磁気浮上搬送のためのホール素子を用いた2自由度位置推定*

井上 剛 志^{*1}, 平山 雅 己^{*2}
小林 真 子^{*3}, 高木 賢太郎^{*1}Two Degrees of Freedom Position Estimation of the Magnetic
Levitation System Using Hall ElementsTsuyoshi INOUE^{*4}, Masami HIRAYAMA,
Mako KOBAYASHI and Kentaro TAKAGI^{*4} Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

This study discusses the position estimation method of two dimensional position of a magnetically levitated body. Two Hall elements are installed in order to estimate both the horizontal and the vertical positions. Both the Hall voltages and the electric current signal are measured and the relationships among the levitation gaps, Hall voltages and the electric current are investigated. As the result, it is observed graphically that these relationships indicate the curved surfaces which are single-valued functions to the levitation gaps, and these curved surface are represented by explicit nonlinear functions of Hall voltages and the electric current. The estimation of both the horizontal and the vertical positions are performed by using these obtained explicit nonlinear functions, and its accuracy are validated experimentally.

Key Words: Magnetic Levitation, Hall Element, Position Estimation Method, Experiment

はじめに

磁気浮上技術は、非接触での物体保持力に加え、高精度な姿勢と位置決め制御能力も有し、現在、磁気浮上鉄道をはじめ、磁気軸受、搬送装置など、様々な産業において実用化されている。そして、さらに幅広く応用が期待されている⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾。

これまでの多くの磁気浮上の研究では、変位センサを用いて浮上物体の位置を直接計測している。これらの変位センサは一般に1軸計測であり、またセンサが比較的大きいことから、複数軸方向の計測を行う際にはセンサ配置の問題も生じる。

この観点から、近年、浮上物体の位置推定の研究も盛んに行われている。その手法は大きく2つに分けられ、1つは位置変動による電磁石コイルのインダクタンス変化に着目した方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾、もう一つはホール素子を用いた磁束密度計測から推定する方法⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾である。前者については、たとえば Schammas ら⁽⁹⁾が、PWMアンプを用いた磁気軸受・ロータ系を1自由度系でモデル化し、低周波数領域において高精度なセルフセンシング手法を開発している。後者については、小島らがホール素子1つを用いた磁気浮上搬送物体の鉛直1

自由度方向の位置推定法を提案している⁽¹¹⁾。その研究では、浮上物体の搬送が低速であると仮定して浮上物体の搬送方向(水平方向)の揺れは無視し、鉛直方向のみに関して精度よい推定を実現している。しかし、これまでのこれらの研究では全て、浮上物体の1次元方向の位置推定に限られている。変位センサを用いずに浮上物体の2次元さらには3次元の位置推定を行なう手法の確立は、浮上物体の高速搬送時における安定性の向上や位置センサレスによる低コスト化により役立つと考えられる。

本研究では、浮上物体が鉛直方向と水平方向の2自由度を有する磁気浮上系について、ホール素子を用いた水平方向も含めての位置推定法を検討する。磁気浮上予備実験を、ホール素子とは別の変位センサを用いたPD制御により行ない、取得した磁気浮上状態のホール素子の出力電圧値(以下、ホール電圧とする)、電磁石の電流値と位置の間の特性を調べる。そして、この特性を用いた浮上物体の水平・鉛直位置の推定手法を構築し、その推定精度を実験により評価する。

1. 実験装置

図1に2自由度の実験装置の概略図を示す。浮上物体には、y軸方向運動を拘束して(x,z)平面のみを運動するようにアームが取り付けられている。アームの

* 原稿受付 2009年4月13日。

^{*1} 正員、名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻(〒464-8603 名古屋市中種区不老町)。^{*2} コマツ[〒107-8414 東京都港区赤坂2-3-6(コマツビル)]。^{*3} 名古屋大学大学院工学研究科。

E-mail: inoue@nuem.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Experimental setup

