高精度磁気軸受の研究 (第3報)*

—— 磁束検出による変位推定と位置決め ——

進士忠彦** 飯島知弘*** 佐藤海二** 下河辺 明**

Precision Magnetic Bearing (3rd Report)

- Displacement Estimation by Using Flux Density and Precision Positioning -

Tadahiko SHINSHI, Chihiro IJIMA, Kaiji SATO and Akira SHIMOKOHBE

The accuracy of ordinary magnetic bearings is not high enough because displacement sensors used for feedback are inaccurate. The aim of the paper is to clarify limitations of the positioning accuracy of an object of an electromagnetic levitation system in which a flux density sensor and a current sensor are used for estimating the displacement of the object. First, a displacement estimation method using flux density and current signals in an electromagnet is discussed. Then a non-contact positioning system controlled by electromagnets, Hall elements and current sensors is introduced. The system is provisionally positioned with a precision displacement sensor. Comparison of the resolution, frequency characteristics and measurement range is made between the estimated displacement and the output of the precision sensor to evaluate the accuracy of the estimation. After that, the object is controlled using the estimated displacement as the feedback signal and the accuracy and stability of the estimated displacement are examined. The experimental results show that the resolutions of estimated displacement and positioning were $0.25 \mu\text{m}$, the positioning range was more than $\pm 100 \mu\text{m}$, and the stability of positioning due to the ambient temperature variation was $3.0 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$.

Key words: magnetic bearing, positioning accuracy, electromagnet, Hall element, current sensor, precision positioning, estimated displacement

1. 緒 言

磁気軸受・案内(軸受・案内は、本文中では、軸受で代表する)は、空気静圧軸受と同様に非接触に対象を支持でき、しかも真空中で利用が可能な軸受である。しかしながら、ターボ分子ポンプをはじめとした高速回転を主眼にした研究¹⁾や、真空・クリーンルーム対応の非接触搬送に関する研究²⁾はあるものの、高精度化を追求したもの^{3)~5)}は数少ない。このため、本研究では、精度的には空気静圧軸受に匹敵し、かつ、真空中や宇宙空間でも利用可能な高精度磁気軸受の実現を目的としている。

本研究の第1報⁵⁾では、磁気軸受の高精度化に有効な電磁アクチュエータを検討するため3種類の非接触1自由度位置決め機構を試作した。その結果、いずれの機構でも、10nmオーダの位置決め分解能を実現した。しかしながら、制御に用いた高精度静電容量型変位計(以下、静電容量型変位計)は、動作距離が短く、このため、磁気軸受の特徴である大きな軸受すきまをとることができず、また、高価であるといった問題があった。

上記の問題を解決するため、第2報⁶⁾では、電磁石の電流と電圧値からオブザーバにより変位を推定し、それをフィードバック信号としたセンサレス制御における精度限界に関して検討した。その結果、試作機において位置決め分解能 $0.2\mu\text{m}$ 、位置決め範囲 $\pm 150\mu\text{m}$ 以上を実現した。位置決め分解能は、静電容量型変位計を使用した場合と比較して、1けた劣るものの、渦電流型変位計を用いた場合より高精度であった。さらに、この方式により、軸受すきまの問題も解消した。しかしながら、推定変位は、モデルのパラメータ誤差の影響を受けやすい欠点があった。またこの方式では、静的な外乱力が働いた場合、変位を推定できず、一定位置に対象を保持できない原理的な問題⁷⁾がある。このため、他のセンサレス制御方法を検

討する必要がある。

電磁石を用いた変位推定には、推定に用いる観測量に着目した場合、電流のみを用いる方式と、ギャップ磁束と電流を用いる方式に大別できる。電流のみを用いる方式には、さらに2つに分類され、1つは電磁石のコイルに発生する速度起電力を利用しオブザーバにより変位推定を行う方法⁸⁾、もう1つは、電磁石に高周波信号を重畳、もしくは、電流供給部から発生する高周波の信号成分を利用する方法^{9)~11)}である。前者の変位推定精度、位置決め精度に関しては、前報⁶⁾で検討したので詳細は省略する。後者では、水野らがヒステリシスアンプを用いた磁気浮上機構において、 $1\mu\text{m}$ 程度の振動振幅内で対象位置の保持に成功している¹¹⁾。

