研 究

ホログラフィ干渉で検出された ねじとラックのピッチ信号(続報)*

——ラックの歯面の位置決めと実際のピッチ測定——

谷 村 吉 久** 佐久間 健司***

Pitch Signals of Screw and Rack Detected by Holographic Interference (2nd Report)

——On Positioning a Tooth Surface of Rack and Practical Pitch Measurement——

Yoshihisa TANIMURA, Kenji SAKUMA

In the previous paper, it has been reported that pitch signals of a screw for micrometer and a rack for dial gauge can be detected by using holographic interference technique. This paper describes the practical measurement to get the pitch error of the screw and rack, the two different ways to form the pitch signals detected and the effect of a convex lens set behind hologram in order to position tooth surfaces of the rack. To position the tooth surfaces, it is necessary to condense the first-order diffraction of signal beam by means of the convex lens until the beam becomes the same size as a detector having circular window. As the results of the experience, the followings are obtained: 1) the tooth surfaces as well as the threaded flanks can be sharply positioned by setting the convex lens and the effect is clarified by theoretical analysis and practical experience, and 2) the pitches of the screw and rack can be measured by holographic interference and the measuring values are obtained with the dispersion of less than $1.2\ \mu\text{m}$ over 40 mm of a whole thread length of the screw.

1. 緒 言

前報¹⁾においてねじやラックのように周期的形状をもつ物体のピッチ測定を行う目的から、ホログラフィ干渉を利用してねじフランクとラックの歯面の位置決め信号を検出した。ねじフランクのように彎曲した面から反射してくる信号光であればその方向は変化し、鋭いピッチ信号が得られる。ラックの歯面のように平面の場合、その信号光は急激には方向を変えず、強度分布も一般に複雑である。前報ではホログラムの情報と合致した位置を正しく検出する目的からホログラムのうしろにレンズを入れ、連続したラックのピッチ信号を検出した。

本報ではこのレンズの効果について理論解析し、実験で確かめたことについて報告するとともに、ピッチ信号を波形整形するための二つの方法、マイクロメータやダイヤルゲージのスピンドルに加工されたねじやラックに

ついでの実際にピッチ測定した結果を報告する。

2. ラックのピッチ信号の検出

2.1 その方法と理論解析

ラックの歯面は平面またはそれに近く加工されているので、ホログラムの情報が信号光と合致したかどうかは‘生の’ホログラム¹⁾との重ね合せでできた一種のモアレ縞の間隔から判断しなければならない。すなわち、ホログラムの情報と合致する位置へ信号光がくれば縞間隔は無限大、またはそれに近い状態になるので、ホログラムとなった部分全体で強度変化が起こる。その位置はホログラムと受光部との間にレンズ L_B を入れ、参照光の方向の光を受光部の開口 ($3\text{ mm}\phi$) と同じ直径になるまで集光することによって検出できる(図1)。図1においてレンズ L_B を入れない場合、ラックのピッチ信号がどこでホログラムの情報と合致したかは判断できないが、レンズ L_B を入れることによってその位置を明確にとらえることができる。この効果は縞間隔と受光部の位置との関係から次のように説明される²⁾。

いま、ホログラムによる信号光の1次回折光¹⁾を

* 原稿受付 昭和48年11月7日。昭和48年度精機学会春季大会学術講演会(昭和48年4月5日)にて発表。

** 正 会 員 計量研究所(東京都板橋区加賀1-10-4)

*** 正 会 員 (株)三豊製作所(川崎市高津区坂戸165)

図1 ラックのピッチ信号を検出する光学系

$(\tau_1/2)ae^{i\beta}$ の代わりに

$$p \exp\left\{i\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2x \cos \theta_B\right)\right\} \quad (1)$$

参照光のホログラム透過成分¹⁾を $\tau_0 b e^{i\beta}$ の代わりに

$$q \exp\left\{i\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2x \cos \theta_B\right)\right\} \quad (2)$$

