

## 干涉縞走査型焦点誤差検出法

藤田 輝雄\*

### Fringe Scanning Type Focus Sensing Method

Teruo Fujita

A focus sensing method using far-field diffraction was studied by simulation and experiment. Simulation results gave well-shaped focus error signals as well as independent ones of the photo-detector position as long as the photo-detector is located within the interference area of 0<sup>th</sup> and  $\pm 1^{\text{st}}$  orders. Also the capture range and the influence of the incident-beam aberration were investigated. Following experiments presented well-shaped bipolar signals around the focus from the two-element photo-detector without micro adjustment.

Keywords: Focus sensor, Fringe scanning, Holographic data disc, Collinear hologram, Far-field, Diffraction

#### 1. まえがき

1982 年にコンパクトディスク (CD) が音楽用デジタルディスクとして登場して以来、半導体技術の進展は光ディスクの高密度を推し進めてきた。直径 12cm の円盤の一層に記録できるデータ量で見ると、CD では約 700MB、DVD では 4.7GB、ブルーレイディスク (BD) では 25GB に到達し、動画像圧縮技術と高速高密度半導体の使用により、ハイビジョン画像が BD (片面 1 層) 1 枚に 20 時間分は記録できるようになった。一方、ハードディスク装置 (HDD) においては、垂直磁気記録技術と磁気抵抗効果素子によって、その記録容量は 3.5 インチフォームファクタにおいて 1 TB に到達しながら、その価格も 1 万円以下と、家庭用デスクトップ PC に搭載されるのが通常の時代になった。このような背景の下、BD 以降の光ディスクに関し、その用途開発とともに、いくつかの技術開発が進められており、その一候補がホログラム・データ・ストレージ (HDS) である。HDS では、従来の光ディスクと同様、装置間ディスク可換性の維持と 2 次元記録再生に基づく高速記録再生が期待できることが重要であり、これらは、HDD では実現できない特長といえる。この特長を生かした用途としては、非圧縮動画像データの記録、デジタルデータのアーカイブが適当であり、2007 年にはアメリカの InPhase 社が 300GB の HDS システムの商品化を行った<sup>1)</sup>。日本では、オプトウェア社がコリニア方式 HDS<sup>2)</sup> の提案、プロトモデル開発まで行い、その後、東大、豊橋科学技術大学、ソニーが中心となり研究開発が継続され、昨年度のホログラ

---

\* 電気電子情報工学科

ムメモリ国際ワークショップでは、小型ドライブ（通常の5インチフォームファクタの3倍程度の奥行き）の詳細設計が報告される<sup>3)</sup>とともに、モックアップモデルの展示が行われた。

本研究では、現在開発途上のコリニア方式HDSに対応した焦点誤差検出法に関して報告する。コリニア方式HDSにおいては、フォーカス方向のホログラム位置を調整することによって記録容量の増大を図る方法（フォーカスシフト記録方式）が提案され、基礎実験結果が報告されている<sup>4)</sup>。この方法を実際のドライブに搭載するためには、信号ビームと参照ビームのホログラムディスク内での集光位置を精確に制御する必要があり、著者が検討している焦点誤差検出法<sup>5,6,7)</sup>はこの要求を実現可能とするものである。さらに、本検出法は光ディスク最大の特長である装置間可換性の向上にも有効である。

## 2. 干渉縞走査型焦点誤差検出法の原理

トラックに代表される1次元周期構造は光ディスクにおいて一般的な構造であり、入射する集光ビームを複数の光ビームに回折する。この反射光（0次光）と1次回折光の干渉効果は、書き込み用光ヘッドに採用されているプッシュプルトラッキング誤差検出法<sup>8)</sup>に利用されているのはよく知られている。図1は通常の光ヘッド光学系の模式図（実際の光ディスク装置は反射光学系を採用しているが、図では光ディスクからの反射、回折光は光ディスクを透過するように示している）を示したものであり、対物レンズの入射瞳上の強度分布が光検知器面に投影される。

