等間隔ピッチ信号とレーザビームの平行走査 位置を同期させた光学式外径測定機*

種田修一** 宮澤君男*** 片山一郎*** 柳 和久†

Optical Measurement System of Diametral Dimension by the Synchronous
Pitch Signal with a Parallel Scanning Laser Beam

Syu-ichi TANEDA, Kimio MIYAZAWA, Ichiro KATAYAMA and Kazuhisa YANAGI

This development paper describes the optical measurement system of diametral dimension by parallel scanning of a laser beam. The measure is taken by counting the synchronous pulses with the scanning position of the beam. The pulse signal is generated with a linear scale composed of the optical slits at an equal space on the rotational scanning unit. Therefore a high-precision constant speed motor and fundamental optical components such as a scanning polygon mirror and an $F\theta$ lens fall into disuse. Its compact size and omission of complicated electronic circuits for time-consuming calculation are also strong points of the developed measurement system.

Key words : noncontact measurement, diameter, laser beam, parallel scan, synchronous pulse, linear scale

1. 緒 言

機械要素部品や種々の工業製品においてはその幾何学的品質を保証するために、寸法と形状が重要な管理項目となっている。そのため、製造工程、検査工程を問わず正確かつ精密な測長機器が不可欠な状況にある。

昨今は、測定作業の高速化と操作性の容易さが重視される傾向にあり、光学式の非接触測定法に対する期待が大きい。その中でも、レーザを用いた外径測定機は幅広く活用されており、形態と測定法のバリエーションも豊富である。しかしながら、当該機器の大半は、高精度な機械・光学部品とマイクロプロセッサを初めとする演算回路を必要とすることから比較的高価な設備に位置付けられている。

そこで、レーザビームの平行走査式外径測定機において、複雑な電子回路による演算が不要で、高精度の機械・光学部品による走査機構を必要としない新しい測定原理の開発を行った。すなわち、2枚の平行ミ

ラーによりビームを平行走査する回転機構と、そのビームの走査位置と同期して長さ測定の基準信号が発生する光学システムを構築した。本論文は、ここで開発した外径測定機における測定原理の詳細と、基本的な測定誤差の要因解析を示すとともに、試作機によって達成された測定精度の実測値を報告することを目的としている。

2. これまでの光学式外径測定機

これまでに開発された光学式の非接触外径測定機は大別して、(I) 小径レーザビームの平行走査時に被測定物でそのビームが遮られた時間を計測する方法¹⁾²⁾と(II) スリット状光束を被測定物が遮った影の幅を測定する方法とがある。測定値の分解能の点において前者が優位と考えられている。その一例として図1に測定システムのブロック構成図を示す¹⁾。

光学系はレーザ、等速回転モータに取り付けたポリゴンミラー、 $F\theta$ レンズ及びフォトダイオード (PD) から構成される。モータがクロックパルスに同期等速回転することにより、レーザビームは被測定物に等速平行走査する。その透過光は集光レンズを通り、PDに集められ走査信号として検出される。走査信号とクロックパルスの関係は図2のようになる。クロックパルスの周波数を H 、レーザビームが被測定物によっ

* 原稿受付 平成4年5月11日

** 正 会 員 ユニオンツール(株) (長岡市摂田屋町字外川2706-6)

*** ユニオンツール(株)

† 正 会 員 長岡技術科学大学工作センター (長岡市上富岡町1603-1)

Fig. 1 A representative measurement system on the market

Fig. 2 Relationship between scan signal and clock pulse

て遮られた時間を T ，その間に計数したパルス数を N_0 ，走査速度を V とすると，被測定物の外径 D は次式により求められる。

$$D = VT = \frac{VN_0}{H} \quad (1)$$

しかしながら式 (1) を成り立たせるためには V が一定であることが絶対的条件となる。実際にはモータの理想的な等速性が得られないことや， $F\theta$ レンズの $F-\theta$ の特性により V が一定となり難しく，走査ごとのばらつきを生じやすい。そのため，一般に高速走査によりデータを多数回取り込み，統計演算処理をして外径を算出するシステムとなっている。