とおく。ここで x はホログラムに平行な面内で、その面に投影された干渉縞（一種のモアレ縞）に直角の軸の長さであり、 θ_B はホログラムの面と参照光とのなす角、 λ は He-Ne レーザの波長である。

このときラックの歯面の移動によって信号光の方向が $\Delta\theta_A$ だけ変化したとすれば、その1次回折光の方向は θ_B から $\theta_B + \Delta\theta_A$ に変化する。したがって、式(1)は

$$p' \exp\left\{i\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \cos(\theta_B + \Delta\theta_A)\right)\right\} \quad (3)$$

と表される。式(2)と式(3)が実時間において重なれば

$$\begin{aligned} I &= p'^2 + q^2 + 2p'q \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} x \{\cos \theta_B \sim \cos(\theta_B + \Delta\theta_A)\}\right] \\ &\doteq I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \Delta\theta_A \sin \theta_B\right) \end{aligned} \quad (4)$$

の強度分布をもつ干渉縞が現れる。

一方、図1に示される各記号はそれぞれ

- l_1 : 被測定面の位置からレンズ L_B までの距離
- l_2 : レンズ L_B の位置から集光点までの距離
- l : 受光部の位置から集光点までの距離、 $2x_0 l_2/D$
 $\leq l \leq l_2$ (D : レンズ L_B の直径、 $2x_0$: 受光部の直径)

S : レンズ L_B の位置での1縞の間隔

S' : 受光部の位置での1縞の間隔

I_1, I_2 : レンズ L_B の位置での信号光の1次回折光と参照光の透過光の強度

I_1', I_2' : 受光部の位置でのそれぞれの強度

$\Delta\theta_{A'}$: $\Delta\theta_A$ によって生じた受光部の位置での角度変化

δ : ホログラムの面に平行な被測定物の移動量を表しており、それらの間には次の関係がある。

$$S = \lambda / \Delta\theta_A, \quad \Delta\theta_A = \delta / l_1, \quad S' = \lambda / \Delta\theta_{A'}, \quad S' = lS / l_2 \text{ より}$$

$$\Delta\theta_{A'} = \frac{l_2}{l_1} \delta \quad (5)$$

さらに

$$I_1' = \frac{l_2^2}{l^2} I_1, \quad I_2' = \frac{l_2^2}{l^2} I_2 \quad (6)$$

である。受光部の位置での強度は式(4)の $\Delta\theta_A$, I_1 , I_2 をそれぞれ $\Delta\theta_{A'}$, I_1' , I_2' におきかえると

$$I' \doteq I_1' + I_2' + 2\sqrt{I_1' I_2'} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \Delta\theta_{A'} \sin \theta_B\right)$$

となるので、受光部の開口に対し強度が最大および最小になる干渉縞の分布において I' は

$$I'_{\max} = I_1' + I_2' + 2\sqrt{I_1' I_2'} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \Delta\theta_{A'} \sin \theta_B\right) \quad (7)$$

で表される。この $I'_{\max}$ に対する開口全体の光量 F は

$$F_{\max} = \int_s I'_{\max} \cdot ds \quad s: \text{開口の面積}$$

で与えられる。 $I'_{\max}$ の I_1' , I_2' が開口内で一様と考えれば $F_{\max}$ は

$$\begin{aligned} F_{\max} &= (I_1 + I_2) \frac{l_2^2}{l^2} \int_{-x_0}^{x_0} \sqrt{x_0^2 - x^2} \cdot dx \\ &\quad \pm 2\sqrt{I_1 I_2} \frac{l_2^2}{l^2} \int_{-x_0}^{x_0} \sqrt{x_0^2 - x^2} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} x \Delta\theta_{A'} \sin \theta_B\right) \cdot dx \\ &= \pi x_0^2 (I_1 + I_2) \frac{l_2^2}{l^2} \left\{ \frac{1}{2} \pm \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \right. \end{aligned}$$

$$\left. \frac{J_1(4\pi x_0 \Delta\theta_{A'} \sin \theta_B / \lambda)}{4\pi x_0 \Delta\theta_{A'} \sin \theta_B / \lambda} \right\} \quad (8)$$