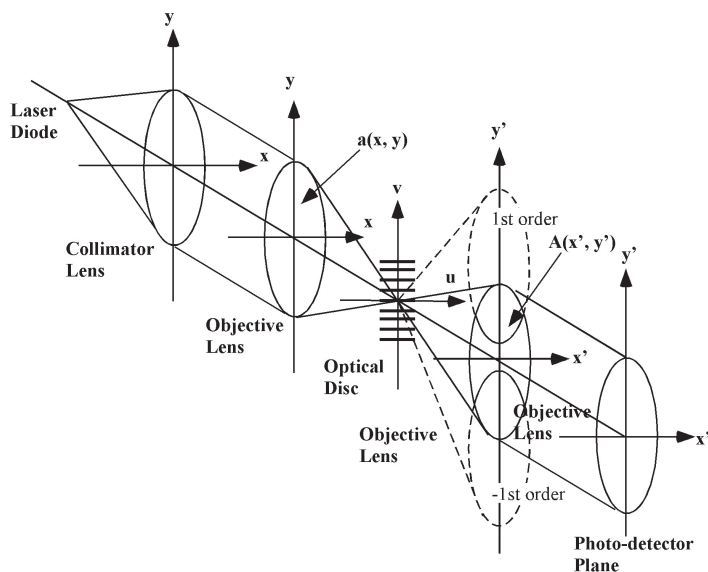


図1. 光ヘッド光学系の模式図.

焦点ずれがある場合には、その傾きが焦点ずれの波面収差係数 $W_{20}$ に比例した位相ずれが0次光と $\pm 1$ 次回折光の間に発生し<sup>5,6)</sup>、その位相ずれ $\Delta\theta_{\pm 1}$ は、

$$\Delta\theta_{\pm 1} = 2\pi W_{20} \left( \mp \frac{2y'}{q} + \frac{1}{q^2} \right) \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 $y'$ はトラックに垂直な方向の正規化座標系（瞳半径で正規化）、 $q$ は $\lambda/NA$ （ $\lambda$ は波長、 $NA$ は対物レンズの開口数）で正規化した

トラックピッチである。この位相ずれは図2に示すような焦点ずれに起因する干渉縞を、0次光と $\pm 1$ 次回折光が重畳する領域に発生させる。そして、干渉縞の空間周波数は $W_{20}$ 、すなわち、焦点ずれに比例するのである。我々が検討を行っている方法は、焦点を合わせたい面の一部に半径方向に変調された1次元周期構造をもたせ $W_{20}$ を実時間検出するものである。

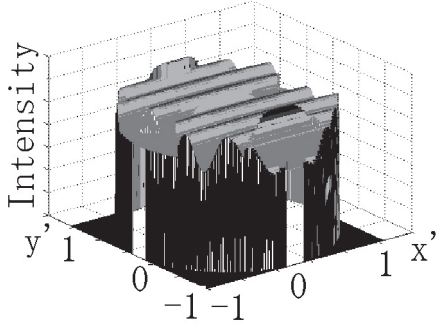


図 2．焦点ずれによって対物レンズ  
瞳に生じる干渉縞

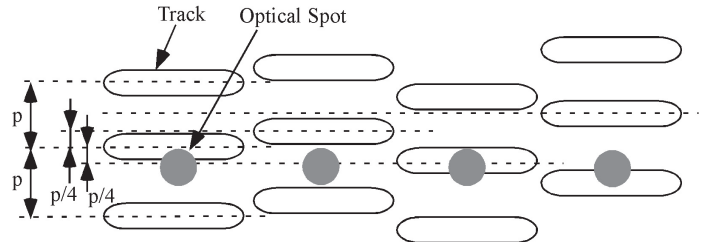


図 3．1 次元周期構造の一例と光スポット  
位置との対応

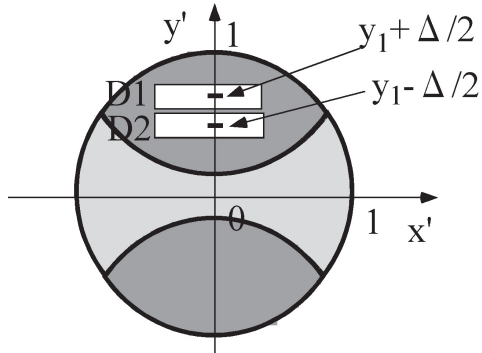


図 4．反射ビーム中の光検知器位置

図 3 は変調された  $y$  方向 1 次元周期構造の 1 例であり、 $1/4$  周期ずつずれた 4 つの周期構造で構成されている（ $p$  は実際の周期）。集光された光スポットは右（ $x$ ）方向に移動するものとし、図ではそれぞれの周期構造に対応した位置が示されている。図 4 は、周期構造からの反射光と  $\pm 1$  次回折光の重なり状態（対物レンズ入射瞳上）、および、2 分割光検知器（ $D_1, D_2$ ：受光エレメント）の配置を示したものである。まず、

