学術論文

外乱オブザーバを用いた柔軟物体の磁気浮上搬送

Active electromagnetic levitation conveyance control of a flexible beam by using disturbance observer

| 佐々木 実 | (岐阜大学) | 小林 | 義光 (Lin | nX) |
|-------|--------|----|---------|-----|
| 堀 康郎 | (岐阜大学) | | | |

Minoru SASAKI Member Yoshimitsu KOBAYASHI Yasuro HORI Member

This paper describes an active electromagnetic levitation conveyance control of a flexible beam using current and magnetic flux instead of a position sensor. An observer is used to estimate the position based on current, magnetic flux, fundamental, 1st and 3rd modes of vibration of the beam, and input voltage to the electromagnet. The controller combines state-feedback with the observer output to arrive at a new input voltage. Results obtained with a conventional observer and the disturbance observer are discussed. Simulation and experimental results demonstrate the feasibility of the approaches.

Key Words: Electromagnetic levitation conveyance control, disturbance observer, flexible beam, current, magnetic flux.

1 緒言

一般にワークの塗装では、ワークを支持した状態で 塗装を行うため、支持した部分の塗装ができず、支持 部を再度塗装する必要がある。一方、ワークを非接触 で支持して塗装することができれば、そのような二度 手間を必要としないため、作業効率が向上するものと 考えられる。そこで、本研究では、非接触把持システ ムの代表的なシステムである磁気浮上システムを塗装 装置に応用することを目的とする。

通常,磁気浮上システムはレーザセンサ等の外界センサを利用し,変位の情報を得ることで安定浮上を実現しているが,塗装システムへの応用を考えるとセンサの配置が問題となり,搬送装置等への応用が困難となる.また,塗装雰囲気中では光学式の変位センサを

利用することができない. そこで, セルフセンシング 磁気浮上もしくは電流と磁束を用いた磁気浮上系であ れば, センサ配置の問題を回避することができる.

電流と磁束を用いた磁気浮上系を塗装装置へ応用す ることを考えた場合,制御系に対する外乱としては, 搬送および塗装時の浮上物体に作用する外力,長時間 の駆動における電磁石の抵抗値の変動,電流および磁 束の検出器のノイズおよびオフセット誤差などが考え られる.これらの外乱はノイズを除けば主にステップ 状外乱として考えることができる.したがって,外乱 が作用する磁気浮上系に対しては,未知のステップ状 外乱に対して可観測となる電流と磁束を観測する磁気 浮上系が有効であると考えられる.

柔軟物体に対する磁気浮上に関する研究は、自動車 の製造ラインで用いられる薄鋼板の搬送系を対象とし たものを中心に報告されている [1]-[5]. しかし,これ らの研究では薄鋼板に生じる弾性振動を陽に考慮して

連絡先: 佐々木実, 〒 501-1193, 岐阜市柳戸1-1, 岐阜 大学工学部, email: sasaki@cc.gifu-u.ac.jp

コントローラ設計が行われておらず,理論的な根拠が 乏しい.一方で,押野谷ら [6]-[8] は薄鋼板を1次元 の分布定数系としてモデル化し,得られたモデルをも とにして線形最適制御を適用した.しかし,これらの 研究においては外乱の補償に関しては余り述べられて おらず,外乱オブザーバによる外乱相殺制御を適用し た例は未だ報告されていない.

外乱に対する制御には、H_∞制御による外乱抑圧制 御 [9],外乱推定オブザーバによる外乱相殺制御 [10] などが考えられる.磁気浮上系に対しては、外乱推定 オブザーバにより推定された外乱をフィードバックす る例 [11] や H_∞制御系に外乱推定オブザーバによる 外乱相殺制御を付加した例 [12] など、外乱推定オブ ザーバの有効性が報告されている.しかし、電流と磁 束を用いた磁気浮上系に対して、外乱オブザーバによ る外乱相殺制御を適用した例は未だ報告されていない. また、主な外乱のダイナミクスは既知であり、外乱の ダイナミクスを含んだ系に対して電流と磁束を観測量 とすることで可観測性が成り立つことから、外乱推定 オブザーバを構成することが可能である [13].