一方、磁束と電流による変位の推定は、ギャップ磁束が、ギャップ長とコイル電流に依存することを利用する。この方式は、ギャップ磁束と電流値を必要とするため、前述の電流のみを観測量する方式と比較して、取り込む信号数が増加する欠点がある。しかしながら、オブザーバによる変位推定方式と比較した場合、静荷重が働いた対象の変位の推定が可能であり、コイルの温度上昇に伴う抵抗変化や制御対象の質量増加によるパラメータ変動の影響を推定変位は受けない。また、高周波信号を利用する方式と比較した場合、電流アンプの種類を選ばない、または、駆動電流に測定用の高周波信号を混入する必要がないといった利点がある。さらに、通常の変位計を用いる場合と比較して、電流センサや磁束を検出するホール素子は安価であり、しかも、センサレス方式の最大の特徴であるセンサとアクチュエータのコロケーションを満たすことができる。磁束検出による制御の研究は、対象の非接触浮上が可能なのがZlatnikら¹²⁾により、板の振動制御に有効なことが栗田¹³⁾により報告されている。しかしながら、変位の推定精度の評価、それをフィードバック信号とした制御時の位置決め精度の検討は行われていない。

本報では、ギャップ磁束と電流を用いることにより変位を推定し、それをフィードバック信号とした磁気軸受の精度限界に関して検討することとした。実際には、電磁石の先端に磁束密度検出用の

* 原稿受付 平成10年5月29日

** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町 4259)

*** 東京工業大学大学院

ホール素子を配置した1自由度非接触位置決め機構を試作し、変位の推定精度の評価と位置決め性能の検討を行う。

2. 変位推定原理

図1に、磁束と電流を用いる変位の推定原理を示す。図に示す電磁石に閉磁路法則を適用する。磁界の強さは、鉄心部ではすべて一様で H_i とし、ギャップ部では H_g とすると、

$$NI = \oint H dl = H_i l_i + 2H_g l_g \quad (1)$$

となる。ここで、 N はコイルの巻数、 I は電流、 l_i は可動部と固定部のコアの長さの合計、 l_g はギャップ長である。

ギャップ部のフリンジ磁界を無視して、鉄心及びギャップ部の断面積は一律で S とし、 ϕ を磁束、 μ_i を鉄心の透磁率、 μ_0 をギャップ部の透磁率、磁束密度を B とすると、次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} H_i &= \frac{\phi}{\mu_i S} = \frac{B}{\mu_i} \\ H_g &= \frac{\phi}{\mu_0 S} = \frac{B}{\mu_0} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)、(2)から、

$$I = \frac{1}{N} B \left(\frac{l_i}{\mu_i} + \frac{2l_g}{\mu_0} \right) \quad (3)$$

となる。ここで、電磁石の動作点における磁束密度、ギャップ、電流を、 b_0 、 l_{g0} 、 i_0 とし、それぞれの微小変動量を、 b 、 x 、 i とすると、

$$i_0 + i = \frac{1}{N} (b_0 + b) \left(\frac{l_i}{\mu_i} + \frac{2l_{g0} - 2x}{\mu_0} \right) \quad (4)$$

となり、2次の微小項を無視し、式を整理すると、

$$i \cong \frac{1}{N} \left(\frac{l_i}{\mu_i} + \frac{2l_{g0}}{\mu_0} \right) b - \frac{2b_0}{N\mu_0} x \quad (5)$$

となる。よって、推定変位は、式(6)のように、 K_1 、 K_2 を定数とする磁束密度と電流の線形結合で求めることができる。

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\mu_0}{2b_0} \left(\frac{l_i}{\mu_i} + \frac{2l_{g0}}{\mu_0} \right) b - \frac{\mu_0 N}{2b_0} i \\ &= K_1 (b - K_2 i) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{\mu_0}{2b_0} \left(\frac{l_i}{\mu_i} + \frac{2l_{g0}}{\mu_0} \right) \\ K_2 &= N \left(\frac{l_i}{\mu_i} + \frac{2l_{g0}}{\mu_0} \right)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

と表せる。このように推定した変位をフィードバック信号とすることで、制御対象の位置決めが可能となる。

3. 実験装置

3.1 装置概要

図2に、1自由度制御型非接触位置決め機構の概略を示す。制御対象の位置決め方向1自由度以外の5自由度は、空気静圧案内で拘束してある。電磁石は、スライダを挟み込むように両側に配置しており、スライダに取り付けられたターゲットと、電磁石の間隙は0.6mmに設定している。従来の磁束と電流によるセンサレス制御実験¹²⁾¹³⁾では、磁束検出素子をギャップ中に配置するためからか、電磁石・ターゲット間のギャップが数mmから十数mmと通常の磁気軸受と比較して、非常に大きく設定されていた。上記のギャップ設定

