

磁気浮上搬送のためのオブザーバによる2次元位置推定*

小林 義光^{*1}, 高木 健太^{*2}
佐々木 実^{*3}, 奥川 雅之^{*4}Observer Estimation of Two Dimensional Position for an Active
Electromagnetic Levitation Conveyance SystemYoshimitsu KOBAYASHI^{*5}, Kenta TAKAGI,
Minoru SASAKI and Masayuki OKUGAWA^{*5} Department of Electronic Control Engineering, Gifu National College of Technology,
2236-2 Kamimakuwa, Motosu-shi, Gifu, 501-0495 Japan

In this paper, the estimation of an object's horizontal and vertical position while it is being levitated and conveyed by an active electromagnetic system is proposed. Position estimation is necessary to implement an anti-sway control on the object. An observer performs the estimation based on magnet current and voltage output from two Hall elements. The validity of the proposed method is confirmed by experiment with an actual conveyance system.

Key Words: Magnetic Levitation, Hall Element, Two Dimensional Position Estimation, Observer, Conveyance Control

1. はじめに

通常、磁気浮上搬送系において、浮上物体の位置検出にレーザセンサ等の外界センサを利用すると、センサの寸法や配置の問題が生じるため、これらのセンサの代わりに電磁石の電流と電磁石の磁極部に取り付けられたホール素子の磁束情報から位置を推定する磁気浮上搬送系が提案されている⁽¹⁾⁻⁽²⁾。これらの研究では浮上方向の1自由度のみの位置を推定している。一方、高速搬送時に発生する浮上体の横揺れを抑えるためには、浮上方向(鉛直方向)と搬送方向(水平方向)の位置を検出する必要があることから、複数のホール素子による2次元平面内の位置推定が提案されている⁽³⁾。これは、複数のホール電圧分布の関係式から位置を推定するものである。関係式から位置を推定する場合の課題として、関係式の導出が複雑であること、ホール電圧と電流の測定値にはノイズが含まれるため、ローパスフィルタ等を施すことによって推定値の位相遅れが生じること、さらには電磁石の動特性が考慮されていないことなどが挙げられる。

そこで、本研究では、複数のホール電圧分布を線形近似して線形オブザーバを構成することで、浮上物体

の鉛直・水平位置を推定する方法を提案し、関係式導出の単純化、ノイズ除去と電磁石の動特性を考慮したオブザーバによる位置推定を検討する。検証として、鉛直位置の推定値を用いた状態フィードバックによる安定浮上、磁気浮上搬送時の搬送方向の横揺れの推定精度を実験により評価する。

一方、天井クレーンの制振位置決め制御においては、固有振動数に同期して加速度入力パターンを構成することで、固有振動数成分を励起させない方法等が提案されている⁽⁴⁾。本研究では、この手法を磁気浮上搬送制御に適用した場合の有効性と、同時に搬送時の浮上物体の位置推定の精度を検証する。

2. 実験装置

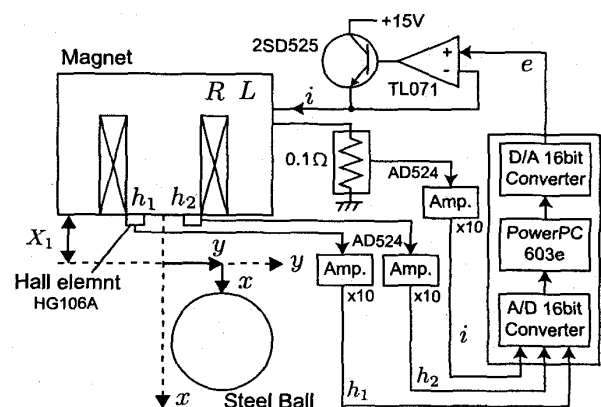


Fig. 1 Magnetic levitation system.

* 原稿受付 2010年7月20日。

^{*1} 正員, 岐阜工業高等専門学校電子制御工学科(〒501-0495 本巣市上真桑2236-2)。^{*2} 神戸大学工学部情報知能工学科(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)。^{*3} 正員, 岐阜大学工学部人間情報システム工学科(〒501-1112 岐阜市柳戸1-1)。^{*4} 正員, 愛知工業大学工学部機械学科(〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)。

E-mail: kobayashi@gifu-nct.ac.jp

図1に実験装置の概略図を示す。実験装置は、電磁石（電磁軟鉄 JIS:SUYB2, 直径 70mm, 高さ 60mm, 巻数 800T), 浮上物体である鉄球（鋼製, 直径 25mm, 質量 68g), ホール素子（旭化成 HG106A), 制御ボード（dSPACE 社製 DS1104), 駆動回路, 増幅回路から構成されている。制御ボードで計算された制御電圧 e は, D/A 変換器から駆動回路を経由して電磁石に印加される。電磁石の電流 i は, 基準抵抗 $0.1[\Omega]$ の電圧をオペアンプ (AD524) で 10 倍に差動増幅して A/D 変換を介して制御ボードで計測する。ホール素子は 6mm 間隔で 2 個配置し, 左右のホール電圧 h_1, h_2 も同様にオペアンプ (AD524) で 10 倍に差動増幅して制御ボードで計測する。

