アクティブコントロールエンジンマウント用電磁アクチュエータの開発

Development of an Electromagnetic Actuator for an Active Control Engine Mount

小林 正嗣^{*1}(学生員), 平田 勝弘^{*1}(正員), 北山 文矢^{*1}(学生員)

Masashi Kobayashi (Stu. Mem.), Katsuhiro Hirata (Mem.), Fumiya Kitayama (Stu. Mem.)

Linear oscillatory actuators using a DC motor converts a rotational motion into a linear motion. The actuator we previously proposed is difficult to assemble and its armature sometimes can collide with the rotor during operation because the armature is sandwiched between two rotors. In this study, we propose a linear oscillatory actuator that has a new structure. The new structure of this actuator solves the above problems because the armature is inserted inside the rotor. Also, we verified that the performance of the new actuator is equivalent to the previous model through FEM analysis and dynamic simulation.

Keywords: Active Control Engine Mount, Linear oscillatory actuator, DC motor, Finite Element Method.

1 緒言

近年、エンジンの振動や騒音を抑制することで、自動車の乗心地と車両性能を向上させている。エンジン振動・騒音の問題を解決するデバイスの1つとして、アクティブコントロールエンジンマウント: ACM (Active Control Engine Mount) が提案、実用化[1]されており、注目を浴びている。ACM は、加振アクチュエータと制御システムによって能動的制振を行うエンジンマウントである。

ACM 用のアクチュエータとして、応答性、制御性の自由度の高さから、電磁式アクチュエータが最も多く採用されている。その中でも現在ではソレノイドやボイスコイルモータが研究、実用化されているが、これらを ACM 用アクチュエータとして用いる場合、振幅増幅機構、駆動用交流電源を用いたコントローラ、センサなどの追加部品が必要となる。また、ボイスコイルモータの場合は、アクチュエータそのものが高コストである。そのため、これらを用いた場合 ACM システムとして高コストになる。現在でもこれらの部品は十分に低コスト化されていないため、乗用車に広く採用されておらず、低価格乗用車などへの搭載を目標とした ACM の研究報告例は少ない[2-4]。

そこで筆者らは、低価格乗用車用 ACM への適用を目指し、モーター一体型リニア振動アクチュエータ[5](従来モデル)を提案した。低価格乗用車へ採用されている

パッシブマウントを考慮し、要求仕様を Table 1 のように設定した。なお動作周波数は、搭乗者が特に不快と感じやすいアイドリングなどの低周波数域に特化することを前提としている。このモデルは、ブラシ付き DC モータの回転を、回転直動変換機構によって直進運動に変換し振動を発生させる。ブラシ付き DC モータは低コストであると同時に、その制御手法が十分に確立しているため特別なコントローラが不要となり、低コストの ACM を実現出来ると考えた。しかし、回転直動変換機構の組立性が悪くアクチュエータ自体の高生産性が実現できない、過負荷時に可動子と回転子が衝突するという課題を有していた。

本稿では、それらの課題を解決する新しいモーター一体型リニア振動アクチュエータを提案し、そのモデルでの推力向上案の検討と、有限要素法および MATLAB/simulink による特性検証の結果を報告する。

2 モーター一体型リニア振動アクチュエータの基本構造および推力発生原理

2.1 従来モデル (ツインロータモデル)

参考文献[5]から、従来モデルの基本構造は Fig. 1 のようになっている。このモデルは、駆動源となる DC モータと回転運動を行う回転子、往復直進運動を行う可動子から構成されている。可動子、回転子共に軸方向に多極着磁された永久磁石が配置されている。回転子が可動子を挟むように、2つ配置されており、2つの永久磁石は非磁性体によって機械的に接続されている。なお、可動子の回転運動、回転子の直進運動は機械的

連絡先: 小林 正嗣, 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1
大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻,
e-mail: masashi.kobayashi@ams.eng.osaka-u.ac.jp

^{*1} 大阪大学

Table 1 Requirements specification of linear oscillatory actuator using DC motor.

