

S11 半導体レーザ干渉計による微小回転角度測定

富樫 誓 佐々木 修己 鈴木 孝昌 王 向朝  
新潟大学工学部

1. はじめに

微小角度を測定するためにはオートコリメータが最もよく用いられるが、測定対象が小さな場合には測定精度が悪くなる。本研究では、半導体レーザ干渉計を用いて微小角度の測定を精度良く行うことを目的とする。

干渉計に使用するフォトダイオード(PD)には4画素PDを採用し、測定平面で反射された平行光の位相分布を平面内の3点で、参照光との干渉によって検出する。3点の位相の値から測定平面の直交する2方向の微小角度を同時に測定することができる。位相の検出には半導体レーザ(LD)による正弦波位相変調を用いる。また、機械的な振動による干渉信号の位相変動を検出し、半導体レーザの注入電流をフィードバック制御することによって、振動の影響を除去し、高精度な測定を行う。

2. 回転角度測定方法

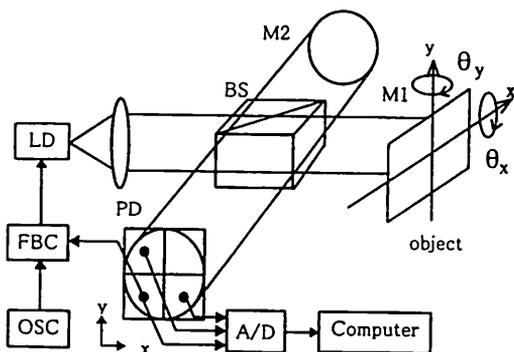


図1. 実験装置

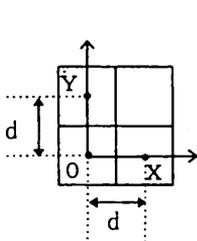


図2. PDの各測定点

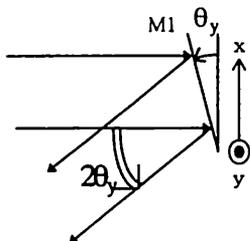


図3. 反射光の変化方向

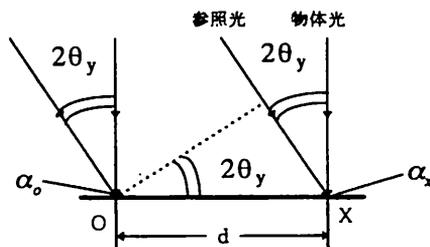


図4. PD面上の物体光と参照光の比較

図1にLDを用いた微小回転角度装置の構成を示す。半導体レーザからの平行光はビームスプリッタ(BS)で2つに分けられる。1つの光は測定物体に照射され、その反射光を物体光と呼ぶ。他方の光は、ミラーM2で反射され参照光と呼ぶ。4画素PDの平面は参照光の伝搬方向と垂直であり、図2に示すようにPD面上に座標O-X-Yを定める。原点OとX(x=d), Y(y=d)の位置にピンホールを置き、3点で干渉信号を検出する。3点O, X, Yで検出される干渉信号はそれぞれ*i*=0,x,yとして、 $S_i(t) = A + B\cos\{z\cos(\omega_c t + \phi) + \alpha_i\}$ となる。ただしAは直流分の振幅、Bは交流分の振幅であり、 $z\cos(\omega_c t + \phi)$ は半導体レーザの注入電流を  $I_m(t) = a\cos\omega_c t$  で変調することによって得る。

PDの3点で受光した干渉信号の位相をそれぞれ  $\alpha_o, \alpha_x, \alpha_y$  とする。y軸を回転軸とする測定物体の回転角度を  $\theta_y$  とすると図3に示すように反射光の角度変化は  $2\theta_y$  になる。このときのPD面上の物体光と参照光は図4に示すようになり、 $\alpha_{x0} = \alpha_o - \alpha_x$  とすると、

$$\alpha_{x0} = \frac{2\pi}{\lambda_o} d \sin(2\theta_y)$$

となり、

$$2\theta_y = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_o}{2\pi d} \alpha_{x0}\right)$$

より回転角度  $\theta_y$  を求めることができる。但し、 $\lambda_o$  はLDの中心発振波長である。

同様にx軸を回転軸とする角度  $\theta_x$  も  $\alpha_{y0} = \alpha_o - \alpha_y$  とすると、

$$2\theta_x = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda_o}{2\pi d} \alpha_{y0}\right)$$