磁気浮上モデルは, 浮上物体が鉛直・水平方向を運動するものとし, 定常浮上位置（電磁石から下方 $X_1 = 0.005[\text{m}]$ ）からの鉛直位置を x , 水平位置を y とする。 R および L は, 電磁石の抵抗およびインダクタンスである。また, 浮上物体の位置 (x, y) の実測値は, 高速カメラ（株式会社ライブラリー社製の高速ビデオカメラ ネット画像入力システム GA200, VGA モノクロ, 解像度 640×480 , サンプルング $200[\text{Hz}]$ ）を用いて撮影し, 浮上物体の重心位置を算出することで計測する。

3. 磁気浮上モデル

図1のモデルに対して, 浮上物体の鉛直・水平方向の運動方程式及び電磁石の電気回路方程式は次式で与えられる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg - f_{mag} \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -c_y \frac{dy}{dt} - k_y y \quad (2)$$

$$e = \frac{d}{dt}(Li) + Ri \quad (3)$$

ここで, m は浮上物体の質量, g は重力加速度, f_{mag} は磁気吸引力, c_y と k_y は復元力による減数係数とバネ定数である。吸引力 f_{mag} とインダクタンス L は磁気飽和, ヒステリシスおよび渦電流の影響がないと仮定し, 鉛直位置 x の関数として次式で与えられる。

$$f_{mag} = k \left(\frac{i}{X+x} \right)^2 \quad (4)$$

$$L = \frac{Q}{X+x} + L_0 \quad (5)$$

ここで, $X = X_1 + X_0$ とおき, X_0 はギャップ定数, k は磁気吸引力係数, Q はインダクタンス定数, L_0 は漏れインダクタンスとする。式(4)のパラメータを導出するため, 図2に浮上物体の重力 mg と吸引力 f_{mag} が釣り合う鉛直位置 x と電流 i の測定結果を示す。 $f_{mag} = mg$

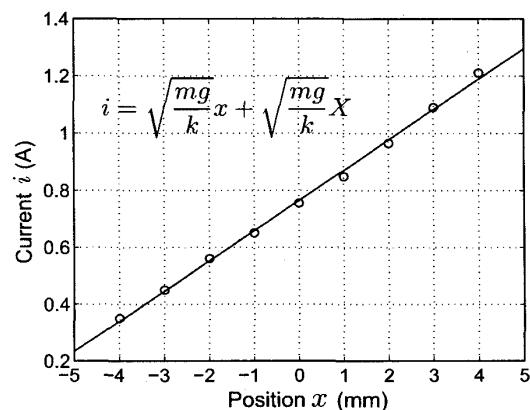


Fig. 2 Experimental result of magnetic force.

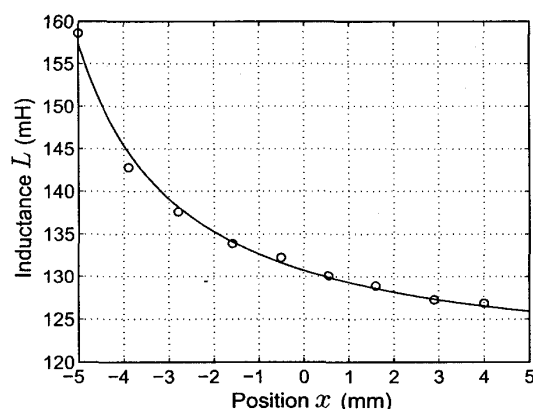


Fig. 3 Experimental result of magnetic inductance.

とおくと, 鉛直位置 x と電流 i は比例の関係となるため, 計測結果より k と X_0 を最小二乗法により決定する。また, 図3に鉛直位置 x を変化させた場合の電磁石のインダクタンス L の測定結果を示す。この結果より, 式(5)の Q と L_0 を最小二乗法により導出する。ここで, $x=0$ のときの電流とインダクタンスをそれぞれ定常電流 $i = I_1$, 定常インダクタンス $L = L_1$ とおく。式(4)と(5)を式(1)と(3)にそれぞれ代入すると最終的には次式 of 非線形モデルが得られる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = mg - k \left(\frac{i}{X+x} \right)^2 \quad (6)$$

$$e = -\frac{Q}{(X+x)^2} i \frac{dx}{dt} + L \frac{di}{dt} + Ri \quad (7)$$

4. ホール電圧の関係式導出

位置推定の準備として, ホール電圧 h_1, h_2 と鉄球位置 (x, y) の関係式を導出する。鉄球を XY ステージ上に固定し, 電磁石に電流を加えて, 鉄球を鉛直方向 x ・水平方向 y に変化させた場合のホール電圧を測定

する. 図4, 5に電流一定 ($i = I_1$) での鉄球の各位置 (x, y) における左右のホール電圧分布 h_1, h_2 を示す. 図6に水平位置を固定 ($y = 0$) し, 各鉛直位置 x における電流とホール電圧の関係を示す. 図6よりホール電圧 h_1, h_2 と電流 i は比例関係にあることが分かる.

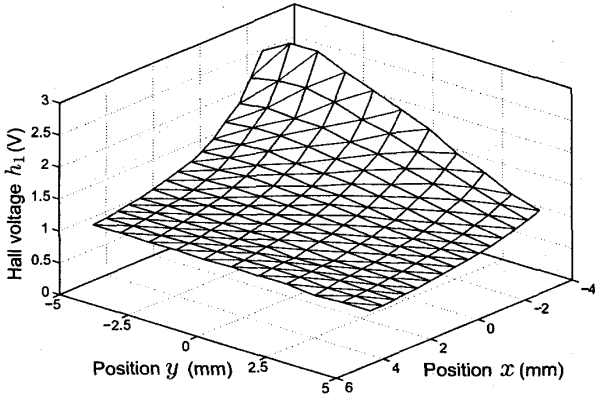


Fig. 4 Hall voltage for steel ball position (left side).

