

可変キャパシタンスを利用した静電浮上機構の セルフセンシング制御システム

Self-sensing Control of Electrostatic Suspension System Using Variable Capacitor

水野 毅^{1*}、加藤 貴彰^{1*}
Takeshi MIZUNO¹, Takaaki KATO¹

¹ 埼玉大学 理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

Abstract

Self-sensing electrostatic suspension is achieved with a control system using a variable capacitor. In the control system, a variable capacitor is connected with an electrostatic actuator and a constant power supply. The voltage applied to the actuator is adjusted by the variable capacitor. The position of the floator can be estimated from the capacitance of the variable capacitor and the voltage applied to the electrostatic actuator. The estimated signal was fed back and used for suspension. Finally, self-sensing electrostatic suspension was achieved.

Key Words: Electrostatic Suspension, Self-Sensing, Mechatronics

1. 緒言

静電浮上は静電気力の特徴から、真空中などの特殊環境で利用でき、シリコンウエハ[1]、ガラス基板[2]などを浮上対象とすることができる。これらを対象とした静電浮上では、キロボルトオーダーの電圧を浮上用電極に印加する必要がある。従来の制御システムでは、高速高電圧電力増幅装置（アンプ）を利用して電圧を制御していたが、このようなアンプは高価であり、システム全体のコストが高くなってしまいうという問題があった。

著者らは、電圧制御方法の一つとして可変キャパシタンスを利用した静電アクチュエータ制御システムを提案し[3]、これを用いて3自由度静電浮上の実現に成功している[4]。

従来の静電浮上システムのもう一つの問題は、浮上体の位置を検出する方法である。従来

は、様々な材質の物体の位置を検出できることから、光学式変位センサが用いられていた。しかしながら、静電浮上を達成するのに必要な高速応答性を備えたレーザ型変位センサは、高精度であるが、概して高価である。

本報では、可変キャパシタンスを利用した制御システムにおいて、可変キャパシタンスの静電容量と浮上用電極への印加電圧から浮上対象物の位置を推定する方法を提案する。さらに、実際に推定値をフィードバック制御に用いて、セルフセンシング静電浮上を実現した結果について述べる。

2. 原理

2.1 制御システムの原理

最初に可変キャパシタンスを用いた静電浮上システムについて説明する。まず、浮上機構

の基本モデルを Fig.1 に示す. 浮上機構は, 浮上力を発生する電極と浮上体とから構成されている. 電極と浮上体は電圧が印加されると帯電するため, コンデンサと見なすことができる. また, これらの間には吸引力が作用する.

つぎに可変キャパシタンスを利用した制御システムの等価回路を Fig.2 に示す. 上述したように, 浮上機構は, コンデンサ C_a としてモデル化されている. 浮上用電極に印加される電圧 V_a は, 次式で与えられる.

$$V_a = \frac{C_v}{C_a + C_v} E \quad (1)$$

ここで E は電源電圧, C_a は電浮上機構の静電容量, C_v は可変キャパシタンスの静電容量である. 式(1)から, 可変キャパシタンスの静電容量を変化させることで, 浮上用電極の印加電圧を制御できることがわかる. これが提案する制御システムの動作原理である.

2.2 位置推定の原理

次に浮上体位置の推定方法について示す. 浮上用電極と浮上体とのギャップを d_a で表す. 浮上用電極と浮上体で構成される静電浮上機

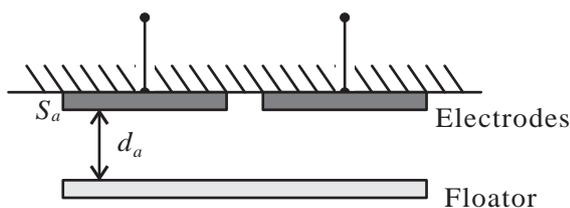


Fig.1 Schematic drawing of suspension system.

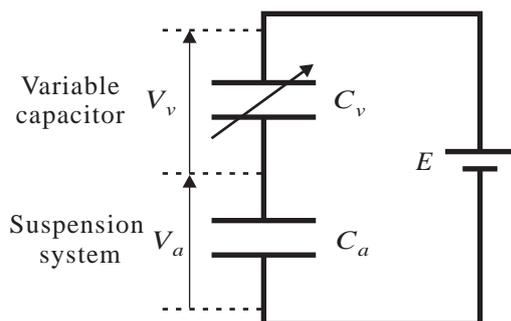


Fig.2 Equivalent circuit.

