

## 学術論文

## PID 制御下におけるリニア電磁アクチュエータの動作特性解析

## Dynamic analysis method for an electromagnetic linear actuator under the PID control

仲田 佳弘<sup>\*1</sup> (学生員), 平田 勝弘<sup>\*1</sup> (正員), 石黒 浩<sup>\*1</sup>

Yoshihiro NAKATA (Stu. Mem.), Katsuhiro HIRATA (Mem.), Hiroshi ISHIGURO

We have been studying a new electromagnetic linear actuator for android using Halbach array of magnets. In this paper, the dynamic analysis method under the PID control is proposed employing the 3-D finite element method. This method is applied to compute the dynamic response when the positioning control is active. The validity of the analysis is verified through the comparison with the measurement of a prototype.

**Keywords:** PID control, linear synchronous motor, 3-D finite element method, android, Halbach array.

## 1 緒言

現在, ロボットには様々な種類のアクチュエータが搭載されている。その中で最も一般的なアクチュエータは減速機構を有する回転式サーボモータである。これらのアクチュエータは特徴として, 大出力・高トルクを得ることができる。しかし, 減速機構による位置決め精度の限界, 応答性の悪さ, サイズの限界などの欠点がある。また, 人の関節の動作には回転式モータのような機構ではなく直動の筋肉を用いている。そのため, 人間を模擬したアンドロイドの開発においては, 人工筋肉によって関節を直動で動作させることが有効である。

現在開発中のアンドロイド[1]には, エアシリンダおよびハイロータを複数搭載し, 空気によって直動および回転動作を実現している。上述した減速機構付き回転型アクチュエータと比較するとバックラッシュが少ないといった特徴があるが, 圧縮空気制御に伴う応答性, リアクション性, 多次元動作の実現性, 大型エアコンプレッサによる歩行の実現性の低さなど多くの問題点がある。

それに対して, 我々は, これまでに, 可動子に 90 度ずつ着磁方向の異なる永久磁石を並べたハルバッハ磁石配列[2]を持つリニア電磁アクチュエータを提案し, その推力特性や応答特性などの基本特性を明らかにしてきた[3-5]。その結果, 小型で高推力, 長ストロークなど優れた性能を有することが分かった。さらに,

アンドロイドの上肢への搭載を検討した[6]。アンドロイドへの搭載時にはその位置制御が重要となる。本アクチュエータは目標位置までの動作に PID 制御を用いている。そこで, PID 制御下の応答特性を明らかにする必要がある。

本稿では, アンドロイド搭載時のアクチュエータの応答特性を予測するため, 三次元有限要素法による PID 制御下での動作特性解析法を提案するとともに, 試作機を用いた応答性の実験結果との比較により, 本解析の有効性を確認したので報告する。

## 2 リニア電磁アクチュエータ

## 2.1 基本構造

本研究で用いるリニア電磁アクチュエータの基本モデルの長さ方向の断面図を Fig. 1 に示す。可動部は永久磁石ブロックとその中心を貫く非磁性体のシャフトからなる。この永久磁石ブロックは 90°ずつ着磁方向の異なる永久磁石を組み合わせたハルバッハ配列となっており, これにより非常に高い磁束密度が磁石外側に周期的に発生する。このラジアル方向の高密度の磁束を有効に利用することで, 大きな推力を得ることができる。固定部は励磁コイルとケースからなる。コイル部分は 3 相 (U 相, V 相, W 相) の 3 つのコイルを 1 ブロックとして, 複数ブロックの各相のコイルを直列に接続させる。各相のコイルの一端は結線され中性点となっており, 他端はドライバに接続されている。さらに, ケース部は磁気回路構成部分であり軟磁性体 (純鉄) を用いた。また, 永久磁石は, NdFeB 系 (Br = 1.4 T) の希土類磁石を用いた。

