

研究速報

回折格子付レーザー投影機

北島 博愛・宮内 真人

九州工業大学工学部二部電気工学科 〒804 北九州市戸畠区仙水町 1-1

(1986年10月4日受理)

Laser Ray Projector with Grating

Hiroe KITAJIMA and Makoto MIYAUCHI

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology,
1-1, Sensui-cho, Tobata-ku, Kitakyushu 804

In this letter we present the laser ray GRIN rod-lens projector attached with an optical grating. The projector constitutes telecentric optical system and its resolution limit is less than one micron-meter. The grating, with its self-imaging phenomenon, serves as a distance-measuring scale. It is possible to get appropriate high-magnification images with a scale by just adjusting the distance between the lens and the screen.

1. まえがき

検査投影機の光学系は、一般にテレセントリック光学系を構成している。非テレセントリック光学系では合焦誤差が生じると、スクリーン上のピントがぼけると同時に像の大きさも違ってくる。これに対して、テレセントリック系では像のぼけは生じるが、像の大きさの変化は最小限に抑えられている¹⁾。ところで、回折格子に平行なレーザー光線を照射すると、倍率1の回折格子像^{2,3)}（フーリエイメージ）が複数の結像面に生じる。この現象に着目することにより、回折格子と被検物体の両方にピントの合った投影像を得ることができる。したがって回折格子を目盛として被検物体といっしょに拡大した投影像が得られるので、被検物体の動的な微小変位から大きな変位に対してまで、精密な観測が可能になる。

さて、テレセントリック光学系をみたす条件は、投影レンズの射出側の焦点位置が射出瞳として作用することである。そのために焦点の位置に絞りを設けるので、口径比も小さくなり、その分だけ分解能は低下する。現在では解像度限界は透過光の中心部で $4 \mu\text{m}$ とされている⁴⁾。そこで、射出光の開口角の大きい屈折率分布円筒レンズを投影レンズとして用いると、焦点の位置におけるスポット径は非常に小さくなるので⁵⁾、絞りを設ける

必要がない。したがって、光量も減少せず、しかもレンズからスクリーンまでの距離は一定に固定されることなく、任意の距離にあるスクリーンに鮮明な投影像を得ることができる。ようするにスクリーンまでの光路長を変えることになり、目盛とともに被検物体の倍率を自由に調節して観察しうることを報告する。

2. 投影機の構成

周期 a の回折格子に波長 λ のコヒーレント光が入射すると (Fig. 1 参照)

$$1/F + 1/d = \lambda/m a^2 \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

を満足する複数の結像面に、倍率 $M_g = 1 + F/d$ の回折格子像（フーリエイメージ）が生じる^{2,3)}。とくに平行光線が入射する場合、上式で $d \rightarrow \infty$ とすると倍率 $M_g = 1$ で、

$$F = m a^2 / \lambda \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

と与えられるタルボー (Talbot) 長 F に回折格子が結像する。さらに Fig. 2 に示すように、回折格子 G と被検物体 O との間の距離 P が (2) 式の F と一致するとき、回折格子と被検物体の両方にピントの合った投影像が得られる。Fig. 1において、たとえば $F = 2,000 \text{ mm}$, $a = 10 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ のとき。

$m=1$ のとき $d_1 = 0.158 \text{ mm}$, $M_g = 12,659$

$m=2$ のとき $d_2 = 0.316 \text{ mm}$, $M_g = 6,330$

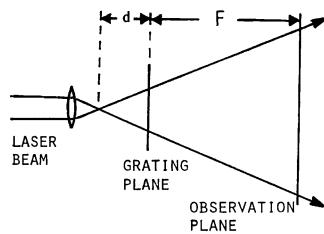


Fig. 1 Self-imaging system.

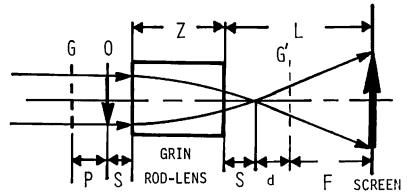


Fig. 2 Arrangement of a projector system attaching a grating.

と高倍率になる。この場合は、Fig. 2においては射出瞳側の G' の位置に回折格子を置いていくことになる。

屈折率分布円筒レンズの屈折率分布関数 $n(r)$ は、

$$n(r) = n_0(1 - br^2/2) \quad (3)$$

と近似される。ここに n_0 は中心軸の屈折率、 b は屈折率分布定数、 r は半径である。レンズ長を z とするととき光線マトリックスの各要素は

$$\begin{aligned} A &= D = \cos(\sqrt{b}z) \\ B &= \sin(\sqrt{b}z)/(n_0\sqrt{b}) \\ C &= -n_0\sqrt{b} \sin(\sqrt{b}z) \end{aligned} \quad (4)$$

と与えられる⁶⁾。レンズ端面から焦点までの距離 s は、

$$s = 1/\{n_0\sqrt{b} \tan(\sqrt{b}z)\} \quad (5)$$

と与えられる。平行光線が入射した場合、焦点におけるスポット径は、回折によるスポット径 $\Delta_d = 0.5\lambda/NA$ (NA : 開口数) よりも、屈折率分布の半径の4乗の項による影響で若干大きくなる⁵⁾。実際のスポット径 Δ を、 $\Delta \approx \lambda/NA$ と近似しても、解像度に関する Rayleigh Criterion は $\epsilon \approx 0.61\lambda/NA$ であるから、スポット径は解像度限界に近い値である。したがってテレセントリック光学系を構成する投影レンズとして最適である。すなわち射出瞳に絞りを設ける必要はなく、レンズからスクリーンまでの距離 L は任意で鮮明な投影像が得られる。