Fig. 2 Experimental setup of magnetic levitation

Fig. 3 Block diagram

反対側は2つのボールベアリングで支持されており、そのアームの回転角がポテンシオメーター (Bourns, 6639S-1-202) でそれぞれ計測される。アームの長さは300 mmである。浮上物体の平衡位置周りの変位に対してアームの長さが十分に長いので、このベアリングの回転角より浮上物体の鉛直方向と水平方向の変位が近似換算でき、参照用に用いられる。浮上物体の平衡点 (X_0, Z_0) の水平方向の原点 $X_0 = 0$ mm は、電磁石の両極間の中央に取る。

図2に磁気浮上部を示す。また、磁石や浮上物体の寸法は表1に示す。浮上物体の円柱の中心にはアー

Table 1 System length and size

Parameter	unit	
w_1	(mm)	49.0
w_2	(mm)	36.8
w_3	(mm)	76.8
d	(mm)	40.0
h_1	(mm)	11.0
h_2	(mm)	78.5
t_1	(mm)	38.0
t_2	(mm)	30.2

Table 2 System parameter

Parameter	unit	
m	(kg)	0.552
g	(m/s ²)	9.81
k	(N m ² /A ²)	4.63×10^{-5}
δ	(m)	4.30×10^{-3}
Z_0	(m)	3.00×10^{-3}
I_0	(A)	1.47
k_p	(A/m)	6.84×10^2
k_d	(As/m)	1.01×10

ムが貫通し、浮上物体の運動を鉛直面 xz 内に拘束する。 Z_0 は鉛直方向の平衡ギャップ、 G_1, G_2 は電磁石各極の真下中央に取り付けられた2つのホール素子 (東芝, THS123) それぞれから浮上物体の最上端までの距離である。

磁気浮上平衡点からの位置 (x, z) とギャップ (G_1, G_2) の間の変換は、それぞれ図2より幾何学的につぎのように得られる。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + (z + Z_0)^2}, \\ G_2 &= \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + (z + Z_0)^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$z = G_1 \sqrt{1 - \left(\frac{G_1^2 - G_2^2 + d^2}{2G_1 d}\right)^2} - Z_0, \quad x = \frac{G_2^2 - G_1^2}{2d} \quad (2)$$

ホール素子により電磁石各極を通る磁束密度を計測する。直流電流源 (高砂製作所, CCP150-01MR) を両極の2つのホール素子と直列に接続し、それぞれのホール素子を通過する磁束に比例して変化する出力電圧を取得する。直流電流源は9 mAに設定して実験を行った。そのときのホール素子 THS123 の出力電圧は、カタログ値より磁束密度 B (T) に対し $2.16B$ (V) で与えられ、さらにオペアンプ (OP07) を用いて10倍で設計し

Fig. 4 Diagram of magnetic levitation

た増幅回路を用いてホール電圧を得た。

電流アンプから電磁石に入力される電流は、電流センサ(甲神電気, HC-PFG10V4B15)により計測し、さらにオペアンプ(OP07)を用いて電流値に対応する電圧値に増幅して用いた。これらのホール電圧と電流センサの出力電圧は、推定に用いられる。

1.1 系全体のブロック線図 図3に、本研究で扱う磁気浮上系全体を表したブロック線図を示す。 z は浮上物体の平衡位置からの鉛直方向変位である。指令制御電流値 I_d により、電流アンプ(ハイピーテック製 μ SWA-6AT)から実際の電流 I が出力され、電磁石各極において磁束密度 B_{H1} と B_{H2} が発生する。この電流 I は電流センサにより計測される。また、磁束密度 B_{H1} と B_{H2} をホール素子THS123により計測し、その出力電圧を増幅したものをホール電圧 V_{H1} と V_{H2} として用いる。

