薄型光ディスク装置用傾き補正三次元アクチュエータの開発*

木村 勝彦^{*1}, 小笠原 浩^{*2}
佐竹 光雄^{*2}, 伊東 徹雄^{*3}Development of a Three-Dimensional Actuator for Compensating Disc Tilt
in Slim Optical Disc DrivesKatsuhiko KIMURA^{*4}, Hiroshi OGASAWARA,
Mitsuo SATAKE and Tetsuo ITO^{*4} Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

A three-dimensional actuator for compensating disc tilt in slim optical disc drives was developed. The actuator inclines the objective lens according to the disc tilt in addition to the focus and track-driving directions. The moving part of the actuator has three driving coils and supported by six suspension bars. Its moving coil structure has the advantage to increase the driving sensitivity. The measured driving sensitivities in the focus, track and tilt directions were 104, 106 m/s²/V and 1.7°/V, respectively. These values are enough for high-speed read-write operation. The result on disc tilt compensation verified the effect of this actuator that the jitter of DVD read-out signal with tilt control was within 10% at 1.0° disc radial tilt.

Key Words: Information Processing Equipment, Optical Instrument, Electromagnetic Actuator, Vibration of Mechanism, Optical Disc Drive, Disc Tilt, Magnetic Circuit

1. 緒 言

コンピュータの外部記憶装置である光ディスク装置は、CD-ROMやDVD-ROMディスクの再生に加えて、CD-R/RWやDVD-R/RW/RAMなどのディスクへ記録できる装置への要求が拡大している。

光ディスク装置は、レーザ光を対物レンズによりディスク記録面上に直径約1μmのスポットに集光し情報の記録再生を行う。さまざまなディスクに対して記録再生を行う上での課題の一つとして、ディスクと対物レンズ間の傾きの低減が挙げられる。対物レンズで集光された光は、ディスクの透明基板を通過して記録面に焦点を結ぶ。このとき対物レンズとディスクが相対的に傾くと、ディスク記録面上で集光スポットが広がり、記録再生性能が低下する。

この傾きによる影響を補正する方法として、これまでに2枚の非球面レンズを移動させる方法^①、液晶板を用いる方法^②、対物レンズを従来のフォーカス方向とトラック方向の並進駆動に加えて傾き方向のチルト

駆動も行う対物レンズアクチュエータを用いる方法^③～^⑥などが報告されている。このうち対物レンズを三方向に駆動する三次元アクチュエータは、従来の装置構造からの変更点が少ないことから、有望な傾き補正方法と考えられる。

本報告はこの三次元アクチュエータを装置高さ12.7mmの薄型装置用に開発することを目的とし、薄型でチルト駆動可能なアクチュエータの構造と特性について述べる。

2. 三次元アクチュエータ構造

2.1 開発目標とアクチュエータ構造 対物レンズアクチュエータは、対物レンズの焦点位置をディスク記録面上の目標トラックに位置決めする機構である。図1に示す例において、対物レンズの焦点方向がフォーカス方向、ディスクの半径方向がトラック方向、ディスクの半径方向に傾く方向がチルト方向となる。

対物レンズアクチュエータは、高速記録再生を行う上で高速に回転するディスクに追従できる高い駆動感度と、広帯域な制御系を実現する振動特性が求められる^{⑦⑧}。

対応する装置の記録再生速度の仕様であるCD24倍速およびDVD8倍速から決定したアクチュエータの開発目標を表1に示す。

* 原稿受付 2003年10月8日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所(☎300-0013 土浦市神立町502)。^{*2} (株)日立メディアエレクトロニクス(☎244-0817 横浜市戸塚区吉田町501)。^{*3} (株)日立アドバンスデジタル(☎244-0817 横浜市戸塚区吉田町292)。