Fig. 2 で被検物体 O や回折格子 G の倍率は

$$M = |C \cdot L| \quad (6)$$

と近似されるので、距離 L を調節することにより任意の倍率の投影像を得ることができる。

回折格子がレンズよりスクリーン側の G' の位置にあるとき、倍率は、レンズの光学定数に関係なく、

$$M_g = 1 + F/d \approx F/d \quad (F \gg d) \quad (7)$$

と近似される。ただし、この場合、結像面は(1)式の制約があるので倍率 M_g は離散的となる。しかも d の値が(1)式の条件からわずかにずれると倍率 M_g の値は大きく変化するので注意を要する。

3. 投影例と考察

光源の波長 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ でレンズの諸定数が、たとえば(4),(5)式より、 $\sqrt{b} = 0.339/\text{mm}$, $z = 3.785 \text{ mm}$, $n_0 = 1.608$, $NA = 0.46$ なるレンズを用いると⁶⁾, $-C =$

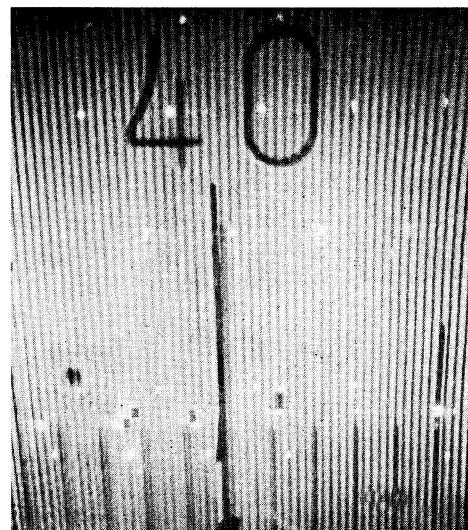


Fig. 3 Projection images of a scale with minimum separation $50 \mu\text{m}$ in O and a grating ($a = 10 \mu\text{m}$) in G plane, respectively shown in Fig. 2. The scale is movable.

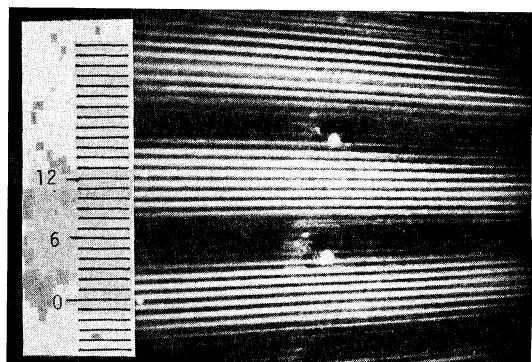


Fig. 4 Projection images of two gratings period $a = 10 \mu\text{m}$; the one at G' has high magnification $M_g = L'/d = 12,600$ by self-imaging and the other at G magnification $M = |C \cdot L| = 1,000$ by GRIN rod-lens, respectively.

0.523/mm となるから、距離 $L=1,913\text{ mm}$ のとき、
 (6)式より被検物体の倍率 $M=1,000$ となる。解像度限界は $\varepsilon \approx 0.84\text{ }\mu\text{m}$ となる。**Fig. 3** は、周期 $10\text{ }\mu\text{m}$ の回折格子と、最小間隔 $50\text{ }\mu\text{m}$ の目盛板を **Fig. 2** における G と O にそれぞれ置いたものの投影像である。被検物体として目盛板を、たとえばバイメタルなどの可動部に置けば、数字が読めるので、大きな変位量でも精密な測定が可能になる。**Fig. 4** は、周期 $10\text{ }\mu\text{m}$ の二つの回折格子をそれぞれ **Fig. 2** における G と G' に置いた投影像で、倍率は(6), (7)式よりそれぞれ 1,000 倍と 12,600 倍になっている。したがって 12,600 倍に拡大された大きな 1 周期の間に 1,000 倍に拡大された格子が 12.6 本現われている。その様子をわかりやすくするために同図に番号をつけた目印をつけている。実際問題として、d の値が(1)式の関係よりわずかにずれていても(7)式の倍率 M_g の値は大きく変化するから注意する必要がある。この場合も **Fig. 2** における G に置いた回折格子の像は、G' に置いた回折格子の高倍率フーリエイメージ³⁾の倍率 M_g の測定に目盛として役立ついる。

4. む す び

投影レンズとして屈折率分布円筒レンズを用いた回折格子付レーザー光投影方式を示した。高開口数の円筒レンズを使用することにより、解像度限界はテセントリック光学系で $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下になりうる。倍率 1 のフーリエイメージを利用することにより、回折格子を被検物体の目盛として、任意の高倍率投影像が得られることを示した。

文 献

- 1) 三宅和夫: 幾何光学 (共立出版, 東京, 1979) pp. 68-76.
- 2) J. M. Cowley and A. F. Moodie: "Fourier images: 1 the point source," Proc. Phys. Soc. (London), Sect B **70** (1957) 486-496.
- 3) D. Joyeux and Y. Cohen-Sabban: "High magnification self-imaging," Appl. Opt., **21**, 4 (1982) 625-627.
- 4) 西村新一: "投影機", 光工学ハンドブック, 小瀬輝次, 斎藤弘義, 田中俊一, 辻内順平, 波岡 武編 (朝倉書店, 東京, 1986) pp. 657-659.
- 5) K. Iga: "Theory for gradient-index imaging," Appl. Opt., **19**, 7 (1980) 1039-1043.
- 6) 日本板硝子資料: セルフオックマイクロレンズ (SML) (1984).