

特集 身近なリニアモータ

## リニア共振アクチュエータの逆起電圧検知による PID 制御

## PID Control for Linear Resonance Actuator using the back-EMF

浅井 保至<sup>\*1</sup>(学生員), 平田 勝弘<sup>\*1</sup>(正員), 太田 智浩<sup>\*2</sup>(正員)

Yasuyoshi ASAI (Stu. Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.), Tomohiro OTA (Mem.)

Linear resonant actuators (LRAs) have been used in wide range of application because they can reciprocate in comparatively short stroke in spite of their compact size and lightweight. However, the amplitude of LRAs severely decreases in response to an external load. This paper proposes a control method to maintain constant amplitude against an external load by adopting the PID control in the PWM feedback control by the back-EMF detecting from the coil. The effectiveness of this method was clarified by both 3-D finite element analysis and the measurement.

**Keywords:** Linear Resonant Actuator, PWM control, PID control, 3-D Finite Element Method, Dynamic Analysis.

## 1 緒言

近年, リニアモータおよびリニア電磁アクチュエータは, 産業界の様々な分野において活発に利用されており, その代表的利用として, 輸送システム, 工場用搬送システム, ロボット, NC 工作機などの FA 機器から情報端末機, 事務機などの OA 機器まで, 幅広く展開している。

その中で, リニア振動アクチュエータ (Linear Oscillatory Actuator: 略称 LOA) は小形・軽量の構造を有し, 短いストロークでの往復運動が可能であるというなどの理由から, 電気シェーバや電動歯ブラシなど様々な電気製品に応用されている[1-3]。特に, バネ共振を利用することにより高効率なリニア共振アクチュエータ (Linear Resonant Actuator: 略称 LRA) が注目されているが, 外部からの負荷に対して振幅が大きく減少するという問題を有する。そこで本研究では, 筆者らが研究してきた電気シェーバ用 LRA の, 検知コイルからの逆起電圧信号による PWM フィードバック制御 [4] に PID 制御を導入することにより, 負荷に対して一定の振幅を維持可能な制御法を提案する。三次元有限要素法および実験により, その有用性を明らかにする。

## 2 解析手法

## 2.1 有限要素法による磁界解析

電圧源を入力とした磁界の基礎方程式は, 磁気ベクトルポテンシャル  $A$  とコイルに流れる電流  $I_0$  を用いて式(1)~(3)のように表される。

$$\text{rot}(\nu \text{rot } A) = J_0 + \nu_0 \text{rot } M \quad (1)$$

$$E = V_0 - RI_0 - \frac{d\Psi}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$J_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 n_s \quad (3)$$

ここで,  $\nu$  は磁気抵抗率,  $J_0$  は強制電流密度,  $\nu_0$  は真空の磁気抵抗率,  $M$  は永久磁石の磁化,  $V_0$  はコイル端子間電圧,  $R$  は実効抵抗,  $\Psi$  はコイルの総鎖交磁束数,  $n_c$  はコイルの巻き数,  $S_c$  はコイルの断面積,  $n_s$  はコイル断面の単位法線ベクトルである。

## 2.2 運動方程式

直線運動をする可動部の運動について解くべき方程式は式(4)で表される。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + kx = F_x \quad (4)$$

ここで,  $M$  は可動子の質量,  $x$  は可動子の位置,  $C$  は粘性減衰係数,  $k$  はバネ定数,  $F_x$  は磁力の  $x$  方向成分である。三次元有限要素法を用いて式(1), (2)を連成し, 得られた磁束分布からマクスウェルの応力法によって, 推力を求め, これを式(4)へ代入して, 各時間ステップの可動部の位置を求める。尚, 本解析手法においては, PWM 制御を考慮したフィードバック制御下

連絡先: 平田 勝弘, 〒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: k-hirata@ams.eng.osaka-u.ac.jp

<sup>\*1</sup>大阪大学 <sup>\*2</sup>パナソニック電工

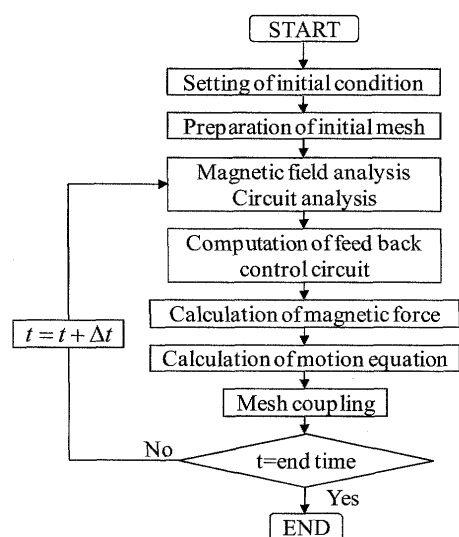


Fig. 1 Flowchart for analysis.