(J_1 : 1次の第1種ベッセル関数)

と表される。

信号とノイズの比 (S/N 比) が $(F_{\max} - F_{\min}) / (F_{\max} + F_{\min})$ に比例していると考え、式(5)の $\Delta\theta_{A'}$ を式(8)に代入して計算すると S/N 比は

図2 平面を位置決めする場合のレンズ L_B の効果 (ブロックゲージの面による記録例)

図3 記録された波形(図2)からの実測値と式(9)による計算値との比較

$$\left. \begin{aligned} \frac{S}{N} &\propto \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}} = \frac{4\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \cdot \frac{J_1(R\pi)}{R\pi} \propto \frac{J_1(R\pi)}{R\pi} \\ R &= \frac{4x_0 l_2 \sin \theta_B}{\lambda l_1} \cdot \frac{\delta}{l} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となる。式(9)において l を小さくすれば δ の少しの変化で $J_1(R\pi)/R\pi$ は急激に減少してゆき、ホログラムの情報が信号光と合致したラックの歯面の位置を鋭く検出することができる。

2.2 実験

2.1項で述べた理論解析を確かめるためブロックゲージの面を移動させ実験を行った。実験において l をパラメータとし、 $l=l_2$, $0.7l_2$, $0.3l_2$, $0.16l_2$ と変化させたときのおおのの記録波形は図2のとおりである。一方、式(9)のそれぞれの値を

図4 ピッチ測定に用いた光学系と電気回路

$$2x_0=3\text{ mm}, \lambda=0.633 \times 10^{-3}\text{ mm},$$

$$l_1=545\text{ mm}, l_2=320\text{ mm}, \delta=vt,$$

$$\sin \theta_B=0.940 (\theta_B \approx 70^\circ), v=4.7 \times 10^{-3}\text{ mm/s}$$

として計算すると、 $R \approx 0.077 l_2 t / l$ となるので、 l を変化したときの $R\pi$ の値が t の関数で計算され、また $J_1(R\pi)/R\pi=0$ となるときの δ の値も計算される。これらの計算値を用いて図3の曲線が書ける。図中の各実測値は図2の記録波形から求めた。 $l=0.16l_2$ はオプティカルファイバの受光部の開口とほぼ同じ直径に集光した場合である。

3. ピッチ測定に用いる装置およびピッチ信号

3.1 光学系と電気回路

図4はピッチ測定を行うための光学系と電気回路を示す。1個のレーザ光源* (3mW) をビームスプリッタにより一方はホログラフィのために、他方は被測定物の移動量を干渉縞の数で計数するための干渉計の光源として用いる。ビームスプリッタの反射と透過の割合を7:3とし、ホログラフィ光学系に用いる光を強くした。

移動台の送り速度はピッチ測定において $75\text{ }\mu\text{m/s}$ に、またピッチ信号を記録紙に記録するときには $4.7\text{ }\mu\text{m/s}$ とする。ピッチ信号の強度変化の周波数は被測定

* CW Radiation 社製。

面からホログラムまでの光路長の変化する割合によって決まる。レーザビームを被測定面に入射させる入射角は正反射光を得るために約 85° 以上に設定されるので、この周波数は 20 Hz 以下と見積られる。同図のカウント A と B はピッチ信号が検出されるごとに交互にそのときの被測定物のピッチ誤差をパルスの数 (1パルス $= \lambda/4$) で表示する。一方、セット信号はピッチ誤差を表示している方のカウンタに入り、カウンタを一定時間後に称呼のねじピッチに相当するカウント数にセットし、次のピッチ信号で干渉縞の計数を開始するように回路の各部をセットするための信号として働く。

3.2 ピッチ信号の波形整形

ピッチ測定に入るまえに、検出された信号をどのように整形し、鋭い矩形のピッチ信号とするかによって測定値のばらつきに差があると予想されたので、二つの方法で波形整形してみた。実験はマイクロメータのスピンドルのねじについて行った。