Fig. 1 Principle of displacement estimation and positioning control

Fig. 2 Configuration of experimental setup

は、磁束変化を感度良く測定し、高精度に変位を推定するためには望ましくない。よって本実験では、通常の磁気軸受で使用される1mm以下のギャップに設定にした。

電磁石には、0.4Aの定常電流を流し、両端の電磁石にプッシュ・プル制御が発生するように指令電圧を与える。定常電流を0.4Aとした理由は、ギャップ0.6mmにおける電流・磁束密度の線形性が、電流1A以下の範囲で比較的良好に成立するため、その間を電磁石の動作範囲としたためである。渦電流の影響を低減するため、板厚0.2mmのパーマロイ合金の鋼板を積層し、コアとターゲットを製作した。コイルは、エナメル線を300回巻いたものを、それぞれ2個ずつU字のコアに配置し、直列に電流増幅アンプに接続する。

推定変位の精度検証用センサとして静電容量型変位計（ADE社、マイクロセンス、分解能10nm、測定範囲 $\pm 25 \mu\text{m}$ ）を、測定範囲検証用として渦電流型変位計（センサ技研、分解能0.5 μm 、測定範囲0～2mm）を用いた。各変位計とも、電磁石の磁氣的干渉を避けるためターゲットの両端部の変位を2本のセンサを用いて測定している。これらのセンサ出力を加算平均することにより、スライダのヨーイング運動の影響を除去したものを、スライダの変位としている。上記装置のコイル入力電圧から、制御対象の変位までのブロック線図を図3に示し、実験により同定した各係数の値を表1に示す。

Fig. 6 Linearity of estimated displacement

Fig. 7 Measured and estimated displacement

が、位相がさらに遅れる。位相の遅れは、フィードバック信号として推定値を制御に用いる場合好ましくないとの理由で、式(9)の2次のフィルタに決定した。補正フィルタの係数は、 $\omega_n=377.0$ 、 $\zeta=0.4$ である。以下の実験では、すべて補正フィルタを通過した推定値を用いる。

4.3 推定範囲と精度

約0.1Hzの正弦波状の目標値を図4のサーボ系に与え、推定変位と渦電流型変位計の出力を比較する。図6に、推定変位の直線性を示す。横軸が、渦電流型変位計の出力、縦軸が推定変位である。実験で得られたデータを最小2乗法で近似すると、渦電流型変位計との傾きの誤差は3.6%であった。 $\pm 150\mu\text{m}$ の範囲では、図中の推定変位に、特に顕著な電磁石のヒステリシスや磁気飽和の影響は見られない。

図7に、 $10\mu\text{m}$ のステップ応答を推定した結果を示す。推定値と実測値がほぼ一致しており、推定値が実際の変位に良く追従している。また、電流と磁束密度の波形に見られる高周波の振動成分は、変位推定の過程で相殺され、推定変位には大きく現れていない。

変位の推定分解能を図8に示す。静電容量型変位計をフィードバックセンサに用いて、 $0.25\mu\text{m}$ の階段状に制御対象を位置決めした。その時の変位センサ出力が図8(a)、推定値が図8(b)である。階段状の識別可能な変位が推定値に見られ、分解能は $0.25\mu\text{m}$ であることが明らかになった。

4.4 推定誤差

位置決め分解能を制限する要因を明らかにするため、制御対象を一定位置に制御した状態における静電容量型変位計の出力と推定変位の周波数分析を行った。結果を図9に示す。推定変位のみに、25Hzを中心としたなだらかなピークが見られる。この推定誤差を発生さ

Fig. 8 Resolution of the estimated displacement

Fig. 9 FFT analysis of capacitance micrometer output and estimated displacement

Fig. 10 Positioning system using estimated displacement as feedback signal

せる要因をさらに調べるため、制御対象を固定し、オフセット電流0.4Aをコイルに流した状態の磁束密度と電流を測定し、同様に周波数分析を行った。磁束密度の周波数分析結果には、推定変位と同様な25Hzを中心としたピークが見られたが、電流センサの出力には見られなかった。以上より、推定精度を低下する要因が、磁束センサ出力のみに含まれる25Hzノイズの影響であることが明らかになった。25Hzをピークとする計測ノイズは、ホール素子に直流電流を与え磁束密度を測定する場合、発生しなかった。よって、磁束センサに発生する25Hzノイズの原因は、ホール素子に交流電流を与え、変調された電圧を復調する信号処理の過程にあると考えられる。更なる変位推定精度の向上には、磁束センサにおける信号処理方法の改良が不可欠である。

