ファイバ式レーザ干渉計による磁気ヘッドスライダの
非定常挙動計測システムの開発*池 田 裕^{*1}, 広 瀬 伸 一^{*2}Development of Measurement System Using Laser Interferometers
for Measuring Transient Behavior of Magnetic Head Sliders

Hiroshi IKEDA and Shin-ichi HIROSE

A multi channel measurement system using a laser interferometer with 8 nm accuracy was developed to measure the transient behavior of magnetic head sliders for magnetic disk drives. It features a laser-beam group converger, which focuses multiple laser beams on small areas of both the disk and the slider. This system also eliminates the influence of disk runout due to its high measurement accuracy. The main advantage of this system compared with white light interferometry and capacitance measurement methods is that it is applicable to actual disks and sliders. The system is useful for evaluating the slider's behavior during the contact sliding, take-off, steady flying, and landing processes.

Key Words: Measurement, Transient Response, Accuracy, Flying Height, Laser Interferometer, Magnetic Disk Drive

1. 緒 言

磁気ディスク装置では記録密度を高めるために磁気ヘッドスライダ(以下スライダと略す)の浮上量がますます狭くなる傾向にある。浮上量が狭くなると、スライダ挙動を原因とするスライダとディスク間の接触が発生する恐れがある。また多くの磁気ディスク装置においては、浮上開始・停止過程にスライダとディスクとの接触・摺動を伴うコンタクト・スタート・ストップ(以下CSSと略す)方式を採用しているためスライダ浮上面の摩耗・スライダ支持部材の変形などを生じ、さらに摩耗等による浮上異常によって、スライダとディスク間の接触が発生する可能性がある。そのため、定常運転時の浮上安定性とともなCSS時の浮上開始・停止特性のよいスライダおよびスライダ支持系を設計することが信頼性向上のために重要となっており、スライダ浮上挙動を詳細に把握することは、設計のための基礎データとして重要である。

従来、スライダ挙動は、光干渉法⁽¹⁾、静電容量法⁽²⁾⁽³⁾、

レーザドップラー振動計^{(4)~(6)}等により計測されてきた。光干渉法では、ガラス等の透明材料で作られたディスクまたはスライダを用いて浮上すきまにおける干渉光の強度を計測することにより約1 nmの分解能が得られている。静電容量法では、電極を組込んだスライダを用いて、スライダ面とディスク面との静電容量を測定し、数十nmの分解能を実現している。レーザドップラー振動計による挙動計測では、2本のレーザ光を使用してスライダとディスク間の差分による浮上量計測や、スライダとディスク全体にレーザ光を照射し、反射した戻り光の像上に複数のディテクタを配置することによって浮上挙動を計測するものがあり、数nmの分解能と数十kHzの周波数帯域を実現している。

CSS時にスライダとディスクの摺動を伴うスライダ浮上挙動を計測するときは、製品に用いるディスクとスライダ(以下それぞれ実ディスク、実スライダと称す)の組合せでの計測が望ましい。この組合せを実現しているレーザドップラー振動計による方法では、物体光と参照光をスライダの背面とディスク面に照射し、スライダとディスクの相対運動により観測されるドップラー効果によって生じたうなりの周波数変化を測定する。この方法では、ディスクうねり等の幾何学

* 原稿受付 1995年10月17日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町502)。

^{*2} (株)日立製作所ストレージシステム事業部 (〒256 小田原市国府津2880)。

的な形状に起因する低周波成分、スポット間距離やスポット配置方向による誤差成分、測定環境によるノイズ成分を取除くことができれば、実ディスクと実スライダの組合せでのスライダ挙動測定が可能となる。

本論文の目的は、実ディスクと実スライダの組合せで高精度にスライダの浮上挙動を計測することである。本論文の計測システムでは、スライダ挙動を計測する点は複数とし、各点に直接レーザ光を照射することを特徴とする。またレーザ光をスライダおよびディスク上の近接する2点に垂直に照射させるために考案した集光光学系と、ディスクうねり等の影響による測定誤差を低減して測定誤差を低減したことを特徴とする。

2. 計測装置の構成

ファイバ式レーザ干渉計(以下、干渉計と略す)の6個のセンサヘッド(二つのセンサヘッドで1チャンネル、計3チャンネル)は図1のように配置し、それぞれがレーザスポット位置を調整するためのセンサホルダに固定されている。また、使用するレーザ光はヘリウムネオン(HeNe)レーザで波長は632.8 nmである。実験に用いたスピンドルはエアスピンドルであり、10 000 rpm まで回転可能である。回転精度は、軸心振れが0.05 μm_{P-P} 、非回転同期成分振れが0.01 μm_{P-P} 、回転変動が $\pm 0.3\%$ 以内である。データ処理装置は、干渉計からの信号を増幅する信号増幅器と、不要な周波数帯域を減衰させるフィルタと、干渉計よりデータを取込むA/D変換器と、コンピュータとから構成されている。A/D変換器はサンプリング周波数が最高1 MHzまで取込み可能である。コンピュータは、測定されたデータを64メガバイトの内蔵メモリに保持しデータ解析を行い、1ギガバイトの外部記憶装置に解析データを保存する。

