

## レーザーによる部品選別装置に関する研究

### Investigation of Parts Sorting Device by Laser

謝 東藩<sup>+</sup> , 山田 諄<sup>++</sup>  
Dong fan XIE Jun YAMADA

**Abstract** Non-contact parts sorting device is constructed to be applied to an automatic flexible manufacture system. The device is one of the laser gaging system with a wide inspection area, which consists of a laser diode, a scanner, Fresnel lens and so on. The inspection area is 250×1500 mm.

Increasing the inspection area, the error generally increases. Some causes for the error are discussed in detail. The tilt from a parallel beam and the intensity profile transmitted Fresnel lens are calculated. The error of the device is measured. The accuracy is below 0.5%.

#### 1. はじめに

消費者ニーズの多様化に伴い、少量多品種生産が普及しつつある。このような生産ラインでも、まだシーケンス制御が一般的であるが、ベルトコンベアを流れる多品種の部品を選別する必要がある場合には、CCDカメラと画像処理装置が用いられている、しかし、縮小光学系を用いているため、部品の高さにより縮小率が異なるため複雑な画像処理が必要で、装置は高価となり、処理時間がかかるといふ欠点がある。

レーザー光の平行ビームを走査させることにより、精度や処理速度の向上が期待される。そこで検査領域の広いレーザー走査装置の試作し、その特性を調べた。一般にレーザー走査装置は、検査領域の狭い場合には、精度が高いが、検査領域の広い場合には、精度が低くなるので、誤差を詳しく考えることが必要である。

#### 2. 実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。実験装置は投

光器と受光器の二つの部分からなる。1は波長780nm出力3mWの半導体レーザーである。2は直径40mmの六面体ポリゴンミラーである。4は平行ビームを作るためのフレネルレンズで、焦点距離 $f=356\text{mm}$ 寸法 $40\times 250\text{mm}^2$ である。検査領域が広い場合にはフレネルレンズはガラスレンズや放物面反射鏡等と比べて重さは軽いし値段も安い。しかし、フレネルレンズの表面は多数の溝から出来ているので、光が通過するとき、回折とか光強度分布変化とかの問題も起こり、信号処理は難しくなる。3は基準パルスを取るP.Dである。6は受光用フレネルレンズで、焦点距離 $f=178\text{mm}$ である。7は受光用P.Dである。

投受光器間に、部品がおいてある場合と部品の無い場合では、光電流が異なる。この電流を処理して基準パルスと一緒にデジタルオシロスコープとコンピュータに入れて、A/D変換して、部品の外径を示す。実際の光は完全な平行ビームでなく、ビーム径も余り狭くないので、これらは誤差の原因となる。

#### 3. ポリゴンミラー誤差検討

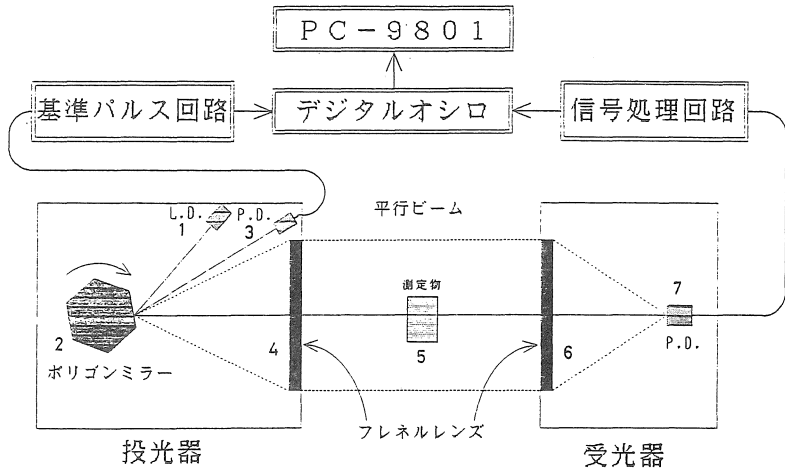
検査領域が広い場合の誤差原因の一つは、光の入射点の変化である。一般に外径測定走査装置は入

<sup>+</sup> 愛知工業大学客員研究員 (南京金陵職業大学)

