金属表面回折格子を用いた光エンコーダ*

羽 根 一 博** 奥 山 賢 一*** 佐 々 木 実***

Optical Encoder Using Metallic Surface Grating

Kazuhiro HANE, Kenichi OKUYAMA and Minoru SASAKI

With an intense thermal variation, optical encoder yields measuring error because of the generation of nonlinear strain due to the difference of the thermal expansion coefficient between a glass scale and a metallic parts of machines. In this study, a method of using a grating which is directly manufactured on a metallic surface of parts of machines is proposed. Using this method, the thermal strain is made linear and the error becomes simplified to calibrate. Furthermore, it realizes a miniaturization of the system and improves its vibration-resistance. This paper shows the process of making a grating on a metallic surface by photolithography using some methods and ascertains the sufficient performance of this scale in an optical encoder.

Key words: optical encoder, lithography, optical measurement

1. 結 言

回折格子を用いた光学式エンコーダは、メカトロニクスにおける制御部品として不可欠な変位センサであり、近年工作機械やロボット等においてより高い精度が必要とされている。このため、微細な周期 ($< 1\mu\text{m}$) の回折格子を用いて回折光の干渉により信号を得る干渉型エンコーダ¹⁾や、内挿分割精度を向上するように変調周期の回折格子を用いたエンコーダ²⁾³⁾など新しい原理のエンコーダが開発され、分解能は既にサブミクロンのオーダーに到達している。

一方、精密機械においては、センサ系のオンマシン化の必要性が高くなってきている。この場合、高精度化とは別に、温度変化・振動・空気ゆらぎ等の環境に強い、信頼性の高いセンサが必要である⁴⁾⁵⁾。光学式エンコーダはレーザ干渉計に比較して温度の変動の影響を受けにくいことが知られている。しかし、スケールの材質は一般にガラスであり、主に金属製の機械部品との熱膨張係数の違いにより、温度変化による非線形ひずみが発生し、計測時における誤差の原因となることが指摘されている⁶⁾。このため、精密な計測は恒温室内に限られるのが現状である。

本研究では、精密移動ステージの基盤やロボットアーム等、曲面を含む機械部品の金属表面上に直接描画した回折格子パターンを用いてエンコーダを構成し、熱膨張によるひずみの線形化を図り誤差の校正を容易にすると共に、機構の耐振動性向上、小型化、低価格化などを達成することを目的としている。本論文では、一般的な表面仕上げ加工が施されたアルミニウム材表面を加工して反射型回折格子を製作した。製作にあたり、様々な形状の機械部品表面への適用を考慮し、通常的光学式エンコーダのうちのフォトレジスト塗布法と露光法を検討した。また、エンコーダ光学系に空間フィルタを使用した二重回折光学系を用いることにより、粗面によるノイズ成分の除去を図った。信号を採取し、鏡面上に製作した回折格子による信号との比較により粗面格子の光エンコーダ用スケールとしての性能を評価し、更にフーリエ解析によりフィルタリングの有効性を確認した。

2. 原 理

2.1 粗面に形成された回折格子の回折理論

機械加工により得られた金属部品表面はある程度鏡面に近いが、ランダムな凹凸があると仮定する。凹凸の変化(分散)の大きさは光の波長に比較して大きいとする。粗面の位置を表面より離れた面 ($z=z_0$) より z の負の方向に測定した距離を $z_r(x)$ とする (図1(a))。次に表面にフォトレジストを塗布し、パターンニング後エッチングする。エッチング量は時間のみに依存するとし、そのエッチング量を d_0 とする。このとき溶液エッチングの場合は等方性エッチングであるが、本研究ではエッチング深さが格子周期に比較して小さいので、エッチング深さは場所によらず一定と仮定する。エッチング深さ $d(x)$ は図1(b)に示すように

$$d(x) = \begin{cases} 0 & |x - np| < \varepsilon \\ d_0 & \varepsilon < |x - np| < p/2 \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

により与えられる。 2ε がマスクの格子の遮蔽部分の幅、 $p - 2\varepsilon$ が格子の透過部分の幅を表す。エッチング深さ $d(x)$ をフーリエ級

Fig.1 Analytical model

* 原稿受付 平成 10 年 4 月 3 日

** 正会員 東北大学工学部(仙台市青葉区荒巻字青葉)

*** 東北大学工学部

数により表現すると

$$d(x) = \frac{2d_0\varepsilon}{p} - \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos 2\pi k \frac{x}{p} \quad (2)$$

$$c_k = \frac{d_0 p}{2\pi \varepsilon k} \sin 2\pi k \frac{\varepsilon}{p}$$

従ってエッチング後の表面形状は図1(c)に示すようにランダムな表面形状が断続的となった状態である。格子の形成された粗面はレーザ光が反射するとき反射型の位相格子として機能する。位相格子の位相 δ は

$$\delta = \frac{4\pi(z_r + d(x))}{\lambda} \quad (3)$$

で与えられる。従って格子透過率は振幅を1とすると

$$\begin{aligned} e^{i\delta} &= e^{i\frac{4\pi}{\lambda}(z_r + d(x))} \\ &= e^{i\frac{4\pi}{\lambda}z_r} e^{i\frac{4\pi}{\lambda}d(x)} \\ &= F(x) \cdot G(x) \end{aligned} \quad (4)$$

