

偏波保持光ファイバを用いた長距離干渉計測

中楯末三^{*1} 村山右近^{*2} 渋谷真人^{*1}

Long Distant Interferometric Measurement Using a Polarization Maintaining Fiber

Suezou Nakadate^{*1} Ukon Murayama^{*2} Masato Shibuya^{*1}

An interferometric method for long distance position sensing is presented, which utilizes a polarization maintaining fiber and a Faraday rotator. The measurement system, principles of phase cancellation and phase calculation of orthogonal polarizations are described. Some experimental results are also given..

1. はじめに

現在、多くの位置センサは様々な所で利用されている。多くは自動車産業、航空機産業、精密機器産業などである。そのため高感度でシステムの小型化や悪条件下でのセンサが要求される。

回転角度センサにロータリーエンコーダーや位置検出用にはリニアエンコーダがある。¹⁾ レーザー光を用いたロータリーエンコーダーは、「小型化」と「高精度化」が両立されている。これの基本原理解は、回折光の干渉現象を利用している。しかしながら、多くの位置センサは光検出部と信号処理部が一体となっており、光発生、光検出および信号処理・伝送に電力供給が必要である。そのために外界からの電磁ノイズに弱い面やセンサ部が過重になり、多重化し難い点がある。そこで、この問題を解決するためにセンサ部と信号処理部を分離し、センサ部に光のみを用いて位置を測定するシステムを検討した。

位置検出法には干渉計測法を使うので、光の伝送には偏波保存光ファイバを利用する。位置検出用の回折格子にレーザー光を照射し、2回回折してきた光を再び光ファイバで伝送し、光の直交偏光間の位相を高精度に測定することで格子の位置情報を得る。しかしただ単純に偏光を光ファイバ中に通すと光伝送中に外乱の影響によって、ノイズを生じてしまう。そこでファラデー素子を用いて、光伝送時

中に生じるノイズを除去し、位置を測定できるシステムの構築を試みた。

2. 測定原理

A. 測定システムの概略

偏波保持ファイバと回折格子を用いた位置検出装置の概略図を図1に示した。半導体レーザーから射出された直線偏光はハーフミラーを通過し、対物レンズ1で集光させられる。偏波保持光ファイバの固有軸に対して直線偏光を45度の角度で入射させる。偏波保持ファイバを通過した光を対物レンズ2により平行ビームにする。次にこの光をファラデー素子に通過させ偏光面を45度回転させて、回折格子に垂直入射する。位置検出用の回折格子により回折された±1次回折光を偏光板に通してミラーで反射させ、再び回折格子で回折させてファラデー素子を透過させる。この偏光板は入射光のそれぞれの直交偏光を取り出すために使用する。ファラデー素子を往復することで光の直交偏光面が90度回転している。つまり、光ファイバから射出した直後の偏光面と、回折格子で2回回折した光の偏光面とは入れ替わっている。偏波保持光ファイバを再び透過した光はハーフミラーで反射し、対物レンズ3で空間フィルタリングした後発散光とする。この光を複素

^{*1} 東京工芸大学工学部メディア画像学科教授 ^{*2} 工学部光情報メディア工学科 現在 日本電産ネミコン (株)
2006年10月4日 受理

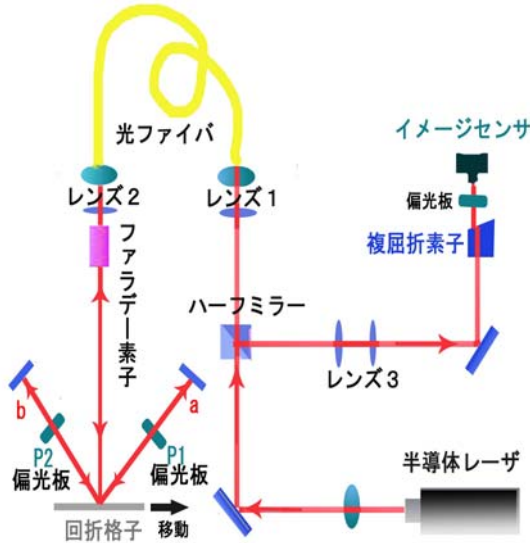


図1 位置検出のための長距離干渉計の概略図

ウェッジ板と偏光板を透過させることにより、直交偏光同士が干渉し、等間隔の干渉縞がイメージセンサ上に現れる。このイメージセンサ上の干渉縞をA/D変換機を用いてPC内に取り込む。イメージセンサで取り込んだデータをあらかじめ求めておいた干渉縞の空間周波数 f_0 (単位長さ当たりの縞の本数) を用いて、フーリエ積分値C、Sを求め、このC、Sの逆正接から、回折格子の移動量に比例する位相 ϕ を求める。

