変調周期の回折格子を用いた光学式エンコーダ（第1報）*

—実験的評価—

家城 淳** 松井圭司*** 梨木政行*** 羽根一博†

Optical Encoder Using Modulated Pitch Grating(1st Report)
-Experimental Evaluation-

Atsushi Ieki, Keiji Matsui, Masayuki Nashiki and Kazuhiro Hane

The light intensity diffracted from superimposed dual transmission gratings having uniform pitch is sensitive to their relative lateral displacement. In the case that change of light intensity is used for measurement of lateral displacement, the intensity change has some distortion(deviation from sinusoidal variation) and is affected by changes in the air gap between two gratings. This paper shows that an index grating with modulated pitch can be used to reduce signal distortion. The index grating does not have uniform pitch lines but has periodical patterns of UN-uniform pitch lines. Experiment shows that the signal distortion is reduced and is almost independent of the gap. This method can reduce interpolation error under $\pm 0.125\%$ of grating pitch, and is effective for an encoder in precision machining.

Key words: optics, displacement measurement, modulated pitch, distortion

1. 緒 言

2枚の回折格子を重ね合わせて得られるモアレじま（回折の効果が発著なときモアレ回折光）は、変位に敏感なことからリニアあるいはロータリーのエンコーダに古くから用いられてきた¹⁾。2枚の回折格子は、一般的にその格子パターンの明暗比が1対1の矩形波状の透過率を持ち周期が一定である。この場合、2つの回折格子を等速度で相対移動させた際に得られるモアレ回折光は、単一の正弦波にならず、「2.原理」の項の図2に示すようなひずみ成分（格子周期の正弦波以外の高調波成分）を含んでいる。従って、信号波形の電気的な内挿分割により、信号周期よりも細かな位置データを得る際に、信号波形のひずみ成分により、分割誤差を招くという問題があった。また、2枚の回折格子の間隙の変動によりひずみ成分が大きく変動するため、格子間隙を常に一定に保たなければならないという問題があった²⁾。このような現象は、発光素子として、半導体レーザを用いても、またインコヒーレント光であるLEDを用いても同様に発生する。

これらの問題を解決し、できるだけ純粋な正弦波に近い信号波形を得るために、コヒーレントな光源を用いて、1枚の回折格子の変位による1次回折光の位相変化をとり出す方式^{3)~5)}や、2枚の回折格子を所定の角度だけ傾けて格子間隙を平均化する方法⁶⁾がある。しかしながら、レーザ光源、ミラー、ビームスプリッタなどのレーザ光学系が必要であったり特殊な光学素子を必要とする。また一般に、インコヒーレント光源を用いた2枚の回折格子を重ね合わせるエンコーダに比べると、装置が複雑で高価である。

本研究では、2枚の回折格子を重ね合わせる方式のエンコー

ダにおいて、モアレ回折光に含まれるひずみ成分を低減し、精度の高い測定を行うことを目的としている。本論文では、周期が一定でない変調周期の回折格子をインデックススケールに用いて、信号波形のひずみ成分を低減する新たな方法を提案した。メインスケールには $80\mu\text{m}$ の一定周期を有する回折格子を用い、光源にはインコヒーレントなLEDを使用して、実験的に有効性を示した。

2. 原 理

2.1 回折格子パターン

本研究では、回折格子のスリットの間隔が一定でない回折格子（本論文では変調周期の回折格子と呼ぶ）をインデックススケール（第2格子）に用い、スリットの間隔が一定の回折格子

Fig. 1 Schematic diagram of modulated pitch grating pattern

* 原稿受付 平成6年12月2日

** 正 会 員 オークマ(株) (愛知県丹羽郡大口町下小口 5-25-1)

*** オークマ(株)

† 正 会 員 東北大学工学部 (仙台市青葉区荒巻字青葉)

Fig.2 Light intensity calculated as a function of displacement d with the gap Z as a parameter (Using periodic grating)

