3 軸角度センサに関する研究*

— 測定原理の提案と検証実験 —

齋 藤 悠 佑** 荒 井 義 和*** 高 偉***

Development of a Three-axis Angle Sensor
- Proposal of the Measurement Principle and Identification Experiments -

Yusuke SAITO, Yoshikazu ARAI and Wei GAO

This paper describes a 3-axes angle sensor based on laser autocollimation for simultaneous measurement of small tilt angles about X, Y and Z-axes. The sensor consists of a laser diode as the light source and quadrant photodiodes (QPDs) as the optical position-sensing device. Differing from a conventional 2-axis autocollimator, the sensor uses a diffractive grating as the target mirror. It is verified that the sensitivity of the sensor in the θ_x (rolling) direction is determined by the pitch of the diffractive grating and the diameter of the laser beam. The sensitivities in the θ_y (pitching) and the θ_z (yawing) direction are determined by the wavelength and the beam diameter of the laser beam. It is confirmed that the resolution of θ_x is about 0.2 arc-seconds, and those of θ_y and θ_z are about 0.02 arc-seconds. Optical design and experimental results are presented.

Key words: laser autocollimation, sensitivity, 3-axis angle sensor

1. 緒 言

位置決め技術の進歩に伴い、工作機械や半導体製造装置等の産業機械に組み込まれている直動機構や回転機構に対して高速化、高精度化への要求が大きくなっている。近年これらの要求に加え、装置自体の小型、軽量化そして信頼性の向上が望まれている。また、これらの装置を用いて製造される非球面レンズ、半導体ウエハなどに対してはサブマイクロメートルオーダーの高い形状精度が求められており、このような超精密加工品の形状評価を行うツールの開発が望まれている。こうした背景の中、超精密形状測定や、超精密運動の姿勢に関する情報のダイナミック評価を行うため、従来の微小位置検出技術に加えて、多自由度の微小角度変位を高感度、高速、非接触に計測する要求が高まっており、角度情報を基準とした精密計測について多くの研究が行われている^{1)~4)}。

このような微小角度変位を計測する手段として光学系が比較的単純であり、高精度角度計測が可能なオートコリメーション法⁵⁾を用いた光学式角度センサがある。この角度センサでは光源から X 軸に沿って出力される光ビームが被測定物に取り付けられた平面ミラーに入射する。今、被測定物に Z 軸回りの微小角度変位（ヨーイング $\Delta\theta_z$ ）が生じた場合、その傾斜角度に応じて反射光は X 軸に対して $2\Delta\theta_z$ 傾き、その角度変位に伴ってセンサの対物レンズ焦点面上における光スポット位置が $\Delta d_{h-\theta z}$ 変位する。 $\Delta d_{h-\theta z}$ を CCD 等の光位置検出素子で測定すれば、角度変位量 $\Delta\theta_z$ を次のように求める事ができる。

$$\Delta\theta_z = \frac{\Delta d_{h-\theta z}}{2f} \quad (1)$$

ここで f は対物レンズの焦点距離であり、 $\Delta\theta_z$ が十分に小さいとする。対物レンズの焦点面上での光スポットの 2 次元変位量を検出する事によってヨーイングのみならず、Y 軸回りの微小角度変位（ピッチング $\Delta\theta_y$ ）も同時に測定する事が可能である。

筆者らはこれまで小型の半導体レーザ（LD）と分割型フォトダ

イオード及び短い焦点距離の対物レンズとを組み合わせる事で、高感度、高速、小型な 2 軸角度センサの開発を行ってきた⁶⁾。しかし角度検出に平面ミラーを用いるこれら従来のオートコリメーション法では測定対象に X 軸（光軸）回りの角度変位（ローリング θ_x ）が生じた場合、対物レンズ焦点面上の光スポットに変位が生じないため、角度変位 $\Delta\theta_x$ を検出できないという問題がある。レーザ光源と CCD 素子とを組み合わせた市販の小型角度センサに関しても同様の事が言える⁷⁾⁸⁾。

そこで本研究では従来反射面として用いていた平面ミラーの替わりに反射型矩形回折格子を用い、発生する反射回折光成分のうち、0 次光と ± 1 次光の光スポット位置変位量を利用した 3 軸角度一括計測を行う手法を提案する。超精密位置決め分野における動体の姿勢制御に用いる事を考慮し、測定範囲 30 秒、分解能 0.1 秒（周波数帯域 1kHz 時）をセンサ開発の目標とする。本稿では主に 3 軸角度測定原理と検証実験結果について述べる。