3.2.1 信号の斜辺を波形整形した場合

信号を一定レベルの電圧でカットし、その切りとられた部分の斜辺を整形すると図 5 (a) に示される過程で矩形のピッチ信号が得られる。同図 (b) はねじの同じ 1 ピッチ間を繰返し往きとかえりで測定したときの測定値のばらつきを示す。この場合のばらつきは標準偏差で $0.18\text{ }\mu\text{m}$ (所要時間は 60 min) である。平均値はそのときのピッチ誤差を示す。

3.2.2 信号の頂点を波形整形した場合

図 6 (a) は信号の頂点を波形整形した場合である。この場合、矩形のピッチ信号は二つ現れているが、そのどちらかの立下りでカウンタを働かせる。どちらを利用するかは図 4 に示した信号の選択回路で自由に選べる。同図 (b) は同様に 1 ピッチ間を繰返し測定したときの測定値のばらつきを示す。ばらつきの標準偏差は移動台の移動方向によって異なるが $0.15\text{ }\mu\text{m}$ であった。標準偏差および平均値が往きとかえりで異なることは一般にこの場合だけでなく斜辺で整形する場合にも起こるが、その原因については測定上の問題点として後述する。

図 5 と図 6 の結果より信号の波形整形をその斜辺ですべきか、頂点ですべきかを判断するため、それぞれの分散の値について統計解析を行った。斜辺の場合と頂点の場合とでそれぞれの分散の値の間に有意差があるかどうかは分散比の検定において F 表を用いて調べられる。その手法に従えば、それぞれの分散比は

$$\begin{aligned} \frac{\text{斜辺の場合の分散}}{\text{頂点の場合の分散}} &= \frac{(0.18)^2}{(0.15)^2} = 1.44 > F_{111}^{119}(0.05) \\ &= 1.36 \text{ (補間値)} \end{aligned}$$

(a) 波形整形の過程 (b) 1 ピッチ間を繰返し測定したときの測定値のばらつき

図 5 ピッチ信号の斜辺で波形整形した場合の測定値のばらつき

(a) 波形整形の過程 (b) 1 ピッチ間を繰返し測定したときの測定値のばらつき

図 6 ピッチ信号の頂点で波形整形した場合の測定値のばらつき

となるから、斜辺で行った場合と頂点で行った場合とでは危険率 10% で有意差があると検定される。往きとか

えりを別々に検定すると行き方向では危険率 2% で、かえり方向では 20% で有意差がある。なお、両方の場合とも行きとかえりとの間には有意差は認められない。

以上の解析の結果、信号の斜辺より頂点で波形整形した方が測定値のばらつきは小さいと判断されるので、以後のピッチ測定においては頂点で波形整形したピッチ信号を利用する。

4. ピッチ測定の結果

4.1 ねじの場合

マイクロメータのスピンドルに加工されたねじの寸法を測定したところ、ピッチ、外径、ねじ部の長さはそれぞれ 0.5 mm, 7.25 mm ϕ , 40 mm であった。測定する際にはねじ軸と移動方向を水平面内のずれで 40 mm につき約 2 μ m 以下になるまで調整した。水平、垂直とも移動方向とレーザビームの方向は十分に調整し、移動台が 150 mm 移動するときビームの位置のずれを 0.5 mm 以下とした。

図 7 (a) はマイクロメータ用ねじ No. 1 についてピッチ測定を行った結果である。両フランクとも 1 ピッチごとに測定されたが、煩雑になるので 4 ピッチごとに 3 回の測定の平均値をとって示した。また、全測定範囲にわたって測定値のばらつきは高々 1 μ m であった。同図の右フランクの測定値はホログラムを作成した側のフランクで得られたもの、また左フランクの測定値は同じホログラムを使ってねじをとんぼ返りさせて得られたものである。実際にマイクロメータとして使用されるとき、その構造上、ねじはナットと両フランクで接触して働くと考えれば、ねじのピッチ精度は両フランクの測定結果

