

ヘッドアームポジショニング用圧電アクチュエータの駆動技術

Micro Piezoactuator Positioning Technique for Dual Stage Suspension

江 鐘偉(山口大学工学部)

Zhongwei Jiang(Yamaguchi University)

An actuated suspension using dual stage micro actuators was designed for high areal recording density HDD. The suspension was analyzed and simulated with add of FEM. The results showed that the tip displacement of the suspension could be easily achieved over $1\mu\text{m}$, which is enough for the density greater than 20 gigabits per square inch. Furthermore, a linear drive technique on piezoelectric actuators for more precise head positioning was developed and discussed.

1 はじめに

近年、磁気ディスク装置の大容量化、小型化の進展に伴い、磁気ディスク面上の磁気トラック密度及び線記録密度の向上に関する研究開発が急ピッチで進められている。一昨年に IBM 社で発売している最新のハードディスクの記録密度は 7.04Gbits/Sq.in. であるが、昨年 5 月には IBM 社が 20Gbits/Sq.in., 11 月には 35Gbits/Sq.in. の記録密度を達成したと発表したばかり、米 Seagate Technology, Inc. が 45Gbits/Sq.In を達成し、Read-Rite 社が同社のヘッド、米 Komag Inc. のディスク、米 Marvell Semiconductor, Inc. のリード・チャンネル LSI を利用して、面記録密度 50.2Gbits/Sq.in. での記録再生を確認したとの発表が相次ぎました。さらに今年 10 月に米 Read-Rite Corp. と Hutchinson Technology Inc., Komag Inc., Guzik Technical Enterprise の 4 社は、長手記録方式で面記録密度 63.2Gbits/Sq.in. の記録/再生を実現したと発表した。当ハードディスクではヘッドの位置決めを行う際に、キャリッジ・アーム全体を大きく動かすメイン・アクチュエータと細かな位置ズレを保証するサブ・アクチュエータを組み合わせる、いわゆる 2 段アクチュエータの導入によって面記録密度を高めた。最近 HDD 製品の面記録密度が年率 100% 増を超える勢いで向上しているが、この勢いが研究開発にも飛び火したとみることができる。つい 1 年ほど前には、研究レベルでの面記録密度ですら 16Gbits/Sq.in. 程度で、当時は、製品の記録密度がこの水準に達するのは 2001 年初頭と見られていたが、実際は米 IBM Corp. が 2000 年 4 月から面密度 14.5Gbits/Sq.In の 3.5 インチ型 HDD を量産し始め、続いて海外では Seagate, Maxtor, Quantum, 国内では日立、富士通が同程度の HDD の発売を発表したなど、予想を遥かに上回るペースでの密度向上競争が続いている。

このような超高記録密度が実現されると、それに伴いトラック間隔がサブミクロン単位となり、従来のボイスモータだけでの位置決め制御では対応しきれなくなってくる。そのため微細な位置決めを行う 2 段アクチュエータの導入が不可欠となってきており、その研究開発も盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。本稿ではマイクロ圧電アクチュエータをサスペンション部に貼り付け、サブ・アクチュエータとしてヘッドの微細位置決めを行うためのアクティブヘッドアームの設計ならびにマイクロ圧電アクチュエータの駆動技術について述べる。

2 圧電素子駆動ヘッドアームの設計

2.1 設計目標

ハードディスクの記録面密度が 10Gbits/sq.in.のものに対して現在のボイスモータによる1段駆動で対応できていることを考えると、本アクティブヘッドアームの設計目標としては 20Gbits/Sq.in.以上の記録密度に対応できる性能を有することとする。この目標を満たすためには次のような条件が考えられる。

- (1) ヘッドにおけるトラッキング方向発生変位 → 30V で $1.0\mu\text{m}$ 以上

20Gbit/Sq.in.以上の記録密度をもつディスクのトラック間隔は $0.6\mu\text{m}$ 以下である。例えば IBM 社の 35Gbit/Sq.in.ディスクのトラック間隔は $0.377\mu\text{m}$ である。そのため 30V で $1.0\mu\text{m}$ のトラッキング方向発生変位が得られればトラック間の位置決めが十分可能となる。

