研究論文

三次元トラッキングレーザ干渉計による 座標測定機の精度評価*

中 村 収** 後 藤 充 夫** 豊 田 幸 司**
高 井 望*** 黒 沢 俊 郎*** 中 俣 透***

Evaluation of a Coordinate Measuring Machine by Using
a Three-dimensional Tracking Laser Interferometer

Osamu NAKAMURA, Mitsuo GOTO, Kouji TOYODA, Nozomi TAKAI,
Toshiro KUROSAWA and Tohru NAKAMATA

A new method for evaluating the coordinate error of commercial CMMs by using a newly developed three-dimensional tracking laser interferometer is proposed. The length between a moving Cats'-eye retroreflector set to the probing head of a CMM and the rotation center of the 3D tracking interferometer is measured and used for estimating the coordinate error at each sampled point based on nonlinear least squares. The measurement accuracy with the proposed method including the optical path accuracy of the Cats'-eye retroreflector and the structural accuracy of the tracking mechanism is evaluated both theoretically and experimentally.

Key words: coordinate measurement, CMM, laser interferometer, laser tracking, coordinate calibration, nonlinear least squares

1. は じ め に

三次元測定機の精度評価の手段としては、長さの評価としての JIS に定められた段差ブロックゲージ¹⁾、ダブルボールバー²⁾³⁾、基準円盤等がある。しかしながら、いずれの手法も評価の基準となるゲージやバーなどの幾何学的広がり範囲でしか精度評価を行うことができず、全測定空間の精度は同時に評価できなかった。したがって、局所的な精度評価はできても、座標系全体としての精度は不明であった。

本論文では、広い角度領域を利用可能なキャッツアイ反射体と新しく試作した三次元トラッキングレーザ干渉計を用いた、市販座標測定機のほぼ全空間にわたる精度を評価できる手法の原理とその実験結果について報告する。既に報告した平面内トラッキング干渉計⁴⁾の場合と同様に、この三次元トラッキング干渉計 3 台による同時測定を行えば、測定空間の任意の点におけるベルトル誤差の測定も可能となる。この新三次元トラッキングレーザ干渉計を用いて、市販の座標測定機の座標誤差を評価した。また、本測定における測

定誤差要因となっている、三次元トラッキング機構の二軸間のアライメント誤差の影響について考察し、キャッツアイ反射体の光学的精度の実験的評価を行った。

2. 原 理

我々が提案する方法は、基準となる空間における 1 点（レーザ追尾ステーションの回転中心）と座標測定機のヘッド部に取り付けられた反射体の中心間の距離を、追尾機構を有するレーザ干渉計で常時測定し、座標測定機の座標系をレーザの波長で定義される空間内の球面と比較することでその系のひずみを算出するのである。この方法では、各測定点における座標誤差を、その点を通るレーザビームの方向に投影したスカラー量が得られる。これは基本的にはダブルボールバーで評価される誤差と同じ種類の量となる。ただし、測定領域は、ダブルボールバーによる手法がバーの長さで制限されるのに対し、本手法では、レーザ測長が可能ながざり無制限に広く取れる。

図 1 に試作した三次元トラッキング干渉計の概念図を示す。レーザ干渉計には、市販の光ファイバ結合型レーザ干渉測長器⁵⁾をシングルビーム干渉計に改良して用いた。安定化 He-Ne レーザからのビームは偏波

* 原稿受付 平成 4 年 2 月 27 日

** 正 会 員 計量研究所（つくば市梅園 1-1-4）

*** 東京精密(株)（土浦市東中貫町 4）

Fig. 1 Three-dimensional tracking laser-interferometric system

Fig. 2 The Cats'-eye retroreflector

面保存ファイバを経て、二軸トラッキングステーションに設置された小型干渉計へと導入される。二軸トラッキングステーションは偏心 $2\mu\text{m}$ 以下のダイレクトドライブモータ 2 台で構成されており、三次元空間での反射体の動きを追尾できるようになっている。反射体の追尾は、反射体から戻ってくるレーザービームの動きを四分割フォトダイオードで検出し、常にビームが分割ダイオードの中心に位置するように 2 軸を回転制御することで実現している。小型干渉計内で測定ビームと参照ビームは再結合され、 $1/2$ 波長板、 $1/4$ 波長板を用いて互いに 90° ずつ位相が異なる 4 つの光が作られ、その光強度が 4 本のライトガイドによってフリンジカウンタへと送られる⁶⁾。

