サーモプラスチックホログラムを用いた ねじのピッチ測定*

丸 山 一 男** 中 野 き よ み**

Automatic Measurement of Screw Pitch Error by Thermoplastic Hologram

KAZUO MARUYAMA and Kiyomi NAKANO

The pitch accuracy of the precise machine elements such as gear, screw and rack having periodic shapes, is very important in their performance. In order to measure the pitch accuracy, in this study, a non-contact measuring method is proposed for the screw pitch error utilizing thermoplastic hologram instead of silver-halide plate hologram, and then the possibility to realize this method is experimentally investigated. The experimental device is constructed by combining a thermoplastic recording system, a laser generator, an optical system, a laser length measuring system, a desk-top-computer, a carriage and so on. The thermoplastic hologram is made as follows: The thermoplastic plate is exposed with the reflected beam from the flank of the screw thread and the reference beam, and then developed by a electrifier. The pitch signal is obtained by illuminating the hologram with both signal and reference beam, and the positional pulse is obtained through the electric circuits. The obtained main conclusions are as follows: (1) The pitch signal can be detected not only at the flank where the hologram was recorded, but at the other flanks. (2) The non-contact measuring system for the screw pitch error was constructed based on this method. The repeatability for the measurement of the screw pitch error is $0.3 \mu\text{m}$ in standard deviation.

Key words: non-contact measuring method, thermoplastic plate, hologram, screw pitch error, pitch signal

1. 緒 言

歯車, ねじ, ラックのような周期的な形状を持つ精密機械要素は, その性能上ピッチ精度が重要な意味を持つ。これらの要素は複雑な形状を持つので, 従来の接触型フィーラによる方法ではフィーラによる測定物表面の損傷, フィーラの摩耗などの問題があり, その改善には確実性のある非接触型フィーラの開発が強く望まれている。そのため, 谷村ら¹⁾²⁾はホログラフィによるねじのピッチ測定法を開発した。しかし, この方法では銀塩乾板を用いているため, ホログラムの作成に時間を要するという問題がある。そこで, 本研究ではこの点を改善し, より実用化を図るためにサーモプラスチックホログラムを用いる方法を提案し, その可能性を調べるための基礎実験を行った。本報告で

は, ホログラフィ光学系³⁾を含む測定装置全体の構成, ピッチ信号処理のための電気回路, 測定プログラム, 本装置によるねじのピッチ誤差測定の結果について述べる。

2. 測定装置全体の構成

本実験で用いた光学系の写真を図1に, 実験装置の構成を図2に示す。定盤の上に置いた 50 mW He-Ne

Fig. 1 Photograph of optical arrangement

* 原稿受付 昭和61年4月25日, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会(昭和60年3月28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)

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set up

Fig. 3 Schematic diagram of the carriage

レーザ発振器から出たレーザ光は、顕微鏡対物レンズ O. L. により広げられ、空間フィルタ⁴⁾ PH₁ を通過後、コリメータレンズ L₁ により直径約 1.5 mm の均一な平面波となり、ビームスプリッタ B. S. で 2 光線に分けられる。反射光はさらに反射鏡 M₁ で反射され参照光としてホログラム乾板 H に入射され、透過光はレンズ L₂ により被測定ねじのねじ面で焦点を結び、その正反射光が物体光として参照光に対して約 30° の角度でホログラム乾板に入射される。ホログラム乾板としてサーモプラスチック乾板を用い、ホログラムの記録はホロカメラ (Newport Corp. 製) により電気的に行われる。ホログラムの再生の際には参照光と物体光の両方で照明し、ピッチ信号は参照光の方向で空間フィルタ PH₂ の後方に置いたフォトダイオード P. D. により実時間で検出され、電気回路により位置信号パ

Fig. 4 Test screw

ルスとしてレーザ測長器の表示装置に入る。

移動台の構成を図 3 に、被測定ねじを図 4 に示す。被測定ねじは、移動台に取り付けたセンタ台に固定され、DC モータとボールねじにより軸方向に移動される。移動台の送り量はレーザ測長器により検出され、デスクトップコンピュータにより累積ピッチ誤差が計算され、内蔵のプロッタ・プリンタに記録される。なお、オシロスコープはピッチ信号の観察に用いる。

3. ピッチ信号の検出

3.1 サーモプラスチックホログラム

サーモプラスチック乾板は図 5 に示すように、ガラス支持体の上に透明な導電膜を真空蒸着し、その上に厚さ 1 μm の光導電体と厚さ 0.7 μm のサーモプラスチックを化学的に塗布したものである⁵⁾。図 5 (a) のようにサーモプラスチックと光導電体を一様に帯電させてから露光し (図 5 (b))、同時に支持体上の透明電極に電流を流し発熱させると (図 5 (c))、サーモプラスチックはやわらかくなり、静電的な力によって露光量に応じて変形する (図 5 (d))。本研究で用いたホロカメラでは、ホログラムの作成に要する時間は 1 min 程である。