- (2) トラッキング方向の揺動モードの振動数 > 10kHz

トラック方向に揺動固有振動数は直接にサーボ性能に影響を与える。ハードディスクメーカーがサーボ帯域を 2kHz 以上と設定しており、そのため本ヘッドアームの揺動モード振動数を 10kHz 以上とする。

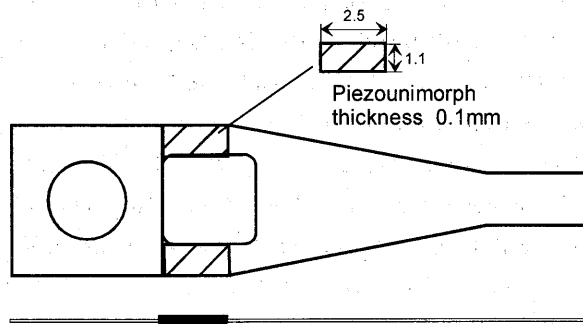


図1 マイクロ圧電アクチュエータを用いたヘッドアーム解析モデル

2.2. アクティブサスペンションの FEM 解析

図1にマイクロ圧電アクチュエータを導入したサスペンションの FEM 解析モデルを示す。ここでとりあえず圧電アクチュエータの性能を確認するため、旧式のサスペンションに圧電アクチュエータを取り付けることを考える。FEM 解析において、根元の固定部 $5.8\text{mm} \times 5.8\text{mm}$ を全変位固定、先端ヘッド部の下面4点に空気圧を仮定したばね定数 10kN/m のばねで支持してある境界条件のもとで、その曲げ1~3次モード、ねじり1, 2次モード、揺動1次モードの振動数と圧電素子に 30V の電圧を印加した場合のトラッキング方向先端発生変位(UY)を調べた。その結果を表1に示す。表中の B1~B3 は曲げ1~3次モード、T1, T2 はねじり1次, 2次モード、S1 は揺動1次モードをそれぞれ示す。ヘッド位置決め性能を大きく左右する揺動モード(S1)とトラッキング方向発生変位(UY)に注目し結果を見てみると、揺動モードの固有振動数は約 27kHz、トラッキング方向発生変位は $0.4\mu\text{m}$ であった。このスペックでは、35Gbit/Sq.in.の面密度にはある程度対応できるが、20Gbit/Sq.in.の面密度に対してはもっと大きな発生変位が必要である。

表1 ヘッドアームの固有振動数およびトラッキング方向変位

B1	B2	B3	T1	T2	S1	UY
2397Hz	6575Hz	11791Hz	6533Hz	14607Hz	27244Hz	0.4 μ m

2.3. 圧電アクチュエータで駆動されるサスペンションの動作実験

まず実験で圧電アクチュエータの動作特性を確認するため、前節で解析したサスペンションに圧電素子を2通りで取り付けヘッド部の発生変位を測定した。図2(a)には長さ3mm厚さ0.1mmの単板圧電アクチュエータを貼り付けた場合のサスペンションの寸法と写真を示し、図2(b)にはサスペンションを根元部位で切断し、長さ2.5mm、厚さ0.2mmのマルチレア圧電アクチュエータで切断されたサスペンションをつなげた場合を示す。