Fig. 1 Schematic of experimental system

センサヘッドから照射されたレーザ光をスライダおよびディスク上の近接する2点に垂直に入射させるために、図2に示す集光光学系を考案した。センサヘッドとレンズ間の距離は950 mmでレンズと対象物と距離は10 mmである。レーザ光はレンズの前側焦点を通過することにより、レンズ通過後にレンズ光軸に平行な光線となってスライダおよびディスク上の近接する2点に照射される。このときのレーザスポット径は最小で0.1 mmである。反射光は入射光と同じ経路を通過してセンサヘッドに戻る。本装置で使用した干渉計は光ファイバ式であり、干渉光学系と速度復調器と変位復調器を備える電気回路が筐体内に含まれる。干渉光学系の原理はヘテロダイン干渉法であり、物体光と参照光にビームスプリッタによって分離させられたレーザ光は物体面と参照面とに照射され、反射光がビームスプリッタにより互いに干渉する。このとき生じた干渉縞の動きおよび数を電気回路によりデジタルカウントし、物体の変位を計測する。この干渉計の装置分解能は、8 nmである。本方式は非接触計測であり、さらに集光光学系によりレーザスポットを微小領域に複数個集光させられるので、実ディスク・実スライダの組合せでの測定が可能である。

3. 測定精度向上の方法

干渉計自体の分解能は8 nmであるが、測定環境によりノイズ成分が増加し、測定精度は低下する。測定精度に対する阻害要因が、光学系・信号処理系および計測方法にあると考えられる。光学系では、気流などによる外来振動、温湿度変化によるレーザ光のゆらぎ、レーザ照射面の反射とレンズ透過によるレーザ出力減少などが考えられる。計測方法では、レーザスポット配置、スポット間距離およびレンズへのレーザ光の入

Fig. 2 Schematic of beam-group converger

射角などが精度に対する阻害要因として考えられる。信号処理系では、電気ノイズと電気基板の温度変化による出力変化が考えられる。

3・1 気流の影響の防止 本装置はクリーンルーム環境下で使用する。クリーンルーム内では除塵のために絶えず気流(ダウンフロー)が循環している。気流は、干渉計のファイバケーブルや防振台を低周波数で振動させるため測定誤差成分となる。また気流により空気のゆらぎが発生し、光学系の光路長に影響を及ぼす可能性もある。この気流の有無による出力変動の様子を図3に示す。実験は静止物体を測定した。気流がある場合には、図3(a)に示すように気流による振動成分がおおよそ100 nmの振幅として現れ、気流の影響がなければノイズレベル(10 nm)程度である。また図3(b)より、気流がない場合には、気流がある場合と比べて低周波数帯域において10 dB以上の振動ゲインが減少し、変位にして誤差成分を20%以下に低減できることがわかる。この結果に基づき、本装置の実験においては気流の影響を防止するために装置全体にカバーを設置した。

3・2 冷却ファン振動の影響の抑止 本装置で使用するファイバ式干渉計は、光学系とともに演算処理用の電気回路が同一筐体内に設置されている。この電気回路を冷却するために冷却ファンが2台取付けられており、この冷却ファンが光学系を振動させノイズ成分増加の原因となっている。そのようすを図4に示す。測定対象物が静止している状態で変位測定を行うと、

ファン稼働時には周波数250 Hz、振幅30 nm_{P-P}の振幅で振動しているが、ファンを停止すれば10 nm_{P-P}以下となる。計測時に冷却ファンを停止することによって、冷却ファン振動の影響を防止可能である。

3・3 スポット配置およびスポット間距離の影響と集光光学系の効果 干渉計は2本のレーザ光をスライダおよびディスク上にある間隔をもって照射し、ディスク面に対するスライダの変位を計測する。このとき、スライダ上のレーザスポット直下のディスクうね

Fig. 4 Difference between fan on and fan off

Fig. 3 Influence of down flow in clean room environment

Fig. 5 Influence of disk runout

Fig. 6 Relation between laser spot distance and disk runout

りとディスク上のレーザスポットにおけるディスクうねりとは差異があるため、誤差成分となる。そこでスポットを近接させる必要がある。スポット間距離を狭くすることによってディスクのうねりの測定誤差成分が低減される効果を図5および6に示す。図5は、スライダとディスク表面に照射された2本のレーザ光のスポット間距離を変えた場合の2点間差分の波形を示している。スポット間距離が広ければ、ディスクうねりによる誤差成分が増加する。図6は、スポット間距離およびスポット配置とディスクうねりの影響成分との関係を示す。集光光学系によりスポット間距離を狭めると、スポットの配置方向に依らずディスクうねりの影響による回転同期の変動成分は低減する。スポットの配置方向が及ぼすディスクうねりの影響を見ると、スポット間距離が2 mm 以上になると、半径方向に配置したほうがディスクうねりの影響を受けにくいと考える。