で表される。ここで $F(x) = \exp\{4i\pi z_r/\lambda\}$, $G(x) = \exp\{4i\pi d(x)/\lambda\}$ とする。回折光振幅 $E(t)$ (ここで t は空間周波数)はフラウンホーファ回折において、格子透過率分布のフーリエ変換により与えられる。

$$\begin{aligned} E(t) &= \mathcal{F}\{F(x) \cdot G(x)\} \\ &= \int f(-t-s)g(s)ds \end{aligned} \quad (5)$$

ここで $f(s)$, $g(s)$ は $F(x)$, $G(x)$ の逆フーリエ変換により得られる関数である。このように $E(t)$ はコンボリューション積分により与えられる。エッチング量 $d(x)$ による回折は格子が周期的であるので、ある特定方向の回折波を発生し、 $g(s)$ はくし形関数により与えられる。一方、 $z_r(x)$ による回折は $z_r(x)$ が鏡面反射に加えてランダムな成分を含むので $f(s)$ は周波数 s 領域では広がった0次の回折光強度分布を与える。従って機械加工した金属表面に形成した位相型回折格子は、広がった0次回折光分布と鏡面に形成した位相格子による回折パターンとのコンボリューションになる。ノイズを取り除くためには、フーリエ変換された周波数領域において ± 1 次光を通すように狭いスリットを用いてフィルタリングすればよいことがわかる。従って、本研究におけるセンサ検出系には、レンズのフーリエ変換を用いた空間周波数フィルタリング機構を用いた。

2.2 エンコーダ光学系

本研究で提案するエンコーダの光学系を図2に示す。光学系には光情報処理に用いられるフーリエ変換を用いた二重回折光学系を用いた。粗面回折格子により反射された回折光はレンズの焦点距離 f だけ離れた位置に置かれたレンズ1によりフーリエ変換される。レンズ1の後焦点に回折格子の ± 1 次光のみを

Fig.2 Optical system for encoding

透過させる2つの穴が開いた空間フィルタを置く。このフィルタによりノイズとなる粗面からの散乱光を取り除き、変位信号に関する ± 1 次回折波を通過させる。通過した ± 1 次回折波は焦点距離 f だけ離れた位置に置かれたレンズ2により再びフーリエ変換される。レンズ2より距離 f だけ離れた位置には2光波の干渉により空間に干渉じまが発生している。この干渉じまの周期は、金属表面に露光した回折格子パターンの周期の半分である。この空間格子に同じ周期の透過型格子(インデックススケール)を重ね、モアレ光を格子の直後に置いた光検出器により検出する。回折格子が光軸に垂直に Δx 移動すると、回折波の位相は ± 1 次回折光に対してそれぞれ $\pm 2\pi\Delta x/p$ 移動する。これに伴いインデックス上の空間格子が移動する。空間フィルタのスリット幅に比例してノイズ成分が増加するので、 ± 1 次光の広がりよりスリット幅を大きくすることは、信号雑音比を低下させる。

3. 実 験

3.1 回折格子の製作

フォトリソグラフィ技術を用いた回折格子の製作は、高精度かつ短時間であるため大量生産に適しているが、一般に機械部品は大きな体積や重量を持ち、形状も複雑であるため、半導体プロセス等に用いられる通常のフォトリソグラフィ技術の適用は難しい。これを考慮し本論文ではフォトリソグラフ塗布法とレジストパターン製法を工夫し、機械部品表面へのリソグラフィ加工を可能にした。金属材料には上仕上げ加工が施された銅とアルミニウム(算術平均表面粗さ $R_a=1.6\mu\text{m}$)を用い、アルミニウムについては粗面材料のほかに精密旋盤による鏡面仕上げ($R_a=0.008\mu\text{m}$)も用いた。

