レーザ干渉及び光学的フィーラによる ねじリードの自動測定*

吉 本 勇** 丸 山 一 男** 大 村 研 二***

Automatic Measurement of Screw Lead by Laser Interferometer and Optical Feeler

Isamu YOSHIMOTO, Kazuo MARUYAMA
and Kenji OHMURA

A new optical feeler which can detect the position of an object with high accuracy, is designed and trially manufactured by combining a tool maker's microscope and a photodiode, and it is applied to the screw lead measuring machine with laser interferometer for the automatic measurement of the cumulative pitch error and the lead error including cyclic error of screw. In order to investigate the accuracy of measurement in this

device, the experiments are carried out changing some factors. The main results are as follows: (1) This device can measure the screw with a small diameter and/or a small pitch which it is difficult to measure with the feeler of contact type. (2) Also the measurement for the screw with a large diameter and/or a large pitch is possible. (3) The accuracy of measurement is $0.2\ \mu\text{m}$ for repeatability and $0.8\ \mu\text{m}$ for reproducibility in standard deviation.

Key words: automatic measurement, screw lead, laser interferometer, optical feeler, lead error, pitch error.

1. 緒 言

精密な親ねじの生産には、そのピッチ誤差及びリード誤差を精密かつ迅速に測定することが必要である。この目的のために、著者らはこれまでレーザ干渉を利用したねじリード測定機の実用化に関する研究を行い、実用上十分な精度でおねじの累積ピッチ誤差、リード誤差、めねじのリード誤差及びおねじとめねじを組合わせた場合のねじ送り誤差を測定できるようにした¹⁾²⁾。この測定機は機械的な接触式フィーラを用いていたので、フィーラの摩耗やピッチの小さなねじの測定に問題があった。これを解決するために、本研究では工具顕微鏡とフォトダイオードを使い高精度で位置検出のできる光学的フィーラを開発した。これまでに、ねじの測定に光学的位置検出を利用した研究も高島・縄田ら³⁾⁴⁾によって発表されているが、本研究では新しく、比較的簡単な光学的フィーラを考案・試作して、レーザ干渉ねじリード測定機に応用し、非接触で累積ピッチ誤差の測定及び酔歩誤差を含むリード誤差の測定を可能にしたので、その原理及び測定精度について報告する。

2. 光学的フィーラ

2.1 原 理

図1に高精度位置検出のために開発した光学的フィーラの原理を示す。工具顕微鏡の照明装置から来る光は光源の明るさの変動を補償するためにハーフミラーで二つに分けられ、一方は被測定ねじに、他方はPINフォトダイオードPH2に向かう。被測定ねじに向かった光は対物レンズによって被測定ねじのねじ山の実像を円形の穴（ピンホール）を持つ像面（マスク）上に結ぶ。このとき、ピンホールを通った光を受光部のPINフォトダイオードPH1で検出する（この装置を以後光学的フィーラと呼ぶ）。マイクロメータにより被測定ねじを軸方向に動かすと、像が移動してピンホールに対し前と同様な位置

図1 光学的フィーラの原理

* 原稿受付 昭和55年4月18日。昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和52年10月15日）および昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和54年10月9日）にて発表。

** 正会員 東京工業大学精密工学研究所（横浜市緑区長津田町4259）

*** 正会員 （株）第二精工舎（習志野市屋敷4-3-1）

図2 光電信号増幅器の概略

図3 ピンホールを用いる場合の線形性の解析

関係になると、PIN フォトダイオードの出力は前と等しくなる。そのときのマイクロメータの値を読めばピッチが測定できる。また、被測定ねじの酔歩誤差を含むリード誤差を測定する際は、ねじ山のフランクの像がピンホールの中心を通る付近では、ピンホールを通過する光量の変化がねじ山のフランクの像のピンホールに対する移動量に比例することを利用する。

2.2 光電信号増幅回路

ねじの累積ピッチ誤差の測定のために、ピンホール上において、ねじ山が中央に来たときにパルス信号が出るような電気回路を製作した。その概要を図2に示す。PIN フォトダイオード PH1, PH2 で検出された信号は差動増幅され、さらにローパスフィルタ（遮断周波数 100 Hz）によって高周波成分を除き、シュミット回路、クリッピング回路を通して正電圧の矩形波に変換され、位置信号として計算システムに送られる。