2. 磁気浮上系の構成

2.1 電磁石の吸引特性 2自由度系を考える前に、図4の鉛直1自由度のみを考える。磁束密度を B 、コイル巻数を N 、電流を I 、真空の透磁率を μ_0 、鉄心の比透磁率を μ_s 、磁路の断面積を S 、鉄心中の磁路の長さを l 、電磁石からの距離(ギャップ)を Z とする。また、浮上物体の質量を m 、重力加速度を g とする。電磁石には、磁気飽和やヒステリシスが無いと仮定すると⁽¹⁾⁽²⁾、磁束密度 B と電磁石の理想電磁吸引力 F_e は次式のように表すことができる。

$$B = \frac{\mu_0 N I}{(l/\mu_s) + 2Z}, F_e = \frac{B^2}{\mu_0} S \quad (3)$$

しかし、実際の吸引力は、上記の仮定が完全には成立しないことから F_e とは異なる値を示す。本研究では、実際の電磁石の吸引力を F'_e で区別し、それを効率係

Fig. 5 Static model identification

数 α を用いて次式で表す⁽¹⁾⁽²⁾。

$$F'_e = \alpha \frac{B^2}{\mu_0} S = k \left(\frac{I}{Z + \delta} \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 k と δ は電磁石の特性係数である。

2.2 運動方程式 水平方向の運動についてはもとと電磁力により安定であるので制御はせず、鉛直方向のみを制御する。平衡状態 Z_0, I_0 からの微小変動を z, i とし、運動方程式をつぎのようにおく。

$$m\ddot{z} = mg - k \left(\frac{I_0 + i}{Z_0 + z + \delta} \right)^2 \quad (5)$$

運動方程式(5)より、平衡状態($z = i = 0$)の関係式、および、平衡状態まわりの線形化運動方程式は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} mg &= k \left(\frac{I_0}{Z_0 + \delta} \right)^2, \\ \ddot{z} &= \frac{2kI_0^2}{m(Z_0 + \delta)^3} z - \frac{2kI_0}{m(Z_0 + \delta)^2} i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

表2に示す等価質量 m の浮上物体に対し、さまざまな鉛直ギャップ Z_0 に対して平衡電流 I_0 を調べ、式(6)の第1式を基にフィッティングした結果を図5に示す。また、得られた電磁石の特性係数 k と δ を表2に示す。

電流アンプにおける電流の遅れは小さく無視できるとし、電流 I は指令制御電流値 I_d に追従するものとする。そして、制御電流 $I_d = I_0 + i$ をPD制御で設計すると、次式となる。

$$I_d = I_0 + i, i = k_p z + k_d \dot{z} \quad (7)$$

フィードバックゲイン k_p と k_d は、最適レギュレータ設計により求めた表2の値を用いる。

3. 2自由度位置推定

3.1 2自由度磁気浮上系 浮上物体が水平と鉛直の2自由度 x, z を有し、 x 方向に変位すると、浮上

物体とそれぞれの電磁石の極との間の距離 G_1 と G_2 は異なる値を持つ。小島ら⁽¹¹⁾は、ギャップをホール電圧に関する3次のべき級数で表わし、その係数を電流の値に対してデータベース化することによりギャップを推定したが、この方法では、2自由度の位置を推定しようとするとき非常に多くの係数に関するデータベースを構築しなければならず、磁気浮上物体の位置 (x, z) の推定は困難になる。本研究では、前節の鉛直1自由度磁気浮上系のモデルを拡張して、2自由度磁気浮上系の簡便な位置推定手法を検討する。

電磁吸引力の式(4)の2つめの等号関係を浮上物体と電磁石間のギャップ Z について整理すると、1自由度磁気浮上の場合にはギャップ Z は電流 I と磁束 B からなる値 I/B の線形関数で表されることに着目する。この式を基に、2自由度磁気浮上系でも、距離 G_1 と G_2 が値 I/B_1 と I/B_2 の非線形関数で表現できると仮定し、べき級数で近似的につぎのように表現する。

$$G_1 = f_1\left(\frac{I}{B_1}, \frac{I}{B_2}\right), \quad G_2 = f_2\left(\frac{I}{B_1}, \frac{I}{B_2}\right) \quad (8)$$