3. 等間隔ピッチ信号とレーザービームの平行走査位置を同期させた光学式外径測定機

3.1 測定原理

新しく開発した光学式外径測定機のシステムブ

ロック構成を図 3 に示す。本機は，2 枚のミラーとガラススケールを取り付けた円盤（以後，回転スキャナと称する）を用いる。2 枚のミラーは段違いにかつ一定の間隔で平行に対向して取り付けられ，ガラススケールはスリットが扇形の弦と垂直に等ピッチで並ぶリニアタイプである。

光学系は，回転スキャナ側とリニアスケール側の 2 つから成り立っている。

回転スキャナ側光学系は可視半導体レーザー (LD 1) を光源に使い，測定位置に焦点を絞り込むためのレンズ系を組み合わせたユニット構成としている。可視光を用いる理由は，被測定物上での走査位置の確認を容易にするためである。

ユニットから発光されたレーザービームは取り付けられた 2 枚のミラーで反射し回転スキャナにより被測定物を平行に走査する。その透過光は集光レンズを通りフォトダイオード (PD 1) で受光され，走査信号として検出される。

リニアスケール側光学系は，半導体レーザー (LD 2) を光源としてレンズ系によりガラススケールの数 μm 幅のスリット上で焦点を結ぶ。その透過光をフォトダイオード (PD 2) で受光し，出力信号波形整形回路でパルス化しスケールのピッチ信号とする。

(Optical system for the SCALE)

Fig. 3 Block diagram of the present system

Fig. 4 Relationship between scan signal and SCALE pitch signal

図4には、走査信号とスケールのピッチ信号の関係を示す。レーザービームの平行走査位置を A 、スケール上の読取り幅を B 、スキャナの回転角を θ 、2枚のミラーの間隔を W 、回転中心からスケール上のレーザービームのスポット位置までを R とすると、 A, B は

$$A = 2W \sin \theta \quad (2)$$

$$B = R \sin \theta \quad (3)$$

となり、これらより

$$A = \left(\frac{2W}{R} \right) B \quad (4)$$

が得られる。

回転スキャナ側のレーザービームが被測定物に遮られている間のスケールのピッチ信号のパルス数 N_D を B に換算すれば、式(4)により被測定物の外径 D が求まる。式(4)は θ が消去されているので、走査信号とスケールのピッチ信号が完全に同期していることを意味する。

また、各信号の速度はスキャナの各速度を ω とすると

$$V_A = \frac{dA}{dt} = 2W\omega \cos \theta \quad (5)$$

$$V_B = \frac{dB}{dt} = R\omega \cos \theta \quad (6)$$

となり、等速ではなく $\cos \theta$ の関数となっていることがわかる。

3.2 特長

本機は従来の測定機と比べ、次に示す特長をもつ。

- (1) 走査信号とスケールのピッチ信号は完全に同期しているのでモータの等速回転性は必要としない。
- (2) ポリゴンミラー、F θ レンズを用いず、2枚のミラーを平行に取り付けたスキャナを回転させる

Table 1 Specifications of the present system

Measuring range	0.5-30 mm
Resolution	1 μ m
Linearity*	$\pm 1 \mu$ m
Repeatability	$\pm 1 \mu$ m
Error in the scanning direction	$\pm 2 \mu$ m
Error in the direction of optical axis	$\pm 1 \mu$ m
Number of scanings	40 s ⁻¹
Measurable region	Axial direction of laser beam ± 5 mm Scanning direction ± 15 mm

* Deviation over the measuring range

Fig. 5 Scanning direction and direction of optical axis

ことで平行走査光が発生する。

- (3) CPU を用いずに簡単な電子回路構成によりシステムを組めるため、装置を小型化できる。
- (4) 高精度のガラススケールを用いるので、スケールのピッチ信号は高精度の演算基準値となる。