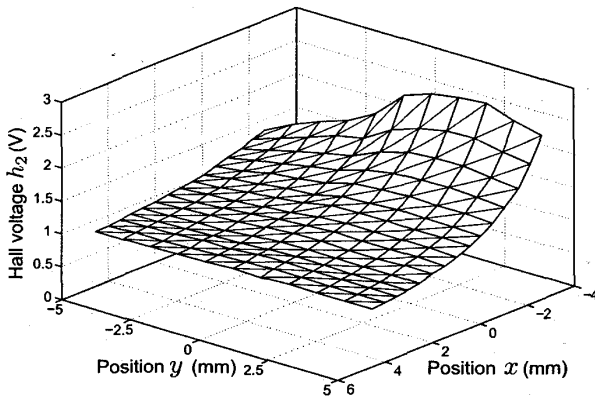


Fig. 5 Hall voltage for steel ball position (right side).

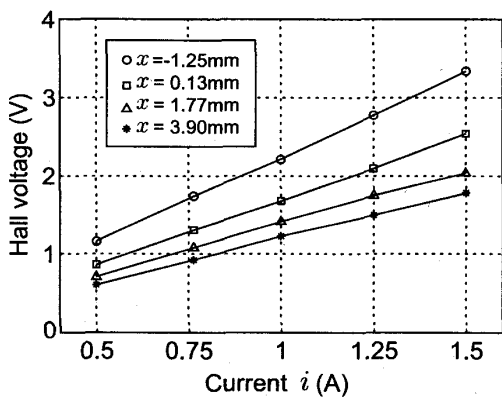


Fig. 6 Hall voltage for magnetic current.

次に鉄球の位置 (x, y) とホール電圧 h_1, h_2 の関係を調べるために, 図4, 5の計測結果から, 図7に鉛直位置 x とホール電圧 h_1, h_2 の関係 ($y = 0$) を, 図8に水平位置 y とホール電圧 h_1, h_2 の関係 ($i = I_1$) を示す.

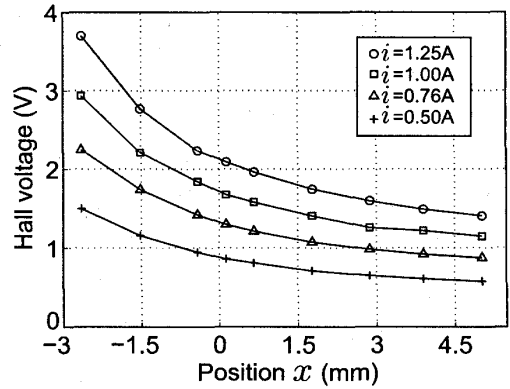


Fig. 7 Hall voltage for magnetic current.

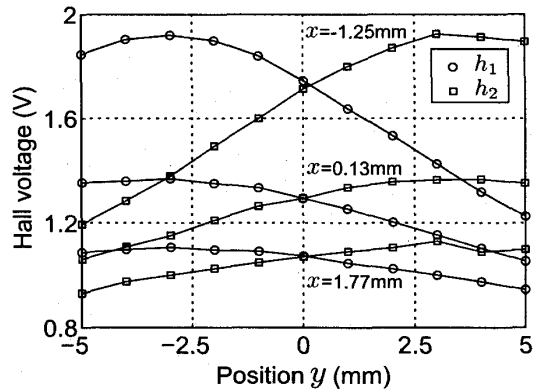


Fig. 8 Hall voltage for magnetic current.

図7より, 鉛直位置とホール電圧は反比例の関係にあることが分かる. 図8では, 定常値付近 ($y = 0$) に着目すると比例の関係にあることが分かる. そこで, これらの関係を考慮して, 左右のホール電圧の関係式を次式で表すこととする.

$$h_{1,2} = (ai + b) \left(\frac{p}{X_1 + x} \pm qy + r \right) \quad (8)$$

ここで, a, b, p, q, r は実験結果から得られる定数であり, 項 qy の符号が h_1 と h_2 で異なる. また, $x = 0, y = 0, i = I_1$ のときの左右のホール電圧を定常ホール電圧 $h_{1,2} = H_1$ とおく. 定数の導出方法としては, 最初に図6の電流とホール電圧の関係から定数 a, b を最小二乗法にて導出する. 次に定数 a, b を既知として, 図7のホール電圧と鉛直位置から定数 p, r を最小二乗法にて導出する. 最後に定数 q を未知数として, 図8のホール電圧と水平位置から定数 q を最小二乗法にて導出する.

5. オブザーバの導出

式(6), (7), (8)は非線形となるため, $e = E_1 + \Delta e, i = I_1 + \Delta i, x = \Delta x, y = \Delta y, h_1 = H_1 + \Delta h_1, h_2 = H_1 + \Delta h_2$ とおき, 定常値 $e = E_1, x = 0, y = 0, i = I_1,$