(一定周期の回折格子と呼ぶ)を、メインスケール(第1格子)に用いる。変調周期の回折格子のパターンの一例を図1に示す。ハッチング部がスリット(透明部)であり、その周囲は不透明部(金属膜)である。4本のスリットを1組として、1組の長さ4Pを周期として繰り返すパターンである。スリットはいずれもスリット幅がP/2で同一形状だが、それらの間の距離は同じでない。この周期4Pのなかに、4本のスリットがあるので平均周期はPである。そして、これらのスリットが、平均周期Pに対して図1に示す所定の位相差をもって配置されている。これらの位相差は、2枚の回折格子を経たモアレ回折光に含まれるひずみ成分を除くために用いられる。図1の例では、3次と5次の高調波成分が生じないように以下の理論的考察に基づいて4本のスリットの配置を決定した。

第1格子は、Pを格子周期とする一定周期のパターンであり、透明部、非透明部の幅がそれぞれP/2である。

2.2 変位信号

一定周期の回折格子を第1格子及び第2格子に用いて、光電変換素子をその直後に配置した場合(図3参照)に得られる変位信号 I_1 は、下式で示される。

$$I_1 \propto \frac{1}{8} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k^2 \pi^2} \cos(k^2 \pi M) \cdot \cos\left(\frac{2\pi k d}{P}\right) \quad (1)$$

$M = \lambda Z / P^2$, λ は波長, Z は格子間隙, P は格子の周期, d は変位である。変位信号 I_1 の3次のひずみ成分は、式(1)の $k=3$ において、 $\cos(3 \cdot 2\pi d/P)$ の係数

$$\frac{1}{9\pi^2} \cos(9\pi M)$$

によって生じる。また、5次のひずみ成分は、式(1)の $k=5$ において、 $\cos(5 \cdot 2\pi d/P)$ の係数

$$\frac{1}{25\pi^2} \cos(25\pi M)$$

により生じる。これらの値は、格子間隙 Z の値により $\cos(k^2 \pi M)$ が0となるような特別な場合を除き0にはならず、変位信号にひずみが含まれる。計算により得られた変位信号を図2に示す。緒言で述べたようにひずみ成分を含み、またそのひずみ成分が格子間隙により、大きく変化している。

これに対して、図1に示す変調周期の回折格子を第2格子に用いて、光電変換素子をその直後に配置した際に得られる変位信号 I_2 は、下式で示される。

$$I_2 \propto \frac{1}{8} + \sum_{n=4}^{\infty} \frac{4}{n^2 \pi^2} \cos(n^2 \pi M') \{A_n' \cdot \cos\left(\frac{2\pi n d}{P'}\right) + B_n' \cdot \sin\left(\frac{2\pi n d}{P'}\right)\} \quad (2)$$

$$A_n' = \{1 + \cos(n \cdot 2\pi \cdot \frac{7}{24}) + \cos(n \cdot 2\pi \cdot \frac{21}{40}) + \cos(n \cdot 2\pi \cdot \frac{49}{60})\}$$

$$B_n' = \{\sin(n \cdot 2\pi \cdot \frac{7}{24}) + \sin(n \cdot 2\pi \cdot \frac{21}{40}) + \sin(n \cdot 2\pi \cdot \frac{49}{60})\}$$

P は第2格子の平均周期であり第1格子の格子周期に等しい。 $P' = 4P$, $M' = \lambda Z / P'^2$ である。この例のように、基本周期が4Pの場合、 n は4, 12, 20, 28, 36, 44...の値だけをとる。ここで、 $n=4$ がPの基本周期成分に、 $n=12, 20, 28$ がPの3, 5, 7次の周期成分に相当する。式(2)の変位 d に関する項は、 $n=4$ において、 $\cos(2\pi d/P)$, $\sin(2\pi d/P)$ となりPを周期とする基本周期成分となる。