対物レンズへの照射強度分布が一様、かつ、高次収差がないと仮定すれば、2 つのエレメントからの出力電流  $I_{D1}, I_{D2}$  は、

$$I_{D1,D2} = I_0 + I_1 \cos \left[ \beta_1 + \delta + 2\pi W_{20} \left\{ -\frac{2}{q} \left( y_1 \mp \frac{\Delta}{2} \right) + \frac{1}{q^2} \right\} \right] \quad (2)$$

と与えられる<sup>5,6)</sup>。ここで、 $\beta_1$  は初期位相（サンプリング時に決定される値）、 $\delta$  はラジアル方向トラックずれに対応する位相、 $\Delta$  は瞳半径で正規化された 2 つの光検知器エレメントの間隔であり、 $I_0, I_1$  は定数である。次に、 $\Delta$  と  $W_{20}$  が 1 に比べ十分小さい場合を考えると、 $I_{D1}, I_{D2}$  の差信号  $I_{DF}$ 、和信号  $I_{SUM}$  は、

$$I_{DF} = I_{D1} - I_{D2} = 2I_1 \cdot 2\pi W_{20} \frac{\Delta}{q} \cdot \sin \left\{ \beta_1 + \delta + 2\pi W_{20} \left( -\frac{2y_1}{q} + \frac{1}{q^2} \right) \right\} \quad (3)$$

$$I_{SUM} = I_{D1} + I_{D2} = 2I_0 + 2I_1 \cdot \cos \left\{ \beta_1 + \delta + 2\pi W_{20} \left( -\frac{2y_1}{q} + \frac{1}{q^2} \right) \right\} \quad (4)$$

と書ける。式(3)から明らかなように、 $I_{DF}$ は $W_{20}$ に比例するが、光スポットのラジアル方向トラックずれに対応する位相 $\delta$ に対応するサイン関数の積になっている。そこで、 $\delta$ が3つの位相、 $\pi/2$ 、 $0$ 、 $-\pi/2$ を取るときの $I_{DF}$ 、和信号 $I_{SUM}$ をサンプリングし、下記の演算を行うことで、 $W_{20}$ のみを取り出し、焦点誤差信号(FESa)を得ることができる<sup>5)</sup>。

$$FESa = \left\{ I_{DF}\left(-\frac{\pi}{2}\right) + I_{DF}(0) \right\} \cdot \left\{ I_{SUM}\left(-\frac{\pi}{2}\right) - I_{SUM}(0) \right\} + \left\{ I_{DF}(0) + I_{DF}\left(\frac{\pi}{2}\right) \right\} \cdot \left\{ I_{SUM}(0) - I_{SUM}\left(\frac{\pi}{2}\right) \right\} \propto W_{20} \quad (5)$$

ここで、 $I_{DF}(\alpha)$ は $\delta = \alpha$ のときの $I_{DF}$ である。

ところで、上述の演算では対物レンズへの照射強度分布が一様と仮定していたが、実際の光学系ではこの照射強度分布が非一様であることが通常である(例えば、半導体レーザの出射光強度分布は直交する2軸方向の広がり異なるガウス分布である)。この場合、式(5)の中括弧中の $I_{DF}$ の和に起因するオフセットが発生することになる。そこで、 $\delta = \pi$ における $I_{DF}$ のサンプリングを追加し、式(6)で表される焦点誤差信号(FESb)を求め、FESaとFESbを加え合わせたものを焦点誤差信号FESとする。

$$FESb = \left\{ I_{DF}\left(\frac{\pi}{2}\right) + I_{DF}(\pi) \right\} \cdot \left\{ I_{SUM}\left(\frac{\pi}{2}\right) - I_{SUM}(\pi) \right\} + \left\{ I_{DF}(\pi) + I_{DF}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right\} \cdot \left\{ I_{SUM}(\pi) - I_{SUM}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right\} \quad (6)$$

$$FES = FESa + FESb \quad (7)$$

FESbの発生するオフセット成分のみがFESaと逆位相となるので、照射光強度分布が非一様の場合でも、これがオフセットに影響を与えない焦点誤差信号(FES)を得ることができる<sup>5,6)</sup>。さらに、FESは初期位相 $\beta_1$ の関数でなくなることも示される。

