光学的方法による小穴内径測定装置の開発*

丸山六男** 尾坂 一** 小野道彦*** 賀勢晋司†

Development of Optical Apparatus for Measuring Small Hole Diameter

Mutsuo MARUYAMA, Hajime OSAKA, Michihiko ONO and Shinji KASEI

This paper presents an optical apparatus for measuring small hole diameter. The apparatus, basing on the principle of geometrical optics, enables to measure diameters of through holes with high aspect ratios. The measuring range is 0.1–1mm. Four light beams made up by concyclic four pinholes incident onto hole wall with a large incident angles and their reflected beams form four images on a charge coupled device. From optical relations and picture processings about the images, the value of the diameter is obtained. Being employed ferrules of the optical fiber connector, etc., as test specimens, some problems about measuring conditions and data processings are experimentally examined and solved. According to actual measurements, the measuring accuracy is estimated to be $2.3 \mu\text{m}$ (standard deviation) and, under a special condition, $1.4 \mu\text{m}$ (standard deviation). It is also found that the apparatus can measure specimens without mirror surfaces well.

Key words : optical measurement, small hole diameter, aspect ratio, geometrical optics, charge coupled device, accuracy, optical fiber connector, ferrule

1. 緒 言

小穴の内径測定には光学式測定顕微鏡や投影器による影法師法が広く用いられている。それらの測定器で分解能や精度の点で不十分な場合には、電子顕微鏡なども用いられている。光学式測定顕微鏡などはいずれも小穴の内面を直接測定する方法ではないため、測定対象は穴の端面で内径を代表できるような薄い試料にかけられた小穴の内径測定に適した測定器と言える。穴の内面を直接測定する測定器としては、測長機や三次元座標測定機、空気式コンパレータ、電気式コンパレータなどがあるが、それらの測定器では測定子の大きさやそれを支えるシャンク部の長さ等により、測定可能な穴の径や長さに大きな制約がある。現在、汎用機として最も実用性が高いと考えられる小穴の内径測定器としては、Perflektometer (Leitz 社)¹⁾と呼ばれる光学装置を応用したものがあるが、測定可能な穴の長さに限界がある。内径測定を目的とした測定器として光波干渉を用いたもの²⁾や三角測量方式のもの³⁾が提案されているが、測定可能な最小内径は前者で20mm、後者で9.5mmと報告されていて、比較的大きな内径を測定対象にしている。

小穴の内径を測定対象としたとき、その大きさがただちに測定を妨げる要因とはならず、内径の大きさと長さとの比であるアスペクト比(穴の長さ/内径)が問題となる。そこで、本研究では内面の仕上げ状態が良好でアスペクト比が大きく、貫通した小穴の内径測定を行うことを目的に、光学的な測定

装置の開発を行った。目標とした内径は、他の測定機器では測定が困難な0.1~1mmとした。開発した測定装置は、小穴内面に照射した光の正反射光をCCDカメラ(以下、CCDと称する。)により捕捉し、幾何光学的な原理に基づく解析により、小穴内径を測定するものである。性能の確認のため、アスペクト比が大きい光コネクタに用いられるフェルール(内径0.125mm、長さ約11mm)を試料に、測定実験を行った。その結果、測定精度は標準偏差で $2.3 \mu\text{m}$ であり、特定の測定条件下ではそれが $1.4 \mu\text{m}$ となった。また、粗面を試料に測定実験を行い、表面粗さが測定値に及ぼす影響についても検討を行った。以下、それらについて報告する。

2. 測定装置の構成と測定原理

2.1 測定装置の構成

図1に光学系の配置及び測定原理を示す。図1において L_1 、 L_2 、 L_3 及び L_4 は、4本のレンズを示す。簡単のため、レンズはすべて薄いレンズとして示す。光学系は測定試料の内面に光束を照射する投光用光学系と試料の内面で反射した光束を捕捉するための受光用光学系とから構成する。

投光用光学系は、光源、パターン、レンズ1及びレンズ2からなる。パターンは、 $\phi 0.9\text{mm}$ の円周を90°分割する位置に $\phi 0.1\text{mm}$ のピンホールが4個あけられた薄板である。受光用光学系は、レンズ3、レンズ4及びCCDからなる。測定原理を達成するため、それぞれの光学素子は次のような位置関係に配置する。

パターンはレンズ1の前側焦点位置に置く。レンズ3は、前側焦点をレンズ2の後側焦点と共有し、かつ、後側焦点をレンズ4の前側焦点と共有する位置に置く。CCDは、撮像面がレンズ4の後側焦点となるように置く。レンズ1とレンズ2との相対位置は、投光用光学系の機能に無関係であるか