2. 3 軸角度検出原理

2.1 3 軸角度変位の検出

反射面である回折格子に対してレーザ光を入射させ、発生した回折光成分のうち、0 次光、 ± 1 次光が対物レンズを通過した後、焦点面上で集光する様子を図 1 に示す。 ± 1 次回折光の回折角 θ_a は回折格子の格子周期 p と光源波長 λ を用いて次の式で表される。

$$\theta_a \approx \frac{\lambda}{p} \quad (2)$$

式(1)、(2)を用いて対物レンズ焦点面上において ± 1 次光が集光する位置 δ_1 は次のように表せる。

$$\delta_1 \approx \frac{f\lambda}{p} \quad (3)$$

即ち、 ± 1 次回折光は 0 次回折光に対して常に $|\delta_1|$ だけ離れた位置に集光する事が分かる。

まず初めにこのような光学系におけるピッチング $\Delta\theta_y$ 、ヨーイング $\Delta\theta_z$ の角度検出について述べる。2 軸の角度検出には 0 次光を用い、0 次光スポットの対物レンズ焦点面上での変位量の検出を行う。この場合の角度計測は平面ミラーを用いたオートコリメー

* 原稿受付 平成 19 年 12 月 12 日

** 学生会員 東北大学大学院

*** 正 会 員 東北大学工学研究科（仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01）

Fig.1 Principle of three-axis angle detection

シオン法と原理的に同様であり、焦点面上での垂直方向（V 軸）と水平方向（H 軸）でのスポットの変位量（ $\Delta d_{v, \theta_y}$, $\Delta d_{h, \theta_z}$ ）を検出する事で測定する。図 1 は回折格子に $\Delta\theta_z$ の角度変位が生じた場合、焦点面上における 0 次、-1 次光スポットの集光位置の変位に着目している。図 1 に示したように、測定対象が微小に傾いた場合、-1 次光スポットは 0 次光スポットに対し常に $|\delta_1|$ の間隔を保ったまま 0 次光スポットと同じだけ変位するため、 ± 1 次光を用いた 2 軸方向の検出も可能である。

次に、ローリング方向角度変位の検出方法について述べる。回折格子に微小なローリング方向角度変位 $\Delta\theta_x$ が生じると図 2 に示したように、 ± 1 次光スポットは 0 次光のスポットを中心として回転変位を生じる。この変位は微小であるため、 $\Delta\theta_x$ の角度変位によるスポットの変位量 $\Delta d_{v, \theta_x}$ は次の式(4)で表せる。

$$\Delta d_{v, \theta_x} \approx \delta_1 \Delta\theta_x \quad (4)$$

また、反射面のローリング方向角度変位に従って対物レンズ焦点面上では ± 1 次、-1 次回折光スポットは逆符号で同じ変位が発生するため、位置検出素子で変位量を検出しその差動出力を取る。ローリング方向の出力を V_{θ_x} とすれば、次の式(5)が成立する。

$$V_{\theta_x} \approx \frac{(\Delta d_{v, \theta_y} + \Delta d_{v, \theta_x}) - (\Delta d_{v, \theta_y} - \Delta d_{v, \theta_x})}{2} = \Delta d_{v, \theta_x} \quad (5)$$

図 2 に示したように、ローリング方向角度変位と同時にピッチング方向角度変位が生じていた場合、式(5)を用いてこの影響を取り除く事が可能となる。

以上の原理を用いる事で 3 軸の角度変位を一括で測定する事が可能なセンサを構成する事ができる。但し従来の 2 軸角度センサの場合と異なり、 ± 1 次光を角度検出に用いているため回折光の拡がり対物レンズの径よりも大きくなると、ローリング方向の検出ができなくなる。このため、本検出方法を用いた場合、使用できる X 軸方向の作動距離に制限がある。

2.2 4分割フォトダイオード (QPD) を用いた 3 軸角度検出

3 軸角度センサには応答速度が速く、高感度に 2 次元の光ス

Fig.2 Schematic of spot displacement when θ_x changes

Fig.3 Spot displacement on the photodiode

ット位置を検出する事のできる QPD を用いる。図 3 は焦点面上における光スポットの変位の様子を示しており、V 軸方向と H 軸方向の入射光束直径をそれぞれ D_y , D_z とすれば、焦点面上でのスポット半径 r_{y0} , r_{z0} はそれぞれ以下の様に表せる。

$$r_{y0} = 1.22 \frac{f\lambda}{D_y}, \quad r_{z0} = 1.22 \frac{f\lambda}{D_z} \quad (6)$$