<sup>++</sup> 愛知工業大学 電子工学科

射点と焦点を合わせている、もし、この点もミラー表面と合わせると、反射して屈折した光線は平行ビームであるが、しかしミラーが回転すると入射点

図 1  
実験装置



ではなくなる。そこで入射点と焦点を分けて考え、レンズ通過後のレーザービームの平行光線からのずれを計算して、誤差最小な光学系の配置について検討する。最小誤差のポイントを取ることができる。

誤差計算に用いた光学系の配置図を図2に示す。fは焦点距離、Lは検査領域の長さ、aはポリゴンミラーの直径、y = o o' は、ミラー中心とレンズ軸の垂直の距離である。xは焦点とo o' の距離、bは入射光線位置を示す長さであるφは入射角度で、θはミラーの回転角度である。

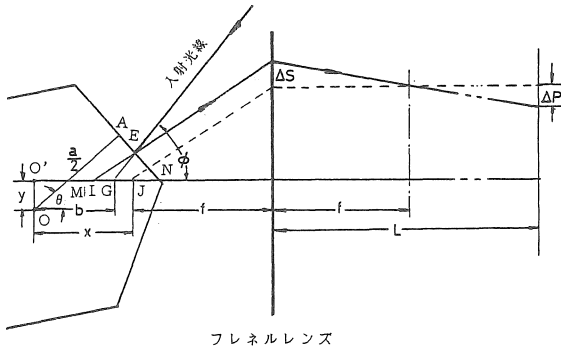


図2 誤差計算

$$AM = \frac{a}{2} - \frac{y}{\sin \theta}$$

$$MG = b - \frac{y}{\tan \theta}$$

$$MN = \frac{AM}{\cos \theta}, \quad GN = MN - MG$$

$$EG = \frac{GN \cdot \cos \theta}{\cos(\theta - \phi)}$$

$$IG = EG \cdot \frac{\sin(2\phi - 2\theta)}{\sin(2\theta - \phi)}$$

$$\Delta S = IJ \cdot \tan(2\theta - \phi)$$

$$= [(x - b) + IG] \tan(2\theta - \phi)$$

$$\Delta P = \Delta S \cdot \frac{L - f}{f}$$

$$\Delta P = \frac{L - f}{f} \cdot \tan(2\theta - \phi) \left[ (x - b) + \frac{\sin(2\phi - 2\theta) \cos \theta}{\sin(2\theta - \phi) \cos(\theta - \phi)} \cdot \left( \frac{a}{2 \cos \theta} - \frac{y}{\sin \theta \cos \theta} - b + \frac{y}{\tan \theta} \right) \right]$$

$$\Delta P = \frac{L - f}{f} \left[ (x - b) \tan(2\theta - \phi) + (a - 2b \cos \theta - 2y \sin \theta) \frac{\sin(\theta - \phi)}{\cos(2\theta - \phi)} \right]$$

この式を用いて誤差を減らす方法を分る。焦点距離を長く、検査領域を狭く、入射角度を小さく、ミラー直径を小さくすると、誤差も小さくなる。誤差はミラーの面数と関係がない、今六面体のポリゴンミラーを選択した。

入射線と焦点の位置は大切である。図3はミラー中心から焦点軸の距離yと誤差の関係を示す。いまの場合はxとbは20mm、Lは1800mmである。

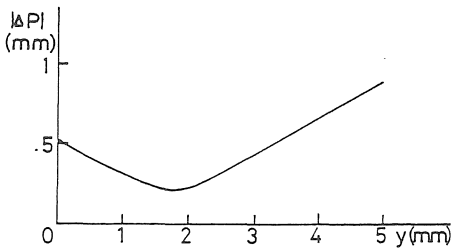


図3 ミラー位置と誤差の関係

誤差が小さいyの値は1.78mmである。

図4はx=20mm、y=1.78mm場合の入射光線の位置bと誤差の関係である。誤差が小さいbの値はほぼ20mmである。

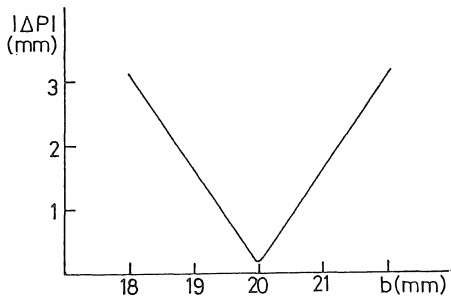


図4 入射線と誤差の関係

図5はy=1.78mm、b=20mmで、焦点位置xと誤差の関係である。一番良いbの値は19.93mmである。最大誤差は0.11mmである。位置調整のために、ポリゴンミラーはXYステージに乗せて使う。