リソグラフィ技術における高分解能の確保にはレジストの薄く均一な塗布が重要である。このため、塗布法としてはスピナー法が多く用いられるが、体積や重量を持ち複雑な形状を持つ一般の機械部品に対しては、この方法は適用が難しい。本論文では、レジスト塗布に二通りの方法を試みた。第一の方法はPEPR2400(シプレイ社製)レジストの使用である。これは、溶液中における導電性被塗物への通電により製膜が可能のものであり、曲面やエッジの部分においても均一な厚さの被膜が形成されるという特性を持つ。電着装置の概略を図3に示す。被塗物を陽極、適当な金属板を陰極とし、これらをレジスト溶液中に浸す。電極間に直流電圧(150~250V)を印加すると、瞬時に約 $50\text{mA}/\text{cm}^2$ のピーク電流が発生した後、抵抗値は次第に増加し数十秒で無限大となる。この間、感光性樹脂酸塩電解質が電気泳動効果により陽極側に移動し、陽極に付着して直径10~20 μm の粒子状の非水溶性樹脂酸となり、粒子の集合であるレジスト被膜を形成する。粒子による凹凸は後のポーキング工程で平滑化され、以降は一般のポジ型レジストと同様に扱える。なお、被塗物の材質により成膜状況に差異が生じることが確認された。

Fig.3 Photoresist film deposition by electroplating

Fig.4 Pattern transfer by excimer laser irradiation

(a) Formed by contact patterning on PEPR-2400

(b) Formed by excimer laser patterning on the sprayed resist

Fig.5 Resist pattern

第二の方法は、超微粒子化したレジストの噴霧による成膜法である。これに用いた薄膜コーティング装置(ノードソン社製)は、スプレーにより発生させた微粒子を試料に吹き付けながら、試料を載せたステージを移動することにより全体に成膜するもので、通常のポジレジスト(OFPR800, 30cp, 東京応化社)を使用しての成膜が可能であった。試料の移動方法の工夫により曲面等の非平面への均一な成膜が可能である。露光・現像によるレジストパターン製作の段階でも、表面が曲面である機械部品に対して、マスクの密着露光法や通常の投影露光法が使用不可能な場合が想定される。そこで本論文では、周期 $80\mu\text{m}$ の格子パ

ターンの密着露光のほかに、エキシマレーザ光照射によるレジストの非接触露光を試みた。加工装置の概略を図4に示す。出射されたパルスレーザ光(波長 $\lambda=248\text{nm}$)は、周期 $p=160\mu\text{m}$ の格子パターンを持つ石英ガラス製の位相マスクを通過すると、マスクから距離 $p^2/2\lambda=51.6\text{mm}$ の面で周期 $p/2=80\mu\text{m}$ の空間格子を形成する。この面にレジストが塗布された材料を配置し、空間格子パターンを転写した。本論文では平面に転写を行ったが、位相マスクを設計することで曲面へのパターン製作も原理的に可能である。金属表面上に電着レジストと密着露光法で製作したレジストパターンを図5(a)に、微粒子噴霧成膜法とエキシマレーザ露光で製作したレジストパターンを図5(b)に示す。

レジストによる格子パターンを現像後、これをマスクとして表面にウェットエッチング($\text{H}_3\text{PO}_4:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}=2:1:1:6$, 40°C , 10分)を施し、最後にレジストを剥離し完成とした。完成した粗面回折格子表面の形状を図6に示す。エッチングによりアルミニウム粗面上に段差による位相格子のパターンが形成されている。エッチング深さは $2.4\mu\text{m}$ である。

(a) Micrograph

(b) Cross-section

Fig.6 Surface profile of rough-surface grating

3.2 エンコーダ実験装置

2.2節で提案した光学系(図2)を用い、信号採取の実験を行った。2つのレンズは焦点距離 $f=50\text{mm}$ のものをを使用した。光源であるHe-Neレーザ(波長 632.8nm , ビーム径 0.5mm)から出た光を、製作した周期 $p=80\mu\text{m}$ の金属表面回折格子(第1格子)に斜め上方から入射し反射・回折させる。レンズ1の後焦点において回折光は空間周波数スペクトルに変換される。この位置に変位信号成分である ± 1 次光のみを透過させる空間フィルタを配置した。フィルタは2本のスリット状の孔を有した不透明パターンを描いたガラス基板であり、2つの孔の中心線の間隔すなわち焦点位置

における ± 1 次光の間隔は $791\mu\text{m}$ 、孔の大きさは幅 $150\mu\text{m}$ 、長さ 10mm である。透過した ± 1 次光束はレンズ2の後焦点において互いに重なり合い周期 $40\mu\text{m}$ の干渉縞を成す。この干渉縞は格子の光学系に対する相対変位と同距離だけ移動する。この位置には周期 $40\mu\text{m}$ の透過型回折格子(第2格子)を配置しており、この格子を透過した光だけが直後に配置されたフォトダイオードへ入る。フォトダイオードで得られた光電流はアンプで電圧増幅され、A/D変換器にてデジタルデータに変換され、パーソナルコンピュータへ転送されて、フーリエ解析等の処理が行われる。

