YAGレーザーマーカによる金属表面直接描画光エンコーダ*

恩田 一** 内山 尚行** 高橋 亨*** 水谷 政敏***

Direct Patterning of Rotary Encoder Grating on the Metallic Shaft with YAG Laser Marker

Hajime ONDA, Naoyuki UCHIYAMA, Tohru TAKAHASHI and Masatoshi MIZUTANI

A new patterning method of an optical rotary encoder gratings is proposed and tested for higher precision and higher rotational speed more than 30000 min^{-1} , which marks the grating patterns directly on the metallic shaft of an air spindle by using YAG laser marker. It is pointed that the second harmonic generated YAG laser wave is more effective for this application rather than the fundamental wave. The experimental patterning system applies a precise speed control system using a flywheel and the PLL (Phase Locked Loop) speed control system with the unique error compensation. The validity of this method is proved from a microscopic examination of the patterned gratings and the regeneration of the encoder signal with a standard optical detector.

Key words: laser marker, patterning, YAG laser, second harmonic generator, rotary encoder, air spindle

1. 結 言

光学式エンコーダは精密位置決めや回転数制御など、精密メカトロニクス技術には必須のセンサとして多用されている。近年特に、厳密な回折・干渉理論によって裏付けされた変調周期構造の格子パターンや高精度の周期分割を行い得る電子回路などにより、ナノメータ台の分解能を持つリニアエンコーダが実用化されている^{1) 2)}。これらエンコーダの出現により、リニアエンコーダは、かつては精度の基準とされたレーザ干渉測長器よりも大気じょう乱の影響を受けないために安定で高精度のセンサとして確実な存在になってきた。現在、高精度のロータリエンコーダはほとんどが低熱膨張率のガラス円盤製であり、写真製版技術により、ガラス基板に格子パターンを作製している。

筆者らは、光ディスクの原盤露光用や記憶装置向けディスクの検査用として空気軸受スピンドルを生産しているが、これらの回転検出用としても光学式エンコーダは重要なセンサとして利用されている。その中で、以下の2点について、現状のガラス円盤形ロータリエンコーダでは不十分な点がある。

1) 高速性

現状のガラス円盤製ロータリエンコーダの最高回転数は 30000 min^{-1} が限度である。これは主として、使用しているガラスの材料的破壊強度から来る限界である。一方、使用状況としては、光ディスクやハードディスクの高速回転化が進んで 15000 min^{-1} 以上のものが出てきており、倍速度での検査を

必要とする場合には、最高回転数の限界に来ている。

2) 高精度

ガラスディスク製のロータリエンコーダ自体は非常に高精度なものが市販されている。しかし、これを軸に取り付ける際、非常に厳密な心合わせを行う必要がある。前記光ディスク原盤露光用スピンドルにおいては、回転数精度(周期変動/周期)として 10^{-6} 程度が必要である。これを達成するためには、非常に高精度の偏心調整が必要であり、熟練者が時間を掛けて調整をする必要がある。

以上の点から、偏心調整が必要なガラスディスク製でなく、高精度に加工され、高精度に回転するエアスピンドルの軸そのものにロータリエンコーダを直接パターンニングする方法を検討した。これにより、1)の高速性は軸(通常ステンレス材)の遠心力による破壊までの耐力があり、2)の高精度の点は空気軸受の精度(通常 $1 \mu\text{m}$ 以下)で心合わせができていることになる。本論文においては、YAGレーザーマーカを用いて、高精度な空気軸受スピンドルの回転軸に、ロータリエンコーダの格子パターンを直接描画する方法について述べる。

2. YAGレーザーマーカによる金属材料への直接描画

金属材料の軸に光学式エンコーダの格子を直接パターンニングする試みは、羽根らによりすでに行われている³⁾。そこでは、軸にフォトレジストを噴霧塗布し、マスク露光と金属材料のエッチングによりパターンニングを実現している。筆者らは工業的な方法としてウェットプロセスを用いない方法を検討し、金属材料のマーキングに使用されているYAGレーザーマーカを応用して、格子形状をパターンニングする方法を検討した。

* 原稿受付 平成11年10月8日

** 正会員 NTN(株)(磐田市東貝塚1578)

*** NTN(株)

Fig. 1 Photograph of marked pattern on the metal by YAG laser with fundamental wave length

通常 YAG レーザマーカにおいては、基本波の発振波長 ($1.06 \mu\text{m}$) でマーキングすることにより、金属表面に熱的な物理的加工をする。この結果、金属表面は図 1 に示すようなテンパーカラーと呼ばれる黒色に変色するが、表面形状はあまり変化しない。もちろん、これはレーザのパワー強度に依存するが、軸受のような取付け精度が必要な部品では、寸法変化を避けるため、このような方法を採用している。この方法でマーキングされた金属表面の反射率は、まだ光沢を残しているため、マーキングされない部分との差はそれほど大きくない。