での動作特性を求める。解析フローチャートを Fig. 1 に示す。

### 3 LRA の構造と制御概要

#### 3.1 基本構造

本研究で取り上げたリニア共振アクチュエータの外観を Fig. 2 に、模式図を Fig. 3 示す。並行に 2 個配置された可動子は永久磁石、磁性材料からなるバックヨークで構成されており、固定子は、E 字型のステータ（固定鉄心）とコイルから成る。可動子は、固定子とのエアギャップ 0.36mm を保持するように共振バネで支持されている。2 個の可動子は極性の異なる永久磁石を有し、コイルに交番電圧を与えることによって、それぞれ逆方向へ往復振動をする。また、コイルは電圧印加に加えて、後述する PWM フィードバック制御のための逆起電圧検知にも用いている。

#### 3.2 PWM 制御

Fig. 4 を用いて、本アクチュエータで導入する PWM 制御の有効性を一般の制御と比較して説明する。一般の制御では、磁石の共振振動により発生する検知コイルからの逆起電圧にもとづき決定される Duty に応じて矩形波電圧を一定時間印加する。このとき、逆起電圧および巻線のインダクタンスによって、三角波に近い電流波形を生成する。

それに対して、PWM 制御では、交番電圧の印加時間において、さらにスイッチング制御し、オン、オフの時間を Duty に応じて変化させる。本制御により、電流波形がノコギリ波状となり、平均電流を低下させ、

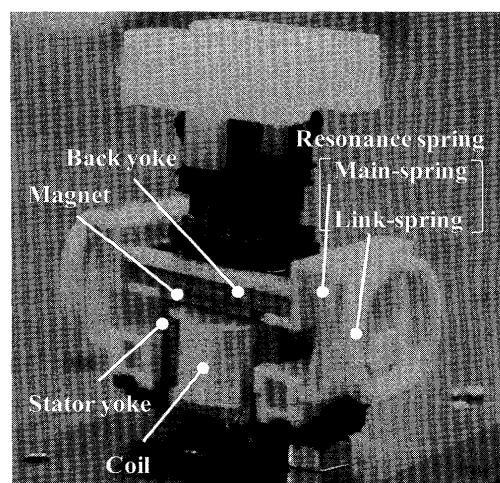


Fig. 2 Basic structure of the LRA.

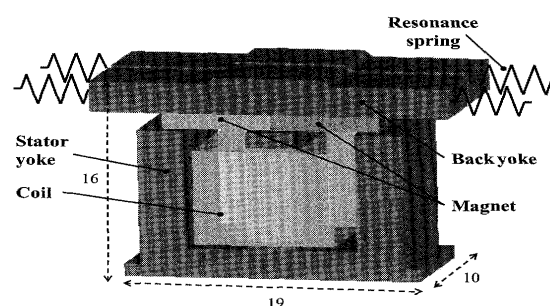


Fig. 3 Schematic diagram.

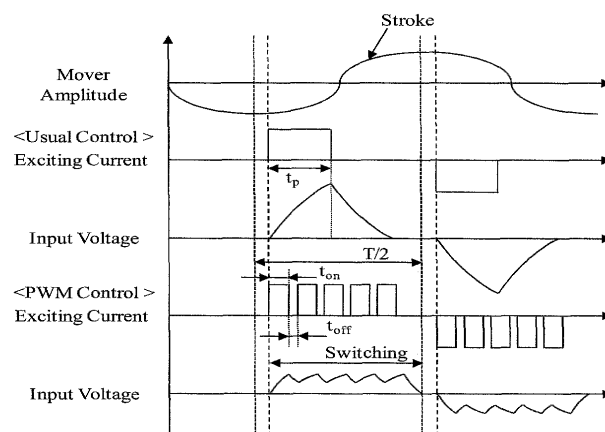


Fig. 4 Comparison of voltage and current waveforms.