また、QPD の角度変位に応じた出力を導出する。式を簡略化するため PD 素子の間にある隙間（不感帯）は存在しないものとし、QPD 上のスポットの光強度分布は一様、さらに各 PD 素子の光強度・電流変換感度が一定であると仮定する。このように仮定する事で、各素子から出力される入射光量に応じた光電流の値は、それぞれの素子に入射するスポットの面積に比例する。図 3 に示したように $\Delta\theta_z$ の角度変位が反射面に生じた場合、式(1)から焦点面上で半径 r_{h0} のスポットが $\Delta d_{h, \theta_z}$ だけ変位する。この変位に伴って各素子上におけるスポット面積 $S_A \sim S_D$ が増加あるいは減少する。スポットの変位量は微小であるため QPD 上における相対的なスポット面積の変位量は図 3 の $2r_{y0} \times \Delta d_{h, \theta_z}$ で表される長方形で近似できる。素子 A,B 上のスポット面積は $2r_{y0} \times \Delta d_{h, \theta_z}$ だけ増大するため、PD 素子 A,B からの光電流出力は増大し、逆に素子 C,D の光電流出力は減少する。その相対的な出力の変化量は近似的に $4r_{y0} \Delta d_{h, \theta_z}$ で表せる。また、光スポットの全体の面積は πr_{h0}^2 と表せるので QPD 上でスポットが中心位置から微小に移動した際の出力値 $H_{\theta_z, out}$ が次のように求められる。

$$H_{\theta_z, out} = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \times 100(\%) = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} \times 100(\%) = \frac{4\Delta d_{h, \theta_z}}{\pi r_{h0}^2} \times 100(\%) \quad (7)$$

同様にピッチングの角度変位 $\Delta\theta_y$ が生じた場合には QPD からの出力値 $V_{\theta_y, out}$ は次のように求められる。

$$V_{\theta_y, out} = \frac{4\Delta d_{v, \theta_y}}{\pi r_{y0}^2} \times 100(\%) \quad (8)$$

ピッチング、ヨーイング方向のセンサ感度 S_{θ_y} , S_{θ_z} はそれぞれ式(1), (7), (8)を用いて次のように表せる。

$$S_{\theta_y} \propto \frac{V_{\theta_y, out}}{\Delta\theta_y} = K_{\theta_y} \frac{D_y}{\lambda} \quad (9)$$

$$S_{\theta_z} \propto K_{\theta_z} \frac{D_z}{\lambda} \quad (10)$$

ここで K_{θ_y} , K_{θ_z} は定数である。式(9), (10)から角度センサのピ

ッチング, ヨーイング方向の感度は対物レンズに入射するビームの直径に比例し, ビーム波長に反比例する事が分かる. この2方向の感度を揃えるため, ビーム形状は円形である事が望ましい.

次にローリング方向のセンサ感度 S_{θ_x} を計算する. 光スポットの変位量に伴う QPD からの出力値 $V_{\theta_x, out}$ はピッチング, ヨーイングの場合と同様に, 次の式 (11) で表せる.

$$V_{\theta_x, out} = \frac{4\Delta d_{v, \theta_x}}{\pi r_{v0}} \times 100(\%) \quad (11)$$

式(3), (4), (6), (11)を用いてローリング方向のセンサ感度 S_{θ_x} は以下のように表せる.

$$\begin{aligned} S_{\theta_x} &\propto \frac{V_{\theta_x, out}}{\Delta\theta_x} \\ &= K_{\theta_x} \frac{D_y}{p} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで K_{θ_x} は定数である. 式(12)から角度センサのローリング方向の感度は対物レンズに入射するビームの直径に比例し, また反射面の格子周期 p に反比例する事が分かる.