$h_1 = H_1, h_2 = H_1$ からの微小変化 $\Delta e, \Delta i, \Delta x, \Delta y, \Delta h_1, \Delta h_2$ として定常値近傍で線形近似を行う。状態変数 $x_p = [\Delta x, d\Delta x/dt, \Delta y, d\Delta y/dt, \Delta i]^T$, 入力 $u_p = \Delta e$, 出力 $y_p = [\Delta i, \Delta h_1, \Delta h_2]^T$ とすると, 状態空間表現は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= A_p x_p + B_p u_p \\ y_p &= C_p x_p \end{aligned} \quad (9)$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_x/m & 0 & 0 & 0 & k_i/m \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -k_y/m & -c_y/m & 0 \\ 0 & k_v/L_1 & 0 & 0 & -R/L_1 \end{bmatrix},$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/L_1 \end{bmatrix}, \quad C_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_1 & 0 & k_2 & 0 & k_3 \\ k_1 & 0 & -k_2 & 0 & k_3 \end{bmatrix},$$

$$k_x = \frac{2kI_1^2}{X^3}, \quad k_i = -\frac{2kI_1}{X^2}, \quad k_v = \frac{QI_1}{X^2}$$

$$k_1 = -\frac{p(aI_1 + b)}{X_1^2}, \quad k_2 = q(aI_1 + b), \quad k_3 = a\left(\frac{p}{X_1} + r\right).$$

ここで, k_y と c_y は, 鉛直方向に対して磁気浮上制御⁽⁵⁾を施した状態で, 水平方向の自由振動を高速カメラで計測することで導出した。導出した磁気浮上モデルのパラメータを表1に示す。式(9)は, (A_p, C_p) に対して可観測であり, 位置 (x, y) を推定するオブザーバを次式で構成できる。

$$\dot{\hat{x}}_p = (A_p - K_p C_p) \hat{x}_p + B_p u_p + K_p y_p \quad (10)$$

ここで, $\hat{x}_p(t)$ は $x_p(t)$ の推定値, K_p はオブザーバゲインである。オブザーバの設計として, 制御対象が白色雑音入力を受ける場合の最適状態推定問題を考える。ここで, 評価として推定誤差 $e_p = x_p - \hat{x}_p$ を取り上げ, 二次形式の平均値

$$J_k = E[e_p^T e_p] \quad (11)$$

を最小とするようなオブザーバゲイン K_p は次式で与えられる。

$$K_p = P_k C_p^T R_k^{-1} \quad (12)$$

ここで, P_k は次式の Riccati 方程式の解である。

$$A_p P_k + P_k A_p^T - P_k C_p^T R_k^{-1} C_p P_k + Q_k = 0 \quad (13)$$

また, Q_k, R_k はそれぞれシステム雑音と観測雑音の共分散である。

Table 1 System parameters.

| Parameter | Value | Unit |
|-----------|-----------------------|------------------------------------|
| m | 63.7×10^{-3} | [kg] |
| g | 9.80 | [m/s ²] |
| R | 4.57 | [Ω] |
| X_1 | 5.00×10^{-3} | [m] |
| I_1 | 7.64×10^{-1} | [A] |
| k | 5.53×10^{-5} | [Nm ² /A ²] |
| X_0 | 2.20×10^{-3} | [m] |
| Q | 8.45×10^{-5} | [Hm] |
| L_1 | 1.31×10^{-1} | [H] |
| L_0 | 1.19×10^{-1} | [H] |
| a | 2.17 | [V/Am] |
| b | 6.99×10^{-2} | [V/m] |
| p | 2.51×10^{-3} | [m ²] |
| q | -3.10×10^1 | [-] |
| r | 2.58×10^{-1} | [m] |
| H_1 | 1.31 | [V] |
| k_x | 1.72×10^2 | [N/m] |
| k_i | -1.63 | [N/A] |
| k_y | 1.25 | [Ns/m] |
| k_y | 1.57×10^1 | [N/m] |
| c_y | 7.97×10^{-3} | [Ns/m] |

6. 鉛直浮上制御

6.1 制御設計 式(9)は水平方向に対しては可制御ではないため, 鉛直方向に対して推定値 $\hat{\Delta x}, d\hat{\Delta x}/dt, \hat{\Delta i}$ を状態フィードバックすることで浮上安定化を実現し, 推定値の有効性を確認する。鉛直方向の運動に対して状態フィードバック制御を設計するため, 次式の状態方程式を考える。

$$\dot{x}_s = A_s x_s + B_s u_p \quad (14)$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_x/m & 0 & k_i/m \\ 0 & k_v/L_1 & -R/L_1 \end{bmatrix}, B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_1 \end{bmatrix}.$$

ここで, $x_s = [\Delta x, d\Delta x/dt, \Delta i]^T$ とおき, 式(10)の推定値 $\hat{x}_p(t)$ から $\hat{x}_s = [\hat{\Delta x}, d\hat{\Delta x}/dt, \hat{\Delta i}]^T$ を得る。推定値が $\hat{x}_s \rightarrow x_s$ となる場合の擬似状態フィードバック則は次式で与えられる。

$$u_p = -F_s \hat{x}_s \quad (15)$$

式(14)に対して最適レギュレータ問題 (LQR 制御系) を考え, 二次形式評価関数

$$J_f = \int_0^\infty [x_s^T Q_f x_s + R_f u_s^2] dt \quad (16)$$

を最小にする最適制御入力となるフィードバックゲイン $F_s = [F_1, F_2, F_3]$ は次式で与えられる。

$$F_s = R_f^{-1} B_p^T P_f \quad (17)$$

ここで、 P_f は次式の Riccati 方程式の解である。

$$A_s^T P_f + P_f A_s - R_f^{-1} P_f B_s B_s^T P_f + Q_f = 0 \quad (18)$$

ここで、 Q_f , R_f はそれぞれ出力, 入力に対する重み行列である。よって、 $F_p = [F_1, F_2, 0, 0, F_3]$ とおくと、オブザーバを用いた状態フィードバック制御系 (LQG 制御系) は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= (A_p - B_p F_p - K_p C_p) \hat{x}_p + K_p y_p \\ u_p &= -F_p \hat{x}_p \end{aligned} \quad (19)$$

