

研究

指示計器のための特殊な GRIN レンズ投影法

北島 博愛・宮内 真人・江崎 哲弘

九州工業大学工学部 〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1

(1987年11月12日受理)

Novel GRIN-Lens Projection Systems for Indicating Instruments

Hiroe KITAJIMA, Makoto MIYAUCHI and Tetsuhiro EZAKI

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

In this paper, we report novel GRIN-lens projection systems for various indicating instruments. As far as one dimensional image information is concerned, even when an object is placed on one side beyond the focal length of an objective lens, it is possible to magnify several hundred times by the GRIN. Moreover, it is possible to get much larger displacement than that of the usual optical lever in the same optical pass length by magnifying, through the GRIN, a displacement of optical spot produced by the turning motion of a mirror. By using these projection systems, it is possible to sensitize various types of conventional instruments varying from a galvanometer to an alcohol thermometer extremely.

1. ま え が き

GRIN レンズは、光通信、光計測、光学機器等の分野に広く用いられ、多くの論文も報告されている^{1,2)}。GRIN レンズの特徴の一つは、射出瞳におけるスポット径が非常に小さくなることである。そのことは出射光の開口角が大きいことを意味するので、短い光路長で拡大率の大きいテレセントリック光学系を構成する投影レンズとしても優れた特性を有する³⁾。本論文では、その特性に着目して、いろいろな指示計器の読取り精度を数桁高めることを目的とした特殊な GRIN レンズ投影法を考察している⁴⁾。

対物レンズの焦点距離よりも遠い位置にある被検物体をレーザービームで照射し、その実像を GRIN レンズで大きく拡大すると、一般的には、被検物体からの散乱光の一部は、その対物レンズよりはみだすので、被検物体の精密な像情報は消滅しているが、一次元的な像情報は必ずしも消失していない。たとえば、顕微鏡の目盛板を被検物体として観察すると、目盛の数字は判読不能となっても、目盛の一次元的な格子状の像は明確に識別できる。したがって、その目盛板の一次元的な変位は精密に測定できる。その特性に着目して、可動コイル型検流

計の指針や、アルコール温度計の液面等を高倍率に投影することにより、読取り精度を著しく高めることができる。さらに、鏡の旋回運動による光スポットの変位を、GRIN レンズを用いて拡大することにより、従来の光てこ方式より、等しい光路長で1桁以上大きく光スポットを変位させることができる。しかしながら、その際光スポット径も拡大されているので、光スポットの中心があいまいになり、そのままでは大きく変位するわりには光スポットの微小変位量の分解能は改善されない。そこで対物レンズの焦点距離よりも十分遠い物空間の位置に細い針線を固定し、それをビーム光線で照射すると、その対物レンズの焦点の位置近くの像空間に小さく縮小された光スポットの中心に針線の影の実像が生ずる。その一次元的な細い影線を含んだ光スポットを鏡の旋回運動により変位させ、その変位を GRIN レンズで拡大することにより、大きく拡大された光スポットの中心に針線の影が挿入されているので、光スポットの微小変位量の分解能が著しく向上する。具体的には、従来の反照形検流計を用い、等しい光路長で、検出感度を1桁高められることを確認している。このように、対物レンズの焦点距離よりも遠い位置に存在する被検物体の一次元的な像情報を大きく拡大する方式や、鏡の旋回運動による光ス

ポット変位を大きく拡大する方式等による指示計器の読取り精度を高める問題について考察している。

2. 投影機の構成

2.1 一次元的像情報の拡大方式

対物レンズの焦点距離を f とおく。Fig. 1 に示すように対物レンズ L_1 の焦点距離よりも遠い位置に被検物体 O がある場合 ($S_1 > f$)、その被検物体 O の実像の位置 S_2 は

$$S_2 \doteq f / (1 - f/S_1) \quad (1)$$

と与えられる⁵⁾。いま被検物体 O が O' へ d_1 だけ変位すると、 S_2 の位置にある像の変位 d_2 は

$$d_2 = \left| \frac{S_2}{S_1} \right| d_0 = \frac{f}{S_1 - f} d_1 \quad (2)$$

となる。その変位 d_2 および像からの光線の角度を d_2' とおき、GRIN レンズの光線マトリックスの各要素を A, B, C, D とおくと⁶⁾、スクリーン上における光線の位置 d_3 と光線の角度 d_3' との関係は

$$\begin{bmatrix} d_3 \\ d_3' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + C \cdot Z_3 & B + D \cdot Z_3 \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_2 \\ d_2' \end{bmatrix} \quad (3)$$