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

## 2.2 動作原理

本アクチュエータの動作原理について、Fig. 2 を用いて説明する。着磁方向が  $90^\circ$  ずつ異なる永久磁石群により、通常より大きな磁束密度が図の  $B$  で示す方向に発生する。この磁束密度に対し、コイルに図の  $i$  で示す向きに電流を励磁することにより、コイル部分では左向きにローレンツ力  $f_{Lorenz}$  を得る。このリニア電磁アクチュエータのコイル部は固定部であるため、その反力が可動部である永久磁石群に働き、それに接続されたシャフトとともに右向きに推力  $f_R$  を得て動作する。可動部の位置に応じて、各相に励磁する電流を順次切り替えることにより、常に同一方向に推力を得ることができる。また、コイルに逆向きの電流を励磁することで、反対方向に動作させることができる。

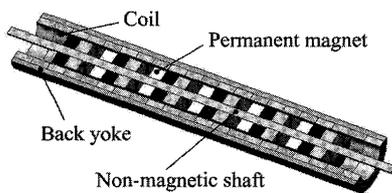


Fig. 1 Basic structure of an electromagnetic linear actuator.

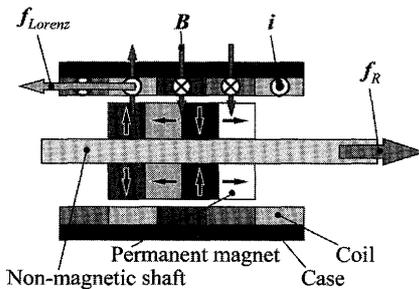


Fig. 2 Operating principle.

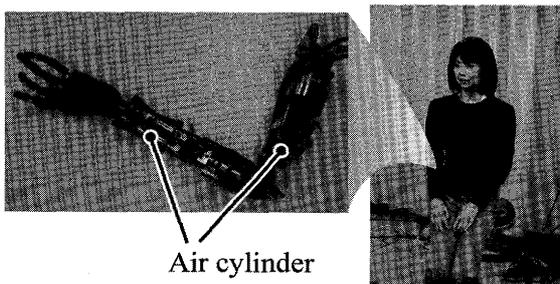


Fig. 3 Android and arm with air cylinders.

## 3 制御方法

### 3.1 リニア電磁アクチュエータの制御

Fig. 3 に開発中のアンドロイドと、腕に搭載されているエアアクチュエータを示す。アンドロイドの動作はエアアクチュエータの圧縮空気制御に伴う応答性の悪さから不安定になりやすい。そこで、前述のリニア電磁アクチュエータを 3 相交流励磁し、PID 制御によって、トルク及び、位置のフィードバックを行っている。

### 3.2 システム構成

リニア電磁アクチュエータの制御を行うために、ドライバに富士通オートメーション株式会社のサーボモータコントローラ MCG02, 安定化電源に株式会社テクシオの PW26-1ATS, ビルトインタイプ・アブソリュートリニアエンコーダに村田機械株式会社の LIC0308H-RL (最高分解能  $0.125\mu\text{m}$ ) を用いた。Fig. 4 にリニア電磁アクチュエータの試作機を、Fig. 5 にシステム構成図を示す。

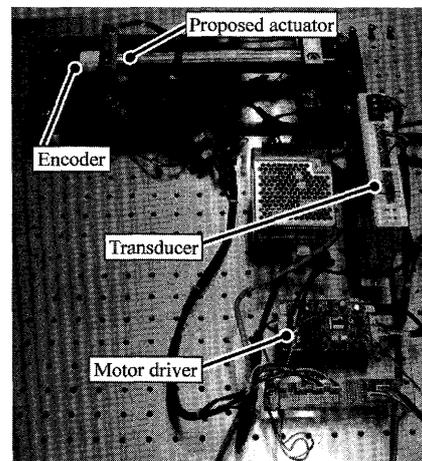


Fig. 4 Prototype.