そこで、本研究では、電流と磁束を用いた磁気浮上系 に対して、外乱推定オブザーバにより浮上物体の変位、 速度および外乱を推定する.推定された変位、速度を 状態フィードバックすることによりシステムを安定化 し、推定された外乱をフィードバックすることにより、 外乱補償までを行う制御系(以下,DLQG制御系)を 構成する.また、外乱推定オブザーバをKalmanフィ ルタと同様な設計方法で行うことにより、検出器のノ イズの影響を除去することを考える.本研究では、電 流と磁束を用いた磁気浮上系に対して、一般的なオブ ザーバを用いた場合と、外乱推定オブザーバを用いた 場合の変位、変位速度の推定についても比較・検討を 行う[14][15].

2 両端自由梁に対する磁気浮上モデル

図1に対する磁気浮上モデルを導出する.ここで、 対象浮上物体は実際の塗装システムを考慮した場合の 図のようならせん状の柔軟物体であるが、複雑な形状 であるため厳密なモデル化は難しく、理想的にバラン スが取れている両端自由梁と仮定し、その両端自由梁 を中心で支持して磁気浮上させることを考える.ギャッ プの定常値 X_1 からのギャップ Δx を両端自由梁の中 心 $z = z_a$ のたわみ $w(t, z_a)$ とすることで運動方程式



Fig. 1 Magnetic levitation flexble beam system.

を導出する. 定常値近傍で線形近似することで, 変数 は次のように与えられる.

$$e \equiv E_1 + \Delta e$$

$$i \equiv I_1 + \Delta i$$

$$x \equiv X_1 + w(t, z_a)$$

$$v \equiv V_1 + \dot{w}(t, z_a)$$
(1)

ここで、 E_1 , I_1 , X_1 , V_1 は平衡点でのコイル電圧、電流、ギャップ、ギャップ速度であり、 $\Delta e \ge \Delta i$ はコイル電圧と電流の平衡点回りの微小変化、 $w(t, z_a) \ge \dot{w}(t, z_a)$ は $z = z_a$ での梁の変位と変位速度である。磁気力 f_{mag} の運動方程式は次式で与えられる。

$$f_{mag} + mg = k \left(\frac{i}{X_0 + x}\right)^2$$
$$\approx k \left(\frac{I_1}{X_0 + X_1}\right)^2 + k_m w(t, z_a) + k_i \Delta i$$
(2)

ここで、電流値の定常状態値 I_1 による電磁力が mg に等しいと仮定する.

$$mg = k \left(\frac{I_1}{X_0 + X_1}\right)^2 \tag{3}$$

mg を消去し, (2) を書き換えると

$$f_{mag} = k_m w(t, z_a) + k_i \Delta i \tag{4}$$

電磁力が $z = z_a$ のみに加わると仮定すると、磁気浮 上システムの運動方程式が次のように得られる.

$$EI\frac{\partial^4 w(t,z)}{\partial z^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(t,z)}{\partial t^2} = -f_{mag}\delta(z-z_a)$$
(5)

ここで, E はヤング率, I は断面二次モーメント, ρ また, コイル は密度, A は断面積である. そして, z = 0, l での に表される. 境界条件は

$$\frac{\partial^2 w(t,0)}{\partial z^2} = \frac{\partial^3 w(t,0)}{\partial z^3} = 0$$
$$\frac{\partial^2 w(t,l)}{\partial z^2} = \frac{\partial^3 w(t,l)}{\partial z^3} = 0$$
(6)

ここで,運動方程式の解を自由-自由梁の固有関数と仮 定して,

$$w(t,z) = \sum_{i=0}^{n} f_i(t)\phi_i(z)$$
(7)

式(7)を(5)に代入すると,

$$M_j \ddot{f}_j(t) + K_j f_j(t) = -f_{mag} \phi_j(z_a)$$

 $(j = 0, 1, 2, \dots, n)$ (8)

ここで,

$$EI \int_0^l \frac{d^2\phi_i(z)}{dz^2} \frac{d^2\phi_j(z)}{dz^2} dz = \begin{cases} 0 & (i \neq j), \\ K_j & (i = j) \end{cases}$$

$$\rho A \int_0^l \phi_i(z) \phi_j(z) dz = \begin{cases} 0 & (i \neq j), \\ M_j & (i = j) \end{cases}$$

$$\int_0^l f_{mag}\phi_j(z)\delta(z-z_a)dz = f_{mag}\phi_j(z_a)$$

同様に式(7)を式(4)に代入すると次式が得られる.