各ゲイン F_p , K_p の設計は、オブザーバの極配置を状態フィードバックの極配置より複素平面上で左側に配置し、かつ最適レギュレータと同様な安定余裕を確保するように各重み行列 Q_f , R_f , Q_k , R_k を決定した。最初に基準となる最適レギュレータを設計する。状態フィードバックゲインの極を原点付近に配置するように重み行列を $Q_f = \text{diag}(5.0 \times 10^1, 5.0 \times 10^1, 5.0 \times 10^1)$, $R_f = 1.0$ で設計した。次にオブザーバの設計は、制御対象の出力を計測し、共分散を計算することで観測雑音の重みを $R_k = \text{diag}(5 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6})$ と決定する。一般に LQG 制御系は、最適レギュレータと比較して安定余裕が劣化するため、最適レギュレータの安定余裕へ回復するようにシステム雑音の重み Q_k を選定する。 Δi に対する重み q_i を $Q_k = \text{diag}(1.0, 1.0, 1.0, 1.0, q_i)$ として、 $q_i = 1.0 \times 10^{-5} \rightarrow 1.0 \times 10^3$ と変化させた場合の根軌跡 (式(10)のオブザーバの極の変化) を図9, ナイキスト線図 (式(9)の入力 u_p から式(19)の出力 u_p のベクトル軌跡) を図10に示す。ここで、図9(b)は図9(a)の拡大図で、○点は各極の出発点である。図10から q_i を大きくすると、安定余裕が増大して最適レギュレータに近づくことが確認できるが、図9の根軌跡で p_2, p_3 のどちらかが原点に向かう。また、原点付近の極 p_5 を動かすことができないことが分かる。 Δx と Δy に

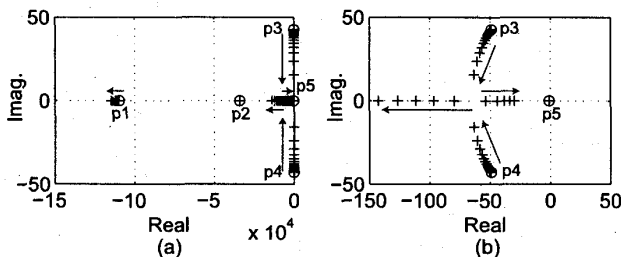


Fig. 9 Root locus of $Q_k = \text{diag}(1, 1, 1, 1, q_i)$.

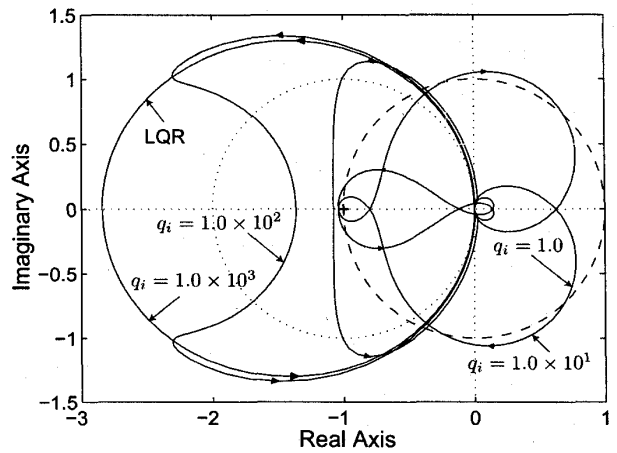


Fig. 10 Nyquist diagram of $Q_k = \text{diag}(1, 1, 1, 1, q_i)$.

対する重み q_x を $Q_k = \text{diag}(q_x, 1.0, q_x, 1.0, 1.0)$ として、 $q_x = 1.0 \times 10^{-5} \rightarrow 1.0 \times 10^{10}$ と変化させた場合の根軌跡を図11, ナイキスト線図を図12に示す。同様に図11(b)は図11(a)の拡大図である。 q_x を大きくすると、安定余裕が減少して、 $p_2 \sim p_5$ のいずれか2個の極が原点に向かう。よって、原点付近の極は q_x の増減で操作できるため、 q_x は小さく設定し、 p_i を大きくすることで安定余裕を確保することが望ましいと考える。これらを考慮して、最終的な重みを $Q_k = \text{diag}(1.0 \times 10^{-3}, 1.0, 1.0 \times 10^{-3}, 1.0, 1.0 \times 10^2)$ で設定し、状態フィードバックの極は $\lambda_f = -62.954 \pm 16.528j, -41.258$, オブザーバの極は $\lambda_k = -11787, -1316.2, -1068.7, -31.648, -31.645$ の配置とした。このナイキスト線図を図13に示す。最適レギュレータと同等の安定余裕が確保できていることが確認できる。

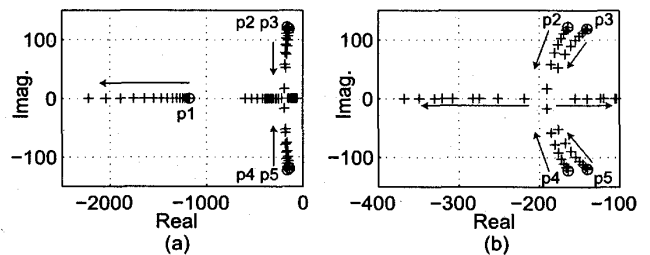


Fig. 11 Root locus of $Q_k = \text{diag}(q_x, 1, q_x, 1, 1)$.