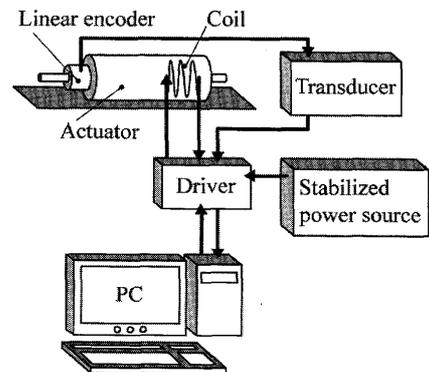


Fig. 5 System configuration of the prototype.

3.3 サーボコントローラ

本アクチュエータの制御に用いたサーボシステムの構成図を Fig. 6 に示す。

サーボコントローラ[7]での制御の流れを説明する。

①目標軌道生成器に、新しい目標位置、最大速度、最大加速度が与えられると、現在位置から目標位置へどのような軌道で動作するかを、速度台形則に従い決定する。

②得られた目標位置 ( $y^t$ ) は、エンコーダにより得られた現在位置 ( $y^l$ ) と 1kHz の周波数で比較される。

③フィードバック制御器のPIDコントローラのブロック線図を Fig. 7 に示す。②の偏差 ( $\Delta y^t$ ) に対してフィードバック制御器でPID演算を行う(式(1))。これにより、トルク指令 ( $i_q^t$ ) が決定される。

$$i_q^t = K_p \cdot \Delta y^t + K_i \cdot \sum_{t=0}^t \Delta y^t + K_d \cdot (\Delta y^t - \Delta y^{t-1}) \quad (1)$$

3.4 電流ループコントローラ

Fig. 6 を用いて、電流ループコントローラ[8]での制御の流れを説明する。

④最初に、磁極検出を行い、磁極位置を獲得する。磁極検出はトルク制御にて高周波電流を励磁し、最もモータの効率が良い、転流角オフセットを検出することで行う。U相はcos軸となっており、転流角オフセットは、リセット時のU相電流を得るためのオフセットのことである。動作時は位置情報を獲得する。

⑤U相、V相、W相それぞれの電流値 ( $i_U^t, i_V^t, i_W^t$ ) を獲得する。

⑥式(2), (3)に従いd-q変換し、d(界磁)成分 ( $i_d^t$ ) およびq(トルク)成分 ( $i_q^t$ ) に分離する。

$$\left. \begin{aligned} i_\alpha^t &= i_U^t \\ i_\beta^t &= (i_V^t - i_W^t) / \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} i_d^t &= \sin \theta^t \cdot i_\alpha^t - \cos \theta^t \cdot i_\beta^t \\ i_q^t &= \cos \theta^t \cdot i_\alpha^t + \sin \theta^t \cdot i_\beta^t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\theta^t$ は転流角である。

⑦得られたトルク成分 ( $i_q^t$ ) と前述のトルク指令により得られたトルク成分 ( $i_q^t$ ) を比較する。

⑧⑦の偏差および $-i_d^t$ に、20kHzの周波数で式(4)に示すPI制御 (Fig. 8) を行うことにより  $\Delta i_q^t, \Delta i_d^t$  を得る。

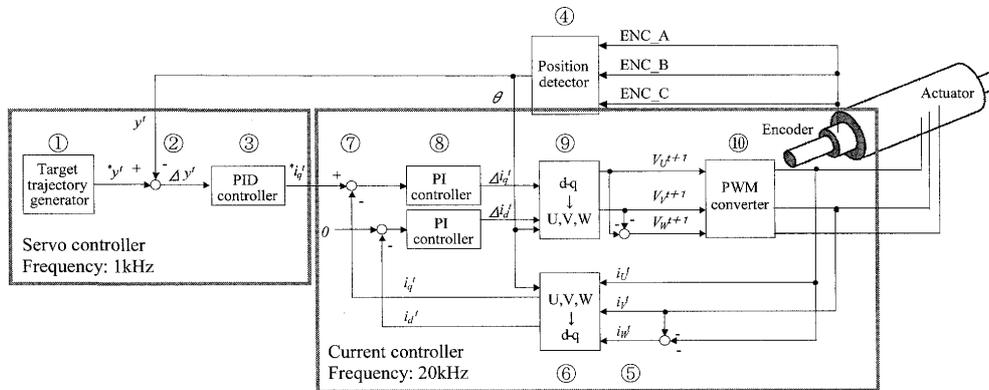


Fig. 6 System configuration of the servo system.

