

誘電率検波による圧電アクチュエータのセルフセンシング位置制御

66789 川俣 昭人

指導教員 森田 剛 准教授

In positioning applications, the drawbacks of piezoelectric actuators are hysteresis, nonlinearity and creep phenomena in piezoelectric displacement. Hence, a feedback control using a displacement sensor is usually essential for a precise positioning control. Such displacement sensors hinder device miniaturization, necessitate a complicated configuration, and increase the manufacturing cost. In this study, a self-sensing control system using a permittivity change detection was developed. This system is based on the linear relationship between the permittivity and the piezoelectric displacement. This linear relationship was verified experimentally. The self-sensing positioning control using a real-time permittivity change detection system was examined, and the non-linear piezoelectric property was successfully compensated.

Key words: Piezoelectric actuator, Permittivity, Precise positioning control

1. 研究の背景と目的

圧電アクチュエータは精密位置決め装置や、マイクロメカトロニクス of 駆動源、アクティブ振動制御用アクチュエータなどとして、広く用いられている^{1,2)}。一方で、圧電変位と駆動電圧の関係はほぼ比例関係であるが、大きな入力電圧により変位量を大きくしようとする非線形性、ヒステリシス、クリープなどの問題が生じてしまい、致命的な問題点となる。このために、高精度位置決め制御をするためにはレーザ干渉計などの高価なセンサが必要になってしまう。これらのセンサは、デバイスの価格上昇だけではなく、装置の大型化、煩雑さをもたらす。

本研究では、圧電アクチュエータにおいて、誘電率と圧電変位が比例関係にあることを見出した。この関係を用いることによって、圧電アクチュエータ自身を変位センサとして用いることにより、セルフセンシングする制御を行った。

2. 着眼点

セルフセンシング圧電アクチュエータに関する研究は、これまでもいくつか報告されている^{3,4)}。その1つが、積層型圧電素子に誘導する電荷を検出し、その電荷量と圧電変位の線形性を利用してフィードバック制御するものである⁴⁾。この手法は、電荷検出しなくてはならず、検出用の追加コンデンサが必要であった。また、圧電アクチュエータの非線形性、ヒステリシスをモデル化する研究も多くあるが、成功しているとはいえない。

そこで、本研究では誘電率検出によるセルフセンシングシステムを提案している⁵⁾。分極反転まで含めた強誘電体の圧電歪み、誘電率の関係を図1に示す。

圧電方程式から考えると、電束密度と電界の関係は比例する。しかし、分極反転まで含めた大きな外部電界まで考えると、圧電変位と電束密度は全く異なった形状である。一方、図に示すように電界に対する圧電歪みと誘電率は、共に電界に対してバタフライ曲線を描き、類似した形状と見られる。圧電変位のヒステリシスや非線形性の原因は多くの要因からなるが、主に圧電セラミック内部のドメイン回転であると予想される。従って分極反転現象を含めて考察すると、電荷と圧電変位よりも、誘電率と圧電変位の関係をセルフセンシング制御に用いる方が合理的である。しかし、今までのところ、この点に着目した測定結果は見当たらない。この誘電率と圧電変位の間にヒステリシスのない線形な関係があれば、誘電率を検出することにより圧電歪みセンサとして用いることができるようになる。以上から、セルフセンシング可能な圧電アクチュエータを実現させるために、圧電変位と誘電率変化の関係の線形性を検証し、その線形性を用いたセルフセンシング制御に関する実験を行った。

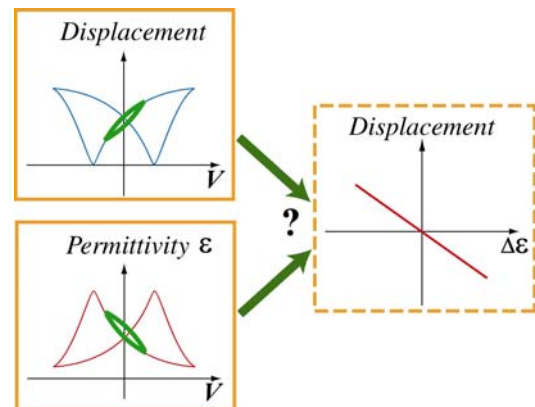


Fig. 1. A relationship expected from a relationship between two piezoelectric butterfly curves

3. リアルタイム誘電率検波法

誘電率と圧電変位の線形関係を検証し、それをセルフセンシング制御に利用するためには、測定される誘電率変化と圧電変位量をリアルタイムで照らし合わせる必要がある。そこで、本研究では、リアルタイム誘電率検波法を開発した。考案した方法を図2に示す。この測定原理は、圧電アクチュエータを駆動する電圧に、誘電率検波用の小振幅高周波の交流電圧を重ね合わせ、この誘電率検波用電圧から生じる電流値から誘電率を検出するというものである。電流値は電流プローブを用いて測定する。この誘電率検波用電圧から誘電率を計算するためには、振幅と周波数は一定にしておく必要がある。誘電率は、周波数での電流値振幅から求めるため、ロックインアンプにより検波する。