磁束密度 B_1 と B_2 はホール電圧 V_{H1} と V_{H2} で計測されることから、式(8)を次のように書き直す。

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= f_1\left(\frac{I}{V_{H1}}, \frac{I}{V_{H2}}\right), & G_2 &= f_2\left(\frac{I}{V_{H1}}, \frac{I}{V_{H2}}\right) \\ &= f_1(Y_1, Y_2) & &= f_2(Y_1, Y_2) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、表記の簡単のため、変数

$$Y_1 = \frac{I}{V_{H1}}, \quad Y_2 = \frac{I}{V_{H2}} \quad (10)$$

を導入した。なお、ホール電圧 V_{H1} と V_{H2} は、通常の磁気浮上中は0近傍の値にはならない。

3.2 推定関数導出のための参照物理量の取得 式(9)で仮定した浮上物体の位置推定関数 f_1 と f_2 を実験的に見出す。予備磁気浮上実験を行い、浮上中における式(9)に関係する物理量、すなわち、平衡点からの浮上物体の鉛直方向変位 z_s (m)、平衡点からの浮上物体の水平方向変位 x_s (m)、増幅されたホール電圧 V_{H1} (V) と V_{H2} (V)、電流値 I (A) の時刻歴を計測する。そして、計測量から、式(1)によりギャップ量 G_1 と G_2 、式(10)により変数 Y_1 と Y_2 を求め、それらの間の関係を調べる。

推定関数はこの参照データ取得を得るための予備磁気浮上実験の計測範囲内で決定されるため、予備実験はつぎのCase 1～4の4種類によりできるだけ多様かつ広範囲で行った。まず、平衡位置付近の情報を重点的に得るために、Case 1は、物体が単にPD制御則に基づいて平衡位置で浮上している状態で行なう。Case

Fig. 6 Time history of variables (experiment 3): displacement z , displacement x , Hall voltage V_{H1} , Hall voltage V_{H2} , Current I_s

2は、搬送時などの水平方向の変位量を推定するために、平衡位置で浮上中に水平方向(x 軸方向)に初期変位を与えたときの過渡振動である。なお、水平方向は制御しない方向なので、この過渡振動の振動数は小さい。Case 3は、平衡位置で浮上中の物体に鉛直方向に初期変位を与えたときの過渡振動である。鉛直方向は制御方向なので、Case 2のときより振動数は大きい。さらに、Case 4では、制御中の物体を緩やかに上下左右に強制的に運動させる。例として、図6にCase 3で計測・記録した上記5つの物理量の時刻歴を示す。

つぎに、式(9)の推定関数 f_1, f_2 の変数 Y_1 と Y_2 を検討する。図7に、実験3で得られたホール素子1の出力電圧信号 V_{H1} のスペクトルを示す。周波数が15 Hz付近にかけて振幅が下がっており、20 Hz付近以降はいくつか大きくなる周波数があるが、基本的には徐々に振幅は減少していくことから、本研究では、取得した物理量にカットオフ周波数20 Hzの1次ローパスフィルタを施す。ローパスフィルタを施す前後の時刻歴波形を図8に示す。20 Hzのローパスフィルタを

Fig. 7 FFT result for Hall voltage V_{H1} Fig. 8 20Hz LPF applied Hall voltage V_{H1LPF}

Fig. 9 Characteristic curved surface

施した各物理量を、元の物理量と区別するために、添え字 LPF により、それぞれ Z_{LPF} , X_{LPF} , V_{H1LPF} , V_{H2LPF} , I_{SLPF} で表す。そして、 Z_{LPF} と X_{LPF} から式(1)に基づき、距離 G_{1LPF} と G_{2LPF} を得る。