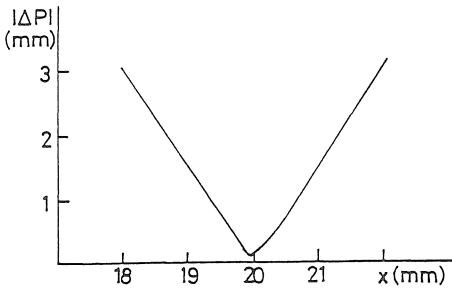


図5 焦点位置と誤差の関係

#### 4. 信号処理

信号処理のブロック図を図6に、その波形図を図7に示す。

P. Dで受光した光信号はアンプで増幅する。この信号は外乱光などのせい、色々なノイズがある(図7の1))。まず信号のレベルの小さい領域の

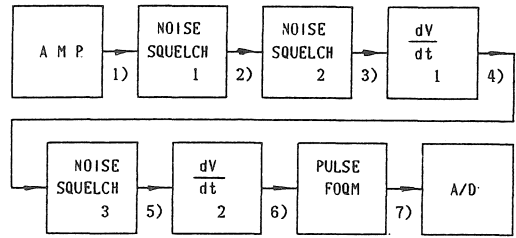


図6 ブロック図

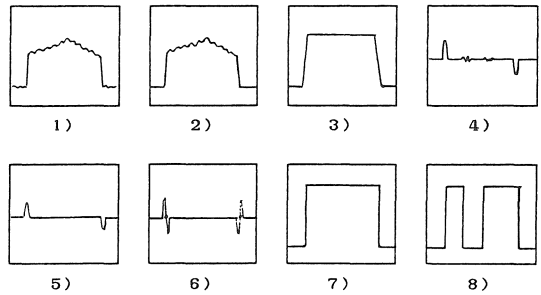


図7 波形図

ノイズをダイオードで切って(図7の2))、二番目は信号のレベルの大きい領域のノイズを飽和させて切る(図7の3))。次に、光ビームの中心を取るために、二次微分をする。まず一次微分すると、新しいノイズが起こるので(図7の4))、もう一度ノイズを切って(図7の5))、二次微分をして(図7の6))、信号の零点を横切るところでパルスが発生させると図7の7)のような波形の信号が得られた。もし部品が置いてあると、図7の8)の波形になる。そしてA/D変換する。基準パルスで検査幅の中心の時間を取ることができ、部品両側の時間を取って、部品の外径と時間の関係がtan関数であるので、コンピュータで計算して、結果を示す。

しかし、実際の信号は図8に示すように光強度が一定でない。図9は直接二次微分して、外径をパルスに変換した波形であるが、部品どこにあるか余り分からない。この信号強度の変化は一般のノイズでなく、変化の振幅は最大信号の半分以上である。もし、この変化の部分全部切ると、ビーム径の中心も切ってしまうかもしれないので、処理にくい。だからこの波形の起こる原因は検討することが必要である。これはフレネルレンズのためであると思われる。

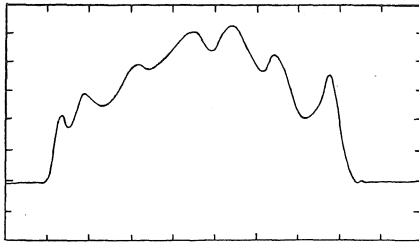


図8 信号波形

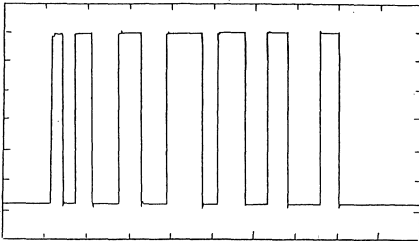


図9 直接変換波形

5. フレネルレンズ光強度分析

5.1 投光フレネルレンズ光強度分布

フレネルレンズの表面は多数の溝から出来ている、従って、 $k$ を波数、 $n$ を1mm当たり溝数、 $B$ をビーム径、 $D$ を一周期幅 ( $D=1/n$ )、 $d$ を溝透光部分幅、 $\lambda$ を波長、(図10参考)