E-mail: anton@gm.merl.hitachi.co.jp

Fig. 1 Objective lens actuator

アクチュエータの高さは薄型装置用として標準的な6.0mmとした。

フォーカス方向とトラック方向の駆動感度の目標値は、印加電圧に対する発生加速度を表す加速度感度として $80 \text{ m/s}^2/\text{V}$ 以上とした。ディスク回転周波数はCD24倍速時が90Hz、DVD8倍速時が80Hzであり、面振れと偏心の外乱加速度はCD24倍速時のほうが大きくなる。上記の目標値 $80 \text{ m/s}^2/\text{V}$ は、駆動コイルへ1Vを入力したときにディスク回転周波数90Hzで0.25mmの面振れ・偏心に追従できることを表している。

チルト補正は、ディスクが有する反りやディスクを交換したときに生じる取り付け傾きに対する静的な補正を想定し、チルト方向の駆動感度の目標値は、静的な駆動感度として $15^\circ/\text{V}$ 以上とした。これはチルトコイルの抵抗を 4Ω とした場合に、 1° チルトさせたときの消費電力が 0.1W 以下となる条件から設定した。

以上の目標に対して考案したアクチュエータ構造を図2に示す。また図3に駆動コイルと磁石の配置および駆動力の方向を示す。

本アクチュエータは対物レンズをホルダ上面の中央に配置するレンズセンター構造となっている。フォーカスコイルおよびチルトコイルは2個一連とし、トラック方向において対物レンズの両側に分けて配置する。2個のチルトコイルの巻線方向を反対にすることで、それぞれ逆向きの力を発生させ、対物レンズを傾かせるモーメントを発生させる。トラックコイルは4個一連としてホルダの側面に固定する。

対物レンズとホルダおよび駆動コイルからなる可動部を固定部に対して支持するサスペンションは、各駆動コイルへの電流供給を兼ねている。サスペンションの本数は6本とし、各駆動コイルへ独立に駆動電流を供給する。

磁石は可動部を挟んで4個使用している。トラック

Table 1 Target specifications

Actuator height		6.0 mm
Driving sensitivity	Focus	$80 \text{ m/s}^2/\text{V}$
	Track	$80 \text{ m/s}^2/\text{V}$
	Tilt	$1.5^\circ/\text{V}$

Fig. 2 Configuration of slim three-dimensional actuator

Fig. 3 Driving coils and forces in three directions

方向に沿って2個の磁石を間隔を空けて配置すること、およびフォーカスコイルおよびチルトコイルを対物レンズの両側に分けて配置することで、光学系からの光路を確保しつつ薄型化を図っている。

本アクチュエータの特徴は次の三点である。

一つは、フォーカス、トラック、チルトの三系統すべてで駆動コイル側が動作するムービングコイル方式としていることである。これにより、従来の二次元アクチュエータと同じ構成で、チルト駆動機能を付与することが可能である。磁石を可動部側に有するムービングマグネット方式に対して、ムービングコイル方式は可動部質量を軽く構成できるので、駆動感度の点で有利となる。

他の二点は可動部の振動モードと駆動力作用位置の最適化により振動低減を図っている^{⑧～⑩}ことである。その一つは、応答点である対物レンズをホルダ上面の中央に配置することで、ピッチングやヨーイングと呼ばれる可動部の回転振動と、ねじれ振動に対して、対物レンズ位置を変形の中心に近づけ、応答振幅の低減を図っている。

もう一つは、可動部の弾性変形である高次振動の応答振幅の低減である。薄型装置用のアクチュエータでは高次振動が10kHz～30kHzで生じ、制御系で問題となる場合がある。本アクチュエータではフォーカス方向に約13kHzで生じる可動部の曲げ振動に対して、その節にフォーカス方向の駆動力を作用させる磁石位置とすることで、高次振動の低減を図っている。

2.2 チルト駆動機構の設計 傾き方向へのチルト動作はサスペンションの軸回り（図2のx軸回り）の回転動作であり、変形の中心はサスペンションの取り付け位置の中心となる。

