

反発浮上小型磁気軸受の回転特性と振動回避法の提案

Evaluation of High-Speed Rotation Characteristics and a Proposal for Avoiding the Vibration Mode in Repulsive Type Magnetic Bearing Systems Using Permanent Magnets

大路貴久・飴井賢治・作井正昭・山田外史*

富山大学工学部, 富山市五福 3190 (〒930-8555)

*金沢大学自然計測応用研究センター, 金沢市小立野 2-40-20 (〒920-8667)

Takahisa Ohji, Kenji Amei, Masaaki Sakui, and Sotoshi Yamada*

Faculty of Engineering, Toyama Univ., 3190 Gofuku, Toyama 930-8555

*Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa Univ., 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667

This paper reports on the performance characteristics of the permanent magnet repulsion-type magnetic bearing, which has a vertical-shaft-type inner rotor with polygon scanner mirror facets. In general, though this type of magnetic bearing system has the feature that the radial stiffness is constant in the permanent magnet sections at a steady position, if the radial stiffness can be changed by an axial active control, various applications of this system can be expected. We propose the generation of a radial restoring force, using an iron board with a conical surface set up in the rotor shaft. Stable rotation at a maximum rotation speed of about 50000 rpm is achieved, and a change in the radial stiffness in the noncontact levitation condition is confirmed.

Key words: magnetic bearing, permanent magnet, stiffness, restoring force, natural frequency, mode switching

1. はじめに

一般的な能動形磁気軸受の利点(摩擦・摩耗がない, メンテナンス不要, 特殊環境化での使用)を持ち, さらに付帯設備等を簡素化する方式として, 反発浮上形磁気軸受が提案されている^{1,2)}. 本方式は回転軸に対し1軸のみを電磁石により制御し, 永久磁石反発によって回転を除く残りの4軸を受動的に安定化することができる. また特徴として, 永久磁石による剛性が小さくかつ一定であるため, 瞬時外乱や擾乱がなく, 機械的負荷が小さい装置に適用できる. このような観点から, 永久磁石反発を利用した磁気軸受の事例は, 付加的な使用^{3,4)}や, 低回転もしくは無回転での使用⁵⁾などがあり, 小型かつ高速回転を実現した例ではターボ分子ポンプ⁶⁾に限定されている.

一方, 高速回転を利用する装置としてポリゴンミラ(光偏向走査装置)が挙げられる. これは情報機器等に内填されており超高速回転化が望まれている. 従来技術として動圧軸受方式, 磁気受動支持-動圧軸受併用方式⁶⁾などがあり, 高速回転での受動安定が可能であるが, 回転体は多面鏡を持つため空気抵抗による風損が大きく, 即ち回転に必要な電力が大きという問題点がある.

能動形磁気軸受は, ラジアル方向の支持剛性を制御できるこ

とも大きな利点である. この利点を本方式に適用することを筆者らは試みており, 受動制御軸の静的な剛性調整方法⁷⁾や制御電磁石対向面の形状変化による動作特性を評価してきた. ラジアル受動剛性を何らかの方法で動的に変化させることが出来れば, 回転時の軸振動を回避することが可能であり, 永久磁石反発による磁気軸受方式での高速回転化が期待される.

本稿では, 多面鏡を有するインナーロータ形の縦軸反発浮上磁気軸受を製作し, 基礎特性として浮上回転特性, 電力特性を評価した. また, ラジアル剛性を動的に変化させるための円錐状吸引板を有する回転体を提案し, 浮上静止時においてその効果を確認したので報告する.

2. 反発浮上小型磁気軸受の構成

2.1 装置仕様

縦軸形の反発浮上磁気軸受として, Fig. 1のインナーロータ形装置を試作した. 上下に配置された円筒形永久磁石(ロータ磁石(直径8 mm(内径4 mm), 高さ8 mm), ステータ磁石(直径14 mm(内径10 mm), 高さ8 mm), Nd-Fe-B磁石, 軸方向着磁)により, 半径方向を受動的に安定化する. 浮上方向は, 永久磁石構成における不安定軸となるため, Fig. 1のように上下の制御電磁石および渦電流式変位センサ(Keyence EX-008)によって能動制御する(以降, 上部電磁石を電磁石1, 下部電磁石を電磁石2とする). 中心軸はSUS304製であり, 外接直径40 mm, 面高さ15 mmのアルミ多面鏡(12面)を圧入し, 電磁石1に対向する吸引板(SS41製)を内装してある. モータ回転子は積層化されたケイ素鋼板を軸中央に配置し, 銅製エンドリングで固定する. ここでは三相電源を使用し, かご形誘導機による回転を試みており, 電源周波数は最高900 Hzで駆動する. 電磁石2の吸引板(SS41製)は中心軸下端に設置され, 円錐形状となっている. 2つの電磁石とその吸引板およびモータ固定子, 回転子以外は全て非磁性材料で作製しており, 回転体以外の部品はアルミ製筐体に固定されている. 軸長81 mm, 全質量126 g, 上下の永久磁石間距離55 mmである.