と示される。ここで、 $|A| \ll |C \cdot Z_3|$ 、 $|B| \ll |D \cdot Z_3|$ 、 $Z_2 \ll Z_3$ 、 $Z_1 \ll Z_3$ とし、かつ $|C| \gg |D|$ なる GRIN レンズを用いると、変位 d_2 の倍率 M_a は

$$M_a = d_3/d_2 \doteq |C \cdot Z_3| \quad (4)$$

となる。したがって、被検物体が O から O' へ d_1 だけ変位した場合の倍率 M_1 は

$$M_1 = d_3/d_1 \doteq \{(S_2 - f)/f\} |C \cdot Z_3| \quad (5)$$

と形式的に近似できる。つまり被検物体の一次元的な変位についてのみこの倍率は意味を持つ。とくに $S_1 \gg f$ の場合は

$$M_1 = d_3/d_1 \doteq |C \cdot Z_3| (f/S_1) \quad (6)$$

となり、GRIN レンズのみによる倍率 M_a 、式(4)が、 f/S_1 に縮小されることになる。この場合は被検物体 O の微小変位の測定には不適である。しかしながら、次に示す鏡の旋回運動による光スポットの変位を拡大する際に、光スポットの中心に細い影線を挿入するために重要

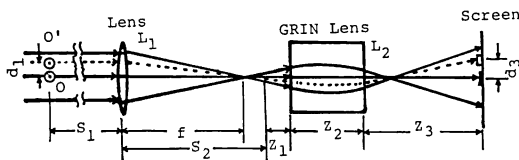


Fig. 1 GRIN-rod-lens projection system for high magnification one dimensional image information. O: Object.

となる。

2.2 光スポット変位の拡大投影方式

中心に細い影線が挿入されている光スポットを鏡の微小な旋回運動により変位させ、その変位を GRIN レンズで大きく拡大するように光学系を構成している (Fig. 2 参照)。いま鏡が $\Delta\theta$ だけ旋回すると、GRIN レンズ L_2 の入射端面における光線の位置 d_1 と、角度 d_1' はそれぞれ

$$d_1 = 2\Delta\theta Z_1, \quad d_1' = 2\Delta\theta \quad (7)$$

と与えられる。これらの d_1, d_1' とスクリーン上の光線の位置と角度 d_3, d_3' との関係はすでに示している式(3)で与えられ、倍率 M_a は式(4)で与えられる。それに対して、GRIN レンズを用いない場合光てこととして、鏡が $\Delta\theta$ だけ旋回した場合の光スポットの変位量 d_L は

$$d_L = 2\Delta\theta (Z_1 + Z_2 + Z_3) \doteq 2\Delta\theta Z_3 \quad (8)$$

と近似できる。この d_L と式(4)で求まる d_3 との比を M_L とおくと

$$M_L = d_3/d_L \doteq |C \cdot Z_3| \quad (9)$$

となる。これは GRIN レンズを用いない場合の光てこの変位 d_L に対する倍率を示している。実際問題として、GRIN レンズの光学定数 $|C|$ は約 0.5/mm 程度であるから⁵⁾ $Z_1 = 20$ mm とすれば $M_L = 10$ となるので、従来の光てこよりも、GRIN レンズにより 1 桁大きく変位が拡大されることになる。しかしながら、光スポットの中心があいまいになるから、変位量が增大する割には分解能は改善されない。そこで Fig. 2 に示すように、被検物体 O の位置に細い針線を固定する。 S_1 が f より十分大きい場合 ($S_1 \gg f$) 被検物体の実像は式(1)による S_2 の位置にできる。Fig. 2 において、 $S_2 \doteq Z_0 + Z_1$ とおけば、GRIN レンズ L_2 の入射端面に縮小された被検物体 O の実像が生ずることになる。それを GRIN

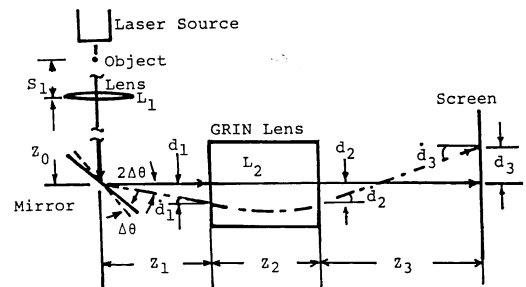


Fig. 2 Optical system for optical spot magnification type optical lever.