サーモプラスチック乾板を用いて作られたサーモプラスチックホログラムは、平面形位相ホログラムであ

Fig. 5 Thermoplastic recording process

る。銀塩乾板に記録されたホログラムは平面形振幅ホログラムであり、これは入射光の強度分布が振幅透過率分布として記録されるが、位相ホログラムにおいては、入射光の強度分布が位相透過率分布として記録される。

そこで、サーモプラスチックホログラムの作成の際の最適露光量を決めるために、一般に銀塩乾板で用いられている振幅透過率 T_a と露光量 E の関係を表す T_a - E 曲線の代わりに、回折効率 η と露光量 E との関係調べた。

図2の光学系において、ホログラムを物体光のみで照明し、ホログラム後方に置いたフォトダイオードにより、入射してきた物体光の強度と参照光の方向で得られる1次回折光の強度を測定する。回折効率 η は次式で表されるように、入射光と1次回折光の強度の比を百分率で表したものである。

$$\eta = \frac{\text{1次回折光強度}}{\text{入射光強度}} \quad (1)$$

図6は実験により求めた η - E 特性曲線である。1回の測定につき、露光時間を10段階に変え、同じ測定を25回繰返し行った。25回の測定で乾板の使用回数は250回となる。図6(a)は1~5回の測定結果、(b)は21~25回の測定結果を示している。図6(c)は1~5回の平均と21~25回の平均を比較したもので、使用回数が増すと回折効率が低下したことがわかる。また、最適露光量は図6のAの範囲であることが認められる。本実験で用いた光学系においては最適露光時間は1/4~1sであった。

3.2 ピッチ信号

被測定ねじとして図4に示すM24、ねじ面研削仕上のねじを用い、ねじ面に対し十分大きな入射角で照明し、その正反射光がほぼ垂直にホログラム乾板に入射するように調節する。ねじ面への入射角は大きいほど、表面粗さの影響を受けにくく安定したピッチ信号が得られる。このねじでは入射角をおよそ85°とした。ねじ面から反射してきた物体光による1次回折光(再生光)と参照光をホログラム乾板面で干渉させ、乾板の後方に置いたフォトダイオードにより電気信号に変換する。

信号処理のための電気回路のブロック線図を図7に示す。フォトダイオードからの電気信号をOPアンプで増幅し、レーザ発振器の出力強度のドリフト分を除くためのハイパスフィルタを通し、全波整流するとピッチ信号が得られる。ねじ面からの反射光でホログラムを記録したねじ山以外の山でも、移動台の送りに従って次々と同様の波形が検出される。オシロスコー

(a) Result of measurement from the 1st to the 5th time

(b) Result of measurement from the 21st to the 25th time

(c) Comparison between the mean of 1st-5th and the mean of 21st-25th

Fig. 6 Characteristic of thermoplastic hologram

ブにより観察されたピッチ信号を図8に示す。このピッチ信号を微分回路およびコンパレータに入力し、信号のピーク点、つまりホログラム乾板面での光の強度変化が最大となる点を検出し、TTLレベルの位置

Fig. 7 Block diagram of the circuit for forming positional pulses

Fig. 8 Pitch signal

信号パルスを出力する。このパルスをレーザ測長器の表示装置に送ることにより、そのときの移動台の送り量が表示され、同時にコンピュータに割込みがかかり、ピッチ誤差が自動的に計算されCRT上にプロットされる。

この方法によりピッチ測定を行う場合、位置検出精度が重要となる。そこで、一つのねじ山において、そのねじ面からの反射光により得られる位置信号パルスの検出位置を繰返し測定した。移動台を一つのねじ面に対して25回往復させ、位置信号パルスが出力されるたびにそのときのレーザ測長器の読みをコンピュータに取り込みプロットしたものが図9のグラフである。図9(a)は実際にホログラムを記録したねじ面における結果で、図9(b), (c)はそれ以外のねじ面における結果であり、10山について測定した中でばらつきの最も大きい山と最も小さい山における結果がそれぞれ(b)および(c)である。測定結果の標準偏差は、この被測定ねじにおいてすべての山で $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ である。

4. 測定プログラムの開発

本装置のデータ処理には高速で広範囲の計算が可能なデスクトップコンピュータ(YHP製9845B)が用いられており、迅速にデータ処理を行うことができる

システムとなっている。このコンピュータ用のソフトウェアとして開発した、ねじのピッチ誤差測定プログラムのフローチャートを図10に示す。このプログラムはBASICで作られ、レーザ測長器からコンピュータへのデータ入力、演算およびカセットテープへのデータ書込み、CRTディスプレイおよびプロッタへのグラフの出力と大きく3つの部分に分けることができる。このうち、CRTへの累積ピッチ誤差線図のプロットは測定中に実時間表示され、効率よく測定を行うことができる。さらにこのプログラムは回帰分析による