より求めることができる。

### 3. 干渉信号からの位相検出

干渉信号から正確に位相  $\alpha_o$ 、 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$  を検出するために、正弦波位相変調法を用いる。干渉信号  $S_i(t)$  をフーリエ変換し、 $\omega_c$ 、 $2\omega_c$ 、 $3\omega_c$  の周波数成分を用いることによって  $\alpha_i$  が得られる。次に、機械的振動による位相変動を除去するために以下のようにフィードバック制御を用いる。干渉信号  $S_o(t)$  と変調電流  $I_m$  の2式を乗算回路に入力し、掛け合わせた  $v(t) = S(t) I_m(t)$  の信号をローパスフィルタに通すことにより、 $BJ_1(Z) \sin \alpha_o$  の信号が得られる。この信号をフィードバック信号として、注入電流を制御することにより  $\sin \alpha_i = 0$  つまり  $\alpha_i = \pi, -\pi$  に固定する。

### 4. 実験方法と結果

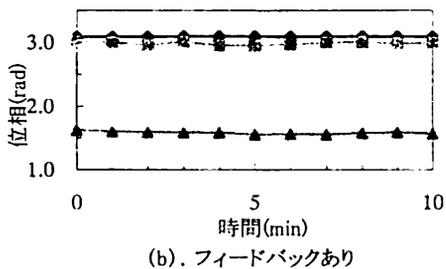
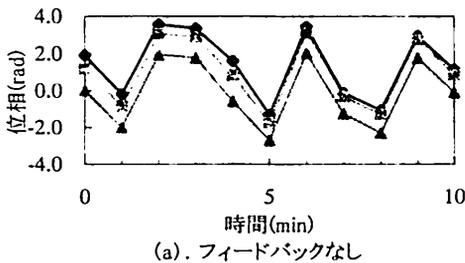


図5. 位相検出の時間的安定度

まず、干渉信号の位相検出の安定性を調べた。フィードバック制御を行わない時の位相変化で  $\alpha_o$ 、 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$  について図5(a)に示す。位相の変化量は最大で約4.5ラジアンである。一方、図5(b)にフィードバック制御を行った時の位相変化を示す。その変化量はフィードバック制御を行っている干渉信号の位相  $\alpha_o$  の変化量は最大約0.01ラジアン、そのほかの位相  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$  の変化量は最大約0.1ラジアンの変化である。フィードバック制御により著しく安定化されていることがわかる。

次に、回転角度  $\theta_y$  を与えたときの位相  $\alpha_{x0}$ 、 $\alpha_{y0}$  を図

6に示す。今回の実験では  $\lambda_0 = 670\text{nm}$ 、各測定点の間隔  $d = 2\text{mm}$  を用いた。

また、測定範囲としては干渉縞が一番広い位置から測定間隔の2mmの広さになるまで行った。位相の測定範囲は  $0 \sim \pi$  になる。

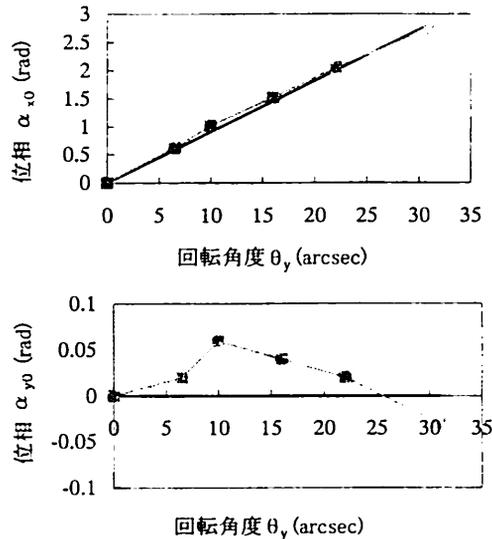


図6. 回転角度  $\theta_y$  に対する位相  $\alpha_{x0}$ 、 $\alpha_{y0}$

図6の横軸に示されている回転角度はオートコリメータによって測定した。 $\theta_y$  の回転を与えているため  $\alpha_{y0}$  には位相変化がほとんど見られないが、 $\alpha_{x0}$  は回転角度の変化に従って変化している。式による理論値と測定値の誤差は最大で約0.1 rad程度である。図5に示すように、 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$  の時間的変化が最大0.1 rad程度であることにより、これらの位相変化により誤差が出ていると思われる。また、他の原因として、オートコリメータの測定誤差も考えられる。これらの結果から、測定誤差は約1 arcsecと言えらる。

### 5. まとめ

干渉信号の位相を3点で検出することによって、回転角度を約1 arcsecの精度で測定することができた。今後、さらに測定精度を高めるためにフィードバック制御による位相の安定度を向上させる必要がある。

また各測定点の間隔を小さくすることによって測定範囲を拡大すること、及び現在の干渉計を小型化する予定である。