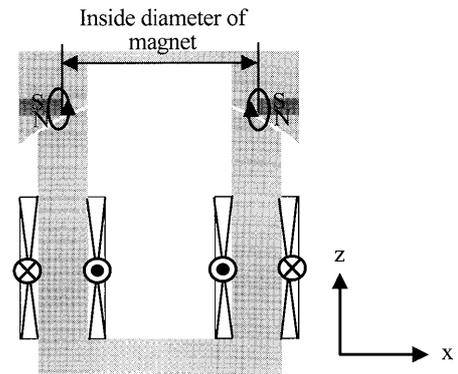


Fig. 8 Shape change part.

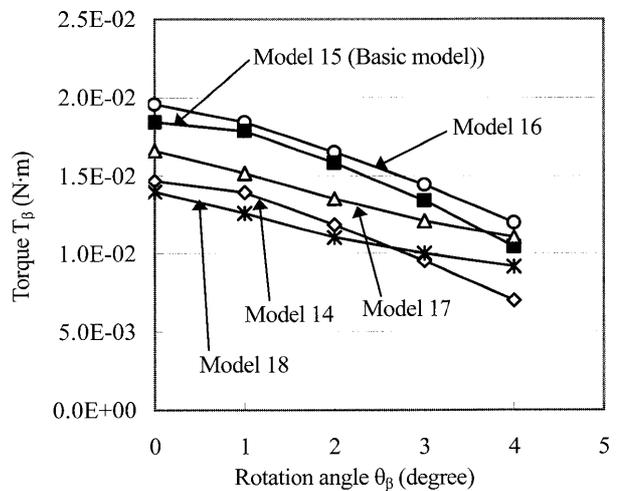


Fig. 9 Current torque characteristics with 100A.

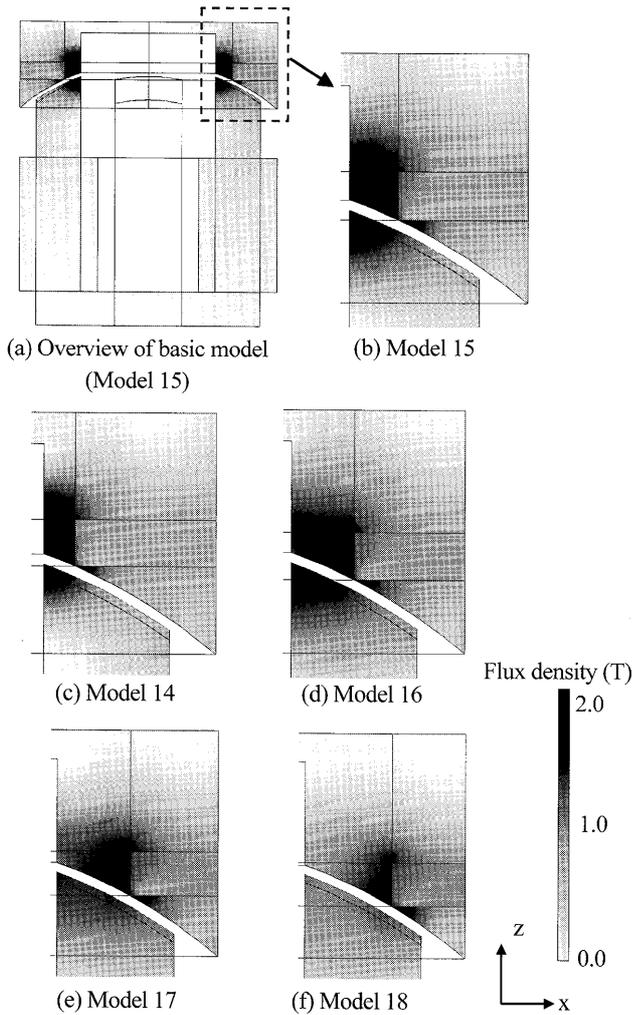


Fig. 10 Flux density in the cross section of x-z plane with 0A.