5. 推定変位を用いた位置決め実験

5.1 制御系

推定変位を用いた位置決め制御系を、図10のブロック線図に示す。状態フィードバックに用いる速度、電流は、推定変位とアンプ入力電圧から、最小次元オブザーバにより推定したものをを用いた。実際に測定した電流値をフィードバックしない理由は、実験において、測定電流をフィードバックしたところ、制御対象が不安定になったためである。推定電流と比較し、測定電流は高周波ノイズを含むため、それらの影響が制御系を不安定にしたと考えている。

フィードバックゲイン K_p 、 H_f は、以下の2次形式の評価関数を最小にするように決定した。

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \lambda_x x_e(k)^2 + \lambda_v v_e(k)^2 + \lambda_i i_e(k)^2 + Ru(k+1)^2 \right\} \quad (10)$$

Fig. 11 Reference characteristics

ここで、 x_i , v_i , i_i は、それぞれ整定時の制御対象の変位、速度、電流と整定までの各状態の偏差を示し、 u はアンプ入力電圧、 λ_x , λ_v , λ_i , R は、状態変数と入力電圧にかける重み係数である。評価関数の重み $(\lambda_x, \lambda_v, \lambda_i) = (10^7, 10^5, 10^4)$, $R=1$ と、オブザーバの極配置 $\text{pole}=(0.96, 0.99)$ は、シミュレーションと実験から決定した。

5.2 目標値特性

静電容量型変位計の出力と推定変位をそれぞれフィードバック信号として用いた場合の目標値特性を図 11 に示す。三角は静電容量型変位計を用いた場合、黒丸は、推定変位を用いた場合の目標値特性である。バンド幅はいずれも約 7Hz で、図 5 に示した推定変位の誤差の影響により、高周波域では推定値を用いた場合の位相遅れが大きくなっている。しかし、バンド幅内の周波数領域では、ゲイン・位相とも大きな特性の違いは見られない。

5.3 位置決め精度

推定値をフィードバック信号とした場合のステップ応答 10 μm と 100 μm の結果を図 12 に示す。10 μm の変位は静電容量型変位計、100 μm の応答は渦電流型変位計で測定している。いずれの場合も、安定した位置決めが実現している。

図 13(a) に分解能試験結果を示す。変位は静電容量型変位計で測定している。分解能は 0.6 μm で、図 8 で示した推定変位の分解能 0.25 μm より低くなっている。この原因は、推定信号に含まれる 25Hz のノイズに対してシステムが敏感に反応したためと考えられる。位置決め分解能を向上するため、25Hz のノイズに対してオブザーバが鈍感になるようにオブザーバの極を、 $\text{Pole}=[0.96, 0.99]$ から、 $\text{Pole}=[0.99, 0.99]$ へ変更したところ、図 13(b) に示すように、推定変位分解能と同等の 0.25 μm の位置決め分解能を実現した。

5.4 外乱特性

制御対象に対して、位置決め方向に準静的に荷重を与えた場合の、制御対象の位置の変化を、静電容量型変位計で測定した。図 14(a) に制御対象に弱いばねを介して与えた力の変化、図 14(b) に制御対象の変位を示す。最大 1.7N の力を与えた場合も制御対象の位置は一定に保たれており、実験で与えた範囲の荷重変化に対して、剛性はほぼ無限大であることが示された。

5.5 安定性

制御対象を長時間（9 時間）一定位置に位置決めした場合の浮上安定性を調べた。図 15(a) に、変位検証用に用いる静電容量型変位計の出力、図 15(b) に実験装置の周辺温度の変動を示す。変位計の出力は、周辺温度の変動にほぼ追従して変化しており、最大 0.5 $^{\circ}\text{C}$ の温度変化に対して、2 μm の変動が見られた。この変位が周辺の温度変化に比例すると仮定すると、推定変位を用いて一定位置に位置決めしている対象を静電容量変位計で測定する場合、4 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ の割合で出力は変

Fig. 12 Step responses using estimated displacement

Fig. 13 Stepwise positioning using estimated displacement

Fig. 14 Disturbance force response

Fig. 15 Positioning stability

動すると考えられる。しかしながら、実際には、図 15(a) の変位計の出力変動には、推定変位のドリフトに起因した制御対象の移動と変位計自身のドリフトが含まれると考えられる。純粋な推定変位のドリフトを評価するためには、変位計単体の温度変化に対するドリフト量を明確にする必要がある。このため、固定した対象の変位を静電容量型変位計と同様に 9 時間測定したところ、1 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ のドリフトが見られた。よって、純粋な推定変位のドリフトは、3 $\text{m}\mu/^{\circ}\text{C}$ であると言える。また、本実験で用いた渦電流型変位計のドリフトは 3.3 $\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ で、今回の推定変位と同程度であった。