図 2 に、キャッツアイ反射体の構造を示す。半径が異なる 2 つの半球レンズが貼り合わされ、大きい方の半球の表面は鏡面になっている。このような構成の反射体に、平行化されたビームが入射すると、入射方向にかかわらず必ず鏡面上に微小スポットとして集光され、そこで反射した光は再び平行化され、入射ビームと同軸で逆方向へと戻ってゆく。両半球は中心を共有しており、その位置が測長の基準点となる。このとき、両半球レンズの真半球からのずれ、中心位置の位

置ずれ、球面の幾何学的誤差などが、ここでのレーザ干渉測長の誤差となる。

3. 座標誤差の計算

いま、 N 個の測定点において、レーザ干渉計による $\lambda/2$ 単位の干渉じまの計数値、座標測定機による座標値を同時に測定したとする。それらをそれぞれ、スカラー量 $C(i)$ 、およびベクトル量 $\mathbf{r}(i)$ で表すと、その測定点における座標誤差は次式のように表される。

$$\text{Res}(i) = L + \frac{\lambda}{2} \cdot C(i) - |\mathbf{r}(i) - \mathbf{r}_0| \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

ここで、 L およびベクトル $\mathbf{r}_0$ は未知数であり、それぞれ、干渉測長におけるオフセット値、追尾の回転中心の座標である。厳密に言えば、 $\text{Res}(i)$ は第 i 番目の測定点における座標誤差（ベクトル量）を、その点におけるレーザービームの方向へ投影したスカラー量である。

L および $\mathbf{r}_0$ は最小二乗規範に基づき推定する。すなわち、

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^N \left\{ L + \frac{\lambda}{2} \cdot C(i) - |\mathbf{r}(i) - \mathbf{r}_0| \right\}^2 \quad (2)$$

式 (2) に基づき推定した L および $\mathbf{r}_0$ を式 (1) に代入すると、各測定点における座標誤差を得る。式 (2) の解アルゴリズムには、非線形最適化問題に対する反復ガウス・ニュートン法を用いた。

4. 実験

4.1 市販座標測定機の評価

本手法により、市販の座標測定機（測定領域 $800\text{ mm} \times 600\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 、長さの測定精度 $U_1 = 5\mu\text{m}/500\text{ mm}$ ）の評価を行った。全測定領域のうち、 $370\text{ mm} \times 210\text{ mm} \times 240\text{ mm}$ の空間内の 33 点において干渉じまの計数値と座標値を測定した。実験室内の気温は約 22°C 、測定時間は数分以内であった。

表 1 に測定値と式 (1)、(2) に基づき求めた各測定点における残差（誤差）を示す。誤差の最大偏差は約 $14\mu\text{m}$ 、標準偏差は約 $3.4\mu\text{m}$ であった。ここで得られた誤差は、使用した座標測定機に保証されている座標誤差に比べ、やや大きいと思われるが、表 1 の誤差には、座標測定機の誤差だけではなく、三次元トラッキング干渉計の測定誤差が加えあわされている。三次元トラッキング干渉計の測定誤差には、三次元トラッキング機構の 2 軸間のアライメント誤差とキャッツアイ反射体の製作誤差がある。

Table 1 The coordinate of the sampled data-points, the measured fringe counts, and the residuals at the every data-points after the least squares