3.3 設計仕様及び構成

本機の設計仕様を表1に示す。測定精度に関しては、図5に示すように被測定物を走査方向に移動した場合の表示値の変化量である走査方向誤差 (UP-DOWN 誤差) と、光軸方向に移動した場合の光軸方向誤差 (パラレル誤差)、測定中心位置に置いた被測定物の種々の直径に対する誤差 (偏差量) であるリニアリティ、そして読取り値の繰返し精度をもって表すことができる。いずれの項目も測定領域内で保証する必要がある。

回転スキャナは、 $W=15$ mm、 $R=30$ mm で設計し、 $\theta=\pm 30^\circ$ で 30 mm の走査幅を得る。ガラススケールは 4 μ m パターン、8 μ m ピッチのものを用いて 1 周期 8 μ m の正弦波状のスケール信号を発生さ

Fig. 6 SCALE signal and divided pitch signal

Fig. 7 Photographic view of the developed measurement system

Fig. 8 Fine adjustment of beam spot in R , δ and θ directions

せ、電氣的に8分割された分解能 $1\mu\text{m}$ のピッチ信号に変換する。図6にスケール信号と計数用ピッチ信号の出力波形を示す。

これらの構成により製作した測定機の外観写真を図7に示す。測定部と制御部を一体化しており、従来のものに比べ小型、軽量となっている。

Fig. 9 Influence of beam spot position in R direction on the linearity Fig. 10 Misalignment $\Delta\theta$ of the scale

4. 誤差要因と測定誤差の低減

測定精度を示すリニアリティと走査方向誤差を低減するため、本開発システムでは図8に示すようにスケール側光学系のビームスポット位置を R , θ 両方向に微動できる機能を備えている。

4.1 リニアリティの調整と R 微動

リニアリティを最適化するには式(4)において比例定数 $2W/R$ の値をできるだけ1に近づけることが不可欠となる。設計仕様は $W=15\text{mm}$ であるが、組立時には位置決め誤差を伴うための R の微動 ΔR を行い、 $R=2W$ とする調整を行う。

図9は、 R と $2W$ の大小関係による実機でのリニアリティの変化を示す。 $R=2W$ となった位置で、最もリニアリティが保たれることがわかる。

4.2 走査方向誤差の低減

走査方向誤差は、ガラススケールが平行ミラーに対して傾いて取り付けられた場合に生じる。

図10に誤差解析のためのモデルを示す。ガラスス

Fig. 11 Theoretical error in the scanning direction by the misalignment $\Delta\theta$ of the scale

Fig. 12 Experimental error in the scanning direction by δ

ケールが平行ミラーに対して、傾き $\Delta\theta$ をもって取り付けられた場合のスケールの読取り幅 B は、次式によって与えられる。

$$B = B_1 + B_2 \quad (7)$$

ここで、

$$B_1 = R \sin(\theta_1 - \Delta\theta) + R \sin \Delta\theta$$

$$B_2 = R \sin(\theta_2 - \Delta\theta) + R \sin \Delta\theta$$

外径 $D_0 = 10$ mm の被測定物について走査方向誤差を数値計算した結果が図 11 である。

図 12 は図 8 に示したレーザビームのスポット位置が θ 方向に微動したときの走査方向誤差変動を示す。但し、角度 θ は R に比べ非常に小さいので、スポッ

Fig. 13 Linearity obtained by the experiments

Fig. 14 Experimental error in the scanning direction

Fig. 15 Experimental error in the direction of optical axis

トの接線方向変位 δ との関係を示した。これらよりガラススケールの傾き $\Delta\theta$ によって生じる走査方向誤差は、レーザビームのスポット位置を θ 方向に微動させることにより低減することがわかる。

5. 性能評価

R と θ を微動調整した後のリニアリティと走査方向誤差を測定した結果を図 13, 14 にそれぞれ示す。リニアリティの測定には、真円度公差 $1 \mu\text{m}$ 、寸法公差 $\pm 1 \mu\text{m}$ のピンゲージ (0.2~30 mm) を用いて行った。その結果、ピンゲージの公差を含めて $\pm 2 \mu\text{m}$ のリニアリティが得られた。一方、 $D_0 = 10$ mm のピンゲージを用いた場合の走査方向誤差は $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内であった。