$$f_{mag} = k_m \sum_{i=0}^n f_i(t)\phi_i(z_a) + k_i \Delta i \qquad (9)$$

また,この式を式(8)に代入して

$$\ddot{f}_{j}(t) = -\omega_{j}^{2} f_{j}(t) - \frac{k_{m}}{M_{j}} \phi_{j}(z_{a}) \sum_{i=0}^{n} f_{i}(t) \phi_{i}(z_{a}) - \frac{k_{i}}{M_{j}} \phi_{j}(z_{a}) \Delta i \quad (j = 0, \ 1, \ 2, \ \cdots, n)$$
(10)

ここで,

$$\omega_j = \sqrt{rac{K_j}{M_j}}$$

また,コイル電圧とホール電圧もそれぞれ次式のよう に表される.

$$\Delta e(t) = -k_v \dot{w}(t, z_a) + L_1 \frac{d\Delta i(t)}{dt} + R_1 \Delta i(t)$$
$$= -k_v \sum_{i=0}^n \dot{f}_i(t) \phi_i(z_a) + L_1 \frac{d\Delta i(t)}{dt} + R_1 \Delta i(t)$$
(11)

$$\Delta h(t) = k_1 w(t, z_a) + k_2 \Delta i(t)$$

= $k_1 \sum_{i=0}^n f_i(t) \phi_i(z_a) + k_2 \Delta i(t)$ (12)

モード展開された磁気浮上システムの運動方程式は次 式のように得られる.

$$\ddot{\boldsymbol{f}}(t) = \left(-\Omega^2 - k_m [\phi/M] [\phi]^T\right) \boldsymbol{f}(t) - k_i [\phi/M] \Delta i(t),$$
(13)

$$\Delta e(t) = -k_{v}[\phi]^{T} \dot{\boldsymbol{f}}(t) + L_{1} \Delta \dot{\boldsymbol{i}}(t) + R_{1} \Delta \boldsymbol{i}(t), \qquad (14)$$

$$\Delta h(t) = k_1[\phi]^T \boldsymbol{f}(t) + k_2 \Delta i(t).$$
(15)

ここで,

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}(t) &= [f_0(t), f_1(t), \cdots, f_n(t)]^T, \\ \Omega &= \operatorname{diag}(\omega_0, \omega_1, \cdots, \omega_n), \\ [\phi] &= [\phi_0(z_a), \phi_1(z_a), \cdots, \phi_n(z_a)]^T, \\ [\phi/M] &= [\phi_0(z_a)/M_0, \phi_1(z_a)/M_1, \cdots \phi_n(z_a)/M_n]^T. \end{aligned}$$

状態ベクトルを $\mathbf{x}_b = [\mathbf{f}(t), \dot{\mathbf{f}}(t), \Delta i(t)]^T$,入力ベ クトルを $u(t) = \Delta e(t)$,出力ベクトルを $\mathbf{y}(t) = [\Delta i(t), \Delta h(t)]^T$ とすると、状態空間表現は次式となる.

$$\dot{\boldsymbol{x}}_b(t) = \boldsymbol{A}_b \boldsymbol{x}_b(t) + \boldsymbol{b}_b \boldsymbol{u}(t) \tag{16}$$

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}_b \boldsymbol{x}_b(t) \tag{17}$$

$$A_{b} = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 \\ -\Omega^{2} - k_{m} [\phi/M] [\phi]^{T} & 0 & -k_{i} [\phi/M] \\ 0 & k_{v} [\phi]^{T}/L_{1} & -R_{1}/L_{1} \end{bmatrix}, \\ b_{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_{1} \end{bmatrix}, C_{b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ k_{1} [\phi]^{T} & 0 & k_{2} \end{bmatrix}.$$
(18)

415

3 制御系設計

3.1 外乱オブザーバ

外乱を考慮した場合の状態空間表現は次式のように 与えられる.

$$\dot{\boldsymbol{x}}_a(t) = \boldsymbol{A}_a \boldsymbol{x}_a(t) + \boldsymbol{b}_a \boldsymbol{u}(t)$$
(19)

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}_a \boldsymbol{x}_a(t) \tag{20}$$

ここで,

$$\boldsymbol{A}_{a} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} & & \\ & A_{b} & \\ & & \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \phi/M \end{bmatrix} & \mathbf{0} \\ \phi/M \end{bmatrix} & \mathbf{0} \\ 0 & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{b}_{a} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} & & \\ & b_{b} \\ & & \\ & & \\ & & 0 \\ & & & \end{bmatrix}, \boldsymbol{C}_{a} = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\$$

$$\boldsymbol{x}_{a}(t) = \left[\begin{array}{ccc} \boldsymbol{f} & \dot{\boldsymbol{f}} & \Delta i & F_{d} & E_{d} \end{array}
ight]^{T}.$$

ここで、外乱 F_d は浮上物体に作用するような一定外 乱および線形近似によるモデル化誤差、外乱 E_d は電 磁石コイルの抵抗値変動、磁束検出器のオフセット線 形近似によるモデル化誤差を仮定している. (A_a, C_a) は可観測であり、式 (19) と (20) から外乱オブザー バは次式で与えられる.