酔歩誤差を含むリード誤差を測定するために、ピンホールを通過する光量に比例した電圧を取り出す際は、図2の回路のローパスフィルタからの出力電圧を用いる。

2.3 ピンホールの形状と光学的フィーラの特性

ピッチ誤差の測定では光学的フィーラを位置検出として用いるため、ピンホールの線形範囲はほとんど問題にならないが、リード誤差の測定の際には、ピンホールを通過する光量の変化が1対1で対応している必要があり、その線形範囲も $\pm 50 \mu\text{m}$ 程度必要である。

図3を用いて、ねじ山の像の動きに対するピンホールの明暗の面積変化を解析する。ピンホールの明の部分が多くなる方向への像の変位を正とする。ピンホールの半径 r 、ねじ山の半角を α とすると、像の移動によるピン

表1 ピンホールを用いる場合の線形誤差 Δx_R
($m=3$, $\alpha=30^\circ$ の場合) (単位: μm)

$d=2r$ (mm)	$\pm x_R$ (μm)				
	20	30	40	50	60
0.3	-0.41	-1.4	-3.5		
1		-0.12	-0.29	-0.57	-0.99
2			-0.07	-0.14	-0.24
3				-0.06	-0.11

ホールの明の部分の面積変化 ΔS は次式で表される。

$$\Delta S = r^2 \left\{ \sin^{-1} \frac{x \cos \alpha}{r} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{x \cos \alpha}{r} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } \left(-\frac{r}{\cos \alpha} \leq x \leq \frac{r}{\cos \alpha} \right)$$

x のゼロ近傍においては式 (1) は次のようになる。

$$\Delta S = 2r \cos \alpha \cdot x \quad (2)$$

式 (1) を式 (2) で近似したときの誤差 Δx は

$$\Delta x = -x + \frac{r}{2 \cos \alpha} \left\{ \sin^{-1} \frac{x \cos \alpha}{r} + \frac{1}{2} \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{x \cos \alpha}{r} \right) \right\} \quad (3)$$

となる。これらの式は像の変位 x についての式であるが、像面上では、実際のねじの変位 x_R が m 倍（本研究では $m=3$ ）に拡大されているので、 $x = mx_R$ として式を書き直すと式 (3) は次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta x_R &= \frac{1}{m} \Delta x \\ &= -x_R + \frac{r}{2m \cos \alpha} \left\{ \sin^{-1} \frac{mx_R \cos \alpha}{r} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin \left(2 \sin^{-1} \frac{mx_R \cos \alpha}{r} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) より $r, x_R, \Delta x_R$ の関係を表1に示す。この表よりピンホールの半径 r が大きい程線形領域は広いが、光学的フィーラの受光部に用いている PIN フォトダイオードの線形特性と被測定ねじのねじ山寸法の問題があるので一概に大きければ良いというわけにはいかない。そこでピンホールの直径 $d=0.3, 1, 3 \text{ mm}$ のものと矩形スリット $1 \times 0.5 \text{ mm}$ のものについて変位 x_R と光学的フィーラの出力電圧の関係を測定した。 x_R はレーザ干渉

ピンホールの直径 $d=1\text{ mm}$ 図4 変位 x_R と出力電圧 e_L の関係 図5 出力電圧 e_L の変動

図6 測定機の構成 (ピッチ誤差の測定)

測長器により、電圧はデジタルマルチメータにより測定した結果の一例を図4に示す。またPINフォトダイオード及び光電信号増幅器の安定性を調べるために、変位 x_R を一定にし、図2におけるローパスフィルタの出力電圧 e_L を $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 当たり 5 mV となるように調整したときの出力変動の記録を図5に示す (なお、この値はシンクロスコープにより確認してある)。図4より実際のピンホールの線形領域は表1に示した計算値と一致し、出力電圧の変動も図5より $\pm 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以内に入っていることがわかる。以上のことから、 $d=3\text{ mm}$ のピンホールが適当と思われるが、 $M10\times 1.25$ のように小寸法のねじの測定では像面上でピンホールの中にねじの山頂部または谷底部が入ってくる場合がある。そこでねじの寸法も考慮して、 $d=1\text{ mm}$ のピンホールを用いることにした。