構の静電容量 C_a は, 次式で与えられる.

$$C_a = \frac{\epsilon S_a}{2d_a} \quad (2)$$

ここで ϵ は誘電率, S_a は電極面積である. 式(1)を変形すると, 次式が得られる.

$$C_a = C_v \frac{E - V_a}{V_a} \quad (3)$$

ここで, 式(3)に式(2)を代入すると

$$d_a = \frac{\epsilon S_a}{2C_v} \frac{V_a}{E - V_a} \quad (4)$$

となる. また電源電圧と各印加電圧の関係は

$$E = V_a + V_v \quad (5)$$

であるため, 以下の式でも浮上体の推定の推定が可能である.

$$d_a = \frac{\epsilon S_a}{2C_v} \frac{E - V_v}{V_v} \quad (6)$$

式(4)および式(6)から, 誘電率と電極面積, 電源電圧が一定の値であるとする, 浮上用電極と浮上体とのギャップ d_a は, 可変キャパシタンスの静電容量 C_v と浮上系への印加電圧 V_a もしくは可変キャパシタンスへの印加電圧 V_v を測定することで推定できることがわかる. 本報では, 式(4)を用いて浮上体の位置を推定した.

3. 実験装置

3.1 可変キャパシタンス

Fig.3 に製作した可変キャパシタンスを示す. この可変キャパシタンスは電極間ギャップを変化させて静電容量を変化させている. 可動側の電極を上下に動かすアクチュエータとしては, ボイスコイルモータを利用している.

3.2 浮上機構

静電浮上機構全体を Fig.4 に示す. 上部にある三つのレーザ変位計はレーザ型の変位センサであり浮上体の位置を測定している. 浮上体

の初期位置を調整するためのポジショナーが浮上体を支えている。ポジショナーと浮上体も絶縁テープによって絶縁されている。

3.3 電圧検出回路

印加電圧は直流の高電圧であるため、浮上系に悪影響を与えずに V_a を直接検出することは技術的に難しい。そこで、浮上力を得るための直流電圧に交流電圧を重畳して印加し、浮上系への印加交流電圧の振幅変化を測定する方法を用いた。

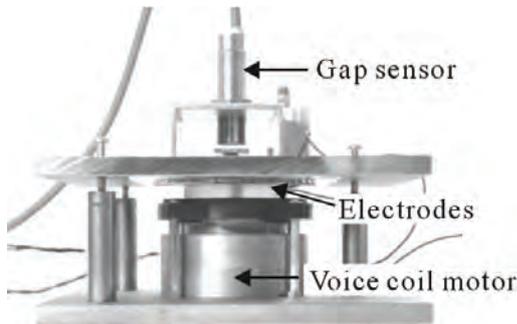


Fig.3 Fabricated variable capacitor.

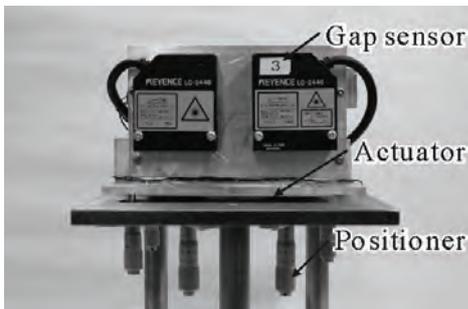


Fig.4 Electrostatic suspension system.

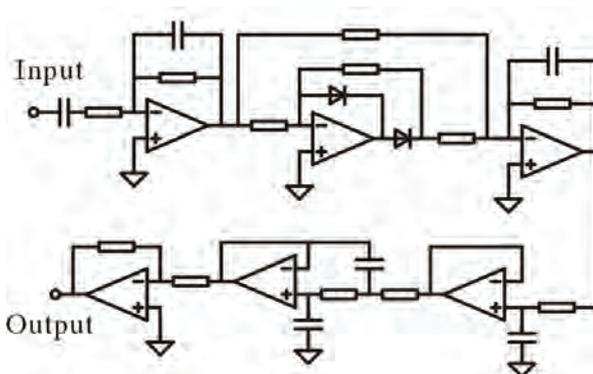


Fig.5 Circuit of the voltage detector.