図4にチルト動作時のサスペンションの変形状態を示す。サスペンションの支持中心の回りに作用するモーメントを M 、各サスペンションに作用する力を F 、各サスペンションの変位量を d 、支持中心から各サスペンションまでの取り付け長を L 、サスペンションのばね定数を k 、サスペンションの数を n 、チルト角を θ とすると、

$$\theta = \frac{d}{L} \quad (1)$$

$$F = kd \quad (2)$$

$$M = nFL \quad (3)$$

である。式(1)～(3)から

$$\theta = \frac{M}{nkL^2} \quad (4)$$

となる。また、チルト角 θ は回転のばね定数を K_θ とすると、

$$\theta = \frac{M}{K_\theta} \quad (5)$$

と表されるので、回転のばね定数 K_θ は

$$K_\theta = nkL^2 \quad (6)$$

となる。また、モーメント M はチルト駆動力 F_{tilt} と、チルト駆動力の作用距離 D により、

$$M = F_{\text{tilt}} D \quad (7)$$

と表される。

Fig. 4 Rotating deformation of suspensions

チルト方向の駆動感度 S_{tilt} は、チルトコイルへの印加電圧 V_{tilt} に対するチルト角で表され、

$$S_{\text{tilt}} = \frac{\theta}{V_{\text{tilt}}} = \frac{M}{V_{\text{tilt}} K_\theta} = \frac{F_{\text{tilt}} D}{V_{\text{tilt}} K_\theta} \quad (8)$$

となる。

したがって、チルト方向の駆動感度 S_{tilt} を大きくするには、チルト駆動力を大きくする他に、その作用距離 D を大きくとること、および回転のばね定数 K_θ を小さくすることが有効である。

しかし、回転のばね定数を小さくしすぎると、外乱が加わったときに傾きやすくなるので、適切な設計が必要である。

チルト方向の固有振動数（以下ローリング周波数と記す） f_r は、回転のばね定数 K_θ と可動部のx軸回り慣性モーメント I_G により、

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_\theta}{I_G}} \quad (9)$$

と表される。可動部のx軸回り慣性モーメント I_G は、可動部質量 m と代表半径 r により、

$$I_G = mr^2 \quad (10)$$

と表すことができる。

一般にローリング周波数 f_r は100Hz～200Hzになる場合が多く、ディスク回転周波数と一致もしくは近い場合には、共振現象を示しチルト角が増大する。

フォーカス制御やトラック制御と同様に、チルト補正も動的にフィードバック制御を行う場合は、このローリング共振を抑圧することが可能である。しかし、ここではディスク自体が有する反りやディスクを交換したときに生じる取り付け傾きに対する静的なチルト補正を想定しているの、ローリング共振の影響を把握しておく必要がある。

ローリング共振は、フォーカス方向あるいはトラック方向の駆動力が可動部の重心からずれて作用した場合に生じる。CDとDVDではディスクの基板厚が異なることから、また装置の組立誤差を考えると、可動部がフォーカス方向に変位することは避けられず、この状態でトラック方向の駆動力が作用した場合にローリング共振が生じる。

トラック方向の偏心量 ΔTR を周波数 f で駆動するときのトラック方向の駆動力 F_r は、

$$F_r = m\Delta TR(2\pi f)^2 \quad (11)$$

となる。フォーカス方向の変位量を ΔF とすると、 $F_r \times \Delta F$ が可動部に作用するモーメントとなる。

したがって、周波数 f に対するチルト角 $\theta(f)$ は、減衰比を ζ として一自由度振動系の応答として表すと、

$$\theta(f) = \frac{F_r \Delta F}{K_\theta \sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_r}\right)^2}} \quad (12)$$

となる。

並進方向の固有振動数 f_0 は

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{nk}{m}} \quad (13)$$

であるから、式(12)は式(6)(11)(13)を用いて

$$\theta(f) = \frac{f^2 \Delta F \Delta TR}{L^2 f_0^2 \sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_r}\right)^2}} \quad (14)$$

となる。また、ローリング周波数 f_r と並進方向の固有振動数 f_0 の関係は、式(6)(9)(10)(13)から

$$f_r = \frac{L}{r} f_0 \quad (15)$$

となり、 f_r は f_0 の (L/r) 倍と表される。

ローリング共振のチルト角を低減するには式(14)(15)からサスペンション取り付け長 L を大きく、可動部の代表半径 r を小さくすれば良い。しかし、可動部の代表半径 r を小さくすることはチルト駆動力の作用距離 D も小さくなるので、先のチルト駆動感度を高める指針と相反することになる。