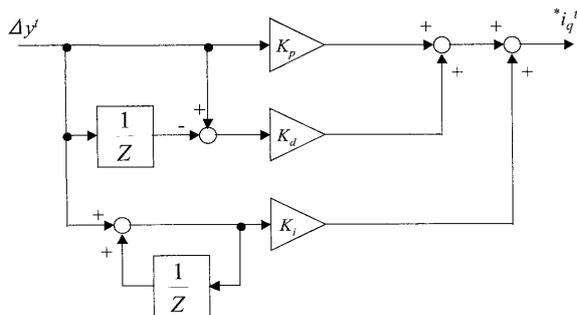


Fig. 7 Block diagram of PID control.

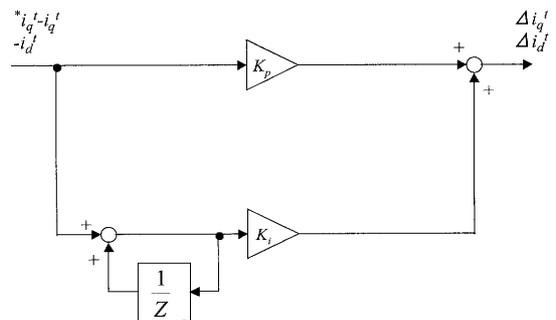


Fig. 8 Block diagram of PI control.

⑨⑧の PI 制御結果に対して、式(5)で示す逆変換を行うことにより、次の時間ステップで与える各相の電圧 ( $V_U^{t+1}$ ,  $V_V^{t+1}$ ,  $V_W^{t+1}$ ) を決定する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_q^t &= K_p \cdot (i_q^* - i_q^t) + K_i \cdot \sum_{t=0}^t (i_q^* - i_q^t) \\ \Delta i_d^t &= K_p \cdot (-i_d^t) + K_i \cdot \sum_{t=0}^t (-i_d^t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} V_U^{t+1} &= \cos \theta^t \cdot \Delta i_q^t + \sin \theta^t \cdot \Delta i_d^t \\ V_V^{t+1} &= -(\cos \theta^t \cdot \Delta i_q^t + \sin \theta^t \cdot \Delta i_d^t) / 2 \\ &\quad + (\sin \theta^t \cdot \Delta i_q^t - \cos \theta^t \cdot \Delta i_d^t) \cdot \sqrt{3} / 2 \\ V_W^{t+1} &= -(V_U^{t+1} + V_V^{t+1}) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

⑩⑨で決定した各相の電圧を PWM の設定値に変換し、この設定値によりアクチュエータを動作する。

#### 4 解析方法

##### 4.1 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(6)~(9)のように表される[9]。

$$\text{rot}(\text{vrot}A) = J_0 + v_0 \text{rot}M \quad (6)$$

$$E = V_0 - RI_0 - \frac{d\Psi}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$\Psi = \frac{n_c}{S_c} \int A \cdot n_s dv \quad (8)$$

$$J_0 = \frac{n_c}{S_c} I_0 n_s \quad (9)$$

ここで、 $v$  は磁気抵抗率、 $J_0$  は強制電流密度、 $v_0$  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、 $dv$  はコイル領域の微小体積である。

##### 4.2 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(10)で表される。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + D \frac{dy}{dt} \pm F_s = F_y \quad (10)$$

ここで、 $M$  は可動部の全質量、 $D$  は可動部の周囲媒体 (空気などの気体や油などの液体) の粘性減衰係数、 $F_s$  は機械的な摩擦による力の  $y$  方向成分、 $F_y$  は電磁力の  $y$  方向成分である。なお、電磁力の計算にはマクスウェ