3・4 信号処理によるディスクうねり影響による測定誤差の補正 スポット間隔を狭くしたうえで、さらに信号処理によりディスクうねりの影響による測定誤差を低減する手段について図7を用いて説明する。まずレーザ光をスライダ上のP'点とディスク上のQ点に照射し、P'Q点間の差分 Δh_s を計測する。次にスライダを取除き、ディスク表面上のPおよびQ点間の差分 Δh_d を計測する。これらによりスライダの浮上量 Δh は、

$$\Delta h = \Delta h_s - \Delta h_d$$

で求められる。演算はスピンドルモータから出力される位置信号(1周1024点)をインデックスとして、常にディスク上の同一点で行う。ディスクうねりの影響を除去すると、図8に示すようにディスクうねり成分を20 dB 低減することができる。

3・5 レーザ光入射角による干渉計出力への影響の低減 レーザ光は集光光学系のレンズ光軸に対して

ある角度 α をもってレンズに入射し、レンズ通過後にレンズ光軸に平行に対象物に照射される。対象物の大きさが大きくなる場合、レンズ入射角 α も大きくなることになり、干渉計の出力に影響があると思われる。図9に入射角 $\alpha=0$ の場合の出力レベルを基準としたときの入射角 α と干渉計の出力レベルを示す。入射角 α が 10° であっても干渉計の出力レベルは3%以内の誤差範囲(変位で3 nm 以下)であり、入射角 α による信号への影響は小さいと考える。また、干渉計出力低下の他の要因として、レーザ光がレンズ表面で反射することにより、有効レーザ光強度が低下することが考えられる。この点については、レンズ表面に使用するレーザ光の波長を透過し反射しないようにコーティングを施すことにより、干渉計の信号レベル低下を防いでいる。

3・6 スポット面積減少による干渉計出力への影響の防止 レーザスポット間隔を狭くすることにより、差分測定において誤差要因となっているディスクのうねり成分を低減可能であることを3・3節で述べた。しかし、スポット間隔を狭くした場合、スライダの端部にレーザが照射されているため、スライダの移動によってレーザスポット全体をスライダ上に照射することが不可能になる場合がある。そこでレーザスポットのオーバーラップ量と干渉計の出力について検討し

Fig. 8 Effect of disk runout removing method

Fig. 7 Elimination of disk runout

Fig. 9 Relationship between beam angle and output level

Fig. 10 Relationship between RF output level and laser-spot overlap with slider R

た。オーバーラップ量とは、スライダ上にレーザスポットがある場合を100%オーバーラップと定義し、レーザスポットがスライダ上からはずれると、オーバーラップ量は減少する。図10にオーバーラップ量と干渉計出力の関係を示す。このときレーザスポット径は、0.25 mmである。スポットが80%オーバーラップ状態で干渉計出力の低下が始まり、50%オーバーラップすると干渉計出力は100%オーバーラップ時と比較し、60%に低下する。オーバーラップ量が40%以下になると、出力はほぼノイズレベル(変位で10 nm相当)となり、計測不能となる。したがってスポット間隔を狭くした場合、レーザスポットのオーバーラップ量が40%以下になるような対象物の移動がある現象では計測不能である。

4. 干渉計単体の測定精度

本装置で使用した干渉計の測定精度を評価した。まず圧電素子(PZT)を正弦波で振動させ、その振動変位をマイケルソン干渉計と本装置で使用した干渉計によって比較したものを図11に示す。マイケルソン干渉計の光源は本装置の干渉計のレーザ光を用いた。圧電素子には正弦波(500 Hz, 35.9 ± 8.6 V)を加えて正弦波の振動(振幅 $\lambda/4$, $\lambda = 632.8$ nm, λ : レーザ光波長)をさせている。ここで図11(a)の波形が正弦波でない理由を図12により説明する。圧電素子の変位を示す図12(a)において、①の変位状態の時干渉の強度が図12(b)に示すように強弱の中間点であるとする。圧電素子は振幅 $\lambda/4$ で①～⑨のように変位するので、干渉縞の明暗の強度は図12(b)のように変化する。そのため光干渉計からの出力は図12(c)のようになり、正弦波形とはならない。図11(a)により、圧電素子は $\lambda/4 \pm 1.3$ nmの振幅で振動している。この時の本装置の干渉計の測定結果を2秒間露光写真である図11(b)に示す。図11より振幅を読取った結果、使用した干渉計の出力感度は、 $1.543 \mu\text{m}/\text{V}$ である。また図11(b)は2秒間露光すなわち約1000回分の波形の重ね合わせで