レンズ L_2 で拡大しても、被検物体としての針線の直径の値は忠実には拡大されない。しかしながら光スポットの中心を示す目安としては有効である。すなわち GRIN レンズ L_2 により拡大される光スポット径は、式(4)の値が f/S_1 に縮小されたものになり、その中心に針線の影線が挿入されることになる。このようにして、鏡の微小旋回による光スポットの変位を GRIN レンズで拡大することにより、従来の光てこ方式よりも等しい光路長で容易に 1 桁以上の光スポットの変位量の分解能を改善することができるようになる。

3. 具体的投影例と考察

具体的投影例に用いている対物レンズの焦点距離は $f=80$ mm, GRIN レンズの光学定数は $A=D=0.284$ /mm, $B=1.759$ /mm, $C=-0.523$ /mm, $NA=0.46$, 直径 1.8 mm である。光源の波長は $\lambda=0.6328$ μm である。

3.1 一次元的像情報の拡大投影方式の応用

Fig. 1 に示す光学系において、被検物体 O の位置 $S_1=160$ mm とすると、実像の位置 S_2 は式(1)より $S_2=160$ mm となる。GRIN レンズは $|C|=0.523$ /mm であるから、式(5)より $Z_3=950$ mm のとき、倍率 $M_1=500$ になる。被検物体として顕微鏡の目盛板を Fig. 1 の O の位置に置き、500 倍に拡大した像を Fig. 3 に示している。この場合、目盛板に画かれている数字は判読不能になっても、一次元的な目盛の像は、このように識別できるので目盛板の一次元的な変位は精密に測定できる。次にこの光学系の直線性を調べるために、1000 倍に拡大した場合の非直線性を測定して Fig. 4 に示している。この図より、GRIN レンズの中心より ± 0.15 mm 程度の範囲での誤差は 0.1% 以内であることがわ

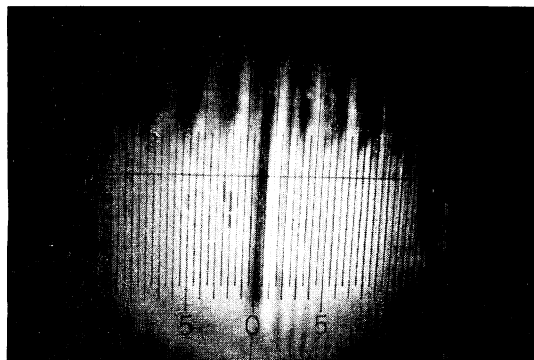


Fig. 3 Projection image of a graticule with minimum separation $50 \mu\text{m}$ at O in Fig. 1, with magnification $M_1=500$. $f=80$ mm, $S_1=160$ mm, $|C|=0.523$ /mm, $Z_3=950$ mm.

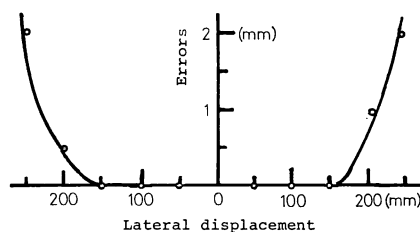


Fig. 4 Magnification errors vs lateral displacement of a GRIN-lens, when a grating with period $a=10 \mu\text{m}$ is magnified 1000 times. For example, a displacement 0.1 mm of the GRIN corresponds to the lateral displacement 100 mm in this figure.

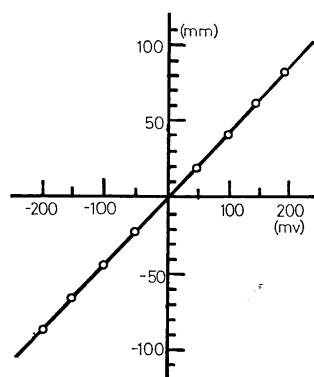


Fig. 5 Displacement of a needle vs input voltage when the needle is magnified 500 times.

かる。それ以上の範囲では急激に歪みが増大するようになるが、光スポットそのものも暗くなるので実用的でない。このように 1000 倍に拡大しても、GRIN レンズの有効径が 0.3 mm もあるので、普通の顕微鏡の対物レンズよりはるかに視野が広い。

具体的な測定例として、可動コイル型検流計の指針に直径 $50 \mu\text{m}$ のステンレス線を接着して、それを 500 倍に拡大して、微小電圧に対する指針の変位を測定した例を Fig. 5 に示している。電圧感度は 2×10^{-4} V/mm (電流感度は 35×10^{-6} A/mm) の検流計が Fig. 5 では 0.4×10^{-6} V/mm となっているので、電圧感度は見掛け上 500 倍になっていることがわかる。

次に $0 \sim 100^\circ\text{C}$ (目盛の長さは約 180 mm) まで測定できるアルコール温度計のアルコール液面を 500 倍に拡大した像を Fig. 6 に示している。アルコール柱の変化割合は約 $0.556^\circ\text{C}/\text{mm}$ であるから、それを 500 倍にしているので GRIN レンズの有効径 0.3 mm の範囲では $\pm 0.222^\circ\text{C}$ の間の温度変化を 0.001°C の見掛け上の温度変化を測定できるようになる。

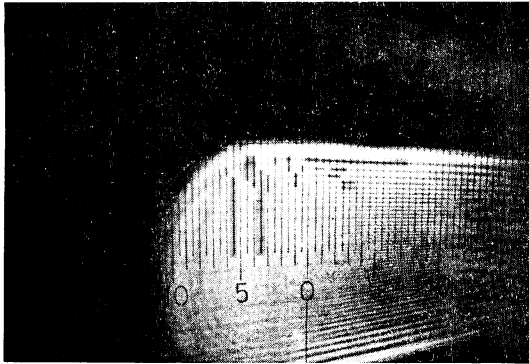


Fig. 6 Projection image of liquid plane of an alcohol thermometer at O in Fig. 1, with magnification $M_1=500$.