変位信号の3次のひずみ成分は、式(2)の $\cos(3 \cdot 2\pi d/P)$ の項の係数

$$\frac{1}{36\pi^2} \cos(9\pi M) \cdot A_3'$$

ならびに $\sin(3 \cdot 2\pi d/P)$ の項の係数

$$\frac{1}{36\pi^2} \cos(9\pi M) \cdot B_3'$$

に比例する。図1に示したスリット配置の場合 A_3' , B_3' はそれぞれ0となる。従って、図1のようにスリットを配置することで変位信号に含まれる3次のひずみ成分は0となる。同様に信号波形の5次のひずみ成分は、式(2)の $\cos(5 \cdot 2\pi d/P)$ の項の係数、

$$\frac{1}{100\pi^2} \cos(25\pi M) \cdot A_5'$$

ならびに $\sin(5 \cdot 2\pi d/P)$ の項の係数

$$\frac{1}{100\pi^2} \cos(25\pi M) \cdot B_5'$$

に比例する。3次の場合と同様に $A_5' = 0$, $B_5' = 0$ となって、これらの係数も0となる。従って変調周期の格子(図1)を用いることで変位信号の3次と5次のひずみ成分を除去できる。

言い換えると、①と②のスリットの位相差P/6は、各スリットを透過するモアレ回折光に含まれる3次のひずみ成分が互いに逆相となり打ち消すために設けられている。③と④のスリット列も同様にP/6の位相差をもつ。さらに、①②のスリット列に対して③④のスリット列は、P/10の位相差をもち5次のひずみ成分を打ち消す。

3. 実験

3.1 光学式エンコーダ部の構成

実験装置は光学式エンコーダ部とステージ及び基準変位測定

Fig.3 Schematic diagram of the optical encoder

部より成る。光学式エンコーダ部の構成の概略を図3に示す。第1格子は、格子周期が $80\mu\text{m}$ で透明部、不透明部は各々 $40\mu\text{m}$ となっており、その精度は $0.3\mu\text{m}$ 以下である。不透明部の材質はクロム、膜厚は $1000\text{\AA}$ 程度であり、ガラスの材質はソーダライム、厚さは 3mm である。第2格子は図1に示したパターンで構成された変調周期の回折格子で、 $4P=320\mu\text{m}$ となっている。

発光素子であるLED（ピーク波長 880nm ）から出た光は、コリメータレンズにて平行光束となりミラーにて反射されて、第1格子に入射する。ここを透過した光束が、第2格子へ入射し、さらに透過した光束がフォトダイオードへ入る。このフォトダイオードで得られた光電流は、アンプにて電圧増幅され、A/D変換器にてデジタルデータに変換される。ここで得られた信号波形は、パーソナルコンピュータへ転送される。

また、比較のため第2格子に、格子周期 $80\mu\text{m}$ で透明部、不透明部が各々 $40\mu\text{m}$ の一定周期の回折格子を用いた場合につい

Fig.4 Schematic diagram of the experimental setup

ても信号波形を採取した。

3. 2 ステージ及び基準変位測定部の構成

基準変位測定のための装置の概略を図4に示す。第1格子に対して、第2格子を含んだ検出系が、移動ステージにより相対的に移動できる。移動ステージは、油静圧1軸ステージ（オークマ株式会社製）であり、ステージの制御は、NCであるOSP500LG（オークマ株式会社製）を用いた。機構は、 2mm のボールねじを、モータに直結したものである。位置制御用の位置検出は、モータ内蔵の回転位置検出器（OSP-FB型検出器）にて行った。検出分解能は 163840parts/rev であり、ボールねじの進行方向に換算すると 12.2nm の位置検出分解能を有する。また、移動ステージの位置を校正するために、レーザ干渉測長器（ZYG社製）を用いた。この測長器の検出分解能は、 1.25nm である。この測定系は、実験装置の構成上アッペの原理を満足していないが、ステージ移動時の姿勢変化が小さいため測定に与える影響は微小で、測定の誤差は 0.0024% と実験結果に影響を及ぼさないレベルとなっている。