また電圧を印加していない  $t_{off}$  区間においても電流が流れ、推力が発生するため、一般のフィードバック制御より高い駆動効率を実現できる。

#### 3.3 PWM フィードバック制御

リニア共振アクチュエータは、共振を利用しているため負荷がかると振幅が減少するという課題がある。これに対して、本稿で取り上げたアクチュエータシステムでは、コイルからの逆起電力をもとに振幅を推定

し、その振幅に応じて前節で示した PWM 電圧の印加時間 (Duty) を制御する PWM フィードバック制御を採用している。

筆者らはこれまでにフルブリッジ回路を用いた、バイポーラ駆動の PWM フィードバック制御について検討してきたが[5]、本稿では、制御回路、制御内容の簡略化を目的としたユニポーラ駆動での PWM フィードバック制御について検討する。Fig. 5 にその詳細を示すが、大きく分けて以下の a~e の 5 つの区間に分けて制御している。

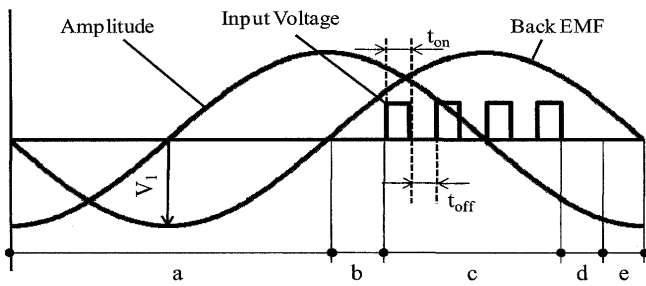


Fig. 5 PWM feedback control.

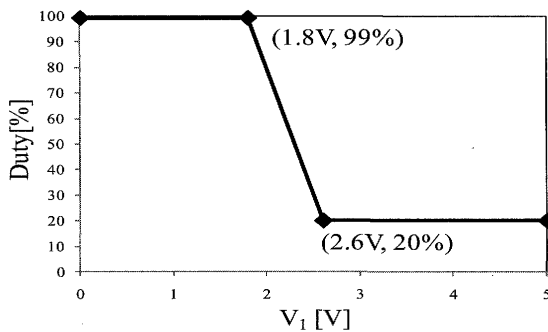


Fig. 6 Control function.

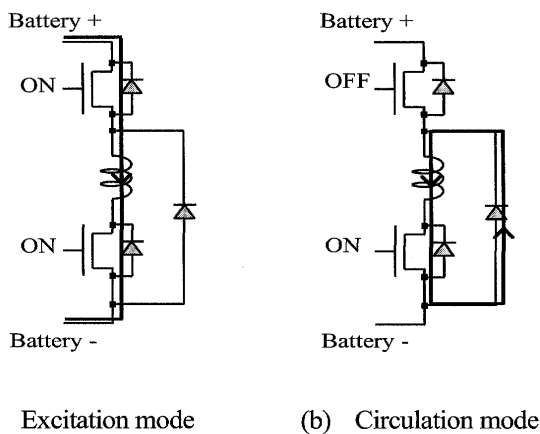


Fig. 7 Control circuit.

まず、区間 a において逆起電圧が 0 となってからの逆起電圧の最大値  $V_1$  を検知し、区間 b にて逆起電圧が 0 となってから一定時間後に 3.6V の矩形波電圧を印加、区間 c で区間 a の逆起電圧  $V_1$  より決定される Duty に従って電圧を印加、区間 d において、ダイオードにより回路に電流を回生し、その後、区間 e で回路を開放する。区間 c において、PWM フィードバック制御により、電圧波形を細かいパルス波とし、各パルス波間の印加電圧 off の区間において流れる電流を利用することで、高効率な駆動を実現している。また、区間 c における電圧印加時間は、式(5)で表される Duty を、検知する逆起電圧  $V_1$  に応じて、Fig. 6 の制御関数に従って決定する。区間 c および、区間 d での制御回路は、それぞれ、Fig. 7 (a), (b) に示す通りである。

$$Duty = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (5)$$

#### 4 解析手法の検証

##### 4.1 解析モデルと解析条件

解析条件、空気領域を除く有限要素モデルをそれぞれ Table 1, Fig. 8 に示す。コイル抵抗と FET 抵抗を含んだ回路全体の抵抗は電圧印加区間では抵抗(on)で、回路回生区間では抵抗(off)で与えられる。

また、解析諸元は、要素数約 670,000、辺数約 77,000、未知変数約 79,000、時間刻み  $\Delta t$  を  $10 \mu\text{sec}$ 、ステップ数 1,300 とした時の計算時間は約 300 時間となった。

Table 1 Analysis condition.