3. ピッチ誤差の自動測定

3.1 測定機の構成

2章の原理に基づく光学的フィーラをレーザ干渉ねじリッド測定機に応用するために、工具顕微鏡の基本機能を持つ顕微鏡ホルダを設計・試作した。

図6に測定機の全体の構成を示す。浮動台を移動台に

図7 光学的フィーラ

固定し、従来のフィーラと回転角検出部の代わりに試作した光学的フィーラを設置する (図7)。被測定ねじは回転させないで、移動台と一体化した浮動台のみが移動する。レーザ光源からの光線は図6のように進み、その干渉じまをPINフォトダイオードで受ける。そのパルスと光学的フィーラから出る1ピッチごとの位置信号が計算器Iに入り演算が行われて、累積ピッチ誤差をデジタルプリンタ及びペンレコーダで記録する。

3.2 測定精度検討のための実験及び考察

3.1節で述べた方法による測定の精度を検討する実験

表2 実験に取上げた因子 (ピッチ誤差の測定)

因子	水準	1	2
A ねじのサイズ		M 10×1.25×30	TM 50×5.0×94
B ねじ面の仕上		研削	切削
C 測定の繰返し間隔		繰返し性	反復性

表3 測定精度に対する実験結果

No.	A	B	C	σ_1 (μm)	σ_2 (μm)
1	1	1	1	0.13	0.11
2	1	1	2	0.36	0.43
3	1	2	1	0.16	0.15
4	1	2	2	0.54	0.64
5	2	1	1	0.12	0.11
6	2	1	2	0.46	0.73
7	2	2	1	0.13	0.14
8	2	2	2	0.72	0.88

表4 σ に対する分散分析

因子	自由度	SS	MS	MS/MSE
A	1	0.037	0.037	5.196*
B	1	0.052	0.052	7.258*
C	1	0.860	0.860	120.630**
A×B	1	0.000	0.000	0.001
A×C	1	0.047	0.047	6.634*
B×C	1	0.030	0.030	4.173
A×B×C	1	0.000	0.000	0.022
E	8	0.057	0.007	

*5%で有意, **1%で有意

を行った。実験は表2に示す因子、水準に従って一つの組合わせについて3回ずつ行った。ピッチの測定はねじ部の両端の部分の2山程度を除き全ねじ山について、ほ

ぼ有効径の位置で行った。各々の場合の精度を標準偏差 σ で表すと表3のような結果が得られた。表3の結果を分散分析したところ表4が得られた。主効果で最も大きいのは、Cの測定の繰返し間隔の因子である。これは、繰返し性の場合には被測定ねじを測定機に取付けると、そのままの状態ですべて連続3回測定するのに対し、反復性の場合には日時を変えて、その都度被測定ねじを取付け直して測定することによる。取付けを変えると完全にもとの状態にもどすのは困難で測定位置が多少ずれるために、ばらつきが大きくなると判断される。ねじのサイズやねじ面の仕上はそれほど影響はない。測定の精度を標準偏差で表すと、繰返し性に対し、 $0.2\mu\text{m}$ 以内、反復性に対し $0.8\mu\text{m}$ 以内である。

4. リード誤差の自動測定

4.1 測定機の構成

図8にリード誤差を測定する場合の測定機全体の構成を示す。被測定ねじは測定機の両センタ間に支持され、主軸により回転させられる。被測定ねじの呼びリードに従って動く移動台上に固定された浮動台に、光学的フィーラを固定する。光学的フィーラは浮動台及び移動台と一体となって移動する。レーザ光源からの光線は図のように進み、その干渉縞をPINフォトダイオードで受ける。回転角検出部から1/20回転ごとの位置信号がくると、計算器Iでは移動台の送り誤差 E が計数され、光学的フィーラでは被測定ねじのリード誤差 ϵ と送り誤差 E が $\epsilon-E$ の形で検出され、このアナログ量をA-D変換して、計算器IIで計算器Iの内容と加算演算を行う。その結果得られるリード誤差をデジタルプリンタ及びペンレコーダで記録する。このA-Dコンバータを用いた光