6. 結 言

電磁石のギャップ磁束と電流値を用いることにより変位を推定し、それをフィードバック信号とした磁気軸受の精度限界に関して検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 変位推定のため電磁石の先端に磁束検出用のホール素子を取り付けた 1 自由度非接触位置決め機構を試作した。
- (2) 変位センサを用いて上記機構の位置決め制御を行い、同時に計測した磁束密度と電流値からリアルタイムで変位を推定し、変位

センサの出力と比較した。その結果、変位推定分解能 $0.25\mu\text{m}$ 、直線範囲 $\pm 150\mu\text{m}$ 以上、周波数応答特性の誤差 $0\sim 100\text{Hz}$ の範囲で、ゲインで 3dB 、位相で 50° 以内であった。

- (3) 推定変位をフィードバック信号として位置決め制御を行った。その結果、位置決め分解能 $0.25\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ のステップ応答の実現、周辺温度変化に対する浮上安定性 $3\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ を確認した。

今回実験で検証した変位推定精度ならびに位置決め精度は、我々の目標である静電容量型変位計を用いる場合の精度と比較して、1けた低く不十分である。更なる位置決め精度向上のためには、磁束密度の高精度計測法の検討、 100Hz 以上の周波数領域に見られる変位推定誤差の発生メカニズムの解明とその改善が必要である。

謝 辞

なお本研究の一部は、日本学術振興会平成8年度未来開拓学術推進事業委託研究補助金（複合集積マシン）と平成9年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)により行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田 宏奇, 桑原冲和, 山本雅之, 浜辺一政: 磁気軸受で支えられる高周波スピンドル系の離散時間スライディングモード制御 (第1), 精密工学会誌, 62, 11 (1996) 1597.
- 2) 日本機械学会編: 磁気軸受の基礎と応用, 養賢堂, (1995).
- 3) M.E.Williams, D.L.Trumper and R.Hocken: Magnetic Bearing Stage for Photolithography, Ann. CIRP, 42, 1 (1993) 607.
- 4) 溝田 勉, 竹内信行, 木下博雄, 鳥居康弘: 超高真空用磁気浮上案内機構の検討, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1990) 825.
- 5) 進士忠彦, 佐藤海二, 橋本 剛, 村井誠一郎, 下河辺 明: 高精度磁気軸受の研究 (第1報) - 磁力による非接触位置決め方法の検討 -, 精密工学会誌, 61, 11 (1995) 1624.
- 6) 進士忠彦, 佐藤海二, 下河辺明: 高精度磁気軸受の研究 (第2報) - オブザーバの変位推定限界とセンサレス高精度位置決め -, 精密工学会誌, 63, 5 (1997) 694.
- 7) 水野 毅ほか: 変位センサレス磁気軸受の実用化に関する研究, 電気学会論文集 D, 116, 1 (1996) 35.
- 8) D. Vischer and H. Bleuler: A New Approach to Sensorless and Voltage Controlled AMBs Based on Network Theory Concepts, Proc. 2nd Int. Symp. Magnetic Bearing, (1990) 301.
- 9) 松田健一, 岡田養二: センサレス磁気浮上の研究, 日本機械学会論文集 C 編, 58, 556 (1992) 3701.
- 10) 水野 毅, 並木啓能, 荒木獻次: ヒステリシスアンプを利用したセルフセンシング磁気浮上系のカウンタ方式デジタル制御, 日本機械学会論文集 C 編, 64, 618 (1998) 523.
- 11) 水野 毅, 石井敏宏, 荒木獻次: ヒステリシスアンプを利用したセルフセンシング磁気浮上, 計測自動制御学会論文集, 32, 7 (1996) 1043.
- 12) D.Zlatnik and A.Traxler: Cost-effective Implementation of Active Magnetic Bearings, Proc. 2nd Int. Symp. Magnetic Bearing, (1990) 229.
- 13) 栗田 裕: 電磁石による変位センサレス制御 (電流と磁束のフィードバックによる振動制御), 日本機械学会論文集 C 編, 58, 556 (1992) 3531.
- 14) 谷腰欣司: 磁気センサとその使い方, 日刊工業新聞社, (1986).
- 15) 杉本英彦, 小山正人, 玉井伸三: ACサーボシステムの理論と設計の実際, 総合電子出版, (1990).