### 3. 干渉縞走査型焦点誤差検出法のコリニア方式HDSへの適用

まえがきにも述べたように、フォーカスシフト記録法がHDSの記録密度を増大させる1候補として研究されている。ホログラムは記録媒体中に3次元の屈折率変化領域として記録されるため、記録媒体の厚さがホログラムの実効的な深さより大きい場合、フォーカスシフト記録法はホログラムを深さ方向にずらして記録できるからである。しかし、これを実現するためには、従来の光ピックアップとは違う光学系を有するHDSにおいて、信号ビームと参照ビームの焦点位置を独立かつ精確に制御する必要がある。現在検討中の焦点誤差検出をコリニア方式HDSに搭載した光学系概略図を図5に、1次元周期構造を有する参照面をもったホログラムディスクを図6に示す。本焦点誤差検出法は、従来の非点収差法や瞳遮蔽法<sup>8)</sup>で必要であった光検知器位置の精密調整や特殊な光学部品を必要とせず、信号再生用の2次元光検知器アレーの一部を焦点誤差検出に使

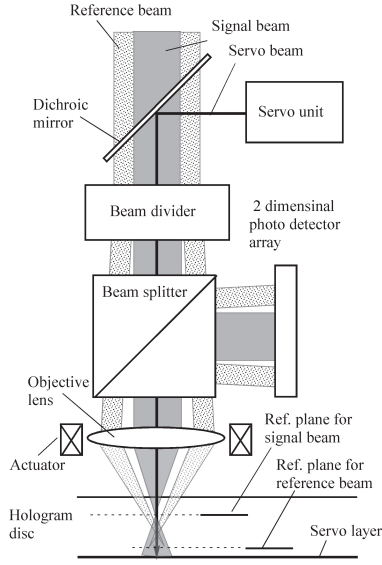


図5. ビーム分割器を有する  
コリニア方式 HDS

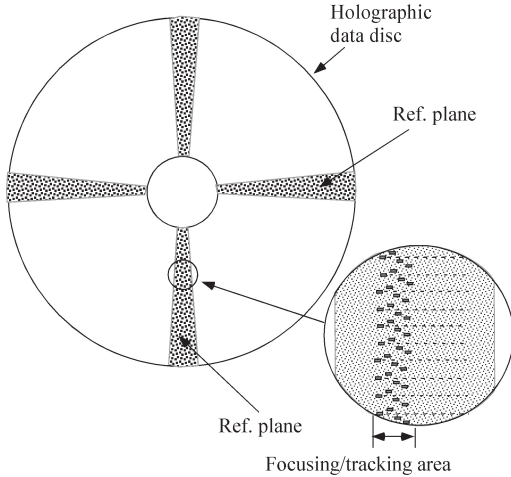


図6. 参照面を有するホログラムディスク

用できるのが特長である。図5において、ビーム分割器（Beam divider）は信号ビーム（Signal beam）と参照ビーム（Reference beam）の光軸方向集光位置に差を与えるものであり、それぞれのビーム集光位置はホログラムディスク中に埋め込まれた参照面（Ref. plane）に設定される。また、記録再生中は図5に示されたサーボユニット（Servo unit）がホログラムディスク内のサーボ面（Servo layer）に対して連続的な焦点制御を行う<sup>2)</sup>。これらの作用により、記録されるホログラムの位置がホログラムディスク内の参照面を基準に精確に設定され、さらに、ホログラムディスクの装置間可換性が保証できることになる。