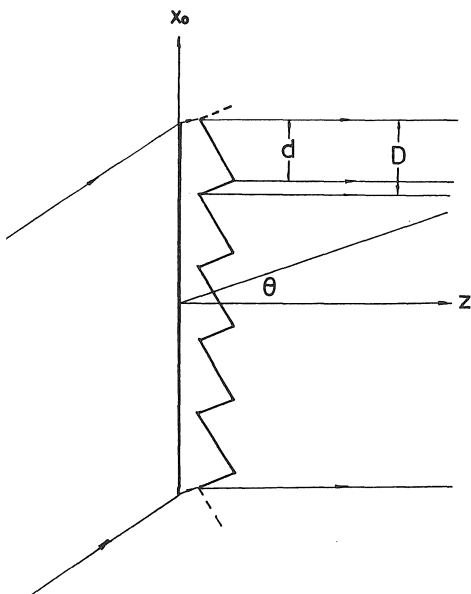


図10 投光フレネルレンズ断面図

$g(x_0)$ を一周期に相当するひとみ関数、  
 $U(\theta)$ を一周期に相当する光振幅角度分布とすれば

$$U_0(\theta) = \int_{-D/2}^{D/2} g(x_0) e^{-ik \cdot \theta \cdot x_0} dx_0$$

$$= \text{const} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot d \cdot \theta}{2}\right) / \frac{k \cdot d \cdot \theta}{2}$$

$U(\theta)$ はN個周期全部による回折和になり

$$U(\theta) = \sum_{S=0}^{N-1} U_s(\theta)$$

$$= U_0(\theta) \sum_{S=0}^{N-1} e^{-ik \cdot \theta \cdot S \cdot D}$$

$$= U_0(\theta) \frac{1 - e^{-ik \cdot \theta \cdot N \cdot D}}{1 - e^{-ik \cdot \theta \cdot D}}$$

$$= U_0(\theta) \frac{1 - e^{-ik \cdot \theta \cdot B}}{1 - e^{-ik \cdot \theta / n}}$$

光強度  $I(\theta)$  に直すと

$$I(\theta) = |U(\theta)|^2 = \text{CONST} \times \frac{\sin^2(k \cdot D \cdot \theta / 2) \sin^2(B \cdot k \cdot \theta / 2)}{k^2 D^2 \theta^2 \sin^2(k \cdot \theta / 2n)}$$

$\sin^2(k \cdot \theta / 2n) = 0$  とすると  $I(\theta)$  が最大値になる。

$$k \cdot \theta / 2n = m\pi \quad (m \text{ 整数})$$

$$\text{回折光角度間隔 } \theta_1 = 2n\pi / k = n\lambda$$

例えば  $n = 8/\text{mm}$ 、 $\lambda = 780\text{nm}$ 、 $\theta_1 = 0.00624 \text{ rad}$ 。  
 $L = 1500\text{mm}$  の場合、距離間隔  $x_1 = 9.36\text{mm}$ 。

この光は受光フレネルレンズを通過後が図8のような周期性信号になり、ビーム径も広がる。

対処の方法：

① 1mm当たり溝数の少ないフレネルレンズを用いる。

例えば  $n = 2/\text{mm}$ 、 $\theta = 0.00156 \text{ rad}$   
 $L = 1500\text{mm}$ 、 $x_1 = 2.34\text{mm}$

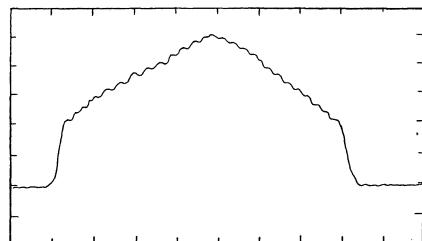


図11 大面積P.D信号波形

しかし、 $n$  が少なすぎると精度に影響も大きくなる。

② より大きい面積のP、Dを用いる。

図8は $3.7 \times 3.7 \text{mm}^2$ のP、Dを用いた結果で、図11は $10 \times 10 \text{mm}^2$ のP、Dを用いた結果である。