Input voltage (V)	3.6	Mass of mover (g)	6.95
Magnetization of magnets (T)	1.42	Viscous dumping coefficient (N·s/m)	0.14
Resistance(on) (mΩ)	350	Resistance(off) (mΩ)	290
Spring constant (N/mm)	13.36	Diode voltage (V)	0.5

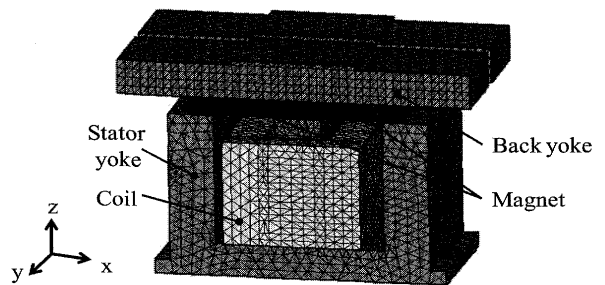


Fig. 8 FEM model.

#### 4.2 実験装置

実験装置の写真を Fig. 9 に示す。これらの実験装置を用いて実機による動作特性を計測した。以下に実験の手順を示す。

安定化電源より供給される 3.6V の直流電圧を、マイコンにより制御される制御回路によって PWM 電圧に変換し、コイルに印加する。可動子の変位はレーザ変位計によって測定する。その際、コイルの両端電圧を電圧プローブで、コイルに流れる電流を電流プローブで同時に測定する。なお、レーザ変位計、電圧プローブ、電流プローブの出力はオシロスコープを介してパソコンへ取り込む。

#### 4.3 解析結果と実験結果との比較

Fig. 10, 11 に無負荷状態における、解析結果と実験結果の振幅、電圧、電流波形を、Table 2 にそれぞれの振幅、周波数、コイルの平均電流値を示す。解析結果

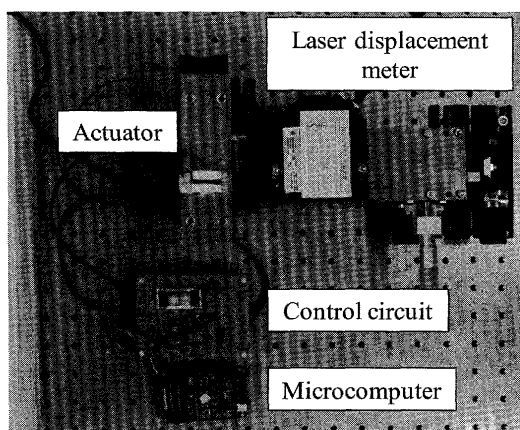


Fig. 9 Experimental setup of dynamic characteristic measurement.

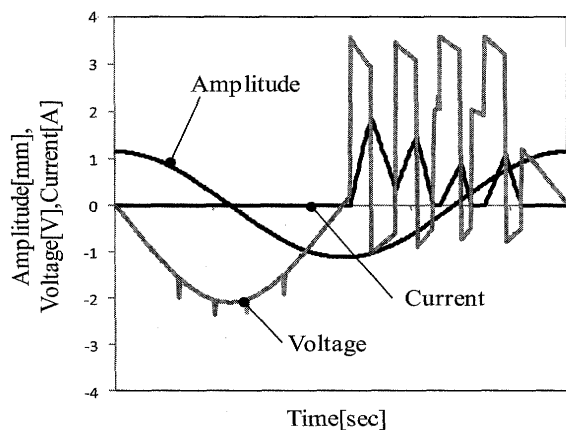


Fig. 10 Computed results.

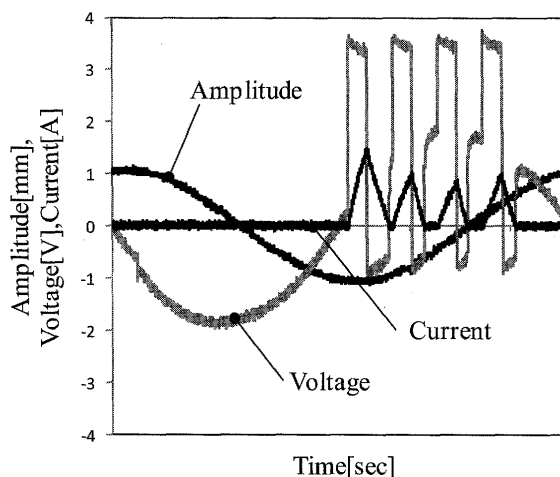


Fig. 11 Measured results.