#### 4. キャプチャレンジ、球面およびコマ収差依存性

2章では $\Delta$ 、 $W_{20}$ が1より十分小さいという仮定の下で焦点近傍での焦点誤差信号を解析的に求めたが、焦点ずれが大きい場合は $W_{20}$ が1より大きくなる。この場合でも、対物レンズ照射光強度分布が一樣である場合には焦点誤差信号を解析的に得ることができる。光検知器が線状であるとすれば、焦点誤差信号 FES は光検知器エレメント間隔 $\Delta$ の関数として

$$FES(\Delta) = K \sin(4\pi W_{20} \Delta / q) \quad (8)$$

と単純な正弦関数の形に書ける。正規化されたエレメント幅は $w$ であるので、FES は式（8）を $\Delta - w/2$  から  $\Delta + w/2$  まで積分すれば求まることになり、FES は、

$$FES = \int_{\Delta - w/2}^{\Delta + w/2} FES(\Delta) d\Delta = Kw * \text{sinc}(2\pi W_{20} w / q) * \sin(4\pi W_{20} \Delta / q) \quad (9)$$

と記述できる。ここで、 $K$  は定数である。典型的な光ヘッドのパラメータ：対物レンズの開口数  $NA_{obj}$  が 0.53，レーザ波長  $\lambda$  が  $0.69 \mu m$ ，トラック間隔が  $1.6 \mu m$  の場合、 $\Delta$  は 0.0455（ビーム半径 4 mm に対してエレメント間隔は 0.182mm）、 $q$  は 1.23 となるので、式（9）の正弦項の変数が

$$4\pi W_{20} \Delta / q = \pi \quad (10)$$

の条件と、 $W_{20}$  と光軸方向のずれの関係式

$$W_{20} = (NA_{obj})^2 \Delta z / 2\lambda \quad (11)$$

から、キャプチャーレンジ  $\Delta z$  (焦点位置近傍で FES 最大、最小を与える点の間隔) は  $33 \mu\text{m}$  と求められる。この値は、シミュレーションで得られる FES カーブからの  $\Delta z$  とほぼ一致することがわかる。また、光検知器エレメントの幅  $w$  は sinc 関数の変数として含まれるので、 $w$  が大きくなると FES カーブのサイドローブ値が減少することになる。図 7 は、回折計算 (シミュレーション) によって得られた FES であり、ここで、正規化光検知器エレメント幅  $w$  は 0.03875 (光検知器面でのビーム半径 =  $4 \text{ mm}$  に対して  $0.155 \text{ mm}$ : 5 章で記載する実験に対応)、光源には典型的な半導体レーザ光源を使う場合 (トランケートされた 2 次元ガウス強度分布: 平行方向放射半値全角 =  $10.5^\circ$ , 垂直方向放射半値全角 =  $21.3^\circ$ , コリメータレンズ焦点距離 =  $17.2 \text{ mm}$ 、ビーム半径 =  $2 \text{ mm}$ ) を想定し、他のパラメータは前述の考察におけるものと同じとした。1 次元周期構造であるトラックの周期は  $1.6 \mu\text{m}$ 、幅は  $0.5 \mu\text{m}$ 、片道の深さは  $(1/4)\lambda$  である。シミュレーションには Hopkins が定式化したモデル<sup>10)</sup>を採用し、瞳半径を 128 の離散点で表現するコードを Matlab<sup>12)</sup>で記述した。

次に、光学収差の影響の評価をシミュレーションで行った。通常、照射光の収差 (球面状のレーザ波面からのずれ) は焦点誤差信号に影響を与え、焦点制御サーボ系を不安定にすることが知られている。例えば、トラックの延伸方向から  $45$  度回転した軸を持つ非点収差が光ディスク照射光に含まれる場合、非点収差法によって得られる焦点誤差信号は大きく影響を受けることが報告されている<sup>11)</sup>。ここでは、球面収差、コマ収差が本焦点誤差検出法に与える影響 (オフセット、

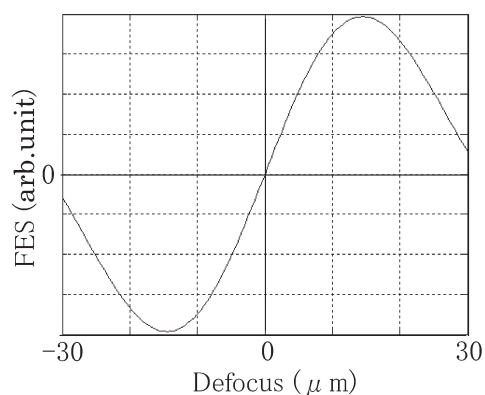


図 7. 回折計算によって得られた焦点誤差信号 (照射光強度分布は非一様)