図8 測定機の構成 (リード誤差の測定)

表5 実験に取上げた因子

因子	水準	1	2
A ねじのサイズ		M 10×1.25	TM 50×5.0
B ねじ部長さ		$L/d \leq 3$	$L/d \geq 10$
C ねじ面の面粗さ ($R_{\max}$)		1.6 S	6.3 S
D 測定の繰返し間隔		繰返し性	反復性
F 測定方向		H→T	T→H

L: ねじ部長さ, d: 外径, H: 主軸側, T: 心押し台側

図9 測定結果の一例

学的フィーラの検出精度は図4, 図5から推定できるが, 図2のローパスフィルタの出力電圧 e_L をA-Dコンバータでデジタル量に変換し, その値を $0.1 \mu\text{m}$ のオーダーまでLED表示ディスプレイに表示し, その値を目で観測した. 検出精度はこの基礎実験の結果 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内であった.

4.2 測定精度検討のための実験及び考察

光学的フィーラによるねじリード誤差の測定精度を検討するための実験を行った. 実験には表5に示す5因子を取上げ, 各2水準とした. 実験は直交配列表 $L_{16}(2^{15})$ を用いて割付け, 因子の各組み合わせごとにピッチ誤差(被測定ねじの1回転ごとに測定)及びリード誤差(被測定ねじの1/20回転ごとに測定)の測定を行い(図9), その繰返し精度または反復精度を標準偏差で表した. 標準偏差の計算に用いる測定値は, 累積ピッチ誤差のばらつき σ_P に対しては測定データの全山分使用し, リード誤差のばらつき σ_L に対しては, 被測定ねじの中央部5山分を用いた. 実験結果を表6に, 表6のうち σ_L に対する分散分析の結果を表7に示す. σ_P に対する分散分析の結果も, ほぼ同様であってD以外の因子及び交互作用は有意ではない. この結果に従って計算すると, σ_L, σ_P とも繰返し性および反復性に対し, それぞれ約 $0.2 \mu\text{m}$ 及び $0.8 \mu\text{m}$ である.

5. 今後の問題点

本研究で試作した光学的フィーラは1個だけであるの

表6 測定精度に対する実験結果

No.	A	B	C	D	F	σ_P (μm)	σ_L (μm)
1	1	1	1	1	1	0.14	0.12
2	1	1	1	2	2	0.19	0.47
3	1	1	2	1	2	0.12	0.51
4	1	1	2	2	1	0.88	0.62
5	1	2	1	1	2	0.17	0.12
6	1	2	1	2	1	0.47	0.69
7	1	2	2	1	1	0.19	0.18
8	1	2	2	2	2	1.29	1.15
9	2	1	1	1	1	0.15	0.13
10	2	1	1	2	2	1.28	0.92
11	2	1	2	1	2	0.10	0.15
12	2	1	2	2	1	0.73	0.90
13	2	2	1	1	2	0.13	0.20
14	2	2	1	2	1	0.44	0.52
15	2	2	2	1	1	0.18	0.16
16	2	2	2	2	2	1.03	0.19

表7 σ_L に対する分散分析

因子	自由度	SS	MS	MS/MSE
A	1	0.030	0.030	0.302
B	1	0.023	0.023	0.236
C	1	0.030	0.030	0.302
D	1	0.946	0.946	9.596*
F	1	0.010	0.010	0.096
A×B	1	0.131	0.131	1.333
A×C	1	0.128	0.128	1.297
A×D	1	0.001	0.001	0.008
B×C	1	0.010	0.010	0.096
B×D	1	0.001	0.001	0.008
C×D	1	0.002	0.002	0.018
E	4	0.394	0.099	

*5%で有意

で, 被測定ねじの自重によるたわみ, 曲がり, 両センタの水平, 垂直面内でのずれ, 及び移動台のヨーイング, ピッチングなど本来被測定ねじに責任のない量の影響を受ける. これに関する対策は, 接触型フィーラの場合のように光学的フィーラを2個用い, 同一フランキに 180° 隔てて配置することによって可能である.