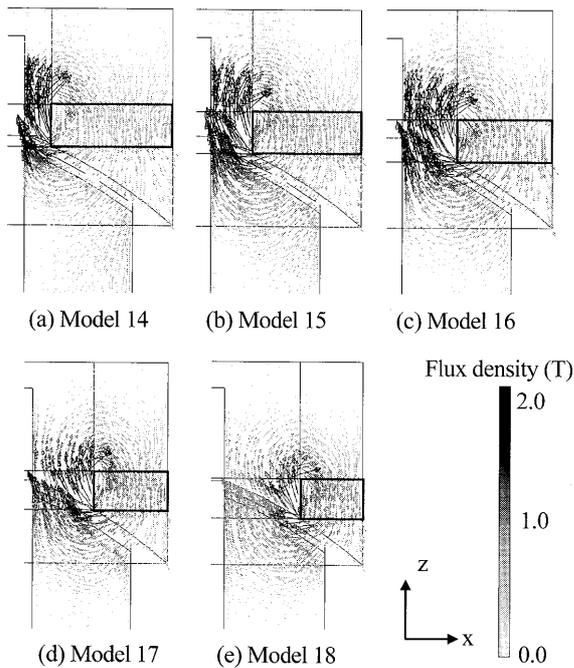
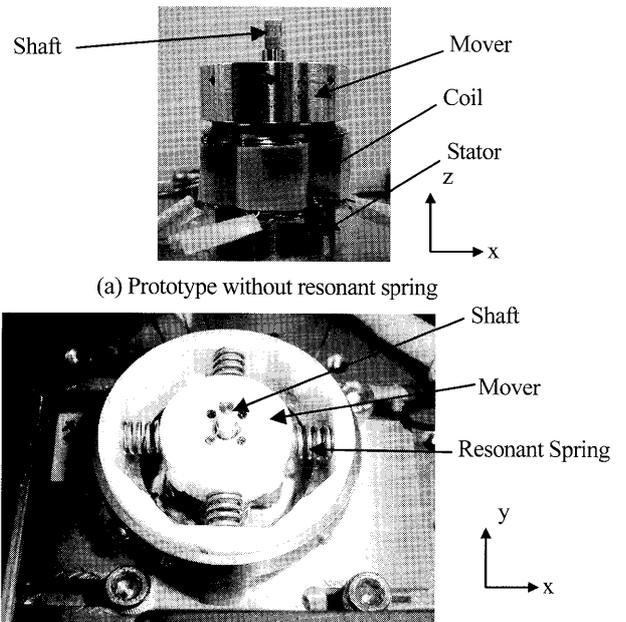


Fig. 11 Distributions of flux density vectors in the cross section of x-z plane with 0A.

この結果より、磁石内径φ16モデルのトルク定数が $16.2 \times 10^{-2} \text{mN}\cdot\text{m}/\text{A}$ と基本形状の107%とトルクを改善できることがわかった。次に、Fig. 10に磁極部分を拡大した $y=0$ 時のx-z断面の磁束密度コンター図を、Fig. 11に磁極部分を拡大した磁束密度ベクトル分布を示す。これによると、磁石内径を小さくし、磁石体積を大きくした場合、磁石から生じる磁束は増加するものの、可動部の磁路が狭くなり磁気抵抗が大きくなるため、トルクは小さくなっている。逆に、磁石内径を大きくすると磁石体積が減少するため、発生する磁束が減少しトルクが低下する。これにより、このアクチュエータの構成では磁石内径φ16近傍にトルクを最大にする最適な寸法があることがわかった。

3.3 試作機による実験結果

次にFig. 12 (a)に共振用のばねを取り付ける前の状態の試作機を、Fig. 12 (b)に共振するように4方向からばねで保持した状態の試作機を示す。ばねを取り付ける前では、コイルが配置された固定部に対してシャフトを有した可動部が磁石の吸引力により中央で安定して静止している。次にFig. 13に電流トルク特性計測時の実験装置を示す。シャフト先端にロードセルを接触させ推力を、反対側からレーザ変位計で変位を測定し、それぞれをトルクと角度に変換する。得られた電流トルクの実測値と解析値をFig. 14に示す。これにより誤差3%でほぼ一致し、解析の妥当性が確認された。



(a) Prototype without resonant spring
(b) Prototype with resonant spring
Fig. 12 Photograph of the prototype.

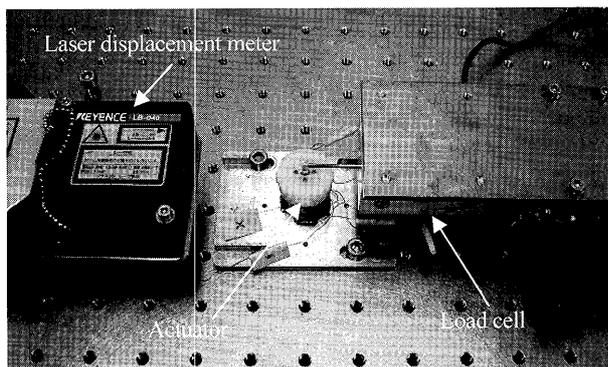


Fig. 13 Current torque characteristics measuring system.