金属表面格子は、光源を含む光学系に対し、移動ステージにより相対的に移動できる。移動ステージはステッピングモータを使用した2軸ステージ(SPC-2NH, シグマ光機社製)であり、パルスコントローラ(PSXY-100, 日本レーザ電子社製)により制御される。パルス1個あたりのステージ移動距離は $1\mu\text{m}$ である。また、ステージを光軸方向にも移動させ、格子位置の変動の信号強度への影響を調べた。

4. 結果及び考察

4.1 回折格子の光学特性

格子表面にHe-Neレーザ光を照射して得られた回折光の強度分布を図7に示す。0次回折光のピーク強度は鏡面格子による回折光の51%であった。これは粗面での散乱及びエッチング深さの影響と考えられる。変位信号成分である ± 1 次回折光は強度低下が少なく、エンコーダ信号を得るのに十分な強度を有している。強度低下分は回折光全体にわたりスペckル状のランダムノイズとして重ね合わされていると考えられる。

Fig.7 Intensity distribution of the diffraction pattern

4.2 エンコーダ信号

図2の構成において、ステージを一定速度($10\mu\text{m/s}$)で移動させ、信号波形を採取し、同時に発生パルス数から基準位置データを算出した。粗面格子と鏡面格子による信号の比較を図8に示す。粗面格子の信号波形は鏡面格子と同様ほぼ理想的な正弦波信号(周期 $40\mu\text{m}$)であった。信号のコントラストは最大24%であった。

空間フィルタを使用しない場合と使用した場合のそれぞれに対し、信号波形より直流成分を除きフーリエ変換により求めた空間周波数成分を図9に示す。フィルタリングしない場合の信号には粗面によるノイズ成分が高い空間周波数にまで存在する。また、光エンコーダに特有の3次、5次等のピークが存在している。フィルタリングによりこれらの高次成分が除去された。正弦波波形からのずれをランダムノイズも含めてひずみとして評価すると、正弦波振幅の5%以下であった。逆三角関数により

内挿分割すると、このひずみにより発生する相対位置誤差は格子周期の5%以下であった。

第1格子の光軸方向変位 Z をパラメータとした信号波形の実測値を図10に示す。コントラスト最大の位置を $Z=0$ とすると、 Z の増加または減少に伴い、光軸の上下方向の移動による信号強度低下に比して著しいコントラストの低下が見られた。これは Z の変動による第2格子部での焦点位置の移動に起因すると考えられ、一般の光エンコーダと同様の性質である。

図10のフーリエ解析の結果を図11に示す。格子間隔の変動に伴い発生する高次ひずみ成分の増加が低く抑えられることは

Fig.8 Encoder signal as a function of displacement

Fig.9 Signal intensity as a function of spatial frequency

Fig.10 Encoder signal as a function of displacement with the position Z as a parameter

Fig.11 Signal intensity as a function of spatial frequency with the position Z as a parameter

±1次光の干渉光のみを用いるエンコーダに特有の性質であり、格子間隙の変化に関しては安定度が高いことが確認された。

5. 結 言

一般機械部品への対応を考慮して、フォトリソグラフィ技術のうちレジスト塗布法と露光法を改良し、金属表面上に反射型回折格子を製作した。この回折格子を用いて光学式エンコーダを構成し、信号を測定した。二重回折光学系における空間周波数

フィルタリングにより、信号中の高周波成分を除去し、鏡面回折格子と同様のほぼ理想的な正弦波信号を得た。これにより金属表面の粗面格子が光エンコーダ用スケールとして利用できることを確認した。

今後、表面粗さ、加工法や材質による格子の出来具合を調べるとともに、各種条件下において従来の光エンコーダと性能を比較し、このエンコーダの有効性を具体的に示したい。また、本論文の格子製作プロセスをさらに改良し、曲面等への対応を図りたい。

本研究はNEDO及び一部文部省科学研究費の援助を受けて行われた。また試料の製作にあたりオークマ(株)、(株)第一ゲージ、(株)ノードソンの協力を得た。

参 考 文 献

- 1) 坂上征司, 寺口幹也, 富谷雅樹: リニアエンコーダにおける高性能化技術, 精密工学会誌, **61**, 3 (1995) 355.
- 2) 家城 淳, 松井圭司, 梨木政行, 羽根一博: 変調周期の回折格子を用いた光学式エンコーダ(第1報), 精密工学会誌, **61**, 9 (1995) 1312.
- 3) 家城 淳, 松井圭司, 梨木政行, 羽根一博: 変調周期の回折格子を用いた光学式エンコーダ(第2報), 精密工学会誌, **61**, 11 (1995) 1619.
- 4) 羽根一博: ナノメートルからピコメートルへ変位センサの高精度・高性能化, 精密工学会誌, **61**, 12 (1995) 1666.
- 5) A.Teimei: Technology and Applications of Grating Interferometers in High-precision Measurement, Prec.Eng., **14** (1992) 147.
- 6) 伊澤 實ほか: 精密位置決め技術, 工業調査会, (1989) 第1章.