また本測定法では, 光量変動の影響を防ぐために, 光源には定電流電源を使用しているが, 光源の電球の明るさは長時間使用していると暗くなってくるようである. 3章で述べた零位法によるピッチ誤差の測定の場合は, 参照用PINフォトダイオードPH2を用いることにより, 測定結果にその影響は現れないが, リード誤差の測定の場合はその影響が現れるので, 今後, より実用的な測定機を実現するためには参照用PINフォトダイオードPH2の出力電圧を用いて, 光電信号増幅器の増幅率を変化させるような回路を考える必要がある.

6. 結 言

工具顕微鏡とPINフォトダイオードを利用した非接触型の光学的フィーラを考案・試作し、これをレーザ干渉ねじリード測定機に応用してピッチ誤差およびリード誤差の自動測定ができるようにした。また測定精度を検討するために、実験計画法による実験を行った。得られた主な結論は次のとおりである。

- (1) 接触型フィーラでは測定困難であった外径及びピッチの小さなねじの測定が可能になった。
- (2) 外径、ピッチの大きなねじ及び親ねじとして用いるような長いねじの測定も、十分測定可能である。

- (3) 測定精度は繰返し性及び反復性に対し標準偏差でそれぞれ $0.2\ \mu\text{m}$ 及び $0.8\ \mu\text{m}$ である。

文 献

- 1) 山本 晃ほか：レーザ干渉ねじリード測定機の実用化，精密機械，**41**，9 (1975) 919.
- 2) 丸山一男ほか：レーザ干渉によるねじ送り精度の測定，昭和50年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1975) 425.
- 3) S. Nawata & K. Takashima: Application of Interferometry to the Measurement of the Pitch of Threads on a Lead Screw, Appl. Opt., **3**, 4, (1966) 609.
- 4) 高島幸史，縄田滋則：光干渉法のねじのよるめきへの応用，応用物理，**40**，5 (1971) 486.

情 報

工技院，イノベーションバンクシステム開発着手

通産省工業技術院は研究情報管理システム RIPS 計画の一環として、56年度からイノベーションバンクシステムの開発に取り組む。

これは工技院翼下の9研究機関が筑波研究学園都市に移転完了したことで、筑波研究センター内に超大型コンピュータ (富士通 FACOM M-200) を設置、各研究機関とのネットワーク化により研究情報の提供、相互利用などを図っていくというものである。

イノベーションバンクシステムは先端的な情報、ノウハウなどを幅広く収集、蓄積することで研究所のワクを越えてすべての研究者に情報を迅速に提供していくことをねらったもので、初年度は、①実験データ、文献を中心とするデータバンク、②回路設計などソフトバンク、③研究ノウハウ、専門情報を中心とするブレンバンクを完成させていく考えである。

工技院の研究機関はすでに計量研究所、機械技術研究所、化学研究所、微生物工業技術研究所、繊維高分子材料研究所、地質調査所、電子技術総合研究所、製品科学研究所、公害資源研究所の9機関が筑波研究学園都市に移転、研究業務を開始している。研究情報管理システム RIPS の開発は研究機関の筑波への結集を機に、電算機システムを統合することで研究業務の一層の高度化、効率化を目指していくというものである。

イノベーションバンクシステムは RIPS 計画の一環で、日常の研究活動に必要な情報、ノウハウを大型コンピュータに収集、研究室内の端末機からいつでも早期に先端的な情報が取り出せる仕組みである。したがって大型コンピュータと端末機は光ファイバでネットワーク化される。

同システムに収集される情報源としては現在、新物質、新材料の物性データ、たえず発見される微生物に関する情報、実験条件に関するノウハウなどが中心となっており、具体的にはデータバンクとして材料、スペクトル、微生物、地質、実験環境、特許関連、一般文献の各データベース、ソフトバンクには回路設計、CAD、メッシュ解析、構造解析、スペクトル分析、分子構造決定、巨大ジョブ支援など各ソフトウェア分野が、ブレンバンクでは専門情報、研究ノウハウ流通の各システムがインプットされる形である。

また、工技院ではイノベーションバンクシステムの開発と並行して、分子構造決定、核融合実験、極低温現象など巨大実験シミュレーションシステム、リモートセンシングなど汎用大型実験ツールシステムといったリサーチ、オートメーションや研究基礎管理システムのソフトウェア開発にも取り組んでいくことになっている。

(服部 敏夫)