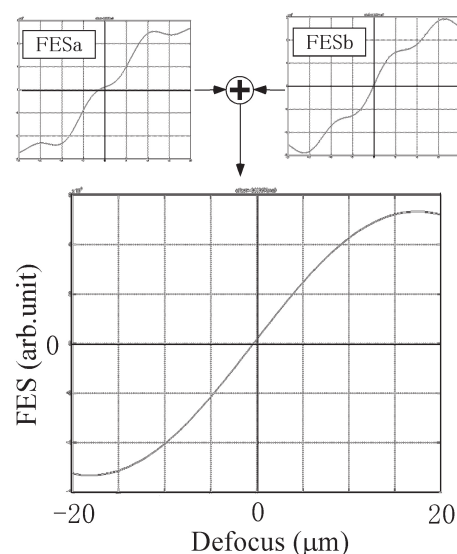


図 8. 球面収差が存在する場合の焦点誤差信号 ( $W_{40}=1\lambda$ 、光検知器位置は最適)



S カーブ形状) をシミュレーションした。球面収差の影響評価においては、波面収差  $W=W_{40}*(r^4-r^2)$  を対物レンズ照射光複素振幅分布の位相項に加えて上述のコードを実行した。また、シミュレーション結果の見通しをよくするため、まずは、0 次反射光の縁に 1 次回折光の中心が一致するように、対物レンズの開口数を 0.43125 に設定した。シミュレーションの結果、光検知器を瞳半径の 78% (y 方向座標点 228、ラジアル方向) に配置した場合、 $W_{40}=1\lambda$  ( $W_{rms}=0.075\lambda$ ) においてもオフセットが  $0.054\mu m$  (ほぼゼロ) という結果が得られた。すなわち、球面収差が光ディスク照射光に存在しても、FES=0 はベストフォーカス ( $W_{rms}$  が最小となる集光面) を指示することを意味している。さらに、ラジアル方向位置に光検知器を配置した場合、オフセットは  $W_{40}$  に比例するので、2 個の 2 エLEMENT 光検知器を使うことで、球面収差補正光学系への補正信号を生成できることになる。図 8 は  $W_{40}=1\lambda$  ( $W_{rms}=0.075\lambda$  :  $0.07\lambda_{rms}$  が回折限界値といわれる) における、初期位相  $\beta_1$  が  $20^\circ$  のときの、FESa、FESb、FES を示している。図から明らかなように、FESa、FESb は球面収差の影響によりスムーズさを若干失うとともに、オフセットが生じている。しかし、2 つは逆位相であるので、それらの和である FES はスムーズな S 形状となり、オフセットもキャンセルされる。コマ面収差の影響評価においては、波面収差  $W=W_{31}*(r^3-2r/3)\sin\theta$  (y 方向にコマを発生する) を同様に加え、他は球面収差の評価の場合と同じパラメータを加えた。まず、コマ収差  $W_{31}=0.64\lambda$  ( $W_{rms}=0.075\lambda$ ) が存在し、かつ、光検知器が球面収差に対する最適位置 (瞳半径の 78%、y 方向座標点 228) に配置した場合、オフセットは  $-2.6\mu m$  であった。しかし、光検知器位置を瞳半径の半分 ( $y=190$ ) に移動させるとその大きさは  $0.11\mu m$  (無視できる程度の値) に減少した。

## 5. 光検知器位置依存性<sup>13)</sup>

最後に、光検知器位置を移動させた場合の FES 測定結果について述べる。測定には、図 9、10 に示す実験光学系を使用した。コリメート光源構成要素、対物レンズ、ビーム系等のパラメータは 3 章でのシミュレーションパラメータと同じであり、トランケートされた 2 次元ガウスビームが開口数 0.53 の対物レンズによって、周期  $1.6\mu m$  の 1 次元周期構造 (実験では MiniDisc を  $10mm*20mm$  程に切断したもの : MiniDisc 片) 上に集光するようにした。MiniDisc 片は光ピックアップ