本アクチュエータではローリング共振を避けることを優先させ、ローリング周波数 f_r をディスク回転周波数よりも高く設定する。

式(14)において周波数 f を対応すべきディスク回転周波数の上限の90Hzとし、ローリング周波数 f_r に対するチルト角 θ を計算した結果を図5に示す。パラメータは、 $\Delta F = 0.3\text{mm}$ 、 $\Delta TR = 0.1\text{mm}$ 、 $\zeta = 0.1$ 、 $L = 6.0\text{mm}$ 、 $r = 33\text{mm}$ とした。サスペンションの取り付け長 L は装置寸法内で可能な範囲で大きくした。チルト角の許容値を 0.2° とすると、これを満たすローリング周波数 f_r は120Hz以上、 f_0 は67Hz以上となる。したがって本アクチュエータでは f_0 を70Hzに設定した。

この条件において、駆動感度を向上するには可動部質量の軽量化が重要となる。

f_0 を一定として可動部質量を軽くすると、サスペンションのばね定数が小さくなるので静的なチルト駆動感度を向上することができる。

また、可動部質量を軽くすることはフォーカス方向とトラック方向の加速度感度の向上にもつながる。本アクチュエータはムービングコイル方式とすることで、可動部質量の軽量化を図っている。

Fig. 5 Calculated tilt angle to rolling resonant frequency

3. 駆動特性の計算結果

フォーカス方向とトラック方向の振動特性の計算結果を図6に示す。フォーカス方向の13kHzに可動部の曲げモードが存在する。この曲げモードの節にフォーカス駆動力を作用させる磁石位置とすることで、振幅をほぼゼロに抑制している。トラック方向の約30kHzに存在する高次振動は、可動部のトラック方向両端の側面の変形モードである。そのピークゲインはゲインカーブ上の20kHzにおけるゲインと同程度であり、DVD8倍速時の制御系として、ゲインクロス周波数が

6kHz, 位相クロス周波数が15kHz程度で, ゲイン余裕が10dB程度の制御系を構成することができる。

三次元磁場解析により各コイルで発生する駆動力を求め, 可動部質量の計算値0.16gから, 各方向の駆動感度を計算した。その結果, 加速度感度はフォーカス方向が $107\text{ m/s}^2/\text{V}$, トラック方向が $109\text{ m/s}^2/\text{V}$, チルト駆動感度は $1.9^\circ/\text{V}$ となり, 目標を満たす値となっている。

Fig. 6 Calculated frequency response characteristics

4. 実験結果

前章の計算結果に従い, 薄型三次元アクチュエータを製作し, 駆動特性とチルト補正の実験を行った。

4.1 駆動特性 アクチュエータの周波数応答特性の測定結果を図7に示す。各コイルへの印加電流に対するフォーカス方向の変位応答を(a)に, トラック方向の変位応答を(b)に, チルト方向の角度応答を(c)に示す。

フォーカス方向は70Hzにサスペンション支持系の一次共振があり, 13kHzに可動部の曲げ振動が生じている。13kHzの振動は, ゲインカーブ上での振幅の変化が2dBであり, 計算値より若干大きいもののピークとしては実用上問題無いレベルである。トラック方向は測定した50kHzまでの範囲において位置決め制御系で問題となる振動は無く良好な特性が得られている。チルト方向のローリング周波数は設計値通り120Hzとなっている。

各方向の駆動感度を表2に示す。フォーカス方向とトラック方向の加速度感度は, 図7の印加電流に対するゲインを表2に示すコイル抵抗で除算して電圧に対する加速度感度として示す。チルト方向の静的感度を含めていずれも計算値と同等で目標を満足するCD24倍速・DVD8倍速の記録再生に対応可能な値が得られた。

Fig. 7 Frequency response of new actuator

Table 2 Experimental results on driving performance

Mass of moving part		0.166 g
Driving sensitivity	Focus	$104\text{ m/s}^2/\text{V}$
	Track	$106\text{ m/s}^2/\text{V}$
	Tilt	$1.7^\circ/\text{V}$
Coil resistance	Focus	$5.0\ \Omega$
	Track	$4.1\ \Omega$
	Tilt	$4.2\ \Omega$