i	$C(i)$	$x(i)$ mm	$y(i)$ mm	$z(i)$ mm	$Res(i)$ μm
1	0	-132.949 5	0.000 5	-230.036 0	-1.05
2	144 000	99.830 5	0.000 5	-230.036 5	2.85
3	225 722	165.101 5	0.000 5	-230.036 5	3.32
4	50 956	-1.795 0	0.000 5	-230.036 5	-0.20
5	330 295	235.201 0	0.000 5	-230.036 5	5.15
6	343 420	235.201 0	0.000 5	-133.723 5	-0.93
7	385 380	235.201 0	0.000 5	-50.627 5	-3.02
8	430 354	235.201 0	0.000 5	6.941 0	-3.18
9	286 045	129.810 5	0.000 5	6.941 0	-2.65
10	163 321	-2.244 0	0.000 5	6.941 0	0.88
11	127 103	-74.949 0	0.000 5	6.941 0	3.61
12	115 289	-132.950 0	0.000 5	6.941 0	5.93
13	33 897	-132.950 0	0.000 5	-94.858 5	-0.65
14	4 362	-132.950 0	0.000 5	-169.328 5	-2.57
15	3	-132.948 5	0.000 5	-230.036 5	-1.96
16	-232 303	-132.948 5	-73.549 5	-230.036 5	-1.87
17	-472 757	-132.948 5	-149.695 5	-230.036 5	-3.53
18	-659 054	-132.949 0	-208.702 5	-230.037 0	-1.08
19	-613 695	-33.749 0	-208.702 5	-230.037 0	1.03
20	-498 642	69.996 5	-208.702 5	-230.037 0	3.92
21	-333 543	170.817 0	-208.703 0	-230.037 0	6.91
22	-322 258	170.817 0	-208.703 0	-150.140 5	0.06
23	-287 947	170.817 0	-208.703 5	-87.361 5	-4.13
24	-238 873	170.817 0	-208.703 5	-30.731 0	-5.13
25	-381 881	79.472 0	-208.703 5	-30.731 5	-5.38
26	-507 708	-41.903 5	-208.703 5	-30.731 5	2.35
27	-543 930	-132.950 5	-208.703 5	-30.732 0	8.72
28	-622 787	-132.950 5	-208.704 0	-111.932 0	-0.58
29	-656 256	-132.951 0	-208.703 5	-182.435 5	-1.59
30	-659 060	-132.952 0	-208.704 0	-230.037 0	-0.78
31	-454 831	-132.952 5	-144.016 5	-230.037 0	-1.90
32	-234 494	-132.952 5	-74.242 5	-230.037 5	-1.21
33	1	-132.949 0	0.000 5	-230.036 5	-1.34

4.2 2軸間のアライメント誤差の影響

三次元トラッキング機構における2軸が厳密に一致していないと、測長値がトラッキング機構の回転中心とキャッツアイの測長基準点の距離に対応しなくなる。そもそも、回転中心自体が不明となる。

4.1節の実験に先だって、小型レーザ干渉計を設置する前の状態で2軸のアライメント誤差が約2 μm であることを確認したが、その値がどの程度測定値に影響するかを考察する。図3に、誤差の解析図を示す。ここで、軸1が水平方向の回転を、軸2が垂直方向の回転をつかさどる軸である。簡単のため、二つの軸が水平方向に Δx だけずれて設置され、レーザビームの中心が軸2に一致しているとする。このとき、キャッツアイの中心点が点 P_1 より点 P_2 へと移動したとす

Fig. 3 The relationship between the length-measurement error of the tracking interferometer and the miss alignment of the axes **Fig. 4** Experimental apparatus for evaluating the Cats'-eye retroreflector

る。軸2が軸1に一致している理想的な状態では、この移動における測長値の変化は $L_2 - L_1$ になる。軸2が Δx だけずれていると、測長値の変化は $L_2' - L_1'$ となる。結局、 Δx だけ軸がずれたことにより生じる測長の誤差は、

$$\begin{aligned}
 \Delta e &= L_2' - L_1' - (L_2 - L_1) \\
 &= (L_2^2 + \Delta x^2 - 2L_2\Delta x \cos \theta)^{1/2} \\
 &\quad - (L_1 + \Delta x) - L_2 + L_1 \\
 &\approx L_2 + \frac{1}{2} \cdot (-2\Delta x \cdot \cos \theta) - \Delta x - L_2 \\
 &= -(1 + \cos \theta) \cdot \Delta x \quad (3)
 \end{aligned}$$

で与えられる。今回用いたキャッツアイでは、 θ は120~240°の範囲を変化するので、 $(1 + \cos \theta)$ の絶対値の最大値は1/2である。金属球を小型干渉計の位置に取り付け、電気マイクロメータを用いてその中心合わせを行ったところ、 Δx は2 μm まで小さくできた。 Δx を2 μm とすると、 Δe の最大値は1 μm 程度と見積れる。

レーザビームと回転軸のずれにより生じる測長値の誤差については、前報で検討した結果1 μm より小さいことが確認されている⁷⁾。

4.3 キャッツアイ反射体の評価

キャッツアイ反射体には市販の広角タイプ(120°の角度範囲で入射可能)のものをを用いたが、その光学精度は公表されていなかった。図4にキャッツアイ反射体の精度評価実験の装置の構成を示す。真円度測定用の回転テーブル上にキャッツアイ反射体を固定し、反射体の中心にレーザビームが入射するように、