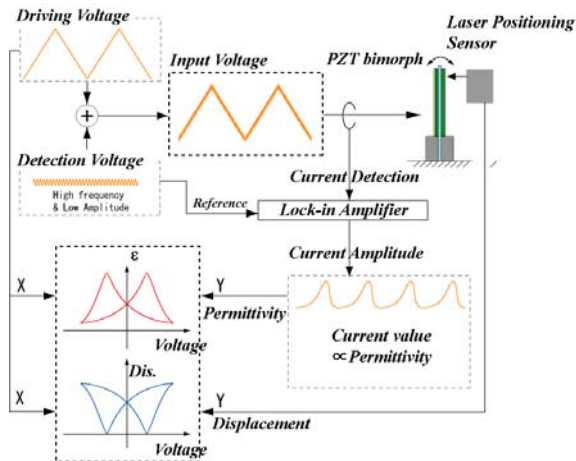


Fig. 2. Principle for detecting permittivity

4. 実験

4.1 誘電率と圧電変位の線形性の検証

リアルタイム誘電率検波法では、誘電率検波用電圧によってアクチュエータが変位しないようにその振幅値と周波数を設定する必要がある。そこで、圧電アクチュエータの振動速度の周波数特性を調べることで、誘電率検波用電圧による圧電変位を見積もった。実験には、ユニモルフのPZTアクチュエータ (Nihon Ceratec Co., Ltd, LPD3713) を用いた。誘電率検波用電圧は $1.0V_{p-p}$ に設定した。図3に振動速度から見積もった圧電変位量の周波数特性を示す。60kHz以上の周波数においては $10nm_{p-p}$ 以下の圧電変位量であることが分かる。高感度検出のためには、できるだけ高い周波数で検波する必要があるが、ロックインアンプの帯域から今回は 100kHz とした。

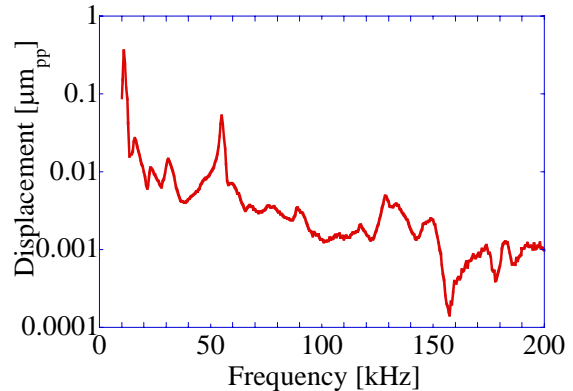


Fig. 3. Displacement estimated from the velocity of the piezoelectric actuator

4.2 誘電率と圧電変位の線形性の検証

誘電率と圧電変位の線形関係の検証を行った。圧電変位は、レーザ干渉計(Canon:DS-80)により測定した。駆動用電圧として 1.0 Hz, $60 V_{p-p}$ と振幅の大きい低周波の三角波を用いた。また、誘電率検波用電圧には、100kHz, $1.0V_{p-p}$ の正弦波を用いた。レーザ干渉計で得た変位データは、圧電変位と誘電率変化の線形性の確認に用いた。実際のセルフセンシングシステムでは、圧電変位は誘電率検出により得る。

圧電変位と電圧の関係および 100kHz の電流振幅から求めた誘電率変化と電圧の関係を図4と図5にそれぞれ示す。両方のグラフから、入力電圧に対する圧電歪みと誘電率のヒステリシス特性が確認できた。また、圧電変位と誘電率変化の関係を図6に示す。誘電率変化と圧電変位間には、ヒステリシスのない関係が確認できた。さらに、このような関係は、積層圧電アクチュエータ(日本セラテック: PAC-233J-C)を用いた実験でも確認している。したがって、この関係が全ての圧電アクチュエータでみられると予想され、提案するセルフセンシングシステムは様々な圧電素子に応用できると期待される。