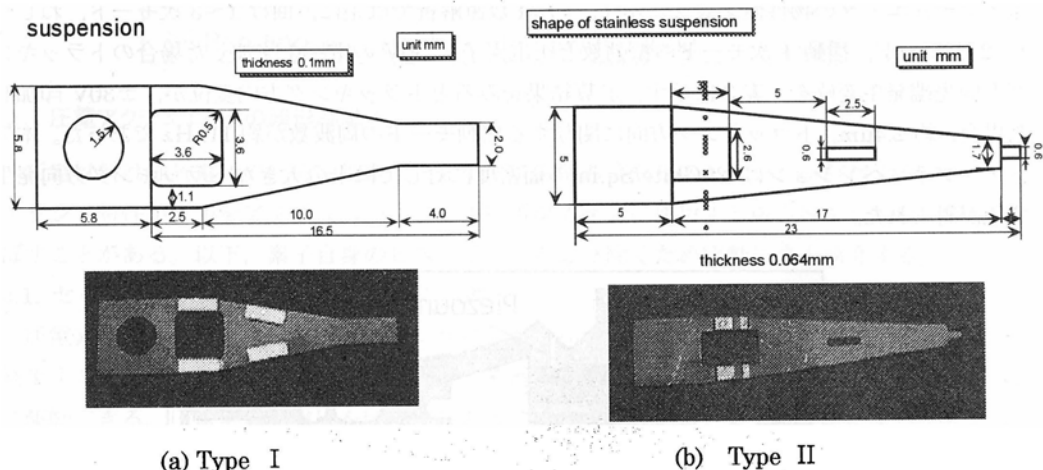


図2 サスペンションに圧電素子を直接貼り付けた場合 (Type I) およびサスペンションを切断した後圧電素子でつなげた場合 (Type II)

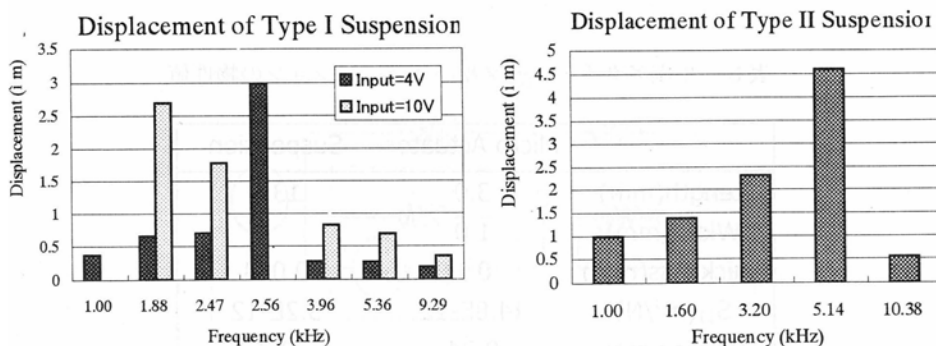


図3 サスペンション先端のトラッキング方向発生変位

上記の2種類の圧電素子駆動サスペンションについて先端のトラッキング方向の発生変位をレ

ーザドップラー (Sony V10) を用いて測定した。また、圧電素子への印加電圧を Type I についてそれぞれ 4V と 10V, Type II については 10V のみとし、いくつかの周波数を変えて測定を行った。得られた結果を図 3 に示す。図 3 より、印加電圧に比例して変位が大きくなるが、印加周波数に対しては変位がかなり異なる。Type I については、発生変位は約 0.3 μm 、2.56kHz で約 3 μm の最大変位が得られた。Type II の発生変位は約 1 μm 、5.14kHz では変位が約 4.5 μm となることが分かった。Type II は、マルチレア型圧電素子を使用したことと、サスペンションを切断した後圧電素子でつなげたため、より大きな発生変位が得られたことが分かる。

2.4. サブ・アクチュエータ能動サスペンションの設計

以上の結果を踏まえて、より大きな変位が得られるようサスペンションの形状と圧電アクチュエータの取り付けを図 4 のように設計した。また、FEM 解析に用いたサスペンションならびに圧電アクチュエータの物性値を表 2 に示す。FEM 数値解析では主に、曲げ 1~3 次モード、ねじり 1, 2 次モード、揺動 1 次モードの振動数と圧電素子に 30V の電圧を印加した場合のトラッキング方向先端発生変位を、表 3 に示す。計算結果をみるとトラッキング方向変位が、 $\pm 30\text{V}$ 印加した場合、約 2.4 μm 、トラッキング方向に関与する揺動モードの周波数が約 11kHz であった。本アクティブサスペンションは 20Gbit/Sq.in. の面密度に対しては十分大きなトラッキング方向発生変位が得られた。