ルの応力法を用いた。

#### 4.3 磁界解析と PID 制御

Fig. 9 に PID 制御下の動作特性解析のためのフローチャートを示す。今回提案する解析手法では、三次元有限要素法を用い、磁界解析、運動方程式、PID 制御を連成させて解いている。PID 制御については、3.3, 3.4 で説明した制御則を考慮してプログラミングしている。位置制御 (PID) は 1kHz, 電流制御 (PI) は 20kHz で行うため、位置制御は 20 回に 1 回行う。

### 5 PID 制御下における動作特性評価

#### 5.1 試作機について

本アクチュエータの特性を調べるために作製した試作機の寸法を Fig. 10 に示す。これは動作前の初期状態であり、コイルの左端から磁石の左端までの距離は 18mm である。試作機のケース部の外径は 30mm, 厚みは 2.5mm であり、コイルの厚みは 3.0mm, 全長は 168mm である。コイルと永久磁石間のギャップはコイ

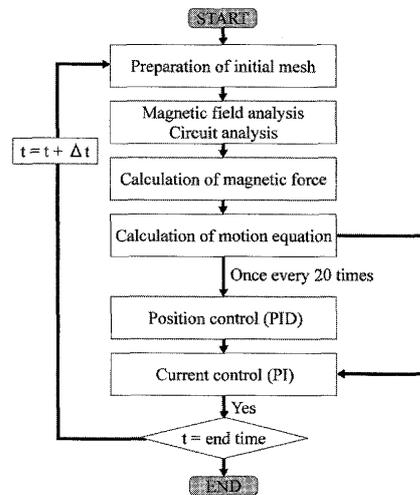


Fig. 9 Flowchart for dynamic analysis under PID control.

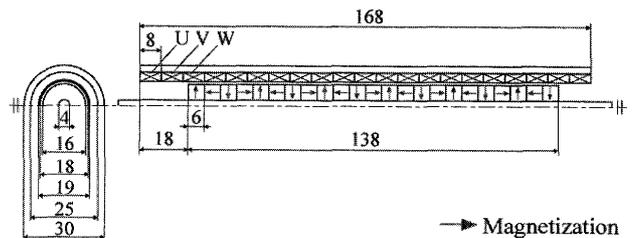


Fig. 10 Dimensions of proposed actuator (3-phase model).

ルが巻かれているコイルボビン（樹脂製）の底の厚み 0.5mm を含めて 1.5mm, 磁石ブロック可動部の全長は 138mm である。コイル 1 層の幅は 8mm, 永久磁石 1 個の幅は 6mm である。シャフト径は 4mm である。

## 5.2 動作特性解析

可動子をストローク 0mm から 0.8, 1.6, 3.2mm まで PID 制御下でそれぞれ動作させる場合の応答特性を計算した。それぞれの場合の最大速度, 最大加速度を Table 1 に示す。位置制御は PID 制御で, 比例ゲインを 0.1, 積分ゲインを 0.01, 微分ゲインを 1.0, 周波数を 1kHz とした。電流制御は PI 制御で, 比例ゲインを 0.36, 積分ゲインを 0.18, 周波数を 20kHz とした。解析条件を Table 2 に, 有限要素分割図を Fig. 11 に, 解析諸元を Table 3 に示す。ただし, Table 3 のステップ数と計算時間はストローク 0.8mm の場合の計算結果である。ストローク 1.6mm の場合のステップ数は 2692, 計算時間は 165.0 時間, ストローク 3.2mm の場合のステップ数は 2798, 計算時間は 169.8 時間である。

Table 1 Maximum velocity and acceleration.

Stroke (mm)	Maximum velocity (m/s)	Maximum acceleration ( $m/s^2$ )
0.8	0.02	2
1.6	0.02	1
3.2	0.05	1

Table 2 Analysis conditions.