Fig. 10 Characteristic curved surface from another view point

3.3 特性曲面とべき級数近似 実際には得られる変数 Y_{1LPF} , Y_{2LPF} は、式(10)より次式となる。

$$Y_{1LPF} = \frac{I_{LPF}}{V_{H1LPF}}, \quad Y_{2LPF} = \frac{I_{LPF}}{V_{H2LPF}} \quad (11)$$

この変数 Y_{1LPF} , Y_{2LPF} に対するギャップ値 G_{1LPF} と G_{2LPF} を3次元表示で図9に示す。また、図10は、それぞれ図9を異なる視点から見たものである。これらの曲面の形状から、ギャップの値 G_{1LPF} , G_{2LPF} はそれぞれ変数 Y_{1LPF} , Y_{2LPF} に対して1個の曲面を形成していることが確認でき、 Y_{1LPF} , Y_{2LPF} からギャップの値 G_{1LPF} , G_{2LPF} が推定できる。本論文では、この3次元曲面を特性曲面と呼ぶ。

つぎに、リアルタイムでの位置推定を行なうために、図10の特性曲面を Y_{1LPF} と Y_{2LPF} の陽な関数で近似表現する。本研究ではギャップの値 G_{1LPF} , G_{2LPF} を表わす Y_{1LPF} と Y_{2LPF} のべき級数関数による近似式を導出する。なお、図からは平面で近似できるように見えるが、近似に用いるべき級数関数の次数は、 Y_{1LPF} と Y_{2LPF} の1次から4次までを試すこととする。そして、その係数を最小2乗法を用いて決定し、位置推定精度を比較する。

$$\begin{aligned} G_{iLPF} = & k_{i00} + k_{i10}Y_{1LPF} + k_{i01}Y_{2LPF} \\ & + k_{i20}Y_{2LPF}^2 + k_{i11}Y_{1LPF}Y_{2LPF} + k_{i02}Y_{2LPF}^2 \\ & + k_{i30}Y_{2LPF}^3 + k_{i21}Y_{1LPF}^2Y_{2LPF} \\ & + k_{i12}Y_{1LPF}Y_{2LPF}^2 + k_{i03}Y_{2LPF}^3 \\ & + k_{i40}Y_{2LPF}^4 + k_{i31}Y_{1LPF}^3Y_{2LPF} + k_{i22}Y_{1LPF}^2Y_{2LPF}^2 \\ & + k_{i13}Y_{1LPF}Y_{2LPF}^3 + k_{i04}Y_{2LPF}^4 \quad (i=1,2) \end{aligned} \quad (12)$$

図2の実験装置に関し、図10の G_{1LPF} (mm), G_{2LPF} (mm) それぞれの特性曲面を Y_{1LPF} と Y_{2LPF} の1次から4次のべき級数で近似し、べき級数多項式の係数 $k_{i00} \sim k_{i04}$ ($i=1,2$) を得た。なお、得られたべき級数多項式の係数の具体的な数値を表3で示す。

これらの推定式の実装には Matlab/Simulink ソフトウェアを用いた。ホール素子と電流センサから取り

Table 3 Fitted coefficients k for the curved surface

Coefficient	Gap G_1 (mm)	Gap G_2 (mm)
1st order		
k_{i00}	24.38774	14.52853
k_{i10}	19.81457	-18.87242
k_{i01}	-22.05459	22.72902
2nd order		
k_{i00}	31.14785	9.84557
k_{i10}	23.30671	-23.23233
k_{i01}	-39.03903	36.48130
k_{i20}	-4.32216	5.87317
k_{i11}	5.23939	-7.48564
k_{i02}	5.73638	-3.10819
3rd order		
k_{i00}	23.94734	15.73551
k_{i10}	-11.91091	14.22174
k_{i01}	16.39190	-16.61075
k_{i20}	64.39298	-66.41904
k_{i11}	-59.55321	59.30419
k_{i02}	-16.99820	16.14882
k_{i30}	-30.07678	31.78119
k_{i21}	22.33270	-23.75527
k_{i12}	9.20533	-8.65168
k_{i03}	4.34525	-3.39454
4th order		
k_{i00}	19.99188	20.23557
k_{i10}	59.16536	-63.34131
k_{i01}	-21.56985	23.82955
k_{i20}	-2.36098	-4.74755
k_{i11}	-156.9425	184.4367
k_{i02}	74.17328	-89.75406
k_{i30}	-85.57405	105.63066
k_{i21}	345.33808	-387.0534
k_{i12}	-210.0967	219.5391
k_{i03}	18.22367	-10.22723
k_{i40}	50.29394	-54.47942
k_{i31}	-163.27728	158.17088
k_{i22}	87.14906	-56.97108
k_{i13}	14.46892	-37.15087
k_{i04}	-6.85628	10.21808