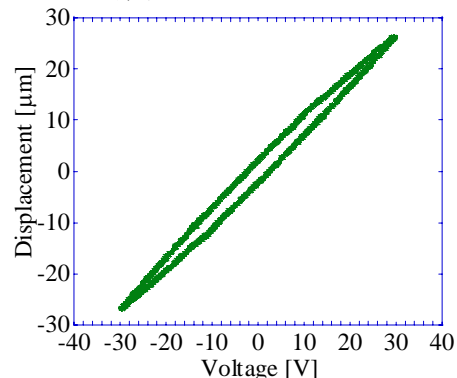


Fig. 4. The relationship between piezoelectric displacement and input voltage

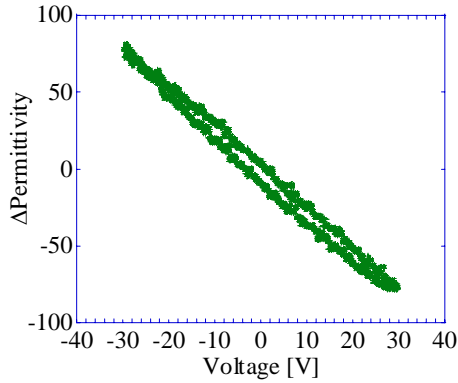


Fig. 5. The relationship between permittivity change and input voltage

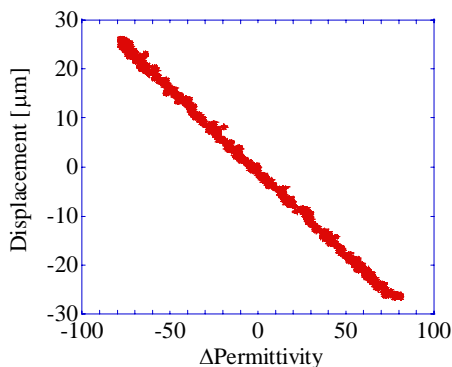


Fig. 6. The relationship between displacement and permittivity change

4.3 誘電率検波周波数変化における誘電率と圧電変位の線形性の検証

誘電率検波用電圧の周波数を変化させて、変位と誘電率の線形関係を検証した。まずインピーダンスアナライザで測定したアドミタンス特性を図7に示す。55kHzに共振周波数があることが確認できる。この55kHzの共振周波数を含む5つの誘電率検波周波数について、変位と誘電率の線形関係の検証を行った。誘電率検波用電圧の振幅は1.0V_{pp}に固定した。駆動電圧は周波数1.0Hz、100V_{pp}の三角波とした。各誘電率検波用周波数における変位と誘電率の関係を図8に示す。

図8より、55kHz以外の誘電率検波周波数では、変位と誘電率の関係は線形となり、直線の傾きも一致した。共振周波数である55kHzの場合の誘電率変化と変位の関係は線形にはならなかったが、入力電圧に対する変位量は他の周波数のものと同じだった。この理由は、誘電率検波用電圧印加に伴う電流は、誘電体に蓄えられる電荷によるものだけでなく、機械振動に用いられたためであると考えられる。このため、誘電率検波用電圧の周波数は、共振周波数以外の周波数に設定する必

要がある。

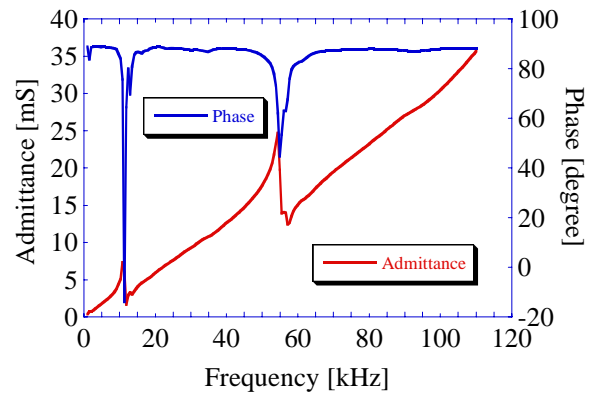


Fig. 7. Admittance frequency characteristic of the piezoelectric actuator

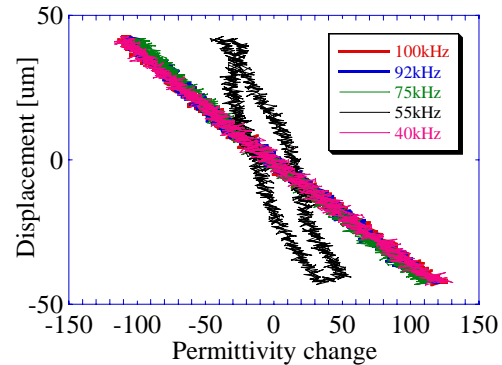


Fig. 8. The relationship between displacement and permittivity in the measurement using some permittivity change detection frequencies

5. 誘電率検波を用いたセルフセンシング位置制御

誘電率変化と圧電変位の関係を利用して、セルフセンシング制御を行った。図9のブロックダイアグラムに示すように、検出された誘電率から推定される位置情報と制御目標位置との差分を積分制御している。制御には図10のようにDSP(s-Box, エムティティ社製)を用いている。