2.2 反発力解析とパラメータの導出

Fig. 2に反発力解析モデルの一例を示す. FEM解析ソフトMaxwell EMによる軸対称モデルを作成し, ロータおよびステ

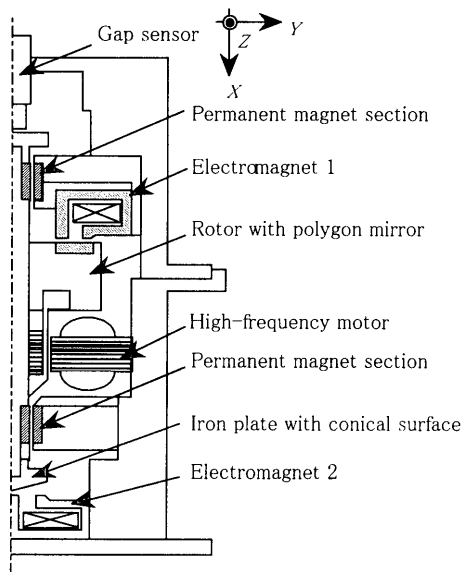


Fig. 1 Configuration of the repulsive-type magnetic bearing. The rotor has an iron plate with a conical surface and a body with polygon mirror facets.

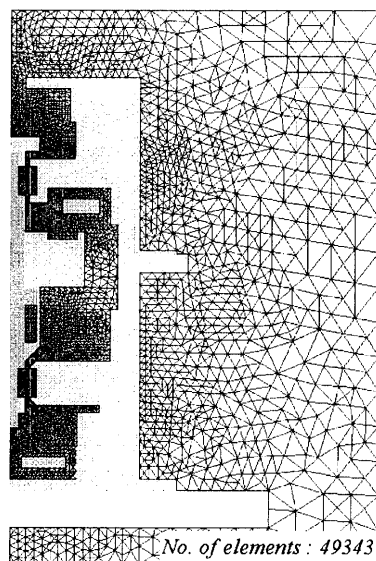


Fig. 2 Axisymmetric FE model for analyzing the repulsive force.

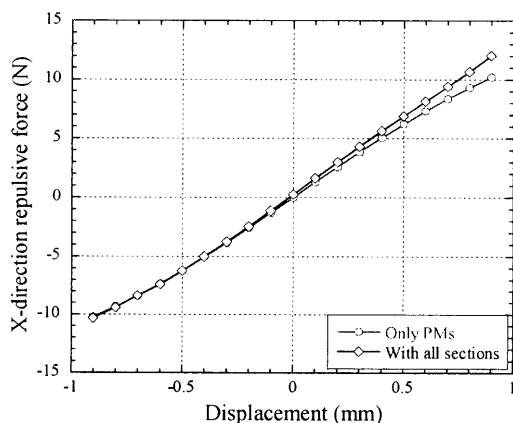


Fig. 3 Repulsive force characteristics along the X-axis.

Table 1 Principal parameters of the magnetic bearing.

Mass of the rotor	0.126 kg	Axial repulsive force	2.25 N
Length of the shaft	81 mm	Axial airgap	0.63 mm
Rotor diameter	40 mm	Resistance of E.M.1	5.5 Ω
Dimensions of the rotor PM	8 ϕ ×4 ϕ ×8 mm	E.M.2	2.2 Ω
stator PM	14 ϕ ×10 ϕ ×8 mm	Inductance of E.M.1	26.45 mH
Axial stiffness	13.78 kN/m	E.M.2	1.74 mH