込まれたホール電圧 V_{H1} , V_{H2} と電流値 I にカットオフ周波数 20Hz のローパスフィルタを施し、それぞれ V_{H1LPF} , V_{H2LPF} , I_{LPF} に変換する。式 (11) により独立変数 Y_{1LPF} , Y_{2LPF} を求め、式 (12) を用いて浮上物体のギャップの推定値 G_{1LPF} , G_{2LPF} を算出し、式 (2) に

(a) displacements z_s and z_{eLPF}

(b) displacements x_s and x_{eLPF}

Fig. 11 Time histories of measured and estimated displacements (first-order power series approximation)

に基づき浮上物体の直交座標系での推定値 z_{eLPF} , x_{eLPF} を得る。

推定精度を調べるために、磁気浮上実験中にポテンシオメータにより得られた浮上物体の実測鉛直変位 z_s と実測水平変位 x_s も同時に計測・記録し、実測値 z_s, x_s と推定値 z_{eLPF} , x_{eLPF} の比較を行う。

4. 実験結果

図 11-14 に、ポテンシオメータにより計測した実測値 z_s , x_s と推定値 z_{eLPF} , x_{eLPF} を時間領域で重ね合わせて誤差を評価したものを示す。なお、この時間領域評価に関して、鉛直方向変位については予備実験の Case 1 のように浮上物体が平衡位置で単に浮上している状態で行い、水平方向変位については Case 2 のように物体が平衡位置で浮上中の水平方向の過渡振動状態で行う。

水平方向の推定値に関しては、べき級数近似の次数が 1 次のときから 1 mm 程度のオフセット誤差はあるもののほぼ推定できているが、20–30msec 程度の時間遅れも確認できる。この水平方向の位置推定精度は、べき級数近似の次数を 2 次から 4 次にしてもそれほど推定精度には影響が無い。鉛直方向の推定値については、1 次ではその運動の特性は推定できているものの誤差が大きいのに対し、べき級数近似の次数を上げ

(a) displacements z_s and z_{eLPF} (b) displacements x_s and x_{eLPF}

Fig. 12 Time histories of measured and estimated displacements (second-order power series approximation)

(a) displacements z_s and z_{eLPF} (b) displacements x_s and x_{eLPF}

Fig. 14 Time histories of measured and estimated displacements (fourth-order power series approximation)

(a) displacements z_s and z_{eLPF} (b) displacements x_s and x_{eLPF}

Fig. 13 Time histories of measured and estimated displacements (third-order power series approximation)

ると、その推定精度が少しずつ向上しているのが確認できる。

なお、位置推定の性能評価の一部として、鉛直方向の推定値 z_{eLPF} を用いたセンサレス制御を試みたが、本研究の実験では磁気浮上制御が実現できなかった。この理由として、推定結果で確認された時間遅れの影響が挙げられる。時間遅れの原因としては、図8に示したように取得した物理量にカットオフ周波数 20 Hz の1次ローパスフィルタを施したことと、式(9)、(10)の表記法および図10で示した特性曲面の構築に制御回路中の電流制御型アンプや電磁石中の磁束の遅れを考慮しなかったことが考えられる。前者の原因については詳細なノイズ対策の積み重ねやフィルタリングの工夫により解決可能である。後者の原因については、式(10)で示した変数 Y_1, Y_2 の表現を制御系の電気回路や磁気回路の遅れの影響も吸収した陽な表現に発展させることにより、本研究の提案手法はほぼそのまま適用可能であると考えている。この後者の、本提案手法の拡張による2自由度磁気浮上系のセンサレス制御については、今後の課題としたい。