この方法では、偏波保持ファイバでの位相雑音 cancels されるので、光ファイバは光の伝送路のみとして働くことになる。

B. ファラデー素子による位相ノイズの除去²⁾

ファラデー素子による位相ノイズのキャンセルのようすを図2に示した。任意の偏光状態は楕円偏光で表されるが簡単のために下記の説明では直線偏光として説明する。直線偏光のレーザー光を偏波保持光ファイバの固有軸に対し45度の傾きで入射すると考える。この直線偏光をx軸、y軸方向の直交偏光成分に分け、各偏光成分の位相をそれぞれ ϕ_x 、

ϕ_y とする。一般的にレーザー光がファイバ内を伝搬する際に、ファイバの曲げや温度変化などの外乱により、各偏光成分に位相ノイズ n_x, n_y が付加される。ファイバから射出したレーザー光をミラーでそのまま反射したとすると、再度ファイバを透過した後の位相は $\phi_x + 2n_x, \phi_y + 2n_y$ となり、ファイバを往復した直交偏光間の位相差は $\phi_x - \phi_y + 2n_x - 2n_y$ となってノイズ成分 $2n_x - 2n_y$ が残る。

次に図2に示したようにファラデー素子を挿入すると偏光面を45度回転することができる。したがってこの図のようにファラデー素子を2度透過

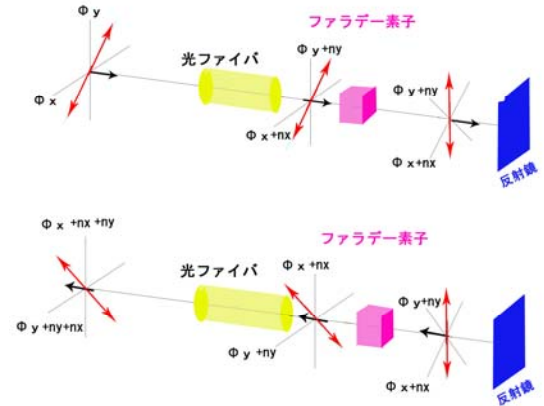


図2 ファラデー素子を用いた位相ノイズ除去法

させると偏光面が90度回転するので直交偏光が入れ替わり、光ファイバを2回透過した後は各偏光成分に位相ノイズ $n_x + n_y$ が付加される。したがって

このときの直交偏光の位相差 Δ は、

$$\begin{aligned} \Delta &= (\phi_x + n_x + n_y) - (\phi_y + n_x + n_y) \\ &= \phi_x - \phi_y \end{aligned} \quad (1)$$

となり、光ファイバによる位相ノイズ成分が除去されることになる。

C. 位相差測定³⁾

光ファイバから帰っていた光の直交偏光間の

位相差を測定することにより、回折格子の移動量が測定できる。ここでは、直交偏光間の位相差測定の方法について述べる。

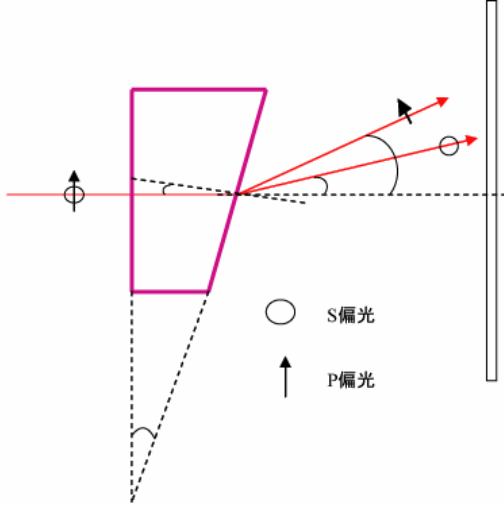


図3 複屈折ウェッジによる等間隔干渉縞の形成

偏波保持光ファイバから帰って来た光は、対物レンズにより発散光となり、図3に示すように、複屈折ウェッジ板に入射する。複屈折素子に入射したレーザー光は、素子の出口面でスネルの法則により常光Oと異常光Eに分けられる。ここで、常光線と異常光線のウェッジ中での屈折率をそれぞれ n_o 、 n_e とし、その偏向角 θ_o 、 θ_e は以下のように表される。

$$\theta_i = \sin^{-1}(n_i \sin \alpha) - \alpha, \quad (i = e, o) \quad (2)$$

ウェッジ板から射出後にこの常光線と異常光線が偏光板によって干渉し、イメージセンサ上に等間隔直線状の干渉縞ができる。この干渉縞の形状は以下のように書ける。

$$I(x) = 1 + \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} \sin \left(\frac{\theta_o - \theta_e}{2} \right) x + (\varphi_y - \varphi_x) \right] \quad (3)$$