目標位置を周波数0.1Hz、振幅40μm_{pp}の三角波としたときの制御結果を図11に示す。誘電率検波によるセルフセンシングシステムによって、オープンループで駆動させた場合のヒステリシス特性を補償できていることがわかる。また、目標変位と実際の変位は一致し、誘電率検波によるセルフセンシング位置制御の有効性が確認できる。

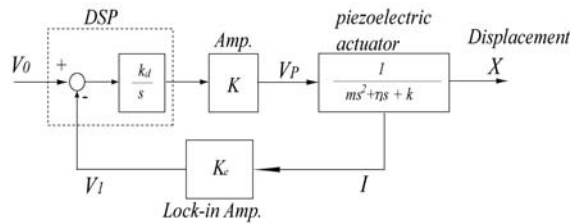


Fig. 9. The block diagram of the self-sensing system using the permittivity detection

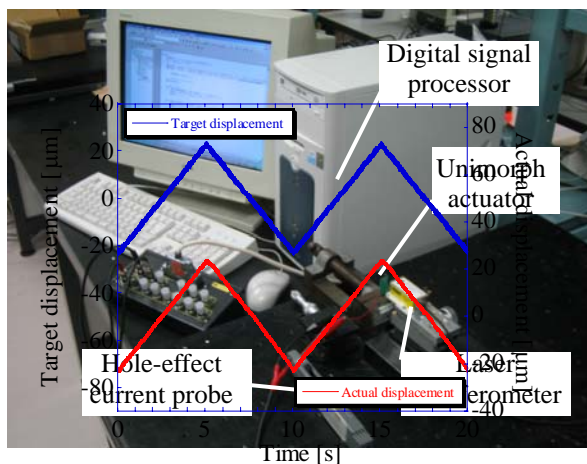


Fig. 11. Target displacement and Actual displacement. The target voltage was a triangular waveform

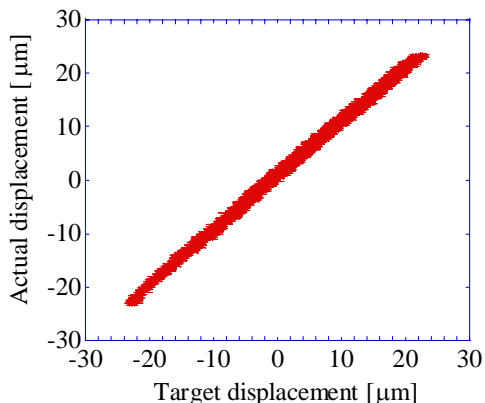


Fig. 12. The relationship between the piezoelectric displacement and target displacement could be demonstrated

6. 研究の結果と今後の課題

本研究では、高周波で微小振幅の誘電率検波用電圧を駆動電圧に重ね合わせ、その周波数の電流振幅値をロックイン検波することによりリアルタイムで誘電率を検出する手法を考案した。この手法を用いて測定をした結果、圧電アクチュエータの誘電率変化と圧電変位間に線形性があることを確認した。この線形関係は、バイモルフ圧電アクチュエータ及び積層アクチュエータで確認している。

この線形関係を応用し、誘電率から圧電変位特性を推定することが可能になった。このセンシング原理に基づき、誘電率検出による圧電アクチュエータのセルフセンシングを行った。この結果、オープンループでみられたヒステリシス特性を補償し、線形性の優れた駆動を行うことが可能となった。今後は誘電率検波法の改良や制御ゲインの最適化などを行うことによって、高速化と精度の向上が期待できる。また、外部負荷の制御への影響についても検討する必要がある。本研究で提案した制御手法は、極めてシンプルであり、従来のオープンループシステムに若干の工夫をするだけで、実現できるものであることから、今後応用範囲が広がっていくものと期待している。

参考文献

- 1) T. Morita, "Miniature piezoelectric motor", *Sensors and Actuators*, vol. 103, pp.291-300 (2003)
- 2) H. Sato, K. Takagi, Y. Shimojo, M. Nagamine, "Application of metal core piezoelectric complex fiber", *Proceeding of 10th International conference on New actuator*, pp. 78-81 (2006)
- 3) H. Kaizuka and B. Siu, "A simple way to reduce hysteresis and creep when using piezoelectric actuator", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 27, p. 5 (1998) L773
- 4) K. Furutani, M. Urushibata and N. Mohri, "Displacement control of piezoelectric element by feedback of induced charge", *Nanotechnology*, vol. 9, pp. 93-98 (1998) 76, 095111 (2005)
- 5) A. Kawamata, Y. Kadota, H. Hosaka and T. Morita, "Self-sensing ferroelectric actuator using permittivity detection", *11th European Meeting on Ferroelectricity* (2007)