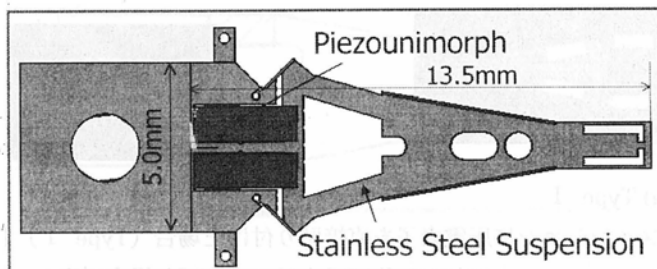


図 4 アクティブサスペンションの FEM 解析モデル

表 3 圧電アクチュエータ及びサスペンションの物性値

	Micro Actuator	Suspension
Length(mm)	3.0	13.5
Width(mm)	1.0	
Thickness(mm)	0.1	0.064
$S_{11}(\text{m}^2/\text{N})$	14.8E-12	5.2E-12
Poisson rate	0.34	0.3
$\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	8000	8030
$d_{31}(\text{m}/\text{V})$	-287E-12	
$\epsilon_{33} / \epsilon_0(\text{F}/\text{m})$	5440	

表4 アクティブサスペンションの発生変位と固有振動数(数値解析結果)

Displacement at tip ($\mu\text{m}@2\text{kHz}$)

	$\pm 30\text{V}$	$+ 30\text{V}$
In-plane Stroke	2.47	1.23
Vertical Stroke	0.0	8.23

Resonant Frequencies (Hz)

1 st Bending	532.6	1 st Torsion	4769
2 nd Bending	4224	2 nd Torsion	13069
3 rd Bending	14610	Sway Mode	11689

3 圧電アクチュエータの線形駆動⁽³⁾

圧電材料は強誘電体のため印加電圧と発生変位間に顕著なヒステリシスが存在する。このヒステリシス特性が素子をアクチュエータとして位置決め制御に使用する場合好ましくない影響を及ぼすことがある。以下、素子自身のヒステリシスを取り除くため駆動技術を紹介する。

3.1. セルフセンシングによる線形駆動の原理

圧電素子にアクチュエータ機能とセンサ機能が並存するので、駆動される素子の変形によって発生する電圧の非線形成分を検出できれば、それを打ち消すように制御することで素子を線形的に駆動できる。圧電素子に電圧を印加すると素子が変形する。また素子の変形によって逆起電圧が発生する。図5に素子の変形によって発生する電圧を抽出するためのブリッジ回路を示す。一般に圧電素子はコンデンサ C_p および誘起電圧 V_p でモデル化できる。圧電素子とコンデンサ C_1 の接続点の電位を V_1 とし、抵抗器 R_1 と抵抗器 R_2 の接続点の電位を V_2 とする。また、圧電素子とコンデンサの内部抵抗成分をそれぞれ R_p 、 R_c とする。図5より、 V_1 と V_2 は次のように求められる。

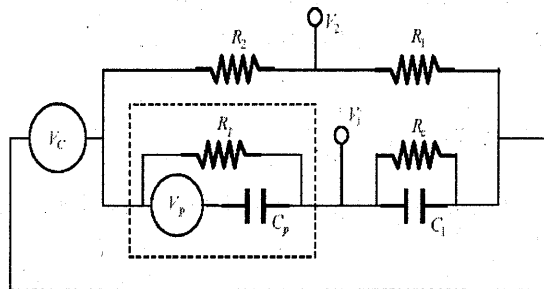


図5 圧電素子発生電圧の非線形成分を抽出するためのブリッジ回路

$$V_1(s) = \frac{1/R_p + C_p s}{1/R_c + 1/R_p + (C_1 + C_p)s} V_c(s) + \frac{C_p s}{1/R_c + 1/R_p + (C_1 + C_p)s} V_p(s) \quad (1)$$