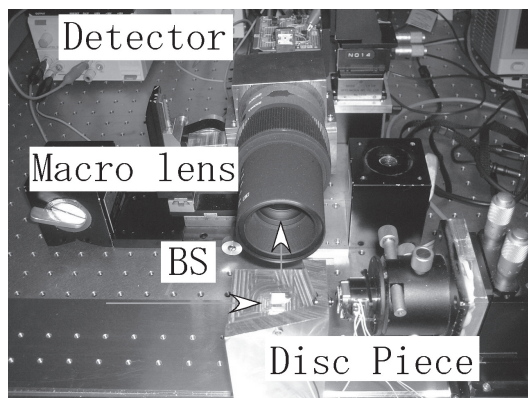


図 9. 実験光学系 (除くコリメータ光源)

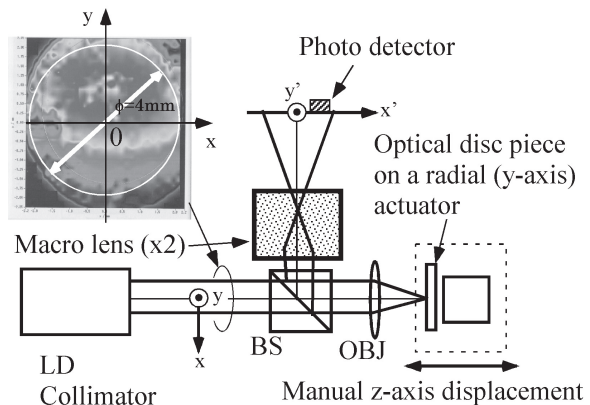


図 10. 実験光学系の模式図と入射光強度分布

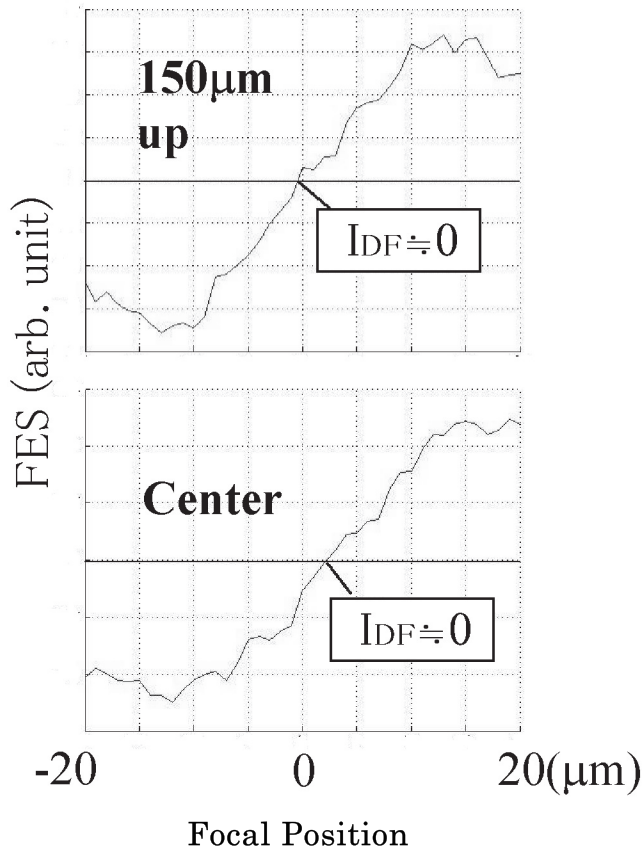


図 11. 光検知器を干渉領域ほぼ中央に配置した場合(下)とラジアル方向に+150  $\mu\text{m}$  移動させた場合 (上) での焦点誤差信号

0 次反射光と 1 次反射回折光との間の位相差は干渉領域内で一定になるため、干渉領域内での光量の変動はどの位置でも同相となる。このとき、2 つの光検知器エレメントからの出力が異なっても、その出力間の位相差がゼロなら、その差信号は最小となる。従って、今回はトラックのウォブリングによって得られる両エレメントからの力の差信号振幅が最小になる位置をジャストフォーカス位置とみなしている。実験の結果、遠領域中に配置された 2 分割光検知器の位置は焦点誤差信号オフセットにほとんど影響を与えないことが実験で確認された。

## 6. まとめ

コリニア方式 HDS でのフォーカスシフト記録による記録容量向上、ホログラムディスクの装置間可換性向上を実際のものとするため、ホログラムディスク内に埋め込まれた参照面を使い、遠領域における 0 次反射光と 1 次回折光の干渉効果を利用する干渉縞走査型焦点誤差検出法の基本的検討を行った。本方式は、ホログラムからの信号再生用 2 次元光検知器アレーの一部を使用するだけで、焦点誤差検出用光学素子が不要、さらに、光検知器の精密位置調整が基本的には不要であるという特長を有し、今回のシミュレーション、実験でその特長を確認することができた。今後の課題として、収差依存性、サンプリング間隔依存性の実験による検証、および、実際の光