図 7 ねじ No. 1 および No. 2 のピッチ測定結果

の平均から求めたねじみぞ中心のピッチ精度が有効である。測定結果を比較する目的から右フランクを Leitz Strassmann 万能測定顕微鏡で測定した結果を同図に○印で示す。そのばらつきは最大 2.5 μ m であった。

図 7 (b) は同じホログラムを使って別のねじ No. 2 のピッチ測定を行った結果である。この場合の測定値のばらつきは全測定範囲で高々 1.2 μ m であった。その他の測定の要領はねじ No. 1 に準ずる。

4.2 ラックの場合

図 8 (a) はダイヤルゲージのスピンドルに加工されたラックの歯面にレーザビームをあて信号光としている様子を示す。同図 (b) は検出されるラックの歯面のピッチ

(a) ラックの歯面の照明

(b) 左上の写真は生のホログラムと凍結されたホログラムが合致したとき、左下はそれらが合致しないときにみられる干渉縞。右は検出されたラックのピッチ信号とその整形後の信号

図 8 ラックの歯面の照明とそのピッチ信号

図9 ダイアルゲージ用ラック No. 1 および No. 2 のピッチ測定結果

信号をオシロスコープで観察したものである。信号はラックの移動とともに次々と現れる歯面からも検出されるが、その連続した記録波形はすでに前報に載せてある。

測定は新品のラック No. 1 および 80 万回ダイアルゲージの耐久試験を行ったといわれるラック No. 2 について行われ、そのピッチ精度をそれぞれ図9(a)および(b)に示す。測定された歯面はダイアルゲージとして使用する場合にその第1ピニオンとかみあう作用側の歯面である。ホログラムはラック No. 1 の一つの歯面で作られたが、同じホログラムを使って No. 2 が測定された。また3回測定した測定値のばらつきは全測定範囲で No. 1 が $1.2\mu\text{m}$ 、No. 2 が $0.5\mu\text{m}$ である。○印はねじの場合と同様に Leitz Strasmann 万能測定顕微鏡で測定した結果である。

5. 考 察

5.1 測定上の2,3の問題点

検出されるピッチ信号の波形整形の容易さ、測定値の再現性の良さなどの点から、信号光の強度はできるだけそろっている方が好ましい。洗浄を十分に行ったのち、ねじフラングおよびラックの歯面からの信号光の強度を記録してみた。その結果、強度のピーク値のばらつきはねじの場合には平均値に対し $\pm 11.7\%$ 、ラックの場合には $\pm 8\%$ であった。ばらつきはあるが、ねじについては80山全部のフラングから、ラックについては26山全部の歯面から有効なピッチ信号が検出できた。

また、3.2項で述べた波形整形においてピッチ信号が一定レベルの電圧でカットされるとき、その波形が左右対称または合同でなければ測定誤差が生じ、同じピッチ間を測定しているにもかかわらず測定値は測定方向によ

表1 光電顕微鏡との比較

位置決め方法	光電顕微鏡による	ホログラフィ干渉による
検出の原理	被測定物の投影されたプロファイル、または実像の位置を顕微鏡で検出	被測定面からの正反射光を信号光とし、ホログラムを作り、これを一種のフィルタとする位置決め
検出する情報	光の強度変化、点または線の情報	光の強度変化と光路長の変化、面の情報
位置決め のばらつき	スケールの目盛の場合 $0.1\mu\text{m}$	電気マイクロメータのドリフトを含めて $0.4\mu\text{m}$
測定値の再現性	スケールの場合 $0.2\mu\text{m}$	ねじの1ピッチ間の場合 $0.8\mu\text{m}$
測定の対象とする物体の形状	直線的、平面的なもの	正反射光が得られる形状であれば面が彎曲していてもよい
測定対象	主にスケールの目盛線の位置、ラック、ねじ、平歯車、ブロックゲージ、コイル	ねじ、ラック、歯車、コイル、特に立体的に並ぶ周期的形状をもつ物体のピッチ
測定の目的	精度の高い測定をしたい場合	多量に同一種類のものを測定したい場合
焦点深度	制限がある	特に関係はない
取付けの難易	易	難(光学系、装置をコンパクトにする必要あり)
性能の安定性	良	不良(光学系、電気系の安定化が必要)
装置の経済性	高	低(レーザと写真技術の発展が必要)