2.3 3 軸角度センサの出力特性シミュレーション

2.2 節では式の簡略化のため PD 素子間の隙間の影響を無視し, 角度検出の感度に及ぼす要素について考察を行ったが, QPD に代表される分割型 PD には, 図3に示したように数 μm ~ 数十 μm 程度の隙間が存在する. 光スポットがこの隙間上を通過するため, 隙間が存在する事によるセンサ出力への影響を考慮する必要がある. そこで光学系をモデル化し, 角度変位に応じた QPD の出力値をシミュレーションによって求めた. 角度センサの出力は数値積分によって各 QPD 素子上のスポット面積 $S_a \sim S_b$ を計算した. スポット形状を円形とすれば, ピッチングとヨーイングの角度出力は一致するため, 結果はヨーイング角度出力についてのみ示す. 入射ビームの条件として, ビーム強度が 1 mW, ビーム形状が $D_0 = D_y = D_z$ と表される円形であるとし, スポットの強度分布は半値幅が $D_0/2$ である理想的なガウス分布と仮定する. なお実験においては角度センサの測定範囲が小さく, 対物レンズの光軸付近のみが検出に用いられるため, 無収差理想光学系と仮定する. この条件に加え, 対物レンズの焦点距離 $f = 40 \text{ mm}$, ビーム径 $D_0 = 1 \text{ mm}$, 光源の波長 $\lambda = 635 \text{ nm}$ とし, 隙間のサイズ g を $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$ と変化させる. 焦点面上の光スポットの直径は式(6)より $62 \mu\text{m}$ 程度と求められる.

この場合のセンサ出力 $H_{\theta_z, out}$ と入力 $\Delta\theta_z$ との関係についてのシミュレーション結果を図4に示す. 隙間サイズ g が大きくなるとセンサ出力曲線の中心部の傾斜が大きくなり, 見かけ上のセンサ感度が向上する. 但し, 測定範囲はスポットの大きさに依存するため, g が大きくなるにつれて狭くなる. また, g が大きくなると, 隙間部分に入射する光量は増大するため, 各素子からの出力が減少する. それによって, PD 用 I/V 変換回路等における電気ノイズの影響を受けやすくなり, 角度センサ出力の信号ノイズ比 (SN 比) が低下するという実用上大きな問題を生じさせる. このためスポットサイズと隙間 g の関係を考慮して光学系の設計を行う必要がある. また, 光スポットが隙間に埋もれてしまうと出力が得られなくなってしまう可能性もあるため注意が必要である.

次に, ローリング方向角度変位に対する出力シミュレーションを行った. 隙間サイズ $g = 10 \mu\text{m}$ として, 格子周期 p を $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$ と変化させた. それ以外のシミュレーションの条件は同様である. このシミュレーション結果を図5に示す. 図5の結果から, 式(12)で表されているように θ_x 方向センサ感度は格子周期 p に反比例して向上する事が確認できる.

Fig.4 Simulation result of sensor output for $\Delta\theta_z$ angle detection ($D_0=1 \text{ mm}$, $f=40 \text{ mm}$, $\lambda=635 \text{ nm}$)

Fig.5 Simulation result of sensor output for $\Delta\theta_x$ angle detection ($D_0=1 \text{ mm}$, $f=40 \text{ mm}$, $g=10 \mu\text{m}$)

3. 光学系

図6に3軸角度検出原理を検討するために設計した3軸角度センサの光学系を示す. 反射面として奇数次数の回折効率が高い特徴を持つ矩形格子を使用する. 矩形格子にビームが入射すると回折光が発生する. その反射回折光は対物レンズを通り, それぞれレンズの焦点面上の異なる場所に集光するため, その集光位置に QPD を配置する. このため, 3つの QPD が必要となる. また, 角度検出に関して, 測定ターゲット (矩形格子) に各軸回りの角度変位が生じると, 焦点面上のスポットが変位するので, 0 次光のスポットの変位でピッチングとヨーイングを, ± 1 次光でローリングを検出する事で, 従来の2軸角度センサの光学系⁹⁾から大幅な変更無しに3軸角度検出を行う事ができる.

4. 検証実験

4.1 実験方法

図6に示した光学系に基づく検出原理確認用の3軸角度センサ (以下タイプ1) を製作した. 光源 LD のビーム径は楕円形状であり, 長軸 (Y) 方向 5.1 mm, 短軸 (Z) 方向が 4.9 mm である. また対物レンズにはアクロマティックレンズ ($f=60 \text{ mm}$, $\text{NA}=0.33$) を用い, QPD (隙間 $g=10 \mu\text{m}$) をその焦点面上に配置した. 測定ターゲットの矩形格子の格子周期は $5.5 \mu\text{m}$ である. このセンサが3軸の角度を検出できる事を確かめるため評価実験を行った. 3軸の角度を独立に発生させるため, 2軸チルトステージと1軸ゴニオステージを組み合わせたステージに矩形格子を取り付け, それぞれのステージを PC の DA, IO ボードを通じて制御する. また, 角度変位は市販のオートコリメータ (Nikon 製 PA102S) により同時に測定する. オートコリメータの最小読み取り値は 0.01 秒, 測定範囲はアナログレンジで ± 300 秒である. また, 応答周波数は約 67 Hz である. タイプ1とオートコリメータのそれぞれの出力は AD ボードを介し PC に取り込まれる.