累積代表ピッチ誤差の計算や同一ねじの繰返し測定の際の測定値の平均値計算および測定の繰返し性または再現性の標準偏差の計算等を行うことができる。

5. 測定結果および考察

被測定ねじを移動台のセンタに取り付ける際にねじの軸と移動台の送り方向がずれていると、ピッチ信号のピーク点にずれが生じ²⁾、測定誤差の原因となるため、その調整を行う。図4に示したねじの円筒部分は研削仕上されている。この円筒部の側面に電気マイクロメータを当て、移動台を送ったときの振れを測定しながら調整する。調整後の結果を図11に示す。円筒部40mmの範囲で移動台を送り、5回測定した結果、軸線のずれはおよそ $1 \mu\text{m}$ 、Y方向の振れは $\pm 0.8 \mu\text{m}$ 、Z方向の振れは $\pm 0.2 \mu\text{m}$ であった。

図12に累積ピッチ誤差の測定結果を示す。同一方向にねじを移動させ、3回の測定の平均および累積代表ピッチ誤差をコンピュータにより計算し、プロッタに記録した。3回の測定の繰返し性を標準偏差 σ で表すと $0.3 \mu\text{m}$ である。他の測定機による測定結果と比較するため、SIP万能測長機によりこのねじを測定した結果も図12に示す。2つの測定結果は比較的良好に一致しているが、本装置による測定では時間の経過に伴い、ピッチ信号のレベルの低下や波形の乱れがみら

れ、測定時間が長くなると誤差が大きくなるという問題があり、さらに改善が必要と思われる。

6. 結 言

本研究により得られた主な結果をまとめると次のようになる。

- (1) ホログラフィによるねじのピッチ測定法をより実用化するために、銀塩乾板の代わりにサーモ

Fig. 10 Flow chart of measuring process

プラスチックホログラムを用いる方法を提案した。

- (2) サーモプラスチック乾板を使うことにより、ホログラムの記録から再生までに要する時間が約 1 min 間と大幅に短縮され、また乾板を取りはずさずに現像処理が行えるため、より簡単にホログラムの再生像が得られる。
- (3) 本研究で試作した装置により、サーモプラスチックホログラムを用いた場合にも、ねじ面においてホログラムを記録した以外のねじ山でもピッチ信号が得られることが確かめられた。
- (4) ピッチ信号から位置信号パルスを発生させるための電気回路および累積ピッチ誤差を実時間で計算しコンピュータの画面に表示したり、プロッタ・プリンタに記録するためのプログラムを開発した。
- (5) ねじの累積ピッチ誤差をこの方法で測定したところ、3 回の測定による測定値の繰返し性は標準偏差で $0.3 \mu\text{m}$ であった。

Fig. 11 Deviation between the axis of test screw and the movement of carriage

Fig. 12 Diagram of the cumulative pitch error

謝 辞

本研究は昭和 57, 58 年度文部省科学研究費補助金

(試験研究(2))の援助を受けて行われた。また、本研究を進めるにあたり、御助言を賜った東京工業大学精密工学研究so・吉本勇教授、計量研究所・谷村吉久氏、東京工業大学工学部像情報工学研究施設・本田捷夫助教授に心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) Y. Tanimura & J. Nara : Pitch Measurement of Objects Having Periodic Shapes by Holographic Interference (1st Report), Bull. N. R. L. M., 31, (1975) 26.
- 2) Y. Tanimura & K. Sakuma : Pitch Measurement of Objects Having Periodic Shapes by Holographic Interference (2nd Report), Bull. N. R. L. M., 37, (1978) 7.
- 3) 村田和美 : ホログラフィー入門, 朝倉書店 (1976).
- 4) J.-Ch. Vienot, P. Smigiesky, H. Royer (辻内順平, 中村琢磨訳) : ホログラフィー入門, 共立出版 (1975).
- 5) 松下 昭編, 平井紀光著 : ホログラフィの基礎と実験, 共立出版 (1979).

●——精密工学会刊行図書のご案内

会誌「精密機械」および欧文誌“Bull. JSPE”総目次

1. 構成 「精密機械総目次」第 31 巻第 1 号～第 49 巻第 12 号 (昭和 40 年 1 月～昭和 58 年 12 月)
B 5 判, 本文 382 ページ
“Index to Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering” Vol. 1. No. 1-Vol. 17, No. 4 (Oct. 1963-Dec. 1983)
B 5 判, 本文 158 ページ
共に内容別・著者別分類からなっています。
2. 定 価 「精密機械総目次」 会員 2 000 円, 非会員 4 000 円
“Index to Bull. JSPE” 会員 1 000 円, 非会員 2 000 円
セット価格 会員 2 500 円, 非会員 5 000 円
(両方をセットとする場合)