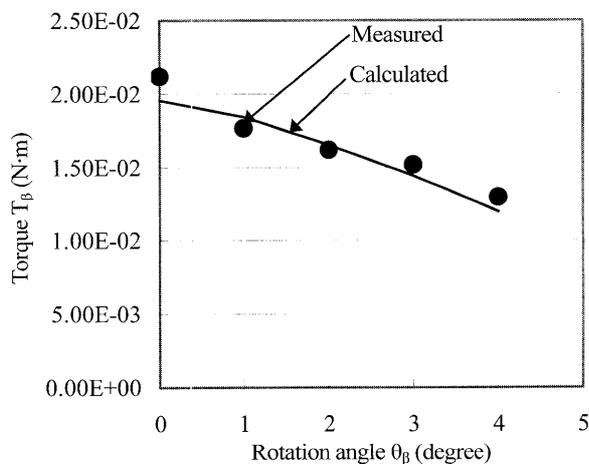


Fig. 14 Comparison between measured and calculated current torque characteristics with 100A. (Model 16)

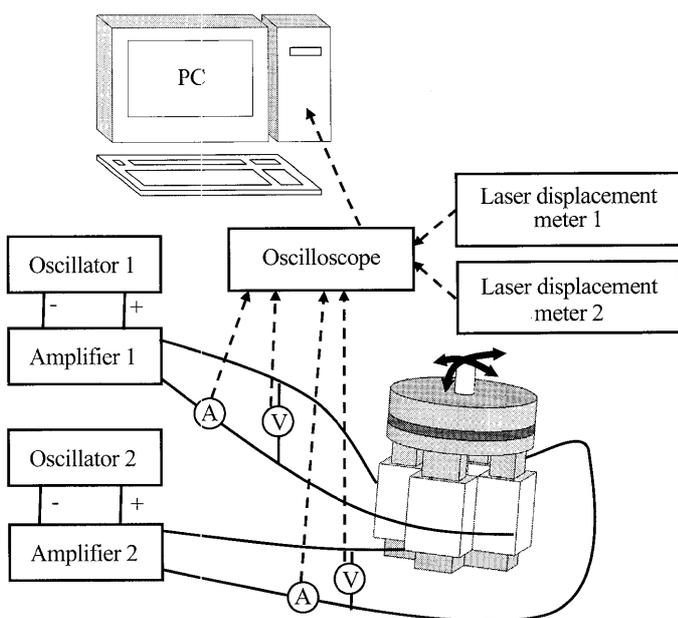


Fig. 15 Current torque characteristics measuring system.

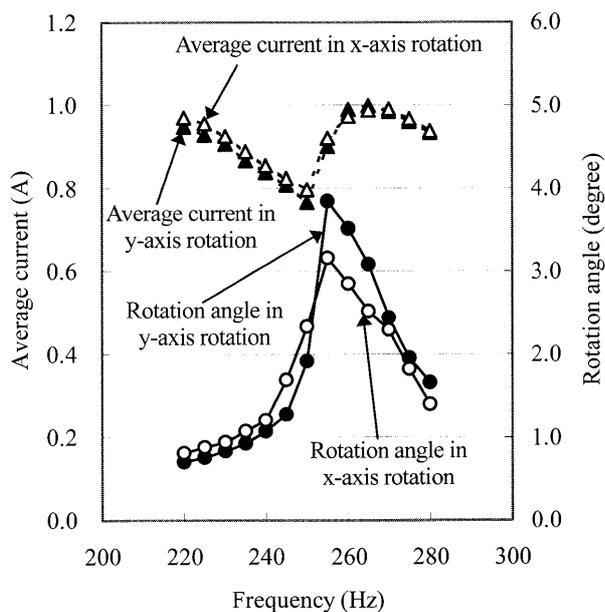


Fig. 16 Resonant characteristics. (Model 16)