 $\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}_a(t) = (\boldsymbol{A}_a - \boldsymbol{K}\boldsymbol{C}_a)\hat{\boldsymbol{x}}_a(t) + \boldsymbol{b}_a\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{K}\boldsymbol{y}(t)(21)$

ここで, $\hat{x}_a(t)$ は x_a の推定ベクトルであり (推定値 を添え字 \land で表す), ノイズを考慮した最適オブザー バゲイン K は次式で与えられる.

$$\boldsymbol{K} = \boldsymbol{P} \boldsymbol{C}_a^T \boldsymbol{R}_k^{-1} \tag{22}$$

ここで, P は次の Riccati 方程式の解である.

$$\boldsymbol{A}_{a}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_{a}^{T} - \boldsymbol{P}\boldsymbol{C}_{a}^{T}\boldsymbol{R}_{k}^{-1}\boldsymbol{C}_{a}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{Q}_{k} = \boldsymbol{0}(23)$$

$$J_k = E\left[\boldsymbol{e}(t)^T \boldsymbol{e}(t)\right] \tag{24}$$

ここで、 Q_k はシステム雑音の共分散であり、 R_k は 観測ノイズの共分散である. 3.2 状態フィードバックコントローラ

状態フィードバックの制御則は次式で与えられる.

$$u(t) = -\boldsymbol{F}\hat{\boldsymbol{x}}_p(t) \tag{25}$$

ここで, $x_p(t)$ の推定ベクトル $\hat{x}_p(t)$ は式 (21) の $\hat{x}_a = [\hat{x}_p \ \hat{F}_d \ \hat{E}_d]^T$ から得られる.最適レギュレータ (LQR) の二次形式評価関数は,

$$J_f = \int_0^\infty \left[\boldsymbol{x}_p(t)^T \boldsymbol{Q}_f \boldsymbol{x}_p(t) + R_f u(t)^2 \right] dt, (26)$$

ここで、 Q_f と R_f は重み関数である。評価関数を 最小にするフィードバックゲインは、

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{R}_f^{-1} \boldsymbol{b}_p^T \boldsymbol{\Theta} \tag{27}$$

⊖ は次の Riccati 方程式の解である.

$$\boldsymbol{A}_{p}^{T}\boldsymbol{\Theta} + \boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{A}_{p} - \boldsymbol{R}_{f}^{-1}\boldsymbol{\Theta}\boldsymbol{b}_{p}\boldsymbol{b}_{p}^{T}\boldsymbol{\Theta} + \boldsymbol{Q}_{f} = \boldsymbol{0}\left(28\right)$$

図 2 は外乱オブザーバと状態フィードバックに基づく 本提案のコントローラ (DLQG controller) のブロッ ク線図を示している. 式 (16) と (17) のモデルを用い



Fig. 2 Block diagram of control system.

て、DLQG 制御系を設計する. アクチュエーション とセンシングの位置が梁の中心 $(z = z_a)$ であることか ら、一般に偶数次のモードは不可観測、不可制御であ る.梁は左右のバランスがとれていることから回転運 動を無視することができる.よって、 $\omega_0 = 0$ の並進 運動に対する剛体モードと1次と3次の奇数次モード を考慮に入れたモデルとする.表1に各物理パラメー タを示す.ここで、両端自由梁と仮定しているワーク はらせん状であり、 ρ , A, E, Iの各パラメータを理 論的に求めることは難しい.よって、固有振動数 ω_1 , ω_3 は予備実験より決定する.表1のパラメータを用い て前章と同様の DLQG 制御系を適用して実験を行っ た結果、1次モードのスピルオーバ不安定現象となっ