光学式エンコーダ部で得られた信号、ならびにレーザ干渉測長器で得られた位置データは、パーソナルコンピュータへ転送される。ここで、信号波形とレーザ干渉測長器の位置データは、ほぼ同一タイミングで計算機にとりこまれる。そして、収集された信号波形と位置データは、ワークステーションにてフーリエ解析等の処理を経て分析される。

4. 結果および考察

4. 1 信号波形のひずみ

図4の構成において、ステージを一定速度で移動させ、信号波形とレーザ干渉測長器の位置データを採取した。第1格子と変調周期の第2格子との間隙は 0.3mm から 1.55mm まで変化させた。各間隙で得た信号波形の周波数成分は、フーリエ変換により求められた。

信号波形の実測値について、第2格子に変調周期の回折格子を用いた場合を図5に示し、第2格子に一定周期の回折格子を

Fig.5 Light intensity as a function of displacement d with the gap Z as a parameter (Using modulated)

Fig. 6 Light intensity as a function of displacement d with the gap Z as a parameter (Using periodic grating)

用いた場合の信号波形を図6に示す。それぞれ、信号の周期は $80\mu\text{m}$ である。図6に示すように、一定周期の回折格子を用いた場合は、信号にひずみを有している。またそのひずみが格子間隙により変化している。これに対し変調周期の回折格子を用いた場合は、どの間隙においても、ほぼ理想的な正弦波形となっている。

図7にて信号波形のひずみ成分を比較した。レーザ干渉測長器にて検出された位置データを基準として、得られた信号波形をフーリエ変換してひずみ成分を算出した。図7に示すように、一定周期の回折格子を使用した際には格子周期 P に対し $P/3$ の成分（3次の高調波成分）と、 $P/5$ の成分（5次の高調波成分）が顕著である。また、格子間隙による変動が大きく、3次の高調波成分は0～11%まで変化している。格子間隙が 1.3mm 程度にて、極小となるが、間隙の増加により再び増加している。5次の高調波成分は、0～4%まで格子間隙の変化に対し変動している。

これに対して、変調周期の回折格子を使用した場合は、3次の高調波成分が0.6%以下、5次の高調波成分が0.1%以下に低減されている。また、これらは格子間隙が 1.55mm 以下においてほとんど変化していない。従って、一定周期の回折格子を使用した場合は、格子間隙を高調波成分の比較的小さい 0.4mm 付近か 1.3mm 付近に合わせる必要があり、その際も格子間隙の設定を精密にしないと、信号波形の高調波成分が変動してしまう。これに対して、変調周期の回折格子を使用した場合は格子間隙によらず、高調波成分の少ない信号波形を得ることができる。

変調周期の回折格子を用いて得られる信号波形のひずみ成分の詳細例を図8に示す。格子間隙は 0.8mm である。ここで、3次や5次の高調波成分は、特にピークを生じず、本手法により十分軽減されていることがわかる。ピークとしては、7次の高調波成分があり、その成分量は基本波に対して0.32%である。また、11次の高調波成分が0.19%含まれている。その他の成分については図示のように含まれているが、0.2%以下と小さい。つまり、この信号波形を理想的な正弦波と見なして位置の検出を

Fig. 7 Signal distortion of 3rd and 5th as a function of the gap (Comparisons between modulated pitch grating and periodic grating)

Fig. 8 Signal distortion as a function of the period (Using modulated pitch grating)

行う場合、これらの高次の成分が誤差要因となるが、それらは次節で述べるように非常に小さい。

4. 2 位置の検出精度

前述の高次の成分が大きな誤差要因とならないことを確認するため、図5に示した信号波形を用いて位置検出の精度を評価した。図4の構成において、ステージを一定速度で移動させ、変調周期の回折格子を用いたリニアエンコーダの信号波形から位置データを算出し、同時に採取するレーザ干渉測長器の位置データと比較して位置の検出精度を求めた。位置データの算出は、信号波形を正弦波と見なして三角関数演算にて求めた。このためそれぞれ 90° 位相の異なる4相の信号波形を用いている。このうち 0° 、 180° の2相の差動により正弦波信号を生成し、 90° 、 270° の2相の差動により余弦波信号を生成し、この2つの信号を用いて逆正接演算を行って位置データを算出した