Maximum limit of size	Diameter	100mm
	Height	50mm
Property	Maximum thrust	$\pm 40\text{N}$
	Stroke	2.0mm
	Operating frequency	20 to 60Hz

Fig. 1 Basic construction of twin rotor model [5].

に拘束されている。

このモデルでは、可動子位置によらずエアギャップの合計が一定であることから、発生推力は可動子位置の影響を受けにくい。そのため、推力波形や振幅波形に高調波成分が含まれにくい。また、ツインロータとなっているため、それぞれのロータに発生する負荷トルクが逆方向になり、回転子全体の負荷トルクを低減できる。しかし、可動子が、それと同径で機械的に接続された回転子の2つの磁石に挟まれているために、組立性が悪い。また、エアギャップが可動子の直進運動と同軸のアキシシャルギャップとなっているため、可動子が外力や共振によって大きく振動した時に、回転子と衝突する恐れがある。

2.2 提案モデル (ラジアルギャップモデル)

本稿にて提案するラジアルギャップモデルの基本構造を Fig. 2 に示す。このモデルも従来モデルと同じく、DC モータ、回転子、可動子から構成される。回転子、可動子共に、径方向に多極着磁された永久磁石を組み合わせた円柱形となっている。可動子は磁石が軸方向に1層となっており、中心にヨークが配置され、そのシャフトにはばねが取り付けられている。また、回転子は軸方向に磁石が2層重なった構造になっており、その着磁方向は層同士で反対となっている。回転子の中心に可動子が挿入されており、回転子と可動子の間にラジアルギャップが形成される。

回転子と可動子の磁石のみに注目した推力発生原理を Fig. 3 に示す。Fig. 3 に示されるような可動子と回

転子の位置関係では、上部では反発力が発生し、下部では吸引力が発生するため、可動子には下向きの推力が発生する。そして、モータによって回転子を回転させることで連続的に変化する推力が発生し振動する。

ラジアルギャップモデルでは、エアギャップが可動子位置によらず一定である。また、回転子が2層構造となっているため、それぞれの層が負荷トルクを打ち消し合う。そのため、ツインロータモデル同様、発生推力は可動子位置の影響を受けにくく、回転子全体の負荷トルクを低減できるといった特徴を持つ。また、可動子を回転子に挿入することで組み立て出来るため、従来モデルで課題であった組立性が向上する。さらに、ラジアルギャップであるため、可動子と回転子が衝突する課題も解決出来ると同時に、従来モデルよりもストローク量を増加させることが可能になる。

Fig. 2 Basic construction of radial gap model.

Fig. 3 Principle of thrust generation of radial gap model.

3 推力向上案の検討

提案した基本モデルの特性を確認するため、三次元有限要素法による電磁場解析により静推力を求める。次に、その基本モデルを基に、磁石量を増やすことなく推力を向上させる回転子形状の改良案を提案し、基本モデルとの比較によりその有効性を明らかにする。

3.1 基本モデルの解析

Table 2 に基本モデルの仕様を示す。磁石体積は従来モデルと同じとした。なお、初期位置では、可動子の中心が回転子の中心に位置するようにした。Fig. 4 に可動子が初期位置からの回転角度に対する静推力を求めた結果を示す。推力は正弦波状に近い波形が得られている。また最大推力は、回転角度が 90 度の時に 29N となっている。要求仕様の最大推力は 40N であるので、基本モデルでは十分な推力が発揮できないと言える。

Fig. 5 に、可動子の直進運動軸方向から見た、磁束ベクトルのコンター図を示す。回転子から可動子にかけての磁束のループが出来ており、これによる吸引力が推力を生み出していると考えられる。しかし、磁束のループの経路が外側の空気層を通っている。このため、磁気抵抗が高くなり、磁束を有効に利用できていないと考えられる。

Table 2 Design of the basic model with radial gap.