* 原稿受付 平成7年7月28日

** 長野県精密工業試験場(岡谷市9959)

*** 長野県情報技術試験場(松本市野溝西1-7-7)

† 信州大学工学部(長野市若里500)

Fig.1 The optical system of measuring apparatus

Fig.2 An example of image on CCD

ら、任意に配置する。測定試料はレンズ2とレンズ3との間に設けた試料台に配置する。

2.2 測定原理

図1に示す光学系による測定原理は、以下のように説明される。なお、図1では説明を簡単にするため、4本の光束のうち①及び②の2本の光束を示す。

パターンはレンズ1の前側焦点位置にあるので、ピンホールA₁からの光①は、レンズ1で光軸00'に対し角度をもった平行光となる。レンズ1からの光はレンズ2で集光し、測定試料面に入射する。測定試料面での正反射光はレンズ3を通過し、光軸00'に対して角度をもった平行光となってレンズ4に至る。レンズ4からの光はCCDに結像する。同様に他の3本の光束もCCD上に結像する。図2にCCDで得られた4個の測定像を示す。

レンズが薄いレンズとする仮定の基に、幾何光学的に解析すると⁴⁾、CCDにおける結像位置A₂'の光軸00'からの距離 r_P と測定試料の半径 r との関係は式(1)で表される。

$$r = \frac{f_3}{2f_4} r_P + \frac{f_2}{2f_1} h \quad (1)$$

ただし、 h : 光軸00'からピンホールA₁までの距離

f_1, f_2, f_3, f_4 : レンズ1, 2, 3, 4の焦点距離

CCDでは r_P の大きさが画素数として得られるため、内径を長さ寸法として直接得ることができない。そこで、4個の測定像により作られる円の半径 r_P を画素数で表した r_N に置き換えると式(1)は、CCDの1画素を長さに変換する換算係数を導入して、式(2)で表される。

$$r = G \frac{f_3}{2f_4} r_N + \frac{f_2}{2f_1} h \quad (2)$$

ただし、 G : r_P と r_N との換算係数

式(2)において右辺第1項の $G(f_3/f_4)$ 及び第2項の $(f_2/f_1)h$ を適当な標準試料を用いてあらかじめ校正しておくことにより、式(2)は r_N を変数とする一次式で表せ、 r_N から測定試料の半径 r が求められる。

2.3 要素の仕様

光源は調光機能付150Wのハロゲンランプである。レンズ1は4倍のエクステンダを組み合わせた焦点距離 $f_1 = 64 \sim 640 \text{ mm}$ のズームレンズである。レンズ2、レンズ3及びレンズ4は、市販されている写真用単焦点レンズである。それぞれの焦点距離は $f_2 = 70 \text{ mm}$, $f_3 = 70 \text{ mm}$, $f_4 = 135 \text{ mm}$ である。CCDは、(789×439)画素、2/3インチ、モノクロ仕様である。画像処理装置は、(512×512)画素、256階調、2画面仕様である。

測定試料を保持する試料台は、光軸に対する2軸のチルト機構及び3軸の平行移動機構で構成する。

パターンは、前述のとおりである。

3. 測定条件の設定及び画像処理の方法

3.1 測定条件の設定及び測定試料のセッティング

内径測定を可能にする条件は二つある。一つ目の条件は測定位置が特定可能なことであり、図1において、その条件はレンズ2による集光位置 r_0 と r とがほぼ等しいことである。幾何学的に f_1, f_2, h 及び r_0 の間の関係を導き、 $r_0 \approx r$ とすると一つ目の条件は式(3)で表される。

$$f_1 \approx \frac{h x f_2}{r} \quad (3)$$

二つ目の条件は反射光が測定試料に遮られずにCCDに到達することである。測定試料の長さを a とし、その限界状態として内面端部の内径測定を想定した場合、二つ目の条件を満足する反射角の条件は、 $\alpha_0 > \tan^{-1} a / 2r$ となり、正反射光を用いることから入射角に関して $\alpha_i > \tan^{-1} a / 2r$ が必要となる。ここで、 $\alpha_i = \tan^{-1} f_1 / h$ であるから、式(4)が得られる。

$$f_1 > \frac{a x h}{2r} \quad (4)$$

一般に、 r の公称値は知られているから、式(3)及び式(4)を用いることができる。

Fig.3 An example of distribution of luminous intensity

Fig.4 Dimension of ferrule

正確な内径の測定を行うためには、測定試料の中心軸と光軸とを合致させることが不可欠である。そこで、本測定装置では試料台に姿勢と位置との調整機構を付加し、二つの軸合せを可能にしている。