ップ用アクチュエータに接着され、ファンクションジェネレータからの出力でラジアル (y) 方向に駆動される。図 10 には CCD カメラにて測定した入射光強度分布も示されており、本実験では強度中心がラジアル方向に瞳半径の半分程度シフトしているのわかる。実験においては、デジタルオシロスコープにて 0, 1/4, 1/2, 3/4 周期ずれのポイントでの差信号、和信号のサンプリングを行い、Matlab で記述した FFT プログラムによる振動周波数成分の抽出と FES の演算を、MiniDisc 片の光軸方向位置を 1  $\mu\text{m}$  づつ移動させながら実施した。さらに、2 分割光検知器の位置を干渉領域のほぼ中心からラジアル方向  $\pm 150 \mu\text{m}$ 、ジッタ方向  $\pm 500 \mu\text{m}$  移動させ、FES を取得した。図 11 は、光検知器をラジアル(分割線に垂直)方向 150  $\mu\text{m}$  移動させた場合の焦点誤差信号である。焦点ずれゼロは観測される  $I_{DF}$  が最小に対応していた。これは、合焦の場合、



ディスクを用いた実時間焦点誤差信号検出、サーボ動作確認を行い、その特性の詳細を明らかにしていく予定である。

## 謝辞

本研究は、平成 21 年度 JST シーズ発掘試験（発展型）助成金、平成 21 年度福井県大学連携リーグ研究推進事業補助金、平成 21 年度福井工業大学特別研究費の支援を受けて実施されたものであり、ここに謝意を表する。また、本研究の実施に当たり、シミュレーション、測定実験、データ解析に協力いただいた学生諸君に感謝する。

## 参考文献

- 1) <http://www.inphase-technologies.com/> (InPhase 社ホームページ) .
- 2) H. Horimai, X. Tan and J. Li: Colliner Holography, Appl. Opt. 44 (2005) 2575.
- 3) A. Yamakawa, M. Saito, T. Yamagami and K. Watanabe: iHoa (intact Holographic Archive) - New Concept of Coaxial Holographic Recording Technology -, International Workshop on Holographic Memories & Display 2009, 3B-2 (2009).
- 4) Y. Nagasaka, K. Okada, T. Saeki, K. Hirano, A. Tanaka, T. Miyake, Y. Nakata and Y. Kurata: Multiplexing Method with Non-Coaxial Spherical Waves for Holographic Data Storage, Jpn. J. Appl. Phys. 46 (2007) 3787.
- 5) 藤田輝雄: 光記録再生媒体の焦点誤差検出方法、および それに用いる発光装置のビーム分割調節器、日本特許出願、2008-206876 (2008).
- 6) T. Fujita and H. Horikoshi: Focus Sensing Method Using Far-Field Diffracted Waves and Its Application to Holographic Data Discs, Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 03A037.
- 7) T. Fujita and H. Horikoshi: Characterization of a Focus Sensor Using Far-Field Diffracted Waves for Holographic Data Discs, International Symposium on Optical Memory 09, Tu-PP-04 (2009).
- 8) G. Bouwhuis, J. Graat, A. Huijser, J. Pasman, G. Rosmalen, and K. Immink: "principle of Optical Disc Systems," Adam Hilger (1985).
- 9) 藤田輝雄: 光学式情報記録再生装置の集光スポット位置検出装置、日本特許、JP1915450 (1995).
- 10) H. Hopkins: Diffraction theory of laser read-out system for optical video discs, J. Opt. Soc. Am. 69 (1979) 4.
- 11) B. Bernacki and M. Mansuripur: Causes of focus-error feedthrough in optical-disk systems: astigmatic and obscuration methods, Appl. Opt. 33 (1994) 735.
- 12) <http://www.mathworks.com/> (Mathworks 社ホームページ).
- 13) 藤田輝雄: 干渉縞走査型焦点誤差検出法の光検知器位置依存性評価平成 21 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会、9p-T-1 (2009).

(平成 22 年 3 月 31 日受理)