Number of turns (Turns)	525
Resistance ( $\Omega$ )	5.1
Mass of mover (g)	238
Static frictional force (N)	0.21
Viscous damping coefficient ( $N \cdot s/m$ )	2.0

Computer used: Core 2 Extreme (3.00GHz) PC

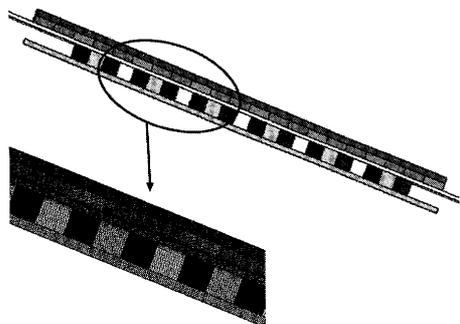


Fig. 11 Finite element model.

## 5.3 実験条件

アクチュエータの制御パラメータは解析のパラメータと同じである。

アクチュエータの変位はレーザ変位計 (KEYENCE LK-G400) にて測定している。変位の計測値はオシロスコープに取り込み, パソコンにてデータ処理を行っている。Fig. 12 に試作機の動作特性評価実験システムを示す。

## 5.4 解析と実験結果の比較

可動子をストローク 0mm から 0.8, 1.6, 3.2mm まで動作させた時の応答特性解析結果を Fig. 13 に示す。いずれの場合も解析結果は実験結果と良好に一致している。0.8mm まで動作させた場合に, 目標位置付近で大きなダンピングが見られる。また, 解析結果において実際よりも大きなダンピングが見られる。これは摩擦や, 渦電流の影響が考えられる。

結果を応答性について見ると, 制御開始後すぐに動作し始め, 等速部分においても遅延無く動作している。目標位置到達時にダンピングが見られるが, 約 30ms で目標位置に収束し, 高い応答特性が確認できる。アンドロイド搭載時には, アクチュエータにかかる負荷に応じて PID 制御値を設定することにより, 同様の応答特性を得られる。エアアクチュエータでは目標位置

Table 3 Discretization data and CPU time.

Number of elements	476,736
Number of nodes	92,686
Number of edges	595,049
Number of unknown variables	518,168
Number of time steps	2,281
Total CPU time (hours)	138.7

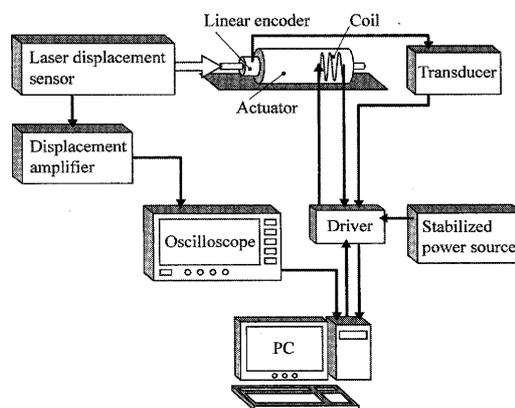


Fig. 12 Measurement system for dynamic characteristics.

付近での振動が大きな問題となっているが、本アクチュエータによりアンドロイドを動作させることで、目標位置付近での振動を抑え、安定した動作が可能となる。

## 6 結言

本稿では、我々が開発してきた可動部にハルバツハ配列磁石を用いたリニア電磁アクチュエータの応答特性を予測するため、三次元有限要素法を用いてPID制御下での磁界解析と運動方程式の連成解析による動作

特性解析法を提案するとともに、試作機を用いた応答性の実験結果との比較により、両者の良い一致を確認し、本解析法の有効性を明らかにした。また、両方の結果から、PID制御下での本アクチュエータの動作が高い応答特性を示すことを確認した。

今後は解析の精度をさらに高めるとともに、現在、開発中の小型の新構造アクチュエータにも本解析法が適用できることを確認する。また、アンドロイドへの搭載に向け、複数本のアクチュエータの協調制御を検討する予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：ゆらぎプロジェクト」の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

(2008年10月23日受付, 2008年12月16日再受付)