| Table 1 No | minal values c | of the system. |
|----------------|-----------------------|----------------|
| Parameter | Value | Unit |
| \overline{m} | 1.17×10^{-1} | [kg] |
| g | 9.80 | $[m/sec^2]$ |
| R_1 | 4.57 | [Ω] |
| N | 800 | [turn] |
| X_1 | 5.00×10^{-3} | [m] |
| I_1 | 9.69×10^{-1} | [A] |
| k | 4.69×10^{-5} | $[Nm^2/A^2]$ |
| X_0 | 1.21×10^{-3} | [m] |
| Z_0 | 3.00×10^{-3} | [m] |
| Q | $6.98 	imes 10^{-5}$ | [Hm] |
| L_1 | 1.34×10^{-1} | [H] |
| L_0 | 1.26×10^{-1} | [H] |
| p | 7.36×10^{-4} | [Vm/A] |
| q | 2.52×10^{-2} | [V/A] |
| H_1 | 1.67×10^{-1} | [V] |
| Y_0 | 0.00 | [m] |
| l | 0.8 | [m] |
| z_a | 0.4 | [m] |

日本AEM学会誌 Vol. 10, No. 4 (2002)

サンプリングタイムを考慮に入れて、オブザーバの極 がサンプリング周波数以上にならない程度にする. ま た、 Q_a の外乱の項に対する重みは、過渡特性と外乱 補償のバランスを考え、外乱に対するオブザーバの極 が変位および変位速度よりも小さくなるように設定す る. 以上を考慮した上で, LQG 制御系および DLQG 制御系のオブザーバの重みを次式として設計する.

$$\begin{split} & \boldsymbol{Q}_{k} = \text{diag}(10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-5}, 0.5, 1, 1, 100), \\ & \boldsymbol{R}_{k} = \text{diag}(5 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}), \\ & \boldsymbol{Q}_{a} = \text{diag}(10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-5}, 0.5, 1, 1, 100, 1, 10^{3}), \\ & \boldsymbol{R}_{a} = \text{diag}(5 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}). \end{split}$$

図3に制御対象,設計された各制御系の閉ループ系の 制御入力 Δe から変位 Δx までの周波数応答を示す. 各制御系とも1次および3次モードが抑えられている ことが確認できる. また, DLQG 制御系は外乱補償 により、低周波数領域でゲインが低く抑えられている ことも確認できる。



Frequency response of Plant, LQG Fig. 3 control system and DLQG control system $(\Delta e \rightarrow \Delta x).$

3.4 ノッチフィルタによる補償

電磁石よる吸引力は、梁の中心 $(z = z_a)$ に作用す ると仮定しているが、実際には電磁石よる吸引力は梁 の中心付近に分布的に作用する. したがって, モデル では仮定していない偶数次の振動モードが励起される 恐れがある.そこで,制御帯域内で最も影響及ほすと 考えられる2次モード振動数をノッチフィルタによ

た. そのスピルオーバの振動数を1次モードとして, ω_1 および ω_3 を求めた. 1次モード振動数は 20[Hz], 3 次モード振動数は 108[Hz] と得られた.

3.3 DLQG 制御系の設計

DLQG 制御系および LQG 制御系の設計は LQG/LTR 法を用いる.LQG 制御系および DLQG 制御系の設 計での状態フィードバック則は1次モード振動数およ び3次モード振動数に対しての重み Q_f を大きくして 次式の重みで設計する.

 $Q_f = \text{diag}(10^3, 10^3, 10^3, 10^3, 10^4, 10^4, 10^3), R_f = 1.$

外乱 F_d は梁の中心 $z = z_a$ で作用するものと仮定し て,外乱 F_d および E_d が作用する拡大系は式 (19) と 式 (20) と表されるので,この拡大系に対して DLQG 制御系を設計する.DLQG 制御系の重み Q_a および LQG 制御系の重み Q_k は、剛体モードの変位の項に 対する重みを弾性モードよりも大きく設定し、速度の 項に対する重みは弾性モードを剛体モードよりも大き く設定する、電流の項に対しての重みは、ループ伝達 関数が回復するように大きく設定するが、実装実験の



Fig. 4 Frequency response of Notch Filter.