6.2 実験結果

図14に水平位置 $y = 6.34[\text{mm}]$, 鉛直位置 $x = -2.15[\text{mm}]$ からの初期値応答の制御結果を示す。実測値はカメラにより計測し、分解能は $0.23179[\text{mm}/\text{画素}]$ である。初期位置に固定した状態では、推定誤差が大きく確認できるが、初期値応答開始後には、実測値に推定値が収束していることが確認できる。水平位置については、定常値から離れると推定誤差が大きくなり、鉛直位置については、定常値付

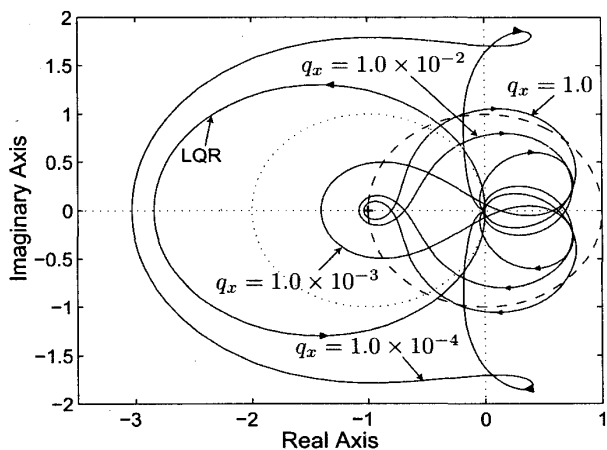


Fig. 12 Nyquist diagram of $Q_k = \text{diag}(q_x, 1, q_x, 1, 1)$.

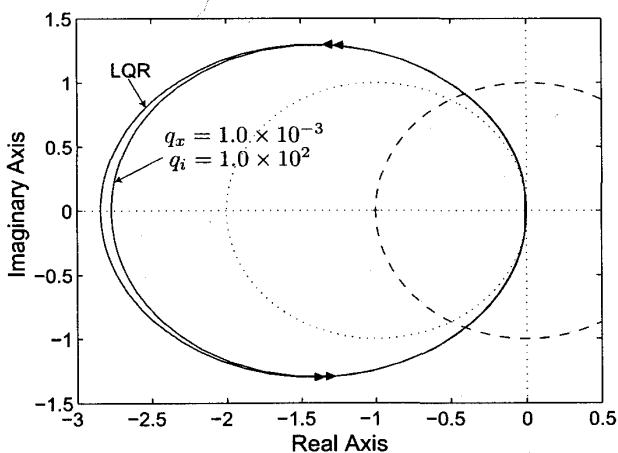


Fig. 13 Nyquist diagram of $Q_k = \text{diag}(10^{-3}, 1, 10^{-3}, 1, 10^2)$.

近で推定誤差が確認できる。しかしながら、推定誤差が存在する中でも安定した磁気浮上制御が実現でき、安定余裕を考慮して制御系を設計した効果であると考えられる。

7. 水平搬送制御

7.1 実験装置 磁気浮上搬送時の浮上物体の位置推定を検証するため、図15の実験装置を構成する。制御ボードでは、モデル追従型のPI制御系が実装されており、目標速度に追従するように、エンコーダ値を計測してPWM出力を制御することでDCモータを駆動する。そして、電磁石が取り付けられたステージを可動することにより磁気浮上搬送を行う。ステージに固定した電磁石の水平方向の絶対位置を z とし、電磁石と鉄球の鉛直・水平方向の相対位置を x, y とする。電磁石の絶対位置 z はエンコーダ値から算出し、浮上物体の相対位置 x, y の実測値は高速カメラの撮

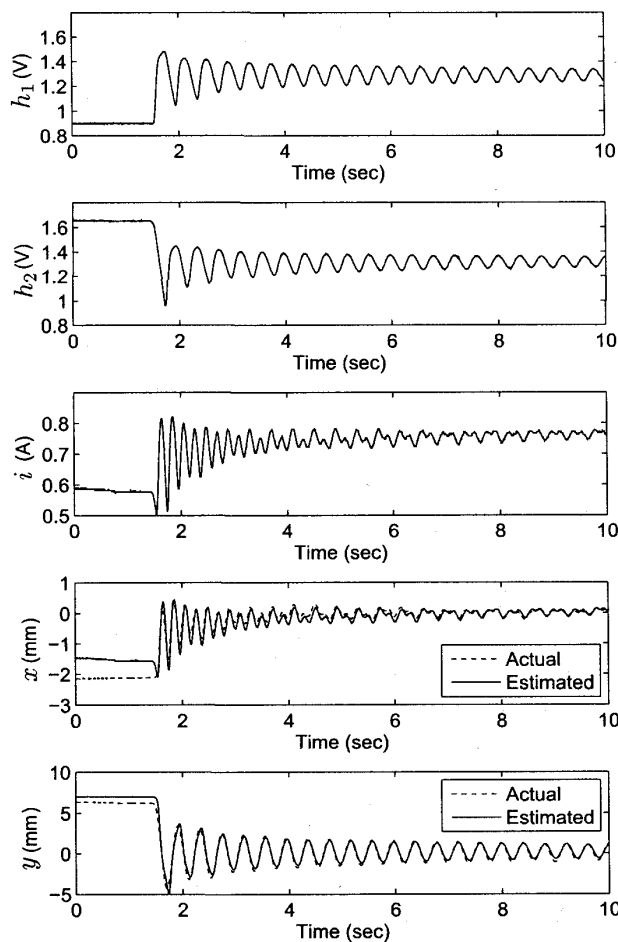


Fig. 14 Experimental results of initial response.