図 15 に光軸方向誤差を示す。測定中心位置に対して、 ± 5 mm の範囲で $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内の指示値が保証されている。

本機の実用例として、複雑断面形状の 2 枚刃エンド

ミルの外径測定に適用してみた。この場合には最大値ホールド機能を付加し、被測定物を回転させながら測定する方式を取った。その結果、測定値の繰返し精度は、量子化誤差 ($\pm 1 \mu\text{m}$) 程度であることが確かめられた。

6. 結 言

- (1) レーザビームの平行走査位置に完全同期した等間隔スケールのピッチ信号を読み取ることで被測定物の外径をデジタル測定する光学システムを開発した。
- (2) リニアリティ、走査方向誤差要因を解明し、リニアスケール側光学系のビームスポット位置を R, θ 両方向に微動させることで要求仕様を達成

した。

- (3) 光軸方向誤差及び繰返し精度は、スケール信号の量子化誤差程度であることを示した。

本論文で開発した測定機の性能と機能を更に向上させるため、(1) ピッチ信号の高分解能化、(2) 極細物体への対応と測定範囲の拡大、(3) 測定速度の向上、等に関する研究開発を進めることが必要である。

参 考 文 献

- 1) レーザースキャンマイクロメーター技術解説書、(株)ミツトヨ、(1991.5)、または、走査型光学式寸法測定方法、公開特許広報 (A) 昭 62-184305。
- 2) 非接触外径測定装置バルコムオプットの活用例、東京精密技報、9, 24 (1991) 1。

(p. 216 より続く)

その結果以下のような成果が得られた。

- (1) 工具の交換特性は工具の心ずれ、位置決め精度、姿勢変化により評価できる。
- (2) 回転特性は主軸および工具の軸心の運動挙動、工具の主軸に対する相対軸心運動挙動と各運動のベクトル方向により評価できる。
- (3) 以上の評価を効率的に行うためのグラフ表示法を提案できた。
- (4) 工具交換特性の絶対空間座標系での評価は、回転特性を主軸と工具独立にかつ同時に評価することにより可能となる。
- (5) 30 番という比較的剛性の低い主軸では工具クランプによる主軸自身の変形に留意する必要がある。これを小さく抑えるためには以下の点に注意する必要がある。
 - (a) 超高速用としては軽量でかつ剛性の高いものである必要がある。
 - (b) 以下のような工具交換系の構成要素の高精度化を図る。
 - ① 工具、主軸のテーパ結合面の形状精度
 - ② テーパ穴の軸心と主軸軸心の同軸度および平行度
 - ③ ドローインボルトと工具の同軸度
 - ④ ドローインボルトの曲がりあるいは直角度
 - ⑤ ドローバーとドローインボルトとの結合精度
 - ⑥ ドローバーと工具の同軸度

- (6) テーパ結合部に適度な粘度を持つ潤滑油を供給することにより心ずれを小さくし、振動レベルを減衰させることができる。

- (7) 工具重量が大きいかほど工具交換精度は低下する。超高速主軸に適用可能なオートバランスを提案し、以下のような結果を得た。

- (1) 本研究で提案したバランス原理ならびに機構は基本的に妥当である。
- (2) 本バランスは原理的に超高速主軸に適用可能であり、強度を無視するならば、最高回転数ならびに主軸系の質量、剛性などに合わせて各パラメータを設定することにより回転数の制限を受けずに設計可能である。
- (3) バランシング時間は、ポケットからチャンバに流れ込む補正流体の流量を制御する弁の開度に大きく左右され、この開度は内部おもりの質量と内部ばねの静剛性の影響を強く受ける。
- (4) バランシング精度は、弁の開閉精度に大きく依存しており、高いシール性能と線形ばね特性を持った高精度な弁開閉機構が必要である。
- (5) チャンバ容量に限界があるため、アンバランス位置により補正可能な最大アンバランス量が変化する。
- (6) 本バランスを実機に適用する場合は設計回転数でバランシングを行うとバランシング時間を最短にできる。
(服部 敏夫)