4.2 センサ特性曲線

製作したタイプ1の出力特性の測定を行った. まず, 1軸ゴニ

Fig. 6 Optical layout of the 3-axis angle sensor (Type 1)

オステージに PC の IO ボードを通して振幅 300 秒程度の角度傾斜を与え、そのローリング角度変位を測定した。測定結果を図 7(a) に示す。図の横軸はオートコリメータの角度出力値であり、縦軸はタイプ 1 の出力を表している。また図の右肩にグラフの傾きで表されるセンサ感度を示した。この数値が大きい程高感度なセンサであるといえる。また、ピッチング、ヨーイングの出力特性の評価については、2 軸チルトステージに PC の DA ボードを通して振幅約 50 秒の角度傾斜を与える事で、同様に測定を行った。それぞれの結果を図 7(b), (c) に示す。図には感度と標準偏差も示されている。 θ_x , θ_z 方向の測定感度の違いはビーム形状が楕円形である事に起因している。

以上 3 つの出力特性のグラフにはデータ点と、データ点の最小自乗法から求めた近似直線を同時に示している。これらの結果から、各軸回りの角度変位に応じて製作したセンサから線形的な出力が得られているため、3 軸の角度を検出可能である事が分かる。また、各軸回りのセンサ感度について評価すると、ローリング方向のセンサ感度が他の軸回り方向のセンサ感度に比べて低い事が分かる。この原因として、2.2 節で述べたように格子周期と光源レーザの発振波長の違いがある。各軸のセンサ感度は式(9), (10), (12)で表されるが、今回使用した矩形格子は格子周期が $5.5 \mu\text{m}$ であるので LD の発振波長 635 nm に比べ 8.6 倍ほど大きい。このため、ローリング方向の感度は他の 2 方向に比べて低くなる。また、ローリング検出に用いる ± 1 次光は 0 次光に比べてレンズの端を通るため、レンズ収差の影響からセンサ感度がさらに低下している。

4.3 ± 1 次光スポット変位のみを用いた 3 軸角度検出

タイプ 1 の 3 軸角度検出方法は、0 次光スポットの変位量を用いてピッチングとヨーイングを、 ± 1 次光スポットの変位量の差動をとってローリングを求めていた。しかし、4.2 節で述べたように ± 1 次光がレンズ収差の影響を受けてしまうため、感度が低下してしまう問題がある。そこで図 6 に示したタイプ 1 の光学系においてそれぞれの QPD に対して対物レンズを配置し、レンズの中心を回折光が通過するように調整する。さらに光学系の簡略化のために 0 次光検出用の光学系を省略し、 ± 1 次光の 2 つのスポット変位量のみを用いて 3 軸の角度を検出する方法 (タイプ 2) について検討する。この場合、ピッチング方向の角度は図 2 から、 $+1$ 次光と -1 次光の出力の足し合わせで求められる。即ち、

$$V_{\theta_y} \approx \frac{(\Delta d_{v-\theta_y} + \Delta d_{v-\theta_x}) + (\Delta d_{v-\theta_y} - \Delta d_{v-\theta_x})}{2} = \Delta d_{v-\theta_y} \quad (13)$$

ヨーイング方向についても同様に考える事ができる。今、ローリング変位による H 軸方向変位を $\Delta d_{h-\theta_x}$ とすると、ヨーイング方向出力 H_{θ_z} は次のように表せる。

(a) θ_x -direction (b) θ_y -direction (c) θ_z -direction

Fig. 7 Outputs of 3-axis angle sensor (Type 1)

$$H_{\theta_z} \approx \frac{(\Delta d_{h-\theta_z} + \Delta d_{h-\theta_x}) + (\Delta d_{h-\theta_z} - \Delta d_{h-\theta_x})}{2} = \Delta d_{h-\theta_z} \quad (14)$$