3.2 画像数の算出

CCDにより得られた画像データから r_N を得るためには、適当な画像処理が要求される⁵⁾。ここで採用した画像処理の手順を次に示す。

(1) ウィンドウ処理

CCDからの画像データを画像処理装置に取り込みモニターで観察しながらウィンドウ処理を行い、不要な画像データを削除する。ウィンドウの範囲は目視による。

(2) 測定像の抽出

図3にウィンドウ処理後の濃度データの一例を示す。ここの画像処理の目的は、測定像とノイズとを分離し、測定像の中心座標を検出することにある。図3から適当なしきい値を選択することで4個の測定像とノイズとが分離可能であることが推測されることから、固定しきい値処理によりノイズの除去を行う。測定対象により画像の濃度分布が異なるので、適当なしきい値を一義的に定めることができない。そこで、濃度の最頻値をしきい値の初期値として、4点の測定像が抽出されるまで一定値を加算しながら逐次処理を行う。加算幅は図3に示す濃度のピーク値と最頻値との1/10とする。ラベリングされた一つの連結領域の画素数が数点以内と小さい場合にはノイズとして除去する。ただし、測定像の抽出を効率的に行うため、最終的なしきい値は5。1節の実験結果により決定した。

Table 1 Measurement of hole diameter of ferrule

Factor	Level of factor
Replication (R)	2
Focal length of f_1 (F)	2
Specimen (W)	5
Measurement position (P)	2
Repetition (n)	2

(3) 測定像の中心座標値及び画素数 r_N の算出

4個の測定像の中心座標は、式(5)で表される画像の濃度を考慮した重心により求める。

$$g_x = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_i \times b_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij})}, \quad g_y = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_i \times b_{ij})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (b_{ij})} \quad (5)$$

ただし、 x_i, y_i :画素の座標

b_{ij} :各画素の濃度

r_N は得られた4個の中心座標から最小二乗法により算出する。なお、図心による中心座標の算出方法もあるが、精度良く中心座標を得るため、後述する実験結果から重心を採用した。

4. 実験方法

4.1 画像処理

3.2節(2)及び(3)に示す処理を効率的にかつ精度良く行うためには、ラベリングに要する演算回数が最小で、しきい値に依存せず4個の測定像の中心座標が得られる必要がある。そこで、しきい値を11段階に変えて得られる半径値 r の違いについて実験を行った。また、図心による半径値 r と重心によるそれとの比較を行った。

4.2 測定装置の校正

式(2)の右辺第1項の $G(f_3/f_4)$ 及び第2項の $(f_2/f_1)h$ の値を直接得るため、標準試料を用いて校正を行った。標準試料としては内径の知られたリングゲージが適当であるが、JIS規格では $\phi 1\text{mm}$ 未満のリングゲージが定められておらず、入手が困難である。測定装置は4本の光束のうち向かい合う2本を用いるとすきま測定が可能である。そこで、標準試料として複数のブロックゲージを密着させて作製したすきま（以下、標準すきまと称する。）を用いた。標準すきまの寸法は測定装置の測定範囲を考慮して0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0mmの10種である。

実験対象とした焦点距離 f_1 は、64, 100, 200, 400, 640mmの5種である。なお、CCDはX方向とY方向とにおいて画素の大きさが異なることから、2方向を個別に校正した。

4.3 フェルール内径の測定

実際の測定試料として光ファイバ用コネクタのフェルールを用いた。図4にフェルールの形状及び寸法を示し、表1に測定実験の割付けを示す。反復Rは一連の測定実験の回数を示す。焦点距離Fはレンズ1の焦点距離設定値であり、水準は測定対象内径を $\phi 0.125\text{mm}$ としているので、 $f_1=400, 640\text{mm}$ である。試料Wは同一ロットからランダムに選択した5個である。測定位置Pは図4に示す端部近傍 P_1 及び中央部 P_2 である。

Table 2 Specimen for examination influence of roughness

Specimen	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
Ra(μm)	0.01	0.10	0.19	0.34	0.54
Ry(μm)	0.08	0.8	1.6	2.7	4.6

Table 3 Analysis of variance on calibration test of apparatus

(Unit: 0.1 μm ²)			
Factor	S	f	V
β	25684.6	1	25684.6
e	1.0	6	0.2
Total T	25685.6	7	