Table 2 Comparison of computed and experimental results.

	Computed	Measured
Amplitude pk-pk [mm]	2.27	2.40
Frequency [Hz]	218	218
Average Current [A]	0.25	0.25

と実験結果とを比較すると、振幅、電圧、電流とすべての波形において、両者の良好な一致を確認することができ、提案解析手法の有効性を明らかにすることができた。

#### 5 LRA の負荷特性

リニア共振アクチュエータの負荷変動に対する動作特性への影響を検討するため、提案手法による解析と、実機を用いた実験を行った。負荷実験装置の写真を Fig. 12 に示す。実験ではアクチュエータの上部からおもりを乗せ、可動子と負荷板との摩擦力により、おもりによる垂直負荷を水平負荷に変換している。また、負荷板には摩擦力を安定させるため、粘着テープが貼られている。解析では、可動子と粘着テープとの摩擦係数を 0.1 として水平負荷に変換している。

負荷に対する振幅と電流特性の解析結果と実験結果を Fig. 13 に示す。解析結果、実験結果ともに負荷の増加に対して、ほぼ比例的に電流は増加、振幅は減少しており、両者で傾向は良く一致している。しかし、解析結果の方が、負荷の増加に対する電流の増加は大きく、振幅の減少も大きい。この原因として、実験では摩擦力のばらつきが大きいこと、また垂直負荷によってエアギャップが多少変化してしまっていると考えられる。

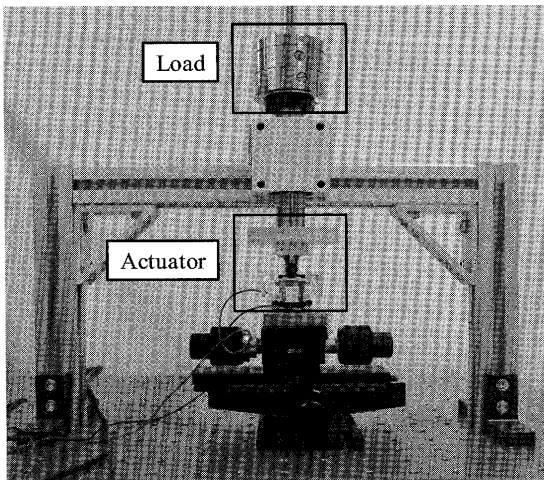


Fig. 12 Load device.

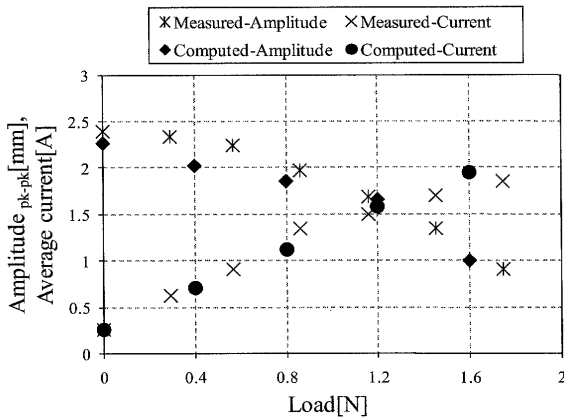


Fig. 13 Load characteristic.

## 6 PID 制御

### 6.1 PID 制御の導入

前章までで述べた PWM フィードバック制御では、フィードバック制御をしているものの、負荷に対して振幅の減少が見られた。そこで Duty を制御関数でなく PID 制御で制御する方法を検討した。本制御での PID 制御による Duty 決定式を式(6)に示す。

$$Duty(\%) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

ここで、 $K_p$  は比例ゲイン、 $K_I$  は積分ゲイン、 $K_D$  は微分ゲイン、 $e(t)$  は目標値との偏差である。

検出値は前述の PWM フィードバック制御と同様に検知電圧  $V_1$  であり、目標値を  $V_s$  すると制御偏差  $e(t)$  は式(7)となる。

$$e(t) = V_s - V_1 \quad (7)$$

次に各ゲインを決定する。決定方法は各ゲインを任

Table 3 Comparison of computed and experimental results.