しかし、光ビーム径の拡がりの問題は改善されない。

③ フレネルレンズの縁部分を用いる。

ビーム径の拡大方向は円形溝の直径方向であるので、もしフレネルレンズの中央部分を利用すると、ビーム径拡大方向と走査方向とが同じで、ビーム径拡大の影響が一番大きい。縁部分を利用すると、ビーム径拡大方向と走査方向と異なり、受光レンズの前にスリットが有れば、影響を減小させることができる。

### 5.2 受光フレネルレンズ光強度分布分析

いまの場合は  $f=178 \text{mm}$ 、 $1 \text{mm}$  当たり溝数2で、回折の影響が小さい。しかし、縁部分の光強度が中央部分より弱い。図11の場合は  $I/I_0 \sim 0.5$  となり、信号処理は難しい。

縁部分光強度計算：

フレネルレンズは溝の横断面の角度が位置によって異なる、だから有効光量も変化している。

図12のABCは横断面の溝の一つである、平行ビームが入射すると、AB部分の光は有効光で、BC部分は無駄になる。

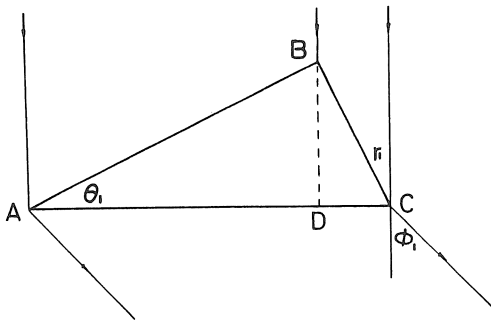


図12 受光フレネルレンズ断面図

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_0} &= \frac{AD}{AC} = \frac{\text{ctg } \theta_1}{\text{ctg } \theta_1 + \tan r_1} \\ &= \frac{1}{1 + \tan r_1 \cdot \tan \theta_1} \quad \text{ここで} \\ \tan \theta_1 &= \frac{\sin \phi_1}{n \cdot \cos r_1 - 1} \end{aligned}$$

$$r_1 = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi_1}{n} \right)$$

図11の場合  $f=178 \text{mm}$ 、幅 $=250 \text{mm}$

$$\phi_{1\max} = \tan^{-1} (250/2 \times 178) = 35^\circ$$

計算値  $I_1/I_0=0.49$ 、これは実験値とよく合っている。

対処の方法：

① 焦点距離がより長いフレネルレンズを用いる。

例えば  $f=356 \text{mm}$ 、幅 $=250 \text{mm}$ の場合

$$\phi_{\max} = \tan^{-1} (250/2 \times 356) = 19^\circ$$

$I/I_0=0.80$ 、この結果はよりよくなる。しかし焦点距離が長いと、装置の寸法も大きくなって不便である。

② 非線形アンプを用いる

この理想アンプは光がレンズの縁を通過するとき中央より増幅度が大きくなるもので、検査領域中の光電流をほぼ不変にできるものである。この回路は負帰還回路ではないし、AGC回路でもない。このアンプの増幅度の制御電圧は出力信号でなく、時間の関数である。或いは

$$\text{増幅度 } K = K(u)$$

$$\text{制御電圧 } u = u(t)$$

制御電圧を取る方法：

基準パルスで光電流信号と同期の方形波を発生させ、フィルターを用いて変化の同期信号を得ることができる。

この制御電圧で可変抵抗を作用させて、アンプの利得を時間によって調整することにより、ほぼ不変な光電流が得られると予想される。

しかし、回路は少し複雑である。

③ 受光レンズのスリットを場所によって幅を調整する、或いは透光率の異なるガラスを用いる。

④ 複数の受光フレネルレンズを用いる。この方法はより簡単で、今度の実験に有効なだけでなく、一般にフレネルレンズの焦点距離の短い場合には、性能向上も期待できる。

### 5.3 複数受光フレネルレンズ光強度分布分析

#### 5.3.1 複数レンズ利用原理

図13は実際の光強度分布曲線である。焦点距離が短い場合は、出射角度  $\phi$  が大きいと、縁部分の光強度が急に小さくなる。この受光レンズ光強度分布の非線形が考えられる。