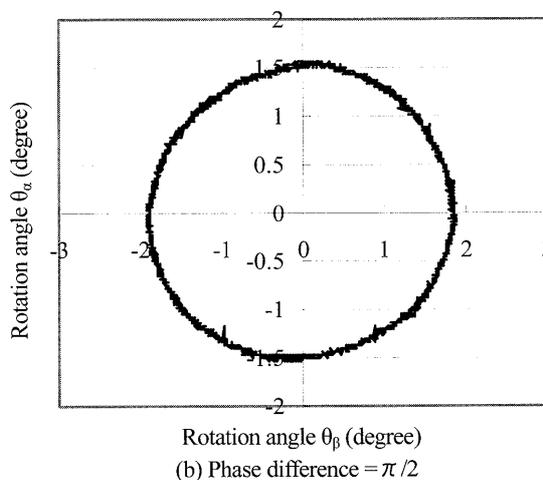
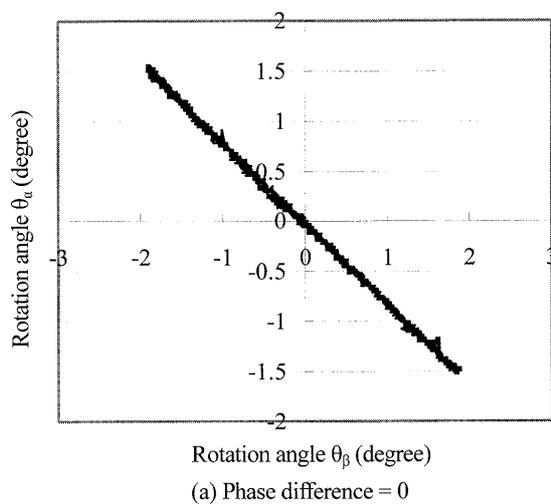


Fig. 17 Trajectory of end of shaft. (Model 16)

Fig. 15に周波数特性計測時の実験装置を, Fig. 16にx, y軸回りの周波数特性を示す。電圧7.2V_{p-p}の矩形波を印加し, y軸回りは255Hzにおいて最大回転角度3.9°となり, 平均電流は0.9Aとなった。またx軸回りも255Hzにおいて最大回転角度3.2°となり, 平均電流は0.9Aとなった。x軸, y軸回りの回転角度に差が生じているのは, 摩擦や試作機の寸法誤差が影響していると考えられる。Fig. 17にx, y軸回りに共に255Hzで駆動した場合の可動部シャフト先端の軌跡を示す。印加電圧の位相を変えることで, 斜め方向運動, 円運動の軌跡を描くことが確認された。本試作機ではx軸, y軸回りの共振周波数を同じに設定しているため, 周波数比による軌跡の検討は行っていないが, 理論的にはx軸, y軸の印加電圧の周波数や位相を変化させることで, 任意の方向に制御可能である。

4 まとめ

本論文では, 小型の球面電磁共振アクチュエータの構造を提案し, その動作原理を示した。また三次元有限要素法を用いてそのトルク特性を明らかにし, さらに磁石寸法の最適化を行った結果, 磁石内径φ16モデルのトルク定数が $16.2 \times 10^2 \text{mN}\cdot\text{m/A}$ と基本形状の107%とトルクを改善できることがわかった。また, 試作機との電流トルク特性を比較することで, 誤差3%で一致し, 解析の妥当性を確認した。さらに, 試作機の動作特性について, 電圧7.2V_{p-p}の矩形波印加時にx, y軸回り共に255Hzで共振し, 最大回転角度はそれぞれ3.9°, 3.2°となり, 平均電流は共に0.9Aとなることがわかった。さらに255Hz共振時に印加電圧の位相を変えることで, 斜め方向運動, 円運動の軌跡を実現し, 本アクチュエータが多自由度に駆動可能であることを確認した。

(2007年12月28日受付, 2008年3月6日再受付)

参考文献

- [1] 田中飛鳥, 鳥居肅, 海老原大樹他, 「多自由度球体アクチュエータの提案と設計」, 第11回MAGDAコンファレンス, PS2-3, pp.169-172, 2002.
- [2] E. h. M. Weck, T. Reinartz, G. Henneberger and R. W. De Doncker “Design of a spherical motor with three degrees of freedom”, Annals of the CIRP, vol. 49, pp.289-294, 2000.
- [3] 矢野智昭, 「多自由度アクチュエータ」, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.3, pp.330~333, 1997.
- [4] K. Hirata, T. Yamamoto, T. Yamaguchi, Y. Kawase and Y. Hasegawa, “Dynamic Analysis Method of Two-Dimensional Linear Oscillatory Actuator”, Proceedings of the 12th

Biennial IEEE CEFC PB3-8, pp.106, 2006.

- [5] K. Hirata, Y. Ichii and Y. Kawase “Novel Electromagnetic Structure with Bypass Magnetic Path for Reset Switch”, IEEJ Trans. IA, vol. 125, No.3, pp.293-296, 2005