$$V_2(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_c(s) \quad (2)$$

さらに、圧電素子とコンデンサの内部抵抗 R_p , R_c の値を外部から調整できるようにそれぞれ並列に外部抵抗 R_p^a , R_c^a を接続する。調整後の値は $R_p^* = 1/(1/R_p^a + 1/R_p)$, $R_c^* = 1/(1/R_c^a + 1/R_c)$ となり、上式に代入し書き直すと

$$V_1 = \frac{1/R_p^* + C_p s}{1/R_c^* + 1/R_p^* + (C_1 + C_p)s} V_c + \frac{C_p s}{1/R_c^* + 1/R_p^* + (C_1 + C_p)s} V_p \quad (3)$$

が得られる。ここで、外部抵抗 R_p^a , R_c^a を

$$\frac{C_p}{C_1 + C_p} = \frac{R_c^*}{R_c^* + R_p^*} \quad (4)$$

を満たすように選ぶと

$$V_1 = \frac{C_p}{C_1 + C_p} V_c + \frac{C_p}{C_1 + C_p} G_{HPF} V_p \quad (5)$$

となる。上式の第2項に含まれる項

$$G_{HPF} = \frac{C_p R_p^* s}{1 + C_p R_p^* s} \quad (6)$$

はハイパスフィルタを表わす。また、 V_c は入力電圧に比例した線形電圧で、 V_p は圧電素子の変形によって発生する非線形電圧である。 V_p を検出するためには

$$\frac{C_p}{C_1 + C_p} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

を満足するように抵抗値 R_1 と R_2 を選べば、素子の非線形電圧成分 V_s が V_1 と V_2 の電圧差として求めることができる。すなわち、

$$V_s(s) = V_1(s) - V_2(s) = \frac{C_p}{C_1 + C_p} G_{HPF} V_p \quad (8)$$

このように抽出された非線形電圧成分を打ち消すために設計したセルフセンシング線形補償駆動回路を図6に示す。ブリッジ回路により検出した信号に比例ゲイン H をかけ入力信号 V_{in} に加算する。得られた信号をゲイン G_1 の圧電素子駆動用線形アンプに入力し、その出力を、直列にコンデンサ C_1 を挿入した圧電素子に印加する。一方、抵抗器 R_1 および R_2 には直接入力信号 V_{in} が印加されるため、圧電素子駆動用線形アンプのゲイン G_1 は圧電素子 C_p とコンデンサ C_1 にかかからない。そこでブリッジ回路のバランスを取る目的でゲイン $1/G_2$ をさらに挿入した。

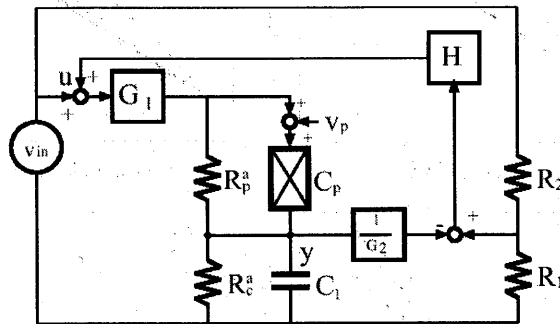


図6 セルフセンシング線形補償回路

本セルフセンシングフィードバック駆動回路に対して、フィードバックゲイン H を十分に大きくし、さらに

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{G_1}{G_2} \frac{C_p}{C_1 + C_p} = 0$$

となるよう各定数を選ぶと、圧電素子とコンデンサ間の電圧 Y は次式のように求められる。

$$Y = \frac{R_1}{R_1 + R_2} G_2 V_{in}$$

また、圧電素子とコンデンサ間の電圧 Y と素子の発生変位は線形関係にあることから、ゲイン H を十分に大きく設定することで入力信号 V_{in} と圧電素子の変位の関係が線形化されることになる。