一方、YAG レーザの第 2 高調波 (波長 $0.53 \mu\text{m}$, 以下 SHG と略記) によるマーキングは金属表面を粗面化する作用があり、その結果表面の光沢がなくなる。従って、光学的な検出の場合、SHG によるマーキングの方が高コントラストが得られると考えられる。予備的実験として、格子パターンではなく、あるマーキングされた面積のみを対象として、発光ダイオード光源とフォトトランジスタの検出器によるコントラスト比を評価した。反射光量の最大値を I_p 、最小値を I_v として、コントラスト比 $(I_p - I_v) / (I_p + I_v)$ を求めた結果、基本波によるものが 0.39、SHG によるものが 0.62 であった。すなわち、SHG の方が約 6 割程度コントラストが良いことが判明した。さらに、高密度の格子パターン作成には、レーザのビーム径が微細に集光できる (波長の短い) SHG の方がより好ましい。

以上の観点から、YAG レーザの SHG を用いたレーザマーキング法を採用した。なお、金属表面は切削や研削の加工により方向性のある筋状の痕跡を有しており、光学的な検出に際してはその方向性を考慮する必要がある。

3. 高精度パターンニングの方法

エアスピンドルの軸にロータリエンコーダの格子を直接、高精度にパターンニングする方法として、下記が考えられる。

- 1) 高精度に位置決めされた静止状態で実施。
- 2) 回転状態で軸に取り付けられた基準信号により実施。
- 3) 回転状態で時間的に正確なタイミング信号により実施。

Fig. 2 Principle of patterning method for high precision rotary encoder pattern using YAG laser marker

これらは、それぞれ一長一短があるが、基本的に「母性原理」に従わざるを得ないところがある。すなわち、基準となる信号の精度や回転数精度をコピーする形となり、1)、2) では軸に取り付けた基準エンコーダの精度以上にはならない。また 3) では、回転数の精度不良がコピーされる。

本研究においては、次のような方法で、精度不良を回避することにした。図 2 によって原理を説明する。

まず、少々精度不良を含むが大略高精度のロータリエンコーダ格子 (Reference encoder) があらかじめパターン付けされた、フライホイール効果の大きいターンテーブルを用意する。これを描画対象のエアスピンドルの軸端に取り付ける。この時の取付け精度は、このエンコーダのパターン精度程度とする。このエンコーダ信号をフィードバック信号として、高精度回転数制御である PLL (Phase Locked Loop) 制御を行う。PLL 制御の指令基準信号は時間領域で正確な水晶発振器を利用する。PLL 制御系はあまりゲインを上げて高速な応答にせず、回転数と同じ周波数より低い制御帯域とする。このような設定の PLL 制御系では、取付け誤差や格子パターンの偏心分は回転周波数の基本波分程度の周波数まではロータリエンコーダの回転精度不良として現れるが、それ以上の周波数成分の誤差はターンテーブルのフライホイール効果 (回転数の平均化作用) により現れない。特に、ある回転数以上になるとフライホイール効果が顕著になり、1 回転内の速度変動分 (高周波分) は非常に少なくなる。この時、PLL 制御系の誤差信号の回転数 (基本波) 成分はターンテーブルの取付け誤差や格子パターンの偏心誤差である。我々はこの誤差信号基本波成分を検出して、PLL 制御ループ内で補正することにより、これらの誤差を相殺する方法を実用化しており⁶⁾、その方法をここに適用する。これにより、低周波域の回転数誤差は補正され、高周波域の回転数誤差はフ

ライホイル効果によって除去される。従って、ターンテーブルは時間軸の基準周波数に対して正確な回転数で回転する。この状態において、PLL 制御の基準信号と同一の信号源からレーザマーカにマーキングのタイミング信号を与えれば、高精度のパターニングが可能となる。

4. 実 験

4.1 実験装置の構成と実験方法

図3に実験装置の写真を示す。基本的な構成は図2に示したもので、写真はターンテーブルにマーキングする場合のセッティングである。エアスピンドルの軸端（上方）に取り付けられたターンテーブル（φ200 mm）の円周面に、f θ レンズから出力される YAG レーザを照射する構成である。ターンテーブルでなく、エアスピンドル軸にパターニングする場合は、エアスピンドルを上下逆にして実施する。

使用したスキャナ用 f θ レンズの直径はφ100 mm、焦点距離は850 mm、f θ レンズ入力時のレーザビームの直径はφ20 mm (実効開口数は0.025)、集光されたレーザビームの直径(理論値)は約φ30 μmである。

実験方法は図2で示したようにエアスピンドルを PLL 制御で回転させると共に、基準発振器からの信号に同期してレーザを出射してマーキングする。格子の明部と暗部の比率を1：1にするため、格子と直角方向（周方向）にスキャナを水平走査する。また、格子の長さ方向（軸方向）に対してはスキャナを垂直走査してマーキングする。格子パターン数は1周500本とし、回転方向判別と原点位置検出が可能のように、A相、B相、Z相および差動検出のために、その逆パターンをマーキングした。回転数は1000 min⁻¹、SHG レーザパワーは平均6 Wで実験した。