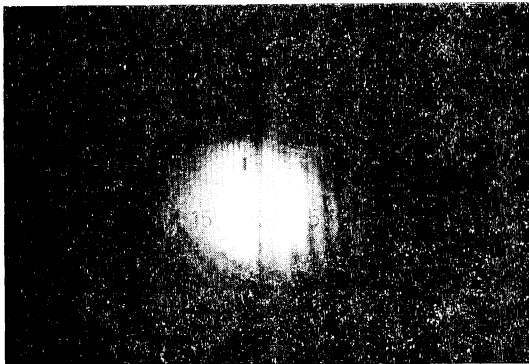


Fig. 7 Optical spot with a line shadow added.

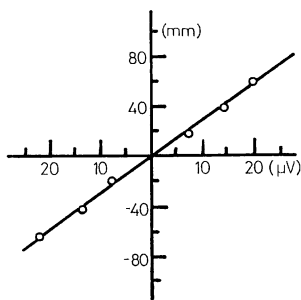


Fig. 8 Displacement of an optical spot vs input voltage of a reflection spot type galvanometer.

このように一次元的な像情報の拡大に限定すると、対物レンズから数十ミリも離れた位置にある、被検物体の微小変位を大きく拡大して精密に測定できるようになるので、従来の指示計器の読取り精度を高めたり、機械的な可動部のバックラッシュの精密な測定等にきわめて便利である。

3.2 光スポット変位拡大投影法の応用

前章の Fig. 2 に示す光学系において、GRIN レン

ズは $|C|=0.523/\text{mm}$ であるから、 $Z_1=20\text{ mm}$ とすると $M_L=|C \cdot Z_1|=10.46$ となる。スクリーンまでの距離 $Z_3=1380\text{ mm}$ として、被検物体 O の位置に直径 $50\ \mu\text{m}$ のステンレス線を固定 ($S_1 \gg f=80\text{ mm}$) して、レーザー光線を照射すると、スクリーン上の光スポットは Fig. 7 に示すように中心に影線が挿入されている。実際に電圧感度 0.42 mm/mV (電流感度 $5 \times 10^{-6}\text{ A}$) の反照形検流計を用いて実測した例を Fig. 8 に示している。この図から電圧感度は 4.4 mm/mV となっているので、従来の光てこを利用した検流計の読取り精度が見掛け上約 1 桁高められていることがわかる。この場合の直線性の特性は、GRIN レンズの特性で決まるので、Fig. 4 に示したものと同一である。ただし、実際問題としては、スポットの中心を示す影の線を最適なものにするために、針線の直径および対物レンズ L_1 から被検物体 O までの距離の関係等を調べる必要があるが、その問題は今後の課題としたい。

4. む す び

GRIN レンズは開口角が大きいので、光路長に対する拡大率が普通のレンズよりもずっと大きくなることを利用した特殊な投影法による、指示計器の読取り精度を高める方式を考察した。対物レンズの焦点距離よりも遠い位置にある被検物体でも、一次元的な像情報である限り大きく拡大することが可能で、被検物体の微小な変位を精密に測定できることを示した。この方式により可動コイル型検流計の指針やアルコール温度計のアルコール液面等を大きくすることにより、読取り精度を 2 桁以上高められることを示した。また、光スポットの中心に細い影線を挿入することにより、鏡の微小回転による光スポットの変位を GRIN レンズで拡大することにより、従来の光レバーより、等しい光路長で約 1 桁読取り精度が高められることを示した。

文 献

- 1) D. T. Moore: "Gradient-index optics," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1035-1038.
- 2) K. Iga: "Theory for gradient-index imaging," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 1039-1043.
- 3) 北島博愛, 宮内真人: "回折格子付レーザー投影機", *光学*, **16** (1987) 120-122.
- 4) 北島博愛, 宮内真人, 江崎哲弘: "指示計器のための特殊な GRIN レンズ投影法", *光学*, **16** (第12回光学シンポジウム) (1987) 365.
- 5) F. A. Jenkins and H. E. White: *Fundamentals of Optics* (McGraw-Hill Kougakusha, Tokyo, 1965) pp. 62-65.
- 6) 日本板硝子資料: セルフロックマイクロレンズ (SML) (1984).