Outside diameter of the rotor	14.2mm
Inside diameter of the rotor	10.2mm
Height of the rotor	14mm
Outside diameter of the armature	13.6mm
Inside diameter of the armature	9.2mm
Height of the armature	10mm
Magnetization of magnets	1.3T
Air gap between the rotor and armature	0.3mm

Fig. 4 Characteristics of thrust of basic model.

Fig. 5 Magnetic flux of basic model.

3.2 バックヨークによる推力向上

前節の結果より、空気層を通っていた磁束をバックヨークの付加により、磁束のループ中の磁気抵抗を減らして推力の向上を試みる。Fig. 6 に示すように、基本モデルの回転子外側にバックヨークを配置した。ヨークの厚さは 1.9mm とし、回転子全体の外径は 18mm となった。このモデルの推力を解析した結果を Fig. 7 に示す。推力は大きく上昇し、最大推力は 29N から 41.7N となった。

また、Fig. 8 に磁束の流れを示す。基本モデルで空気層を通っていた磁束の流れがバックヨークに流れており、磁束を有効に利用できていることがわかる。

3.3 回転子の磁石位置変更による推力向上

次に、前節の結果を基に、磁石体積を増加させずに、回転子の磁石位置を変更することによって推力を向上させることを考えた。Fig. 9 に前節で提案したモデルを可動子の直進運動軸に対して垂直な方向から見たときの磁束の流れを示す。図の右上の、丸で囲まれた部分に注目すると、可動子と回転子間のエアギャップに、斜め右の方向に磁束が流れている。この磁束が、直進運動方向のベクトル成分を有するため、可動子に直進運動方向の推力が発生すると思われる。そこで、直進運動方向のベクトル成分を増加させるために、Fig. 10 のように回転子構造を変更したモデルを考えた。バックヨークは回転子の外側全体に配置されているが、Fig. 10 では簡単のため表示していない。このモデルでは、回転子の 2 層の磁石の間にヨークを配置し、磁石量を増加させることなく回転子を長くした。そうすることで、エアギャップ中の磁束の直進運動方向成分を

Fig. 6 Basic model with back yoke.

Fig. 7 Characteristics of thrust of basic model with back yoke.

Fig. 8 Magnetic flux of basic model with back yoke.

Fig. 9 Magnetic flux of basic model with back yoke as seen from the aspect.

Fig. 10 Changes of rotor magnets.

増加させられると考えた。この回転子を用いたモデルについて、有限要素法によって静推力を求めた。そのモデルの仕様を Table 3 に示す。回転子構造の変更前後で推力の比較を行った結果、最大推力が 44.7N から 49.2N となり、約 10%の推力向上が達成できた。Fig. 9 のベクトル図にて注目した部分の変化を Fig. 11 に示す。エアギャップにおけるベクトルがより上向きになっており、直進運動方向成分が増えていることがわかる。このように、ラジアルギャップモデルにおいて、回転子の構造を変えることで、磁石体積を増やすことなく推力を向上させられることを明らかにした。

Fig. 11 Magnetic flux change before and after improved rotor.

Table 3 Design of the improved rotor model.

Outside diameter of the rotor	16mm
Inside diameter of the rotor	13mm
Height of the rotor	19mm
Outside diameter of the armature	12.4mm
Inside diameter of the armature	9mm
Height of the armature	10mm
Magnetization of magnets	1.3T
Air gap between the rotor and armature	0.3mm
Height of the yoke between rotor magnets	5mm

4 改良モデルの性能評価

Table 3 の仕様である改良モデルにおいて、可動子が初期位置および、1mm 移動した時の回転角度に対する静推力と負荷トルクを Fig. 12、Fig. 13 にそれぞれ示す。推力波形は、可動子が移動してもあまり変化していない。これは、エアギャップが常に一定であるためである。また、最大負荷トルクは、初期位置においては非常に低く、また、可動子位置が 1mm 移動した時でも、小型の DC モーターで十分動作可能な値である。回転子がそれぞれの層で負荷トルクを打ち消したため、全体として低い負荷トルクとなったと考えられる。