り補償する.中心周波数 $f_{NF} = 1/(2\pi T_{NF}) \ge Q$ 値 Q_{NF} によって、ノッチフィルタは次式で与えられる.

$$G_{NF}(s) = \frac{1 + (1 - K_{NF})T_{NF}s/Q_{NF} + (T_{NF}s)^2}{1 + T_{NF}s/Q_{NF} + (T_{NF}s)^2}$$
(29)

ここで、 $K_{NF}(=0 \sim 1)$ は、ノッチフィルタをかけ る割合を表す.中心周波数 f_{NF} は補償する 2 次モー ド振動数よりも低いところに設定し、2 次モード振動 数付近に位相進みを効かせる.単にゲインを下げる意 図で、2 次モード振動数にノッチフィルタの中心周波 数 f_{NF} を合わせると、低い周波数域の位相遅れのため に、かえって不安定性が増大してしまう.実験により、 2 次モード振動数が 39[Hz] であったことから、中心 周波数 f_{NF} を 32[Hz] としてノッチフィルタを設計 した.ここで、 $K_{NF} = 0.5$ 、 $Q_{NF} = 1/\sqrt{2}$ とした. 図 4 に設計したノッチフィルタの周波数応答を示す.

4 DLQG 制御系を用いた磁気浮上搬送

塗装システムへの応用を考え,浮上物体を磁気浮上 させた状態での搬送実験について考える.図5に実験 装置の概略図,図6に実験装置の写真を示す.D/A 変換器からドライバーアンプに速度指令電圧を印加し てDCモータを駆動させる.そして,電磁石が取り 付けられたステージを可動させることにより磁気浮上 搬送を行う.ここで,エンコーダの出力をF/V変換 器を介してドライバーアンプに戻すことにより,速度 フィードバックが行われている.また,ステージの 位置はエンコーダ出力をカウントすることにより算出 する.



Fig. 5 Experimental setup of transfer system.



Fig. 6 Photograph of transfer system.

5 実験結果

応用する塗装システムの仕様では、約1[m]を15[sec] 以内に搬送する必要があるため、今回は0.4[m]を搬 送時間 $T_c = 6$ [sec] 以内に搬送することを考え、速度 指令電圧 V_c [V]を決定している.また、搬送速度を上 げた $T_c = 3$ [sec] の場合の実験も行う.

図 7,8 に,搬送時間 $T_c = 6$ [sec] および $T_c =$ 3[sec]の梁に対しての磁気浮上搬送の結果を示す. 図 7,8の(a)と(b)は、LQG 制御系および DLQG 制 御系の浮上位置の推定値 Δx̂, (c) はドライバーアン プに印加する速度指令電圧 Vc, (d) は電磁石が取り付 けられた台車の移動距離 Zc である. 図7の搬送時間 $T_c = 6$ [sec] に対しては, 梁は常に 140[Hz] 程度振動 をしているが、搬送に対しての影響はなく、DLQG制 御系は定常値を保持した状態で搬送されていることが 確認できる.図 8 の搬送時間 T_c = 3[sec] に対しては, 2[sec] 後の加速から等速へ変化するところで、梁の横 振れが発生して推定値 Δ ̂ 症影響を及ぼしていること が確認できる. LQG 制御系は,発生した約 1.5[Hz] 程度の横振れが持続するのに対して,DLQG 制御系 は、4[sec] 後の停止時に発生した横振れが減衰してい ることが確認できる.

次に図 9, 10 に, 搬送時間 T_c = 6[sec] および $T_c = 3[sec]$ の鉄球に対しての磁気浮上搬送の結果 を示す. 搬送実験の装置ではモデル化誤差などが大き く存在しているために、LQG 制御系は、浮上位置に 大きな偏差を生じているのに対して,DLQG 制御系 では,偏差なく定常値で浮上していることが確認でき る. しかし、 Δx は変位の推定値であるため、正確な 変位ではないことに注意を要する. 図 9 の搬送時間 $T_c = 6$ [sec] に対しては、5[sec] 後の等速から減速に変 化するところで、約2[Hz] 程度の横振れが発生してい る. LQG 制御系は、発生した横振れが持続するのに 対して, DLQG 制御系は, 7[sec] 後の停止時に発生し た横振れが減衰していることが確認できる. 図 10 の 搬送時間 $T_c = 3$ [sec] に対しては、1[sec] 後のスター ト時から横振れが発生して、3[sec] 後の等速から減速 に変化するところで、横振れが一番大きくなっている ことが確認できる.図 10 では,DLQG 制御系が横振 れを減衰させるような効果は見られなかった.

以上より、LQG制御系およびDLQG制御系を用いた磁気浮上搬送では、浮上物体の横振れは存在するが、 実験程度の搬送速度であれば、十分に安定化して搬送



Fig. 7 Transfer experimental results of flexible beam with LQG and DLQG.