この干渉縞の光強度を下記のようにフーリエ解析を使って処理することで、直交偏光間の位相変化を求めることができる。

等間隔直線状の干渉縞の空間周波数 f_0 を求めた後、

干渉縞強度 $I(x)$ のフーリエ余弦値 C と正弦値 S は、

$$\begin{aligned} C &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cos(2\pi f_0 x) dx \\ S &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \sin(2\pi f_0 x) dx \end{aligned} \quad (4)$$

となるので、位相差 φ は C 、 S を用いて以下のようを求めることができる。

$$\Delta = \varphi_y - \varphi_x = \tan^{-1} \left(\frac{S}{C} \right) \quad (5)$$

Δ は干渉縞の移動距離に比例し、さらに回折格子の移動距離に比例する。

D. 回折格子と位相の関係

回折格子で2回回折する光の干渉信号を表す式を求める。回折格子を図4に示すように正弦波状の透過強度を持っているとすると、この回折格子の透過強度 $t(x)$ を次式のように書くことにする。

$$t(x) = 1 + \cos(2\pi f x + \varphi) \quad (6)$$

ここで、位相 φ が格子の移動量を表し、格子が1ピッチ移動すると位相が 2π [rad] 変化する。レーザーを照射したときの回折光は上式をフーリエ変換したものと考えることができるので、回折光 $\tau(\xi)$

は下記のように書ける。

$$\tau(\xi) = \delta(\xi) + \frac{1}{2} [\delta(\xi - f) e^{i\varphi} + \delta(\xi + f) e^{-i\varphi}] \quad (7)$$

ここで ξ は格子より十分遠いフーリエ面での座標軸と考える。上式の第1項が0次回折光で、第2、第3項目がそれぞれ+1次、-1次回折光と考えられる。ここでは各項についている位相項に注目する必要がある。図4で右上に回折した+1次回折光はミラーで反射され再び+1次の方向に回折される。一方、斜め右下に回折した-1次回折光もミラーで反射され、再び回折格子で-1次方向に回折して上記+1次の回折光と干渉する。したがって上式の回折光の位相を参考にすると、2回回折した光の干渉強度は、

$$I = \left| e^{i2\varphi} + e^{-i2\varphi} \right|^2 \tag{8}$$
$$= 2 + 2\cos(4\varphi)$$

となるので、検出される位相信号が 2π [rad] 変化したとすると、格子は1/4ピッチ移動したことになる。

以上では回折格子は透過型としたが、格子を反射型とした場合でも同じように考えて、検出感度は同じである。

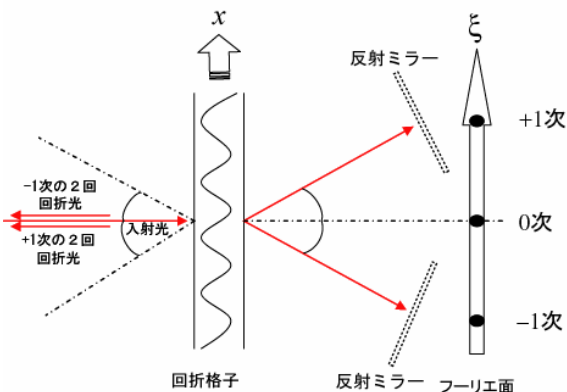


図4 回折格子と位相の関係

5. 実験結果

測定システムの概略図はすでに図1に示した。

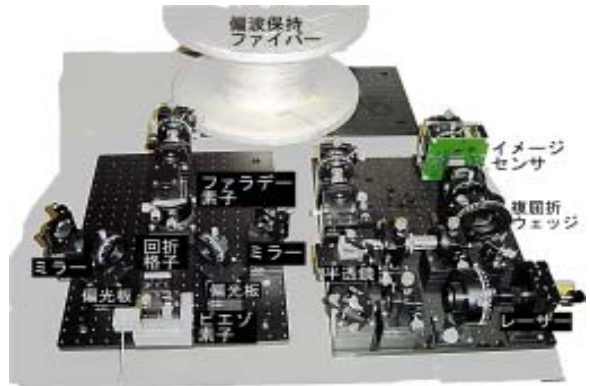


図5 実際の測定光学系

実際に使用した光学系を図5に示した。右側が光源・検出部であり、左側にセンサー部としてピエゾステージ上に1200本/mmの回折格子が固定されている。半導体レーザーの波長は653nmで出力は約15mWである。偏波保持ファイバ長は10mである。

ファラデー素子の影響を見るためにファラデー素子を挿入する前と挿入後の計測時間による位相分布を測定した。まず、得られた等間隔直線状の干渉縞から求めた干渉縞の周波数 f_0 は9.07であった。ファラデー素子挿入前の100秒間の位相揺らぎを図6に示した。100秒間に約60度位相が変化しているのがわかる。