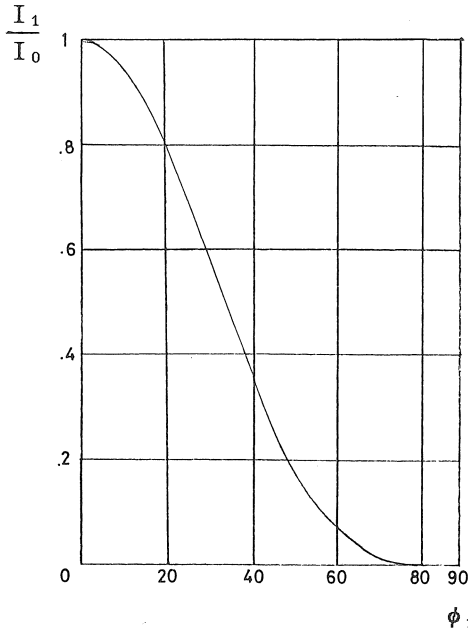


図13 受光フレネルレンズ光強度分布図

例えば、屈折角度20°場合は、相対強度0.80で、減衰量20%である。屈折角度40°場合は、相対強度約0.40で、20°→40°の減衰量50%に相当である。だから、もし二枚のレンズを利用して、毎回20°ずつ屈折させると、総合強度が向上すると期待される。続けて考えると、複数レンズはより有効であると思われる。

5.3.2 二枚レンズ光強度分布分析

図14はEFGが二番レンズの溝横断面の一つである。一番レンズから、屈折した光ビームはφ<sub>1</sub>の角度でEFH面へ入射して、φ<sub>2</sub>の角度に出射する。EF部分の光は有効で、FH部分は無駄である。

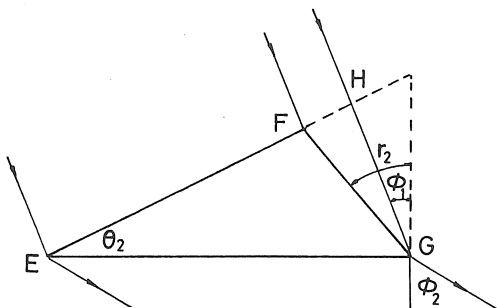


図14 二番目受光フレネルレンズ断面図

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{EF}{EH}$$

$$\frac{EF}{\sin(90^\circ - r_2)} = \frac{EG}{\sin(180^\circ - \theta_2 - 90^\circ + r_2)}$$

$$\frac{EF}{\cos r_2} = \frac{EG}{\cos(\theta_2 - r_2)}$$

$$\frac{EH}{\sin(90^\circ - \phi_1)} = \frac{EG}{\sin(180^\circ - \theta_2 - 90^\circ + \phi_1)}$$

$$\frac{EH}{\cos \phi_1} = \frac{EG}{\cos(\theta_2 - \phi_1)}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\cos r_2}{\cos(\theta_2 - r_2)} \cdot \frac{\cos(\theta_2 - \phi_1)}{\cos \phi_1}$$

ここで  $r_2 = \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi_2}{n} \right)$

$$\phi_1 = \theta_2 - \sin^{-1} \left\{ n \sin \left[ \theta_2 - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi_2}{n} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{I_1}{I_0} \cdot \frac{I_2}{I_1}$$

例えば f=356mmのレンズを二枚重ねると、合成焦点f~178mmであり、I<sub>2</sub>/I<sub>0</sub>=0.61となる。f=178mmの一枚レンズのほうは I<sub>1</sub>/I<sub>0</sub>=0.49となり、複合レンズの効果は大きい。