S: Sum of squares, f: Degree of freedom, V: Variance

β: Regression term, e: Error term

Table 4 Analysis of variance on measured value of hole diameter

(Unit: 0.1 μm ²)			
Factor	S	f	V
R	627.2	1	627.2
F	7296.2	1	7296.2
W	1206.4	4	301.6
P	819.2	1	819.2
e ₃	6184.8	32	193.3
e ₄	89.0	40	2.2
Total T	16222.8	79	

S: Sum of squares, f: Degree of freedom, V: Variance

4.4 粗面の測定

光の反射を応用した測定装置は、測定面の表面性状の影響を受けやすいことが指摘されている⁶⁾。ここでは、表面性状を表す要因の一つである表面粗さを対象に、それが測定値に与える影響について実験を行った。小穴内面の表面粗さを直接測定するのは困難であることから、測定試料として研磨紙により測定面を不規則な粗さに調整したブロックゲージを用いた。表2に試料の表面粗さの測定結果を示す。ただし、測定試料K₁は通常のブロックゲージである。

この実験では図1に示す光束①を試料台に設置したブロックゲージに照射し、測定装置の光軸00'と直交する方向にブロックゲージを0.05mmピッチで変位させて測定像の移動量を検出した。変位量はリニアエンコーダタイプの測長センサ（最小表示値: 0.1μm）により設定した。

5. 実験結果及び考察

5.1 画像処理の結果について

図5にしきい値を変えて得られたフェルールの内径測定における偏差値を示す。ここで、偏差値は得られた11個の内径の平均値からの差を意味する。横軸の単位は図3に示す4個の測定像が得られる最小しきい値（最小濃度値）とピーク濃度値との間を10等分した比で示す。

図5によると、しきい値の設定により、内径の測定値には差異がある。しかし、この測定装置では1画素が約3μmに当たるので、その差異はわずかとなっている。図5(c)において横軸が0の場合を除き、偏差はレンジで1μm程度である。1μmは換算すると0.3画素である。したがって、測定像の抽出に用いるしきい値は最小しきい値に対して10~20%程度の余裕をと

Fig.5 Influence of threshold on measured values in picture processing

れば十分であると考えられる。また、図心による値と重心による値との差は小さく、大きく見積もっても0.1μmであるが、ばらつきは小さい方が望ましいことから、濃度を考慮した重心の値を採用するのが適当と考えられる。そこで、以下の実験では最小しきい値に対し20%加算した値で4個の測定像を抽出し、それらの中心座標を重心により求めた。

5.2 測定装置の校正結果について

表3に標準すきまを用いてX方向を校正した場合の分散分析結果を示す。そのときの校正式を式(6)に示す。

$$r = 0.0019731r_N + 0.03616 \quad (\text{mm}) \quad (6)$$

校正式における誤差分散 V_e' は、回帰項の偏差平方和を S_β 、誤差項の不偏分散を V_e 、標準すきまの個々の寸法を M_i 、その個数を c として式(7)で表される⁷⁾。

$$V_e' = \frac{V_e}{\frac{1}{u} (S_\beta - V_e)} \quad (7)$$

$$\text{ただし, } u = c \sum_{i=1}^c (M_i - \bar{M})^2, \quad \bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^c M_i}{c}$$

表3の数値により計算を行うと校正式における誤差分散は、 $V_e' = 0.64 \mu\text{m}^2$ となる。複数回の校正実験結果に基づいて誤差分散を総合的に評価すると、大き目にみて $V_e' = 1.0 \mu\text{m}^2$ である。

5.3 フェルール内径の測定結果について

表4にフェルールの内径測定値の分散分析の最終結果を示

Fig.6 Influence of roughness on measured results

す。表4における e_3 は検定の結果、効果の認められなかった反復R,焦点距離F,試料W及び測定位置Pに関する交互作用をプールしたものである。また, e_4 は測定の繰返し誤差を表す。表4から、フェルールの内径測定における誤差を求める。測定誤差の要因としては、反復R,焦点距離F,測定位置Pと考えられる。したがって、測定誤差の σ_a はそれぞれの要因の純分散として得られる $\sigma_R, \sigma_F, \sigma_P, \sigma_{e3}, \sigma_{e4}$ から式(8)で表される。

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_F^2 + \sigma_P^2 + \sigma_{e3}^2 + \sigma_{e4}^2} \quad (8)$$