Fig.9 Interpolation error for the modulated pitch grating measured as a function of the displacement

Fig.10 Interpolation error for the modulated pitch grating as a function of the period

(内挿処理)。

変調周期の回折格子を用いたエンコーダの誤差を図9に示す。400 μm の区間におけるエンコーダの精度をレーザ干渉測長器を基準として求めたものである。誤差はおよそ $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の範囲に入っている。標準偏差は、 $0.05 \mu\text{m}$ である。誤差要因としては、第1格子の目盛の製作誤差と、内挿誤差がある。測定区間が400 μm と短いので誤差はほとんどが内挿処理に起因するものと考えられる。

図9に示した $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の誤差は、信号波形周期の $\pm 0.125\%$ の大きさである。この誤差は細かな周期成分からなっており、周波数成分を求めると、図10となる。図10において、誤差の主な成分は、P (80 μm)を基本周期として1/8周期の成分が

0.084 μm 、1/12周期の成分が0.057 μm であった。内挿処理のために、誤差の1/8周期成分は信号波形の7次のひずみ成分に起因して生じ、誤差の1/12周期成分は信号波形の11次のひずみ成分に起因して生じる。信号波形には7次のひずみ成分が基本波に対して0.32%含まれ、11次が0.19%含まれており、これにより発生する内挿誤差を計算すると、それぞれ0.081 μm と0.048 μm であり、測定値とはほぼ一致した。

図7に示したように信号のひずみ成分が格子間隙により変化しないので格子間隙が変化しても、内挿誤差は、悪化することなく精度の高い測定が行える。一方、一定周期の回折格子を用いた場合には、内挿誤差が格子間隙により大きく変化し、またその値は、場所によっては1~1.5 μm にまで達している。従って、本報告による変調周期の回折格子の利用の効果は大きい。また、今回報告した3次や5次のひずみ成分を除去する変調周期の回折格子と同様に、7次や11次のひずみ成分を除去することも可能であると考えられる。

5. 結 論

本研究では、2枚の回折格子を重ね合わせるエンコーダにおいて、変調周期の回折格子を使用することを提案し、信号波形に含まれる高次のひずみ成分を取り除くことを試みた。特に3次と5次のひずみ成分を取り除くことを試み、以下の結論を得た。

- (1) 検出信号に含まれるひずみ成分が、3次、5次とも約1/20に低減された。
- (2) ひずみ成分は格子間隙に対して変動しないため、エンコーダの間隙変動を許容できる。
- (3) 内挿誤差が信号周期の $\pm 0.125\%$ まで小さく抑えられ、位置検出における細分化が可能となった。

今回製作した変調周期の回折格子にて除去を試みていない7次や11次のひずみ成分は残った。しかし、7次や11次のひずみ成分、ならびに一般化されたn次のひずみ成分を低減させる格子パターンを製作することも可能であると考えられる。

最後に本研究に対して貴重なご指導をいただいた花木義廣取締役、柚原秀男開発部長、ならびに多大な協力を得た林 康一、柴田伸二の両氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 立澤 寛編著：精密位置決め技術，第4章，工業調査会(1989)。
- 2) V.T.Chitnis, Y.Uchida, K.Hane and S.Hattori: Moire Signals in Reflection, Opt.Comm., 54 (1985) 207.
- 3) 小尾勝俊：レーザロータリーエンコーダ，センサ技術，13, 13(1993) 18.
- 4) 森山茂夫，原田達男：回折格子を用いた精密変位検出法，昭和57年度精機学会春季大会学術講演会論文集(1982) 234.
- 5) A.Teimel: Technology and Applications of Grating Interferometers in High-precision Measurement, Prec.Engg., 14 (1992) 147.
- 6) K.Hane, Y.Uchida and S.Hattori: Moire Displacement Measurement Technique for a Linear Encoder, Opt Laser Technol., 17 (1985) 89.