5.3.3 複数レンズを用いる

m枚レンズを重ねて、下の式を数度利用して、計算出来る。

I<sub>m</sub>はm番のレンズの光強度で、θ<sub>m</sub>は溝断面角度で、φ<sub>m</sub> 出射角度である。

$$\phi_{m-1} = \theta_m -$$

$$\sin^{-1} \left\{ n \sin \left[ \theta_m - \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi_m}{n} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{I_m}{I_{m-1}} = \frac{\cos \left\{ \theta_m - \sin^{-1} \left[ \frac{\sin(\theta_m - \phi_{m-1})}{n} \right] \right\}}{\cos \left\{ \sin^{-1} \left[ \frac{\sin(\theta_m - \phi_{m-1})}{n} \right] \right\}}$$

$$\times \frac{\cos(\theta_m - \phi_{m-1})}{\cos \phi_{m-1}}$$

$$\frac{I_m}{I_0} = \frac{I_m}{I_{m-1}} \cdot \frac{I_{m-1}}{I_{m-2}} \cdot \dots \cdot \frac{I_1}{I_0}$$

6. 実験の結果と分析

受光用レンズとして f=356mmのフレネルレン

ズを二枚重ね、P. Dとして $10 \times 10 \text{mm}^2$ の受光面積の大きなものを用いて、光強度の変化が小さくなる方法で実験を行った、ポリゴンミラーはXYステージに乗せ、ステージを微調整して、誤差最小の位置で実験を行った。

まん中 = 355  $\mu\text{S}$   
 $\Delta T_1 = 29 \mu\text{S}$   
 $\Delta T_2 = 67 \mu\text{S}$   
 測定物の幅 = 29.8498 mm

CHAN RANGE : +4.00000E+01  
 TIME RANGE : +1.00000E-03  
 誤差 = -.500539 %

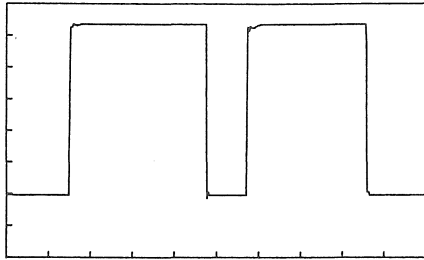


図15 測定結果の例

図15は部品として直径30mmのアルミ円筒を検査したときにえられた波形である、測定値は29.85mm、誤差は0.5%となった。投光器間の距離を1500mmとし、投光器から200mm間隔で7ヶ所、レンズの中心から両側へ50mm間隔で5ヶ所、合計35ヶ所の測定ポイントを定めて誤差の測定を行った。

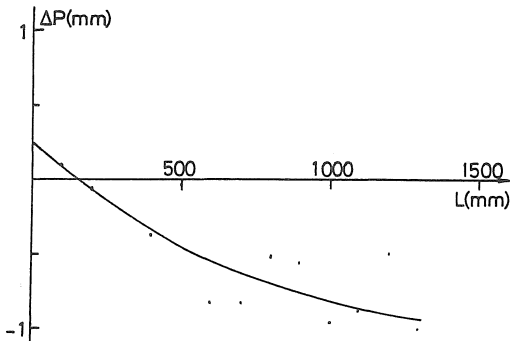


図16 検査領域と誤差の関係

図16はレンズの中央部における誤差分布の測定結果を示す。投光器より距離が離れるに従い誤差が大きくなり、又レンズの中央部より縁に行くに従い誤差が大きくなった。

受光用レンズとして、 $f = 178 \text{mm}$ の単レンズを用いても実験を行ったが、複数レンズを用いた場合と比べて、誤差が3~4倍大きな値となり、前章で

検討したように複数レンズが有効なことが分かった。

又、ポリゴンミラーの位置を設計値通り設定した時の誤差は、実験的に微調整したときの誤差の2倍以上あり、ポリゴンミラーの位置の調整も誤差を減らすため重要であることが分かった。

誤差の原因はビーム径少し大きいなどで、ビーム径の中心を取りにくいためである。

## 7. まとめ

今回はレーザーによる検査幅の広い外形測定器を試作して、理論誤差とフレネルレンズの特性を検討して、精度向上できることが分かった。しかし、実際誤差は理論誤差より大きかった。今後、より良い小型化装置を試作する予定である。

[謝辞] 本実験を一緒にして頂いた本学電子工学科の卒研究生浅井稔勝、塚田大輔、大森和仁さんに対して深く謝意を表します。また、実験に際して御助力を得た本学院生柴田幸二さんおよび卒研究生津田紀生さんにも謝意を表する。

(受理 平成4年3月20日)