以上式(5), (13), (14)を用いて 3 軸角度が検出できる。この検出方法を採用した 3 軸角度センサタイプ 2 を設計、製作した。その写真を図 8 に示す。光源 LD のビーム径は楕円形状であり、長軸 (Y) 方向 1.8 mm 、短軸 (Z) 方向が 1.9 mm である。対物レンズには収差の影響がより小さくなるようにトリプレットレンズ ($f=25.4 \text{ mm}$, $\text{NA}=0.30$) を用いた。矩形格子の格子周期は $4 \mu\text{m}$ である。受光素子はタイプ 1 と同様である。この 3 軸角度センサに対して、4.2 節と同様の方法で出力特性の測定を行った結果を図 9 に示す。図には感度と標準偏差も示されている。この結果から、 ± 1 次光スポット変位のみを用いたタイプ 2 の検出法でも 3 軸角度を検出可能である事が分かる。また、ローリング方向の角度検出感度をタイプ 1 の感度と比較して約 2.5 倍程度向上させる事ができた。

4.4 分解能測定実験

3 軸角度センサタイプ 2 を用いて分解能評価実験を行った。実験方法は 2 軸チルトステージに対して周波数 1 Hz の正弦波状に変化する微小電圧を印加する事で微小角度を発生させ、その角度変位量をタイプ 2 で測定する。

各軸回りの角度について、7 周期分の測定結果を図 10 に示す。この結果から、ローリング方向について 2 軸チルトステージに印

Fig.8 Photograph of 3-axis angle sensor (Type 2)

(a) θ_x -direction (b) θ_y -direction (c) θ_z -direction

Fig.9 Outputs of 3-axis angle sensor (Type 2)

加した 0.2 秒の角度振幅を測定可能である事が分かる。ピッチング、ヨーイング方向についても同様に微小角度振幅の計測を行った。その結果、0.02 秒の角度振幅を測定可能である事が分かった。以上の測定における IV 変換回路のカットオフ周波数は 3 kHz である。

5. 結 言

本研究ではレーザオートコリメーション法をベースとした光学

(a) θ_x -direction (b) θ_y and θ_z -direction

Fig.10 Results of resolution evaluating experiment (Type 2)

式 3 軸角度センサの原理を提案し、その基本特性の測定を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 3 軸角度を一括で検出できる角度検出方法を提案した。また 3 軸角度センサの受光素子に QPD を用いた場合のセンサ感度に影響を与える要素について考察した。
- (2) 提案した角度検出方法に基づいて 3 軸角度センサ (タイプ 1) を製作した。また、その出力特性を調べ、3 軸の角度変位を検出可能である事を実験的に確認した。
- (3) ± 1 次光スポットの変位のみを用いて 3 軸角度を検出する方法を用いて 3 軸角度センサ (タイプ 2) を製作し、3 軸の角度が検出可能である事を確認した。またセンサの分解能についての評価を行った結果、ローリング方向は 0.2 秒、ピッチング、ヨーイング方向が 0.02 秒程度の分解能を有する事を確認した。

ローリング方向検出感度の高感度化並びに 3 軸角度検出の精度評価が今後の課題となる。

謝 辞

本研究は三豊科学技術振興協会と独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金により行われた事を記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) A. E. Ennos and M. S. Virdee: High accuracy profile measurement of quasi-conical mirror surfaces by laser autocollimation, *Prec. Eng.*, **4**, 1, (1982)5.
- 2) 渡部 司, 益田 正, 梶谷 誠, 藤本 弘之, 中山 貴: ロータリーエンコーダの高精度校正装置の開発, *精密工学会誌*, **67**, 7, (2001)1091.
- 3) 小倉 一郎, 岡崎 祐一: 多点法による工作機械回転軸のアキシシャルおよびアンギュラモーションエラーの精密測定に関する研究, *精密工学会誌*, **67**, 7, (2001)1120.
- 4) 陳 欣, 小谷 潔, 高増 潔: 空間周波数領域 2 点法に関する研究 (第 1 報), *精密工学会誌*, **73**, 6, (2007)653.
- 5) 吉田 庄一郎: オートコリメータとその応用, *精密機械*, **44**, 5 (1978)7.
- 6) 高 偉, 齋藤 悠佑, 佐藤 隼人, 清野 慧, 清水 浩貴, 広瀬 純: 高感度 2 軸マイクロ角度センサの開発, *精密工学会誌*, **72**, 9, (2006)1174
- 7) <http://www.keyence.co.jp/>
- 8) <http://www.surugaost.jp/>