一タ磁石の磁極面を一致させたときをゼロ位置とする。回転体を 0.1 mm ずつ浮上方向に変化させて、浮上方向反発力を導出した。解析では比較のため、周辺に存在する磁性材料の材料特性を与えない場合についても調べた。解析結果を Fig. 3 に示す。装填される永久磁石によって、周辺の磁性材料が僅かに磁化されることによる反発力の増加が確認できる。特に回転体が下方へ変位した際にその傾向は強くなる。これは電磁石 2 と吸引面との空隙の減少により吸引力が働くためであり、制御時の定常吸引力として増分する必要がある。この解析結果から制御時の浮上方向剛性 $k_x = 13780 \text{ N/m}$ が得られ、装置のパラメータとして使用する。その他、各電磁石に対するパラメータ等は測定によって容易に得られる。Table 1 に装置のパラメータを示す。

2.3 制御・計測システムとモデル化

回転体の上下に電磁石を配置した本機では、プッシュプル方式による浮上制御が適当であるが、電磁石 2 の吸引板形状による効果を確認するために、ここでは電磁石 1 のみを制御し安定化を図る。Fig. 4 に制御システムを示す。回転体上方に設置された変位センサからの信号を A/D、D/A 変換器オンボードの DSP (Heron DSP6031) に取得し、電磁石 1 に加える電圧信号を計算しパワーアンプに出力する。図中の DSP 内では微小変化分のみを扱う。信号系とは別に、外部から定常電圧を印加できるようにスイッチが設けられており振動回避時に使用する。また、軸振動や回転数を測定するための計測器を設置している。

制御対象となる回転体は剛体とし、体積中心および質量中心が中心軸上に存在すると仮定する。回転体の運動方程式と電磁方程式を動作点近傍で線形化し、以下の状態方程式を導出する。

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx}\end{aligned}\quad (1)$$

ただし、

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= \begin{bmatrix} x_\delta & \dot{x}_\delta & i_{\delta 1} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{u} = e_{\delta 1} \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{m} \left(a + 2 \frac{f_{e10}}{x_{10}} \right) & 0 & -2 \frac{f_{e10}}{m i_{10}} \\ 0 & 0 & -\frac{R_1}{L_1} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{L_1} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (2)$$

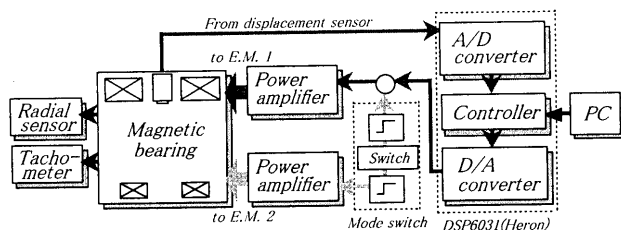


Fig. 4 Schematic of the controller and measuring system.

であり、行列内は全て既定値となる。 x_s, i_{s1}, e_{s1} はそれぞれ定常位置、電磁石 1 の定常電流および定常電圧からの偏差を表す。また R_1, L_1 は電磁石 1 の抵抗およびインダクタンスである。

制御系設計には平衡状態において LQG コントローラを使用し、以下のコントローラによって安定浮上を確認した。

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c y \\ u &= C_c x_c \end{aligned} \quad (3)$$

各行列は以下に示す。

$$\begin{aligned} A_c &= \begin{bmatrix} -8.799 \times 10^2 & 1 & 0 \\ -1.936 \times 10^5 & 0 & -5.952 \times 10^1 \\ 3.076 \times 10^7 & 7.948 \times 10^4 & -5.277 \times 10^3 \end{bmatrix} \\ B_c &= \begin{bmatrix} 8.799 \times 10^2 & 3.872 \times 10^5 & -1.788 \times 10^{-1} \end{bmatrix}^T \\ C_c &= \begin{bmatrix} -8.135 \times 10^5 & -2.102 \times 10^3 & 1.341 \times 10^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

3. 実験結果

3.1 浮上特性

浮上方向の制御状態として、ここでは静止時と安定回転時 (19400 rpm) での結果を Fig. 5 に示す。非接触浮上状態は、上記コントローラによって達成されるが、状態変数としては変位のみを観測し、電磁石 1 の定常電流値は外部回路から任意に調整できるように製作してあるため、初期位置 (電磁石 2 に接触させた状態。電磁石 1 の空隙約 0.76 mm) から Table 1 に示す定常位置までの浮上制御が可能である。また電磁石 2 の吸引板が円錐形状であるため、高速回転からの非接触状態も容易に達成できる。Fig. 5 より定常位置において振幅は静止時で約 8 μm 、安定回転時で常時約 10 μm で安定浮上を達成した。この結果から、解析より得られた浮上方向剛性値を使用しても良好な制御が可能であると言える。安定回転時での振幅の増加分は、モータ駆動用インバータからのノイズ成分が重畳されたものであり、回転動作と浮上制御極めて少なく独立に扱うことができる。電磁石 1 による消費電力は約 3.4 W である。