次に、このモデルの回転子を 1800rpm で強制回転させた時の動作特性を有限要素法と MATLAB/simulink の連成解析[6]によって求め、評価を行った。更に、Table 4 の仕様である従来モデルとの比較を行った。この時の運動パラメータは、Table 5 に示す通りで、両モデルとも同じ値を設定している。なお、磁石体積、外寸は等しくなるよう寸法を設定している。推力を Fig. 14 に、可動子位置を Fig. 15 に、負荷トルクを Fig. 16 に示す。周期的な推力が発生することにより、可動子が振動す

ることを確認できた。その最大推力は約 45N であり、要求仕様を満たしている。また、負荷トルクも最大 50mNm 程度と小さく、低負荷トルクで回転可能なことがわかった。可動子振幅についても、約 2.0mm と要求仕様のストローク量を満たしている。2 つのモデルを比較すると、ラジアルギャップモデルはツインロー

Fig. 12 Characteristics of thrust and torque of improved rotor model (0mm).

Fig. 13 Characteristics of thrust and torque of improved rotor model (1mm).

Table 4 Design of twin rotor model.

Outside diameter of yokes and magnets	18 mm
Inside diameter of yokes and magnets	10 mm
Height of yokes and magnets	3 mm
Magnetization of magnets	1.3 T
Initial gap of armature and rotors	2 mm

Table 5 Motion parameter.

Spring constant	51.5 N/mm
Mass of armature	82.6g
Viscous damping constant	3.6 Ns/m
Dynamic friction force	0 N
Rotor revolution	1800 rpm

Fig. 14 Time variation of thrust.

Fig. 15 Time variation of armature position.

Fig. 16 Time variation of load torque.

タモデルと同等の推力特性、低負荷トルク特性を有しており、ほぼ同等の振動特性を実現出来ることがわかった。

5 結言

本稿では、先行研究であるツインロータモデルの構造的課題を解決するとともに、低負荷トルク、低トルクリップルを実現できるラジアルギャップモデルを提案した。そして、バックヨークを利用し、回転子構造を変えることで、推力を大きく改善できることを明ら

かにした。更に、有限要素法と MATLAB/simulink の連成解析によって、磁石体積、外寸を同じとして、ツインロータモデルと同等の動作特性を実現出来ることを明らかにした。今後は、試作機による実機検証を行う予定である。

(2015 年 4 月 22 日受付)

参考文献

- [1] H. Matsuoka, T. Misaka, and H. Nemoto, Development of Active Control Engine Mount, Honda R&D Technical Review, Vol. 15, No. 2, pp. 209-214 (2003).
- [2] H. Park, B. H. Lee and C. W. Lee, Design of an Active Control Engine Mount using a Direct Drive Electrodynamic Actuator, Proceeding of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conference & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2007, pp. 103-108 (2007).
- [3] B. H. Lee, C. W. Lee, Model Based Feed-forward Control of Electromagnetic Type Active Control Engine-mount System, Journal of sound and Vibration, Vol. 323, pp. 574-593 (2009).
- [4] 酒井昌彦, 平田勝弘, 北山文矢, ACM 用モーター体型リニア振動アクチュエータ, 回転機・リニアドライブ・家電・民生合同研究会, LD-12-39, pp. 11-14 (2012).
- [5] 北山文矢, 平田勝弘, 山田達郎, 新口昇, モーター体型リニア振動アクチュエータの負荷トルクおよび高調波振動の低減, 電気学会モータドライブ・リニアドライブ合同研究会資料, LD-13-107, pp. 17-22 (2013).
- [6] K. Hirata, Y. Ichii, and Y. Arikawa, "Linear oscillatory actuator with dynamic vibration control," Trans. IEE Japan., vol. 122-D, no. 4, pp. 519-551 (2002).