(a) Output from optical interferometry

(b) Output from laser interferometry

Fig. 11 Comparison between optical and laser interferometry

(a) Displacement of PZT actuator

(b) Interferometry intensity

(c) Output from optical interferometry

Fig. 12 Explanation of output wave from optical interferometry

Fig. 13 Comparison between optical and laser interferometry

あり、重なり合った波形の幅を誤差成分と考えると、誤差成分は 7.7 nm 相当である。なお、それぞれの干渉計の出力感度は、チャンネル 1 が $5.543 \mu\text{m}/\text{V}$ であり、チャンネル 2 が $1.971 \mu\text{m}/\text{V}$ であり、チャンネル 3 は $1.913 \mu\text{m}/\text{V}$ である。このときの測定誤差成分は 7.7 nm である。また図 13 には、実スライダとガラスディスクの組合せで光干渉法と本装置で使

Fig. 14 Comparison of spacing history between Negative pressure type slider and Taper flat type slider

Fig. 15 Spacing history during take-off process

渉法と本装置で使

5. 測定例

図 14 は負圧形スライダとテーパフラット形スライダの浮上開始時の流出側と流入側の浮上立上がり特性を比較した測定結果の一例である。スポット間隔は 0.2 mm、スポット配置は図に示すとおりである。図 14 の (a) および (b) はそれぞれ流入側および流出側の浮上挙動を示す。横軸はディスク定常回転に達するまでの時間を基準として無次元化した時刻であり、縦軸はテーパフラット形スライダのディスク安定回転時の平均浮上量で無次元化した過渡的な浮上量である。

負圧形スライダはテーパフラット形スライダに比べ、浮上開始時の流出側の立上がり速い。この結果より、負圧形スライダは接触・摺動を繰返すCSS過程に要する時間を短縮し、スライダとディスク間の摩耗、スライダ支持系に及ぼす影響を軽減することがわかる。スライダが浮上を開始する時の姿勢挙動を図15に示す。縦軸に浮上量、横軸に時間を取り、実線が流出側浮上量、波線と一点鎖線が流入側浮上量を示す。測定点は図15に示すように流入側2点と流出側1点である。スライダは浮上を開始した時に流出側が浮き上がり、ロール運動およびピッチ運動を繰返しながら浮上していくようすが観察される。

6. 結 言

実ディスク・実スライダの非定常挙動計測システムを開発し、以下の結論を得た。

(1) レーザ光をスライダおよびディスク上の微小領域に近接して照射可能な集光光学系を考案した。2点間差分を計測することによって、浮上開始時の過渡特性を含めたスライダ挙動の計測が可能である。

(2) 集光光学系によりスポット間隔を狭め、さらにディスク表面形状の計測結果に基づく補正を行うことによって、ディスクうねりが差分計測に与える影響

を低減させ、より精密に浮上量を計測することが可能である。

(3) 測定精度の阻害要因を取除くことによって、測定精度 10 nm で測定可能である。

文 献

- (1) Ohkubo, T., Hayashi, T. and Mitsuya, Y., Accurate Measurement and Evaluation of Dynamic Characteristics of Flying Head Slider for Large-capacity Fast-access Magnetic Disk Storage, *IEEE Trans. MAG*, MAG-23, No. 5 (1987), 3456-3458.
- (2) 浜口哲也・松本真明, スパッタディスクにおけるCSS時のヘッド/ディスク接触現象の解析, 日本機械学会第67期全国大会講演概要集, (1989), 492-493.
- (3) Suk, M., Ishii, T. and Bogy, D. B., Comparison of Flying Measurement Between Multi-channel Laser Interferometer and Capacitance Probe Slider, *IEEE Trans. MAG*, MAG-27, No. 6 (1991), 5148-5150.
- (4) Henze, D., Miu, P., Clifford, G. and Davidson, R., Multi-channel Interferometric Measurements of Slider Flying Height and Pitch, *IEEE Trans. MAG*, MAG-25, No. 5 (1989), 3710-3712.
- (5) Zhu, L.-Y., Hallamasek, K. F. and Bogy, D. B., Measurement of Head/Disk Spacing with a Laser Interferometer, *IEEE Trans. MAG*, MAG-24, No. 6 (1988), 2739-2741.
- (6) Ponnaganti, V., Noteboom, R. and Eshel, A., On Non-linear of Head-disk Interface to Wavy Excitation, *IEEE Trans. MAG*, MAG-22, No. 5 (1986), 1008-1010.