4.2 検出器の構成

マーキングされた格子パターンからエンコーダ信号を検出する方法はインデックス格子を用いた単純モアレじま方式とした。インデックス格子は回転軸に沿って曲げられるようにフィルム状素材にエッチングして作製した。検出回路はモアレじまの明暗を光電変換して電気信号にするもので、高速応答のために光検出器として PIN フォトダイオードを使用した。

Fig. 3 Experimental equipment

Fig. 4 Detector circuit

図4に回路図を示す。光源は検出器とペアになった赤外発光LEDを使用した。明るさの直流分ドリフト除去と安定化のために差動検出方式を採用した。マーキングされたA, B, Z各相に対して各々図4の回路を用意した。

5. 実験結果と考察

マーキングされた格子パターンの写真を図5、6に示す。マーキングした軸受の材料はSUS630である。図5ではA相とその逆相のパターンが観察でき、明部と暗部のコントラストも明確なことが観察できる。

Fig. 5 Marked encoder pattern by YAG laser

Fig. 6 Micrograph of the patterned encoder grating

Fig. 7 Surface profile of patterned grating

Fig. 8 Detected signal of rotary encoder

図6は格子パターンの一部を拡大して示した写真である。図6(b)は図6(a)をさらに拡大した写真である。マーキングされた部分は表面がランダムに荒れており、光が散乱されて暗部となる。一方、マーキングされていない部分は下地の研磨面が残されており、円筒研磨機により研削された周方向の研磨筋が観察される。この研磨筋による光の散乱があるものの、この部分は反射光が多いため、明部となる。

パターンのエッジ部分がシャープでないため、検出される正弦波の波形がひずむ恐れがあるが、検出器は単一格子の反射光のみを検出するのではなく、複数格子が寄与するモアレじまの明暗を検出するため、平均化される。しかし、高調波成分として残存する可能性は十分ある。

図7はマーキングされた格子部分の断面曲線を示したもので、図6のパターンを上下方向に走査して測定したものである。矢印で示される凹凸の激しい部分がYAGレーザによってマーキングされた部分で、図6の写真で観察されるランダムに表面が荒らされた部分に対応する。その間の平らな部分はマーキングされない部分である。マーキングされた部分はピーク値で20 μ m程度の凹凸を有している。一方、非マーク部分は測定走査方向が研磨すじの方向と一致することもあり、1~2 μ m程度の小さい値を示している。

図8は図4の検出回路により検出したロータリエンコーダとしての信号波形で、回転数1000 min^{-1} の場合である。高調波成分のひずみが幾分観察されるものの、周期の正確な正弦波が得られている。Z相信号はA相信号の2周期分を想定してマーキングしたが、半値幅で約1.5周期分である。実際の使用時にはこれらの信号波形をコンパレータでパルス波形に変換したり、電氣的な倍回路でさらに高分解能化する。その際、正弦波信号に高調波成分があると精度劣化を招くため、できるだけ高調波成分は減らしておく必要がある。

6. 結 言

高速で高精度なロータリエンコーダ信号を得るために、高精度に回転支持された空気軸受スピンドルの軸に、レーザマーカを使って直接ロータリエンコーダの格子パターンを描画する方法を提案し、実験によってその可能性を確認した。YAGレーザの第2高調波(SHG)を利用して実験検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) フライホイールを取り付けたエアスピンドルをPLL制御して回転数変動を抑制した回転系を利用し、時間軸上で正確なマーキングを行うことにより、所望のロータリエンコーダ用格子の形成ができた。
- (2) マーキングされた部分の表面はランダムに荒れて光が散乱されて反射率が低下し、非マーキング部分は下地部材の研磨筋が残って散乱もあるが反射率が高く、4.3倍の反射率差があり、コントラスト比0.62が得られ、エンコーダ用格子パターンとして有効であることが確認できた。
- (3) 単純モアレ方式検出により、高調波成分を少し含むが、ほぼ期待通りのロータリエンコーダとしての信号を得る事ができ、高速のロータリエンコーダとして応用可能なことを確認した。

今後、高速・高精度ロータリエンコーダとしての詳細な性能評価を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 羽根一博, 奥山賢一, 佐々木 実: 金属表面回折格子を用いた光エンコーダ, 精密工学会誌, 64, 10(1998)1532.
- 4) P. Posada, K. Hane, A. Ieki, K. Matusi and M. Nashiki: Modulated Pitch Grating for Optical Encoder Independent of the Air Gap, 1996 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, K77 (1996) 1103.
- 5) R. M. Pettigrew: Analysis of Grating Imaging and its Application to Displacement Metrology, SPIE vol. 136, 1st European Congress on Optics Applied to Metrology, (1997) 325.
- 6) 公開特許公報 特開平10-337071.