おわりに

磁気浮上搬送のためのホール素子を用いた2自由度位置推定に関して、以下の結論を得た。

1. 電磁石の各極にホール素子を用い、それぞれのホール電圧値を電流値で除した値に着目すること

- により, 2自由度を有する浮上物体の磁気浮上系におけるギャップを表現する方法を提案した.
2. 各極から得られるホール電圧値を電流値で除した値に対し, 各極と浮上物体の間の距離は3次元表示で1個の曲面を形成していることを実験的に見出した.
 3. この特性をべき級数で陽に近似表現する位置推定法を提案し, その有効性を実証した. たとえば, 鉛直方向には位置センサがあり水平方向の位置のみを搬送補助のために推定するのであれば, 1次近似でも十分であるが, 鉛直・水平の2自由度を共に推定するためには, 3次程度以上の近似関数を用いるべきである.

文 献

- (1) The JSME ed., *The basis and application of the magnetic bearings*(in Japanese), Yokendo co.,ltd.(1995)
- (2) G.Schweitzer, H.Bleuler, A.Traxler, Active magnetic bearings, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich 1994
- (3) Shih-Kang Kuo, Ximin Shan, China-Hsiang Menq, Large Travel Ultra Precision x-y- θ Motion Control of a Magnetic-Suspension Stage, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronic*, 8-3, pp.334-341, 2003
- (4) Yeou-kuang Tzeng, Tsih C. Wang, Optimal Design of the Electromagnetic Levitation with Permanent and Electro Magnets, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronic*, 30-6, pp.251-258, 1994
- (5) T. Azukizawa and M. Morishita, A Linear Induction Motor Control System for Magnetically Levitated Carrier System, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol.38, No.2, (1989),pp.102-108.
- (6) M. Morishita, T. Azukizawa, S. Kanda, N. Tamura, T. Yokoyama, A New Maglev System for Magnetically Levitated Carrier System,
- (7) Chern-Sheng Lin, Yun-Long Lay, Pei-Wen Chen, Young-Jou Jain, and Shiaw-Wu Chen, The laser displacement measurement with feedback control in a magnetic levitation and suspension system, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol.190 (2000), pp.25-34.
- (8) D. Vischer, H. Bleuler, Self-Sensing Active Magnetic Levitation, *IEEE Transaction on Magnetics*, 29-2, 1993, 1276-1281
- (9) A. Schammas, R. Herzog, P. Buhler, and H. Bleuler, New Results for Self-Sensing Active Magnetic Bearings Using Modulation Approach, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.13. No.4. July 2005
- (10) H. Kojima, O. Itagaki, T. Okabe and T. Kobayashi, 1996, Study on non-contact hold and transfer control of spherical magnetic body by magnetic robot hand with prototype gap sensor system, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 14-6, pp.868-874.
- (11) H. Kojima, O. Itagaki and T. Kobayashi, 1997, Study on Non-contact hold and transfer control by one-pole-type magnetic robot hand system, *JSME International Journal, Series C*, 63-615,(1997), pp.3954-3960.
- (12) H.Kojima, Y. Yuasa, T. Kobayashi, 2000, Noncontact hold and transfer control with a magnetic robot hand attached to a mobile robot, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 8-3, pp.100-108
- (13) M. Sasaki, Y. Kobayashi, Y. Hori, 2002, Active electromagnetic levitation conveyance control of a flexible beam by using disturbance observer, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 10-4, pp.413-420.