Fig. 8 Transfer experimental results of flexible beam with LQG and DLQG.



Fig. 9 Transfer experimental results of steel ball with LQG and DLQG.

日本AEM学会誌 Vol. 10, No. 4 (2002)



Fig. 10 Transfer experimental results of steel ball with LQG and DLQG.

することが可能であることが示された.また,DLQG 制御系には,若干ではあるが横振れを減衰させる効果 もあることが示された.しかし,磁気浮上システムは, もともと搬送方向に対しては不可制御であるため,横 振れを発生させないような搬送速度軌道制御を考える 必要があるものと考えられる.

6 結言

本研究では、磁気浮上システムを柔軟物体に対する 塗装および搬送システムへ応用することを目的として、 電磁石の電流と電磁石の磁極部に取り付けられたホー ル素子のホール電圧からオブザーバにより変位・変位 速度を推定することを提案した. さらに、塗装および 搬送時の外乱に対して、外乱推定オブザーバをベース とした安定化と外乱補償を考えた DLQG 制御系を提 案し、DLQG 制御系の磁気浮上搬送に対する有効性を 検証するために搬送実験を行った. 実験結果より、搬 送速度を速めると浮上物体に横振れが発生するが、十 分安定に浮上して搬送できることを確認した.

(2002年5月10日受付)

参考文献

- [1] 石渡 貴史,和多田 雅哉,鳥居 粛,海老原 大樹,2指 令複合型浮上系による磁気吸引制御を用いた薄鋼板浮上 システム,第9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 395-400, 1997.
- [2] 林屋 均,大崎 博之,正田 英介,鋼板の非接触搬送に 関する諸方式の検討,第9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 409-412, 1997.
- [3] 松本 浩一,岡田 養二,薄平板の磁気浮上搬送,第9
 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 391-394, 1997.
- [4] 佐藤 正人,岡田 養二,薄鋼板の振動制御,第 11 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. 219-222, 1999.
- [5] 押野谷 康雄, 薄鋼板の非接触搬送に関する実験的考察, ロボティックス・メカトロニクス講演会論文集, 2000.
- [6] 長谷川 真也,関原 孝宣,押野谷 康雄,石橋 一久,磁 気浮上鋼板の非接触位置決め制御 (電流フィードバック の適用),第11回 MAGDA コンファレンス講演論文 集,pp. 197-200, 2002.
- [7] 小畑 隆之,小堀 正樹,押野谷 康雄,石橋 一久,磁 気浮上鋼板の非接触振動制御,第11回 MAGDA コン ファレンス講演論文集,pp. 201–204, 2002.
- [8] 伊藤 知広,平尾 正国,押野谷 康雄,石橋 一久,永 久磁石を利用した薄鋼板の弾性振動抑制に関する基礎的 検討,第11回 MAGDA コンファレンス講演論文集, pp. 209–212, 2002.
- [9] 王晶文,野波健蔵,三平満司,美田勉,H_∞制御によるフレキシブルロータの制振制御,日本機械学会論文集 (C編), Vol. 57, No. 533, pp. 196-202, 1991.
- [10] 大西公平,外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール,日本ロボット学会誌,Vol. 11, No.
 4, pp. 486-493, 1993.
- [11] 森下明平,磁気浮上搬送装置,計測と制御, Vol. 38, No. 2, pp. 109-111, 1999.
- [12] 神吉博,川西通裕,古角直樹,外乱推定オブザーバを 用いた磁気浮上のロバスト制御,日本機械学会 機械 力学・計測制御講演論文集 (Vol. A), pp. 319-322, 1998.
- [13] 佐々木 実,小林 義光,奥川 雅之,堀 康郎,竹中 由宏,電流と磁束を用いた磁気浮上系の外乱補償,日本 AEM 学会誌, Vol. 9, No. 3, pp. 349–357, 2001.
- [14] 小林義光,佐々木実,奥川雅之,堀康郎,電流と磁束 を用いた磁気浮上の変位センサレス制御,第12回電磁 力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集,pp. 387-392,2000.
- [15] Y. Kobayashi, M. Sasaki, M. Okugawa, Y. Hori, and Y. Takenaka, Position-Sensorless Control of Magnetic Levitation using Current Magnetic Flux, MOVIC 2000, Vol. 1, pp. 317-322, 2000.