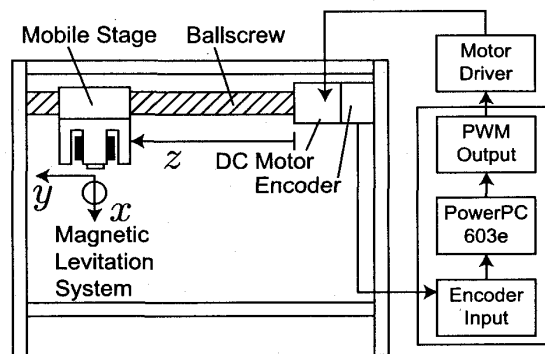


Fig. 15 Experimental setup of conveyance system.

影により算出する。

7.2 制御設計 式(9)の磁気浮上モデルでは、鉛直方向(浮上方向)と水平方向(搬送方向)の干渉は考慮していないため、水平方向のみの運動を考慮して図16の搬送モデルを考える。図16から浮上物体の運動方程式は式(2)にステージの加速度 \ddot{z} が作用し、次式で与えられる。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c_y \frac{dy}{dt} + k_y y = -m \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (20)$$

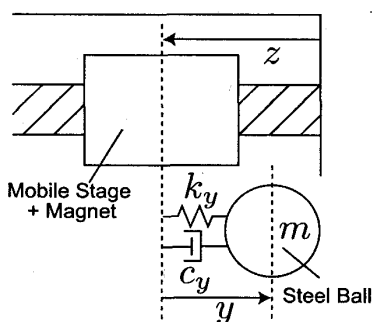


Fig. 16 Model of conveyance system.

式(20)の固有振動数周期を $T_y = 2\pi/\sqrt{k_y/m}$ とし、加速度時間 T_a と、加速開始から減速開始までの時間 T_b を鉄球の固有振動数周期 T_y の整数倍で構成することで、ステージを鉄球の固有振動数周期と同期して可動させ、電磁石と鉄球間で固有振動数成分を励起させることなく、浮上物体を最小限の横揺れで搬送する。

今回の実験では、固有振動数周期を $T_y = 0.4[\text{sec}]$ 、搬送距離を 300mm として、加速度を連続的に変化させて、図 17 に示す加速度入力パターンを作成する。式(20)をシミュレーションすることで最適な加速度パターンを検討した。図 18 に加速度パターンを変化させたシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果より、加速度時間が整数倍でないときは、搬送中に浮上物体の横揺れが発生していることが確認できる。よって、最適な加速度パターンを $T_a = 2T_y = 0.8[\text{sec}]$ 、 $T_b = 3T_y = 1.2[\text{sec}]$ と決定した。

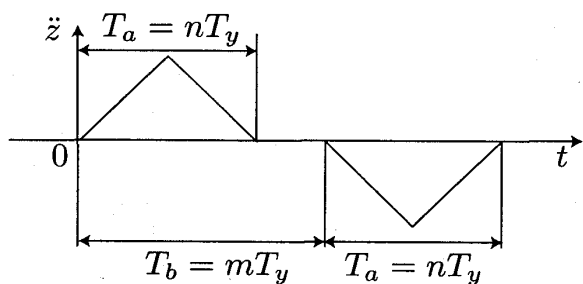


Fig. 17 Acceleration input.

7.3 実験結果 図 19 に磁気浮上搬送の実験結果を示す。実測値は同様にカメラにより計測し、分解能は $0.54264[\text{mm}/\text{画素}]$ である。目標速度にステージが追従し、浮上物体は加速と減速時に横揺れが発生しているが、速やかに横揺れが収束し、安定した磁気浮上搬送を確認した。水平位置の推定値は、実測値と比較して揺れ幅が 2mm 以上となるところで大きな推定誤差が確認されたが、位相遅れがないことから推定値を用いた制振制御は十分に可能であると考えられる。また、実測値とシミュレーション結果では若干の位相遅れは