って違った値を示す。この影響は頂点で波形整形する場合においても微分波形を作れば少なからず入る。図6(b)の結果において行きとかえりで平均値および標準偏差が違っているのはこの影響によるものと考えられる。

5.2 ピッチ測定の結果

ねじのピッチ精度はマイクロメータの構造上から両フラングのピッチ誤差の相加平均として、ねじみぞ中心のピッチ精度で図7に示された。反対側のフラングのピッチを測定する場合、ねじをとんば返りさせることは1枚のホログラムで両フラングが測定できるという利点だけでなく、相加平均を求めれば垂直面内でのもろもろの測定誤差が平均化され、小さくなるという利点も伴う。

ラックのピッチ精度を示す図9においてラック No. 1

に比べ、No. 2 は単一ピッチ誤差が小さく、全体に滑らかな誤差曲線となっている。これは耐久試験の結果、ラックとピニオンの歯面でラッピング効果が生じていたためと思われ、測定値のばらつきも No. 1 に比べて小さい。

5.3 信号波形の経時変化

ホログラムをセットしてから 24 h にわたって 2 h おきに同じラックの歯面のピッチ信号を記録したところ、信号波形の発生する位置がずれるという現象が起きた。はじめに記録した波形の位置を基準にそれからのずれをとると、このずれの量は同時に記録した室温変化と比例していることが確かめられた。この原因として定盤の熱変形、その他の部品や光学系が温度に比例して複雑に変化したことなどがあげられる。またこのずれの量はラックの歯面の位置のずれに換算すると、室温変化が 1°C のとき $1\mu\text{m}$ という値である。ただし、本実験のピッチ測定は室温変化が 4 h で 1°C ある部屋で行われたこと、また 1 回の測定時間が高々 10 min であることなどから、このずれが測定誤差となる量はきわめて少なく、無視できる。

前報および本研究で述べたホログラフィ干渉によるピッチ信号の検出を非接触な位置決め方法の一つと考えれば、光電顕微鏡による位置決め方法と比較される。それぞれの特徴を比較し表 1 にまとめた。

6. 結 言

本研究によって次の結果が得られた。

- (1) ラックの歯面のように平らな面もホログラムのうしろにレンズを入れ、受光部と同じ開口になるまで集光すれば、情報の合致した位置で鋭いピッチ信号を検出することができる。それについて理論解析し、実験で確かめた。
- (2) 本研究のピッチ信号を波形整形するには、その斜辺で行うより頂点で行った方が測定値のばらつきは小さく、標準偏差で $\sigma=0.15\mu\text{m}$ であった。
- (3) マイクロメータおよびダイヤルゲージのスピンドルに加工されたねじとラックについてピッチ測定を行った。測定値のばらつきは全測定範囲で約 $1.2\mu\text{m}$ であった。測定が同種類のねじ、あるいはラックであれば 1 枚のホログラムでその他のねじやラックも次々と測定することができる。

本研究の遂行において計量研究所第 1 部長・奈良治郎氏よりご支援いただき、電気回路に関しては同第 1 部・白石堅司主任研究員より、またねじの測定については東京工業大学・山本晃教授よりご助言いただいた。マイクロメータに関する資料は三豊製作所よりいただいた。ここに各位に感謝の意を呈する。

参 考 文 献

- 1) 谷村吉久, 奈良治郎: ホログラフィ干渉で検出されたねじとラックのピッチ信号, 精密機械, 39, 5 (1973) 541.
- 2) J. L. Goldberg & R. H. Brockman: Interferometry in Length Measurement (2. Practical Consideration), Electronic Tech., May (1962) 186.