3.2 回転特性

高速回転時の実験環境を Fig. 6 に示す。筐体を含めた装置全体をガラスベルジャで覆い、油回転ポンプで徐々に減圧し低真空状態 (約 2 kPa) で半径方向の振動測定や電力測定を行う。振動測定には制御用と同じ渦電流式変位センサ (Keyence EX-008) を使用し、レーザー式回転計 (小野測器 TM-2120)

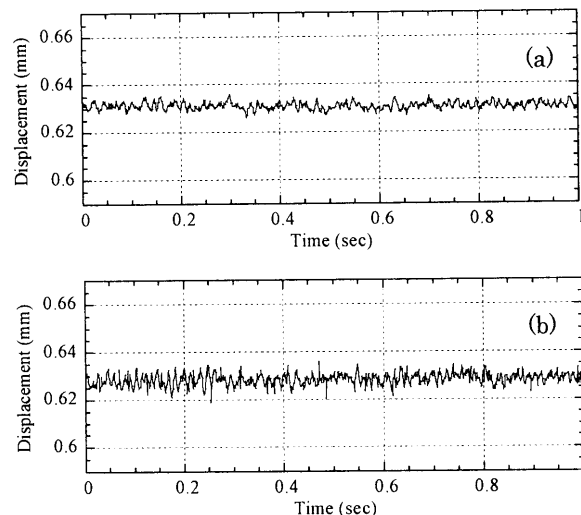


Fig. 5 Noncontact levitation characteristics for the axial direction: (a) at zero speed, (b) in steady rotational state at 19400 rpm.

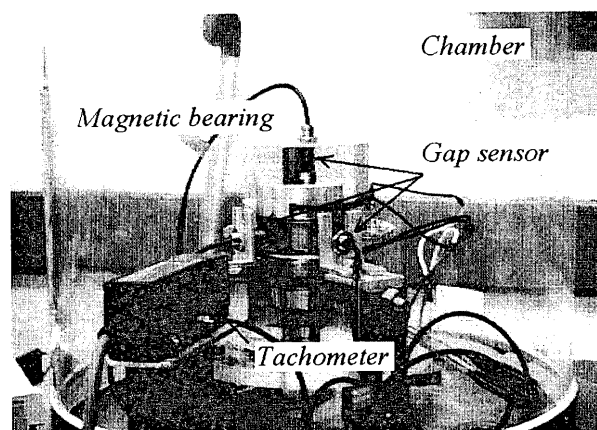


Fig. 6 Photograph of the experimental setup.

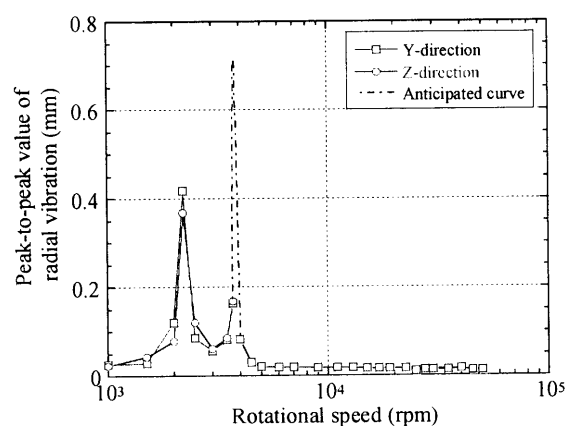


Fig. 7 Characteristics of the radial vibration vs. rotational speed up to 50000 rpm in vacuum.