4.2 チルト補正の効果 チルト補正のプロセスは次の通りである。実験結果で得られたチルト駆動感度から算出した駆動電圧をチルトコイルに印加し、アクチュエータを $\pm 1^\circ$ の範囲でチルト駆動させ、そのときの再生信号のジッタを計測、記憶する。ジッタは基準信号の周期に対する検出信号の周期のずれを表し、ディスクが傾くと集光性能が低下しジッタが増加する。したがって、ジッタが最小となる駆動電圧を選択しチルトコイルに印加することで、ディスクと対物レンズの相対傾きを補正することができる。

上記の方法で行ったチルト補正の結果を図8に示す。スピンドルモータに傾けて取り付けられたディスクの傾き角を横軸に、DVD-ROMディスクを再生したときのジッタを縦軸に示している。白丸のプロットで示すチルト補正を行わない場合は、ディスクの傾き $\pm 1^\circ$ に対してジッタが20~30%となる。ジッタの許容値を15%とすると、ディスク傾きのマージンは $0.6 \sim 0.7^\circ$ となる。

一方、黒印で示すチルト補正を行った場合は、ディスクの傾きが $\pm 1^\circ$ の場合でもジッタは10%以下であり、ディスクの傾きが無い状態とほぼ同じジッタが得られた。

なお、図8でチルト補正を行わない場合のジッタ特性は、現行の製品レベルを示しており、この状態でも使用することは可能である。さらに本アクチュエータを用いて、ディスクが交換される度にディスクの傾きを検出し、その傾きに応じて対物レンズの傾きを設定することで、ディスクごとに適切なチルト補正を行うことが可能となる。

以上から、開発した薄型三次元アクチュエータがディスクのチルト補正に有効であることを確認できた。

Fig. 8 Results on tilt control

5. 結 言

薄型光ディスク装置用対物レンズアクチュエータにおいて、対物レンズをフォーカス、トラック、チルトの三方向に駆動するアクチュエータの開発を行い、以下の結論を得た。

(1) チルトコイルを対物レンズの両側に分け、6本のサスペンションで支持するアクチュエータ構造を提案した。

(2) 薄型装置としてCD24倍速・DVD8倍速の記録再生に対応できる振動特性と駆動特性を満足した上で、ディスクの傾きに対して、チルト補正により再生信号ジッタを低減できることを確認した。

文 献

- (1) N.Eguchi et al., Fast Disk Skew Servo for Optical Disk Pickup, Symposium on Optical Memory, (1994), 83-84.
- (2) 立石潔・他4名, 液晶によるチルトサーボ, 第58回応用物理学学会講演予稿集, No.3, (1997), 1135.
- (3) 永里誠・他3名, 高密度光ディスク用4軸対物レンズアクチュエータの開発, 機械学会年次大会講演論文集V, (1999), 151-152.
- (4) 井上雅之・他3名, DVD-ROM用光ピックアップ, 日立評論, 82-11, (2000), 49-52.
- (5) J.Aso et al., High Response Actuator with Tilt Function for 12.7mm Slim Optical Disc Drives, ISOM/ODS2002, (2002), 326-328.
- (6) 木村勝彦・他5名, 高速CD-ROM装置用対物レンズアクチュエータの開発, 機論, 66-652, C(2000), 179-184.
- (7) I.H.Choi et al., Concentrated anisotropic magnetization for high sensitivity of optical pickup actuator, IEEE Trans. Magn., 35-3, (1999), 1861-1864.
- (8) 梶原逸朗・他4名, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計(第3報), 機論, 55-516, C(1989), 2045-2051.
- (9) 市原順一・他2名, 光磁気ディスク装置用トラッキング機構, 精密工学会誌, 58-8, (1992), 1393-1398.
- (10) 木村勝彦・他2名, 薄型DVD装置用対物レンズアクチュエータの開発, 機論, 68-674, C(2002), 116-121.