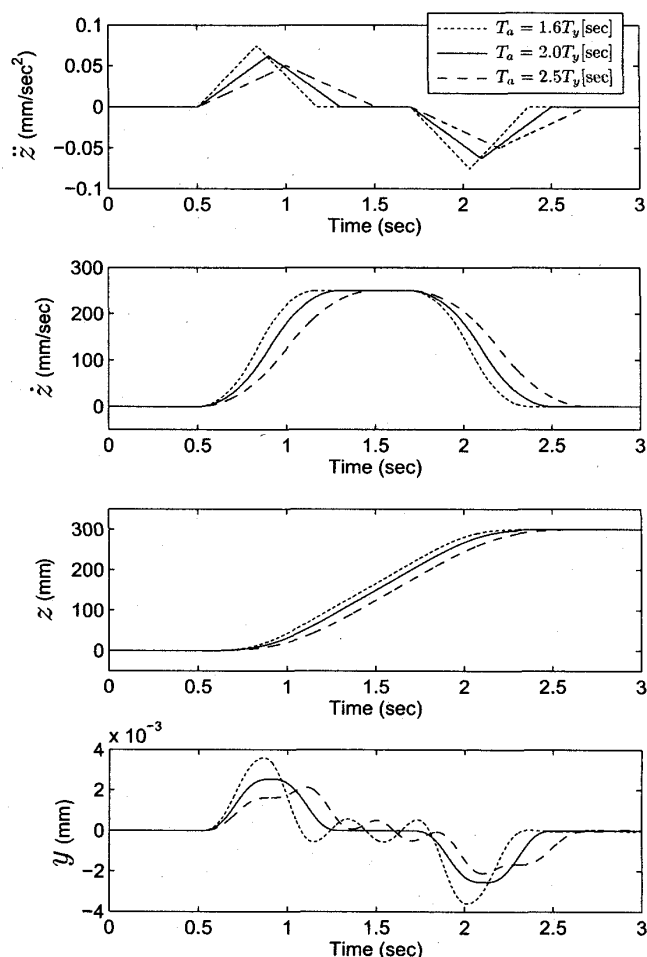


Fig. 18 Simulation results of conveyance control.

確認されたが、揺れ幅がほぼ等しいことから、今回の加速度パターンの構成方法が磁気浮上搬送に対しても有効であることが確認された。さらに、磁気浮上モデルでは鉛直・水平方向の干渉は考慮していないが、実際の搬送制御では鉛直方向への影響も確認された。これは、磁気吸引力が水平方向に対して等しく作用するのではなく、中心より離れると磁気吸引力は弱く作用する。したがって、水平位置が大きく変化すると、同じ吸引力での浮上位置が上方に変化し、結果的に鉛直位置も大きく変化するものと考えられる。

8. おわりに

磁気浮上搬送のためのオブザーバを用いた2次元位置推定を提案し、以下の結論を得た。

1. 電磁石の磁極部に2個のホール素子を配置し、浮上物体の2次元位置と電磁石の電流に対するホール電圧の近似式の導出方法を提案した。
2. ホール電圧の近似式の線形化を含むオブザーバによる2次元位置推定を提案し、推定値を用いた鉛直方向の安定浮上と搬送方向(水平方向)の横揺

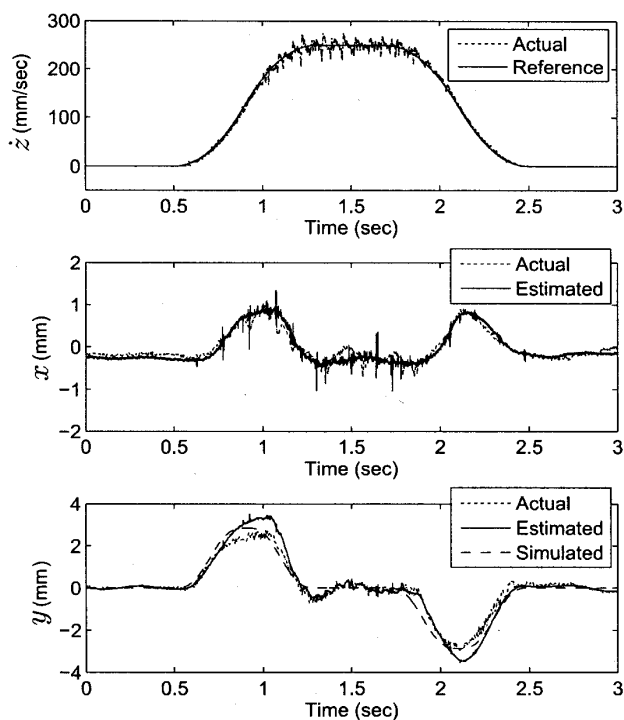


Fig. 19 Experimental results of conveyance control.

れの推定が可能であることを確認した。

3. オブザーバによって、磁気浮上の動特性を考慮した推定機構を実現し、推定値に位相遅れなく、ホール電圧と電流の計測ノイズを低減することができた。
4. 鉛直浮上制御に対して、ホール電圧の近似誤差や線形近似誤差を補うために、オブザーバを用いた状態フィードバック制御系の安定余裕を大きく確保する設計方法を提案した。
5. 水平方向に対する搬送制御に対して、加速度入力パターンの加速時間を水平方向の固有振動数周期の整数倍とすることで、浮上物体の固有振動数を励起することなく、最小限の横揺れで高速搬送できることを確認した。
6. 磁気浮上モデルでは、鉛直・水平方向の干渉は考慮していないが、水平搬送実験によって水平方向の運動が鉛直方向に影響を与えることを確認した。

文 献

- (1) H. Kojima, O. Itagaki, T. Okabe and T. Kobayashi, 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*, Vol. 16, No. 4 (1996), pp. 886-874.
- (2) M. Sasaki, Y. Kobayashi, and Y. Hori, Active electromagnetic levitation conveyance control of a flexible beam by using disturbance observer, *Journal of the Japan*

Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 10, No. 4 (2002), pp. 413-420.

- (3) T. Inoue, M. Hirayama, M. Kobayashi, and K. Takagi, Two Degrees of Freedom Position Estimation of the Magnetic Levitation System Using Hall Elements, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 760 (2009), pp. 3324-3331.
- (4) S. Murakami, and T. Ikeda, Vibration Suppression for High Speed Positioning Control of Overhead Traveling Cranes by Acceleration Inputs, *JSME Proceedings on Dynamics and Design Conference 2006* (2006), CD-ROM (No. 128).
- (5) M. Sasaki, Y. Kobayashi, M. Okugawa Y. Hori, and Y. Takenaka, Disturbance compensation of magnetic levitation using current and magnetic flux, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 9, No. 3 (2001), pp. 349-357.