によってベルジャ外部から回転数を測定する。

回転速度に対する半径方向振動幅の p-p 値を Fig. 7 に示す。4500 rpm 以上では安定回転となり回転数の上昇に伴い振動幅は減少する。最高回転数 (50000 rpm) において半径方向振動

は円軌道かつ回転数に同期しており約 $12\text{ }\mu\text{m}$ である。回転数を徐々に変化させ、固有振動数に起因する危険速度を測定したところ、 2220 rpm （並進モード）および 3800 rpm 付近（傾きモード）であった。振動幅が特に急激に増加する 3800 rpm 付近では、浮上方向への制御が不能となったため、Fig. 7 では模式的に点線で示してある。これらの危険速度を回避する手法を後述する。

3.3 電力特性

大気圧中と低真空中（約 2 kPa ）での駆動モータにおける消費電力を比較した。ここでは安定回転時として 7000 rpm からの結果を Fig. 8 に示す。約 25000 rpm での消費電力は大気圧中の約 10 分の 1 であり、 45000 rpm で 2 W 以下である。 45000 rpm 以上で電力は急激に上昇し 50000 rpm 以上の回転が困難となった。非接触かつ低真空中でのかご形誘導機による運転は、放熱が困難であるため、効率の高い同期機を使用するなどの対策が必要である。

4. 振動回避法の提案

回転体の固有振動数に起因する危険速度は剛体モードであれば、Fig. 7 のように低回転域で生じる。また永久磁石反発による半径方向剛性は通常の能動形磁気軸受と比べても小さいことから、剛体モードから弾性モードまでの安定回転領域は比較的広い⁸⁾。本方式において低回転域で半径方向振動を回避するには、(i)危険速度通過後の浮上制御、(ii)回転数の急激な上昇による振動回避、(iii)ダンパによる振動抑制、(iv)危険速度変化による振動回避、が考えられる。本装置では、上記(i)～(iii)を実現しているが、ここでは能動形磁気軸受で行われる半径方向の能動的な振動抑制ではなく、システムの危険速度自体を変化させることで、振動を回避する方法（上記(iv)）を提案する。

Fig. 4 に示す制御システムにおいて、円錐形吸引板を持つ電磁石 2 に定常電圧を与え、その際に生じる吸引力を相殺する力を電磁石 1 に同時に発生させる。この操作は危険速度付近に達した際に外部回路によって与えられるが、回転数を検出し、A/D 変換器に与えればコントローラ内でも動作可能である。また、その他の信号系は同一であるため、(2)式のシステムおよび(3)

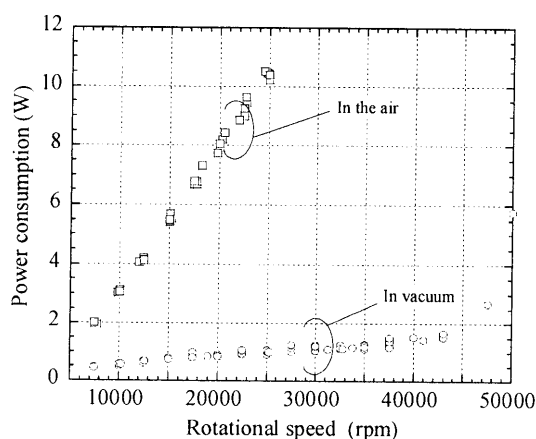


Fig. 8 Comparison of power consumption in the air and in low vacuum.

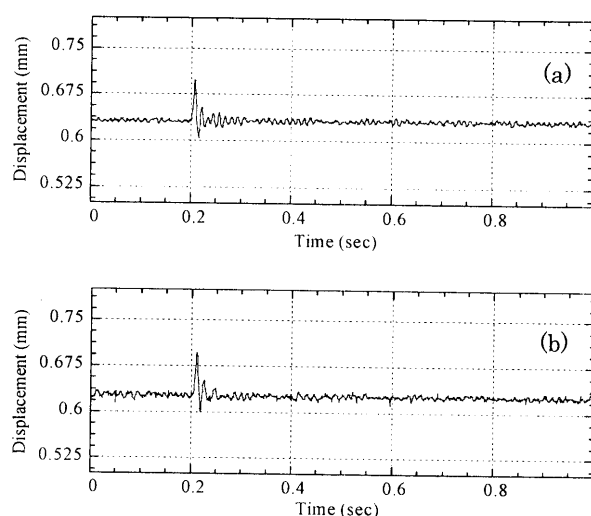


Fig. 9 Response characteristics for the axial direction, with the step current input into E.M.1 and E.M.2 simultaneously (a) at zero speed, and (b) in steady rotational state at 19400 rpm .