Fig. 5 Optical deviation of the Cats'-eye retroreflector measured with the Fig. 4 system

前述のシングルビームレーザ干渉計を設置する。この構成でテーブルを回転させ、レーザ干渉計が示すビーム入射方位による測長値の変化を記録する。実験では、 0.2° 間隔で 120° の入射角度範囲について測長値を記録した。そのデータに対して、キャッツアイの中心とテーブルの回転中心の位置ずれの補正を行い⁸⁾、光路長の偏差を求めた。その結果の一例を図5に示す。振幅で最大 $2\mu\text{m}$ 程度の偏差が認められる。キャッツアイの姿勢を変化させて数回の測定を行ったが、偏差の大きさは同程度であった。この偏差曲線は比較的緩やかであるので、あらかじめその曲線を測定・記憶しておけば、キャッツアイへの入射角度による測長値のばらつきは補正可能である。

5. 結 言

三次元トラッキングレーザ干渉計と広角キャッツアイ反射体を用いた、座標測定機の広測定領域における精度評価法およびその実験例について述べた。

現在のところ本手法における支配的な誤差要因は、三次元トラッキング機構の回転誤差およびキャッツアイの入射方位による光学的偏差であることがわかった。

三次元トラッキング機構の回転誤差に影響する回転2軸間のずれは、実験の節で触れたとおり、小型干渉計を回転機構から降ろした状態で約 $2\mu\text{m}$ まで追い込むことができた。しかしながら、実際に小型干渉計を取り付けた状態で、かつ種々の方向への回転と停止を繰り返す実際の測定時においては、回転誤差はもっと

悪くなると予想される。表1とこれまでの考察から、実験時には約数 μm の回転誤差が生じたと推測できる。今後、より高い回転精度を有する2軸追尾機構を開発する必要がある。

キャッツアイの偏差については、キャッツアイの姿勢の変化が数度以内に抑えられれば、あらかじめその偏差曲線を測定しておくことにより、補正可能である。キャッツアイの形状偏差は、半球を2つ組み合わせる現在の構造上、これ以上の改良は難しいだろう。屈折率が2である材料を用いれば、構造上高い精度で加工可能な真球のキャッツアイを構成できる。その際には、屈折率および幾何形状の誤差は、それぞれ 10^{-3} 、 $0.3\mu\text{m}$ 以下が要求される⁸⁾。

三次元トラッキングレーザ干渉計を3台用いると各測定点における座標誤差をベクトルで求めることができる。すなわち、再現性のある座標誤差については、こうして求めた誤差ベクトルで補正することができる。キャッツアイ反射体をプローブに結合すれば、直交座標系による機械案内機構を持たない全く新しい方式の座標測定システムを構成することができる。

参 考 文 献

- 1) JIS B 7440 三次元測定機の精度試験方法, 日本規格協会, (1987).
- 2) J. B. Bryan: A Simple Method for Testing Measuring Machines and Machine Tools I, Principles and Applications, Prec. Eng., 4, 2, (1982) 61.
- 3) H. Kunzmann and F. Waldele: On Testing Coordinate Measuring Machines with Kinematic Reference Standards, Ann. CIRP, 32, 1, (1983) 465.
- 4) 後藤充夫, 中村 収, 豊田幸司, 黒沢俊郎: トラッキングレーザによる座標測定機の精度評価と校正, 精密工学会誌, 57, 12 (1991) 2237.
- 5) 光ファイバ結合型レーザ干渉測長器カタログ (東京精密).
- 6) O. Nakamura, M. Goto, K. Toyoda, Y. Tanimura and T. Kurosawa: Development of a Coordinate Measuring System with Tracking Laser Interferometers, Ann. CIRP, 40, 1, (1991) 523.
- 7) 中村 収, 後藤充夫, 豊田幸司, 谷村吉久, 黒沢俊郎: 追尾式レーザ干渉計による座標計測システム, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 831.
- 8) 後藤充夫, 中村 収, 豊田幸司, 黒沢俊郎: 追尾式レーザ干渉計による座標計測——リトロフレクタの性能解析, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1991) 301.