3.2. セルフセンシング線形補償回路による素子の駆動特性

本セルフセンシング線形補償回路を用いて圧電素子を駆動した結果の1例を図7に示す。本例は、ゲインを $H=1000$ と設定、入力信号 $V_{in}=5V_{p-p}$ の正弦波正電圧に対し、入力周波数 f を変えて素子の出力変位を求めたものである。図中の実線は本セルフセンシング線形補償回路を用いた場合の結果、破線は線形補償回路を用いず通常のパワーアンプによるオープンループ駆動した場合の結果である。図より、本セルフセンシング線形補償回路を用いることで圧電素子のヒステリシス特性が改善され素子が線形的に駆動されたことが分かる。ちなみに、実験に用いた圧電素子

の1次共振周波数は約238Hzであるので、圧電素子が共振周波数の近くまで線形的に駆動されることが分かる。

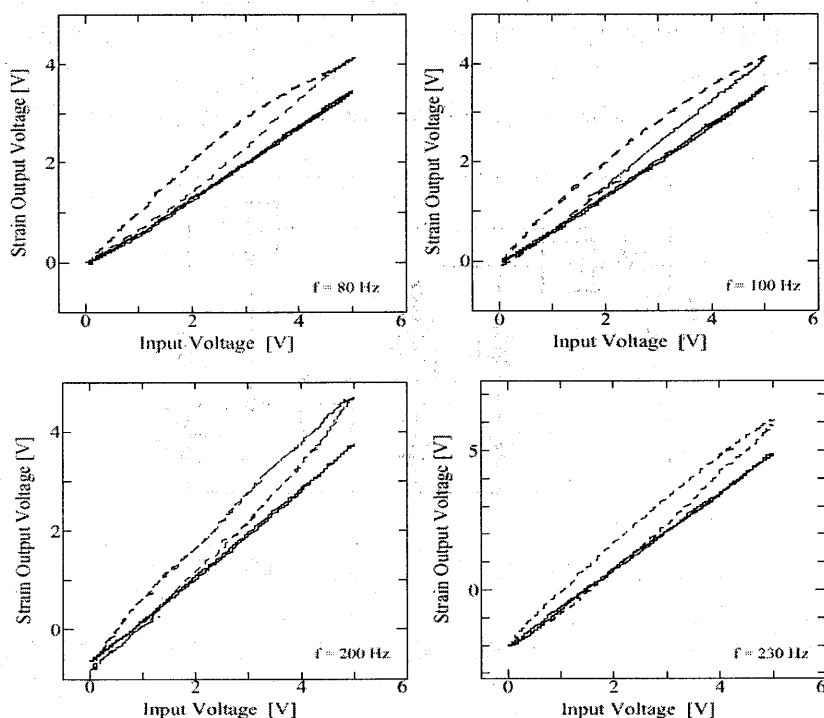


図7 セルフセンシング線形補償回路を用いた場合の素子の変位出力特性。

破線：線形駆動回路を用いない場合，実線：線形駆動回路を用いた場合。

4 おわりに

超高密度ハードディスクに2段アクチュエータヘッドアームを導入することはすでに確実となった。そのアクチュエータとしては圧電アクチュエータが最も重要な役割を果たすことと予想される。今後圧電材料の耐久性や耐熱性，粒子剥離などの更なる改善，薄膜技術や積層技術，微細加工技術などの発展に伴い，圧電アクチュエータ・センサの応用がさらに広がることになる。

参考文献

1. Evans R.B., Griesbach J.S. and Messner W.C., Piezoelectric Microactuator for Dual Stage Control, IEEE Trans. On Magnetics, Vol.35, No.2, 977-982,1999.
2. Koganezawa S. et al. Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives Using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator, IEEE Trans. On Magnetics, Vol.35, No.2, 988-992,1999.
3. 江・長南・山本, 圧電アクチュエータヒステリシス特性の改善に関する研究, 機論, 66-649, 3077-3084, 2000.

2000年11月28日受理