直流電源電圧 E 、直流印加電圧 V_a と交流電源電圧 E' 、交流印加電圧 V'_a との間には、

$$\frac{V_a}{E - V_a} = \frac{V'_a}{E' - V'_a} \quad (7)$$

が成り立つため、直流電圧の代わりに交流電圧 V'_a を測定することによって、変位推定を行えることがわかる。

交流電圧を測定するために製作した回路を Fig.5 に示す。回路は、直流成分の影響を受けないようにコンデンサを介して浮上機構および可変キャパシタンスに接続した。

4. 実験結果

4.1 位置推定

可変キャパシタンスのギャップとアクチュエータへの印加電圧から浮上体の位置を推定した結果を Fig.6 に示す。図から、提案する方法によって、浮上体の位置推定が可能であることが確認された。

4.2 セルフセンシング浮上

つぎに、推定信号に基づきフィードバック制御を施すことによって、セルフセンシング浮上を実現した[5]。セルフセンシング浮上した状態で、アクチュエータの指令値に矩形波信号を入力したときのレーザ変位計の出力と推定信号とを比較した結果を Fig.7 に示す。図から、推定信号はセンサ信号よりゲインが小さくなっ

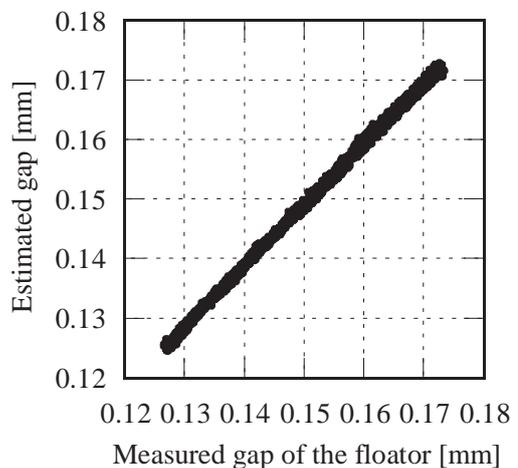


Fig.6 Static characteristic of estimation

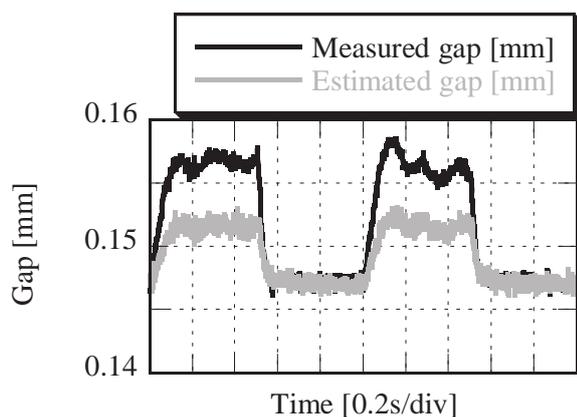


Fig.7 Step response of self-sensing suspension

ているが、静電浮上が達成されていることが確認できる。

5. 結論

可変キャパシタンスを利用した静電浮上システムにおける印加電圧制御の原理及び浮上体位置の推定法の原理を示し、実験によってその有効性を確認した。さらに、推定信号を利用したセルフセンシング静電浮上を実現することに成功した。

謝 辞

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) 平成 21 年度シーズ発掘試験の支援を受けて実施した。記して感謝する。

参考文献

- [1] Jin, J., Higuchi, T. and Kanemoto, M., "Electrostatic Silicon Wafer Suspension," *Proc. 4th International Symposium on Magnetic Bearings*, ETH Zürich, pp.343-348, 1994.
- [2] Jeon, U.J. and Higuchi, T., "Electrostatic Suspension of Dielectrics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.45, No.6, pp.938-946, 1998.
- [3] Mizuno, T., Tsukada, S., Ishino, Y. and Takasaki, M., "Realization of Electrostatic Suspension by Using a Variable Capacitor," *Proc. of the 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp.2209-2212 (2007).
- [4] Kato, T., Tsukada, S., Ishino, Y., Takasaki, M., Mizuno, T., Electrostatic Suspension in 3-DOF by Using Variable Capacitor, *Proc. 11th International Symposium on Magnetic Bearings 2008*, pp.202-205 (2008).
- [5] 加藤貴彰, 石野裕二, 水野 毅, 高崎正也, 「可変キャパシタンス機構を利用した静電浮上におけるセルフセンシング」, 第 22 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 発表予定(2010).