	Computed	Measured
Amplitude pk-pk[mm]	2.44	2.43
Frequency [Hz]	216	217
Average Current [A]	0.23	0.23

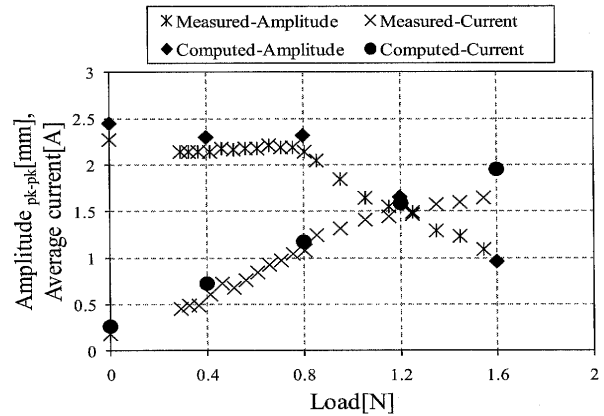


Fig. 14 Load characteristic under PID control.

意で与え、初期状態から定常状態、および定常状態から負荷状態の二次元動作特性解析を行い、応答性および定常状態での振幅安定性を評価し、最良値をハンドチューニングで探索した。その結果  $K_p=1$ ,  $K_I=0.05$ ,  $K_D=0.5$  が良好な結果を示した。

### 6.2 PID 制御下での無負荷特性

前節で決定した各ゲインを用い、目標値  $V_s=2.09$  を与えた時の無負荷状態における三次元動作特性解析と動作特性実験を行った。解析結果と実験結果のそれぞれの振幅、周波数、コイルの平均電流値を Table 3 に示す。解析結果と実験結果を比較すると PID 制御下でも解析と実験が良好に一致していることがわかる。

### 6.3 PID 制御下での負荷特性

PID 制御の有効性を確認するため、負荷特性解析と、5 章で示した負荷実験装置を用いて負荷特性実験を行った。負荷に対する振幅と電流特性の解析結果と実験結果を Fig. 14 に示す。実験結果と解析結果を比較すると振幅、平均電流ともに良好に一致しているといえる。実験結果より垂直負荷約 0.8N までは PID 制御が良好に機能し、振幅を一定に保つことができています。約 0.8N 以上では Duty が 100% となり、制御の余地がなくなり振幅が低下している。解析では約 1N まで振幅を一定に保つことが可能であると考えられる。これらの結果より逆起電圧検知からの PID 制御によって、Duty

に制御の余地がある限り、各々の負荷状況で LRA の振幅を一定に保つことができることを明らかにした。

## 7 まとめ

本研究では、電気シェーバ用リニア共振アクチュエータに焦点をあて、検知コイルからの逆起電圧信号による PWM フィードバック制御を提案し、その有効性を、三次元有限要素法による動作特性解析と実機による実験結果との比較によって示した。更に、提案した PWM フィードバック制御に PID 制御を導入することにより、外部負荷に対して一定の振幅を維持可能な制御法を提案した。

## 参考文献

- [1] Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Koichi Sato, Satoshi Suzuki, Katsuhiko Hirata, Tomohiro Ota and Yuya Hasegawa, Trajectory Analysis of 2-D Magnetic Resonant Actuator, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.45, No.3, pp.1732-1735, 2009.
- [2] T. Yamaguchi, Y. Kawase, S. Suzuki, K. Hirata, T. Ota and Y. Hasegawa, Dynamic Analysis of Linear Resonant Actuator Driven by DC Motor Taking into Account Contact Resistance between Brush and Commutator, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.44, No.6, pp.1510-1513, 2008.
- [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] K. Matsui, K. Hirata and T. Ota, Dynamic Analysis of Linear Resonant Actuator under PWM Control Employing the 3-D Finite Element Method, *Proceedings of the 13th Biennial IEEE CEFC (Conference on Electromagnetic Field Computation)*, OC1-1, p.192, 2008.
- [5] Y. Asai, K. Hirata and T. Ota, Dynamic Analysis Method of Linear Resonant Actuator with Multi-Movers Employing 3-D Finite Element Method, *IEEE Trans. Magn.*, to be published.