## 参考文献

- [1] 石黒 浩, アンドロイドサイエンス 人間を知るためのロボット研究, 株式会社毎日コミュニケーションズ, 2007
- [2] K.Halbach, "Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings", *Journal of Applied Physics*, vol.57, pp.3605-3608, 1985
- [3] 三島 将行, 平田 勝弘, 石黒 浩, アンドロイド用リニアアクチュエータのハルバツハ配列に関する考察, 社団法人電気学会, リニアドライブ研究会資料, LD-07-15, pp.73-76, 2007
- [4] Masayuki MISHIMA, Katsuhiko HIRATA and Hiroshi ISHIGURO, "Performance Analysis of New Linear Actuator for Android Employing 3-D Finite Element Method", *LDIA 2007 LILLE*, pp.187-188, 2007
- [5] 三島 将行, 平田 勝弘, 石黒 浩, アンドロイドに搭載可能なリニア同期モータの性能評価, 日本機械学会 [No.07-253] 第19回「電磁力関連ダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.419-422, 2007
- [6] 仲田 佳弘, 平田 勝弘, 石黒 浩, 電磁式リニアアクチュエータで駆動する上肢ロボットの研究, 日本AEM学会, 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.59-64, 2008
- [7] トランジスタ技術, CQ出版社, 4月号, pp.252-257, 2004
- [8] トランジスタ技術, CQ出版社, 5月号, pp.248-252, 2004
- [9] 三島 将行, 平田 勝弘, 石黒 浩, 有限要素法によるアンドロイド用同期モータの動特性解析, 社団法人電気学会, リニアドライブ研究会資料, LD-07-40, pp.45-48, 2007

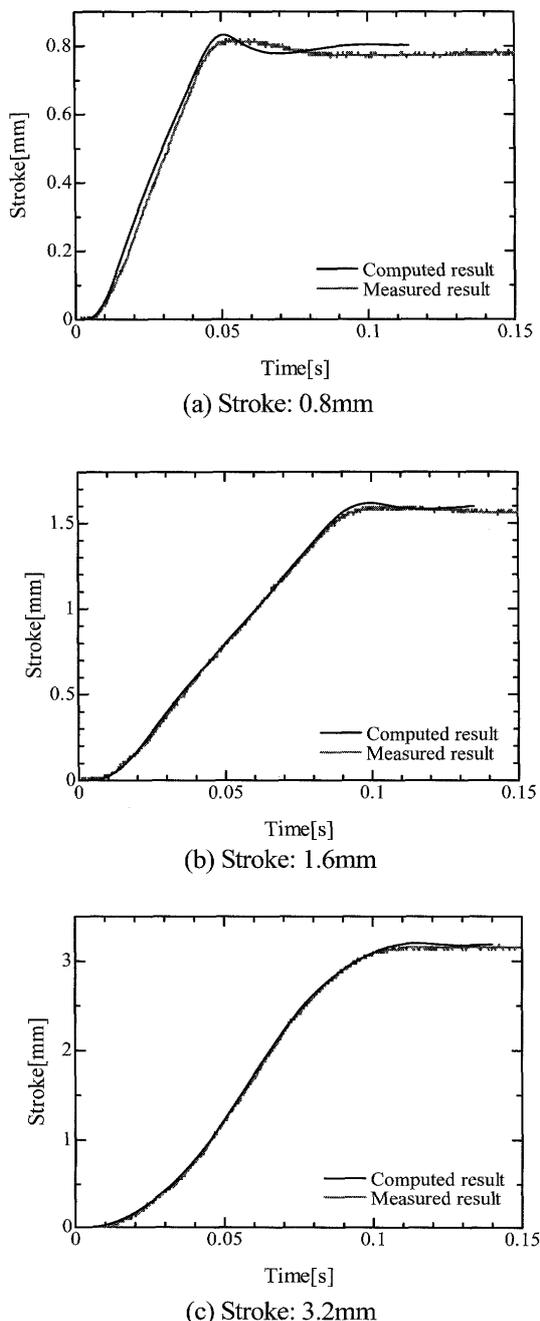


Fig. 13 Response characteristic