表4の数値から計算すると、 $\sigma_w = 1.7 \mu\text{m}$ である。ここで、測定対象の内径に応じて焦点距離を最適に定めれば焦点距離Fの影響は除かれるので、測定誤差は、 $\sigma_a = 1.0 \mu\text{m}$ となる。 σ_a は前節で得た校正式における誤差を考慮していない。それを含めた測定誤差 σ_T は、誤差の伝播法則により式(9)で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_a^2 + V_0} \quad (9)$$

式(9)により、焦点距離Fの影響を含めた場合の測定誤差は、 $\sigma_T = 2.3 \mu\text{m}$ であり、その影響を考慮しない場合には、 $\sigma_T = 1.4 \mu\text{m}$ である。CCDの1画素が $3 \mu\text{m}$ 程度の感度であることを考慮すれば、測定誤差は小さく、本研究の方法が満足できる結果をもたらしていることが分かる。

5.4 測定値に及ぼす表面粗さの影響について

測長センサの値と測定像の移動量とにより、表面粗さに違いをもたせた5個のブロックゲージそれぞれについて直線回帰式を求めた。通常のブロックゲージK1の直線回帰式における誤差を基準とし、表面粗さの影響についての検討を行った。直線回帰式における誤差 σ は、測定装置の校正時と同様に式(7)から得られる誤差分散 V_0 を用いて式(10)より求めた。

$$\sigma = \sqrt{V_0} \quad (10)$$

図6にブロックゲージごとの誤差を示す。図6から、表面粗さが悪化すると誤差は大きくなる傾向にあるが、すべてについて σ は $1.5 \mu\text{m}$ 以下であり、それほど大きな影響を与えていないことが確かめられる。表面粗さの影響を大きく受けないのは、光の入射角が大きいため、粗面であっても十分な反射光が得られたことによると考えられる。

6. 検 討

画像処理の方法の検討においては、予備実験としてフィルタ処理や平滑化処理等も試みた。詳細は省略するが、測定像

の中心座標値におよぼすそれらの影響は、レンジで0.2画素程度であった。反射率が著しく低い試料や表面に規則的な粗さを有する試料などを測定対象とした場合、ノイズレベルが高くなることが予想され、他の画像処理方法の検討も必要と考えられる。

CCDは分割型のセンサであることから、測定誤差の改善や感度の向上を図るためには、約2倍である本光学系の倍率を高めることが一つの方法として考えられる。一方、それを行うことにより、画像の質を損ね精度の低下を招く可能性があることから、高感度化が期待される非分割型センサの採用も検討する必要がある。

測定試料のアライメントは測定像の目視により行った。測定結果から判断すれば、そのことによる問題点は少ないと考えられるが、アライメント誤差が測定誤差に及ぼす影響を明確にする必要があると考えられる。

一般に、光学的な測定装置では、光源の選択も重要な要素である。今後、その適否についての検討が必要である。

7. 結 論

開発した測定装置の性能を確認するため、幾つかの実験を行った。その結果は次のとおりである。

- (1) 考案した測定装置により、小穴の内径測定が可能なことを確認した。
- (2) 呼び内径が 0.125mm 、長さが 11mm の試料を対象に、開発した測定装置は高アスペクト比(約90)の貫通穴の内径測定が可能なことを示した。
- (3) 測定誤差の大きさは、標準偏差で $2.3 \mu\text{m}$ であり、特定の条件下では、それが $1.4 \mu\text{m}$ である。
- (4) 測定表面の粗さは測定結果に影響を与えるが、粗さに起因する測定誤差は小さい。

謝 辞

本研究の遂行に当たり貴重な助言をいただいた通産省工業技術院計量研究所豊田幸司室長に感謝します。測定装置の製作にご協力いただいた(株)五味工業、(株)フィット、(株)柴田エンジニアリングの各社に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 青木保雄：精密測定(1), コロナ社, (1984) 101.
- 2) 植木正明, 大岩 彰, 金田良作：光波干渉式内径絶対測定装置, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1984) 913.
- 3) 鬼鞍宏猷, 桑原義治, 中村泰三, 佐島隆生, 今関義朗, 甲木昭雄, 山田靖二：光学式内径測定器の開発-光学的解析, 基礎実験, 試作及び性能試験-, 精密工学会誌, 61, 2 (1995) 248.
- 4) 近藤文雄：レンズの設計技法, 光学工業技術研究組合, (1979).
- 5) 例えば, 田中 弘：画像処理応用技術, 工業調査会, (1989).
- 6) 田中敏幸, 鮎沢 隆, 丸山六男：光変位センサの変位検出特性, 先端加工学会誌, 12 (1993) 103.
- 7) 朝香鐵一ほか：測定法の改善と測定誤差の評価, 日本規格協会, (1979).