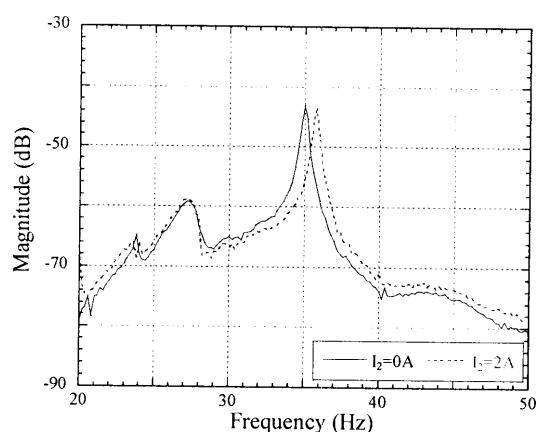


Fig. 10 Comparison of the impact response characteristics with and without a current of E.M.2 in a condition of noncontact levitation at zero speed.

式のコントローラをそのまま用い、重畳する吸引力を外乱として扱う。実際に電磁石 2 にステップ状電流 $I_2 (= 0.8\text{ A})$ を印加した場合の浮上方向振動を Fig. 9 に示す。安定回転時であれば、Fig. 5 と同様、回転とは独立に扱え、約 0.1 秒以下で定常位置に収束することがわかる。

Fig. 10 に通常動作時と電磁石 2 に 2 A の電流を与えた状態での半径方向へのインパルス応答の比較を示した。回転体の剛体モードにおける固有周波数が 2 カ所 (27 Hz 付近、 35 Hz 付近) 存在し、特に 35 Hz 付近（傾きモード）での振幅が急峻かつ大きい。また、浮上位置を一定に保ちつつ、電磁石 2 に電流を印加し浮上方向への吸引力を発生させた場合、円錐形状をもつ吸引板には求心力が働き、そのため、傾きモードを示す振動周波数が増加することがわかる。この効果は、浮上方向（制御方向）の吸引力を変化させることで、半径方向剛性を変化させることができることを意味する。ただし、剛性を増大させるためには、上下の電磁石に定常吸引力を発生させるための電流を一時的に

印加するため、モード変化による振動回避を考慮した場合、電流印加時に消費電力が増大するという問題が存在する。

5. まとめ

本稿では、縦軸形の反発浮上磁気軸受として、多面鏡および円錐状吸引板を有するインナーロータ形装置について評価した。基礎特性として、低真空環境下において約 50000 rpm で振動幅 20 μm 以下での安定回転と、45000 rpm 時での低消費電力 (2 W 以下) を実現した。また、円錐状吸引板の効果により、半径方向の剛性を動的に変化させることが可能であることと、安定回転時であれば 2 つのモード (通常モード, 吸引力印加モード) を定常位置で切り替えることが可能であることを示した。

今後は、超高速回転が可能で、発熱の少ない駆動方式 (同期モータ等) を適用する必要がある。ただし、モータ部では回転トルクと同時に半径方向の吸引力が生じるため、回転体全体での半径方向剛性が低下するという問題が予想される。よって、本方式の適用例としてポリゴンミラのような超高速回転を必要とする場合に即したモータ構成を検討すべきである。

文 献

- 1) I. Satoh, Y. Shirao, and S. Mori: *The 5th Symposium on Electromagnetics and Dynamics*, 293 (1993).
- 2) S. Yamada, T. Ohji, T. Miyamoto, and F. Matsumura: *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 4, 1, 40 (1996).
- 3) S. Ueno, H. Kanebako, T. Yamane, and Y. Okada: *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 8, 2, 239 (2000).
- 4) T. Tomita, K. Oguri, M. Watada, S. Torii, and D. Ebihara: *Proc. of 3rd Int. Sympo. on Linear Drives for Industry Applications*, 213 (2001).
- 5) T. Ohji, T. Azuma, H. Inoue, S. Yamada, M. Iwahara, and Y. Takata: *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 9, 4, 503 (2001).
- 6) H. Kawamoto: *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, C, 64, 620, 1148 (1998).
- 7) T. Ohji, S. Yamada, and M. Iwahara: *Journal of Magnetics Society of Japan*, 25, 4-2, 1103 (2001).
- 8) T. Ohji, M. Kano, S. C. Mukhopadhyay, S. Yamada, and M. Iwahara: *Journal of Magnetics Society of Japan*, 24, 1011 (2000).

2002 年 10 月 4 日受理, 2003 年 1 月 17 日採