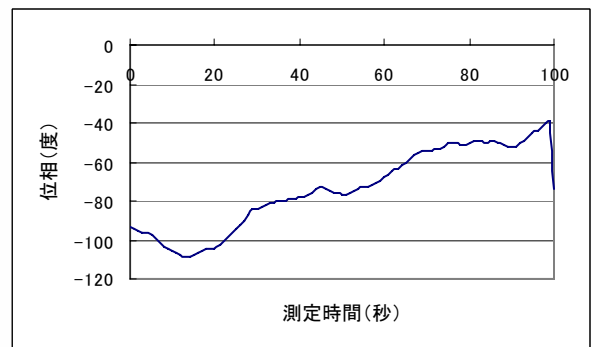


図6 ファラデー素子未挿入100秒間の位相揺らぎ

次にファラデー素子を挿入し同様に100秒間の位相揺らぎを測定した。その結果を図7に示したが、約0.4度の位相揺らぎとなっており、ファラデー素子を使わない場合と比べて150倍以上位相安定度が

改善されているのがわかる。

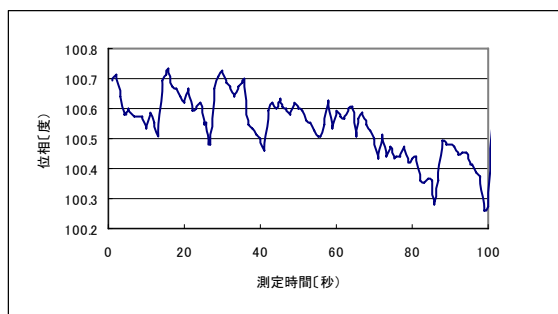


図7ファラデー素子挿入後100秒間の位相揺らぎ

次に、ピエゾステージに電圧を印加してその移動量を測定した結果を以下に示す。ピエゾステージに1サンプル点0.02Vずつ50点まで増加・減少する電圧を印加し、0.1秒間隔で干渉縞を取得した。その

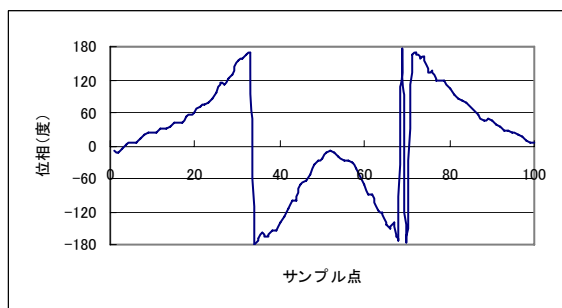


図8 ピエゾステージの移動による位相変化

結果を図8に示した。位相は ± 180 度の範囲で変化するのでこの位相の飛びを補正し、 2π [rad]で回折格子のピッチ/4 ($=208.33$ [nm])に相当することを用いてピエゾステージの移動量を求めたものを図10に示した。

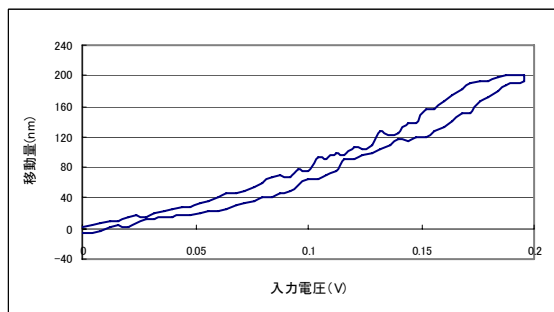


図10 ピエゾステージの入力電圧と移動距離

この図から電圧の上昇・下降によるピエゾステージのわずかな非線形性があることがわかる。

6. まとめ

偏波保持ファイバとファラデー素子を用いた長距離干渉測定について検討してきた。実験結果によると、光ファイバによる位相雑音はかなり良く除去できるが、長時間測定では測定位相のドリフトが起こる。提案した測定系は、他の干渉測定と同様に短時間の相対測定に向いているといえる。

今後は、光源の波長安定性や利用光量の向上などの改良を行って応用分野を開拓することが課題となる。

参考文献

- 1) 富谷雅樹、大崎基弘: “ホログラムスケールを用いた超高精度光電式リニアエンコーダ,” 光技術コンタクト **16**(2000)368-376.
- 2) N. C. Pistoni and M. Martinelli: "Polarization noise suppression in retracing optical fiber circuits," Opt. Lett. **16**(1991)711-713.
- 3) S. Nakadate: "Phase detection of equidistant fringes for highly sensitive optical sensings. II. Experiments," J. Opt. Soc. Am. **A5**(1988)1265-1269.
- 4) M. Martinelli: "A Universal compensator for polarization changes induced by birefringence on a retracing beam," Opt. Commun.. **72** (1989) 341-344.
- 5) A. D. Kersey, M. J. Marrone and M. A. Davis: "Polarisation-insensitive fiber optic Michelson interferometer," Electronic. Lett.. **27** (1991) 519-520.