

研究速報

レンズ駆動形二次元微小変位・振動の高分解能測定

北島 博愛*・西村 正利**・江崎 哲弘*・川原 功治*

* 九州工業大学工学部 〒804 北九州市戸畑区仙水町 1-1

** 九州電力(株)配電部 〒810 福岡市中央区渡辺通 2-1

(1988年10月1日受理)

Lens Driving Type Optical System Having High Resolving Power to Measure Two Dimensional Small Displacement or Vibration

Hiroe KITAJIMA,* Masatoshi NISHIMURA,** Tetsuhiro EZAKI* and Kouji KAWAHARA*

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

** Kyushu Electric Power Co., Inc., 2-1, Watanabedori, Chuo-ku, Fukuoka 810

In this letter, we present the lens driving type optical system having high resolving power to measure two dimensional small displacement or vibration precisely. When we put two GRIN lenses so that an incident Gauss beam emerges as a Laguerre-Gauss beam, the out-put beam contains a small spot and several concentric bright circles, and the relative lateral displacement of the lenses from the optic axis converts the exit angle of the beam. So, the length of the lateral displacement is magnified and its length is shown in terms of the product of the exit angle and the optical pass length. Furthermore, when the spot displacement is magnified by another GRIN lens, it is easy to recognize very small lateral displacement, because the magnified spot contains a concentric small bright spot. It is possible to obtain a lateral resolution of 5 nm.

1. ま え が き

変位や振動の光計測に関しては、焦点検出法¹⁾、非点収差法、ナイフエッジ法²⁾やヘテロダイン干渉法³⁾あるいはドップラー効果法やスペckル干渉法⁴⁾等があるが、これらはいずれも光軸の方向への変位、つまり縦方向変位の検出が主要なもので、その分解能については、限界に近いレベルまで達している⁵⁾。それに対して光軸に対して横方向の二次元的な変位に関する分解能は現在の光計測技術の水準では不十分であるので、超精密加工や超 LSI 測定等の応用面から、横方向分解能の飛躍的向上が望まれている⁶⁾。

本研究速報では、その横方向分解能の飛躍的向上に寄与する方式の一つと思われるレンズ駆動方式を報告する。原理は、ガウスビームの入射光線が、ラゲール・ガウス分布に変換されて出射するように二つの分布屈折率レンズを配置する。それらのレンズを光軸に対して横方

向に微小に変位させると、光軸からの相対的なずれに比例して出射角が変化する。したがって、レンズの微小変位はその出射角と光路長との積で示される光スポットの変位に拡大される(その倍率を M_1 とする)。さらに、その変位した光スポットを3番目の分布屈折率レンズで拡大投影する(その倍率を M_2 とする)。総合倍率 M_t は、独立な異なる二つの拡大方式のそれぞれの倍率の積 ($M_t \doteq M_1 \cdot M_2$) となるので非常に大きな倍率が期待できる。しかし、普通は3番目の分布屈折率レンズで拡大しても光スポット径も M_2 倍に拡大されているので、そのスポットの中心があいまいになり、スポットの横方向変位の分解能は総合倍率が大きくなるほどの期待はできない。しかしながら第2のレンズからの出射光線は、ラゲール・ガウス分布で、光スポットは輝度に明暗の同心円を含んでいる⁷⁾。したがって、3番目の分布屈折率レンズでスポット径を M_2 倍に拡大しても、中心のいちばん小さなスポットに着目すれば、スポットの中心の変位を

精密に測定できるようになるから、実質的には横方向の変位を拡大したこととなり、横方向の分解能は著しく向上する。

具体的例として、普通の He-Ne レーザー光源を用いて総合倍率を2万倍にしても、暗室にすることなく中心のスポットの2mm程度の変位を肉眼で観測できるので、0.1 μmの変位を肉眼で測定できることになる。さらにその光スポットの輝度を二つのフォトトランジスタで差動的に検出することにより、0.005 μmの精度で測定しうることがわかった。

2. 原 理

Fig. 1 に示す構造において、平行な入射光線が再び平行な光線として出射するように二つの分布屈折率レンズ L₁, L₂ を配置する。いまレンズ L₁ が d₁ だけ変位すると出射角 θ は次式で示される。またレンズ L₃ の入射端面における変位 d₂ および倍率 M₁ 等はそれぞれ

$$\theta = |C \cdot d_1|, \quad d_2 = \theta Z_1, \quad M_1 = d_2/d_1 = |C \cdot Z_1| \quad (1)$$

と示される。ここに C は分布屈折率レンズの光線マトリクス (A, B, C, D) の要素 C である^{6,8)}。議論を簡単にする意味で、レンズ L₁, L₂, L₃ はともに等しい光学定数を有するものとする。光スポットの変位 d₂ をレンズ L₃ で拡大投影すると、倍率 M₂ および総合倍率 M_t はそれぞれ

$$M_2 = d_3/d_2 = |C \cdot Z_2|, \quad M_t = d_3/d_1 = M_1 \cdot M_2 \quad (2)$$

と近似される。

総合的に拡大されたスポット変位が直線的となる範囲は、主として3番目の分布屈折率レンズで決まる。近似的には分布屈折率レンズの中心より ±0.15 mm の範囲であれば一般に歪みは小さいので⁶⁾、それが一つの目安となる。総合倍率を一定としても、倍率 M₁ と M₂ の配分により異なるが、直線となる範囲を大きくするには M₁ を小さくすると良いが、M₂ を大きくしなければならないので、光路長 Z₂ が長くなることから制約される (Table 1 参照)。

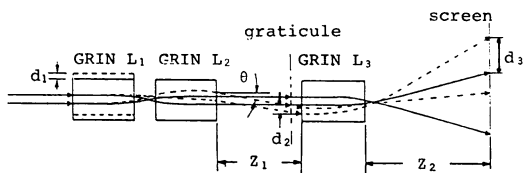


Fig. 1 Geometry for the lens driving type optical system.

Table 1 Various numerical values to obtain the magnification M_t=20000 and ranges of d₁ to obtain linear magnification when we use a GRIN lens with |C|=0.62.

Z ₁ (mm)	M ₁	Z ₂ (mm)	M ₂	d ₁ (μm)
44.78	30	995.0	666.7	±5.0
89.55	60	497.5	333.3	±2.5
149.25	100	298.5	200.0	±1.5

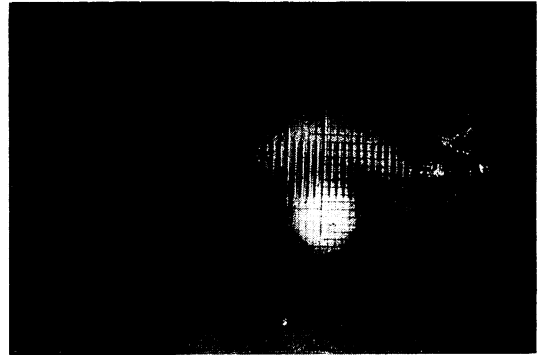


Fig. 2 Photograph of the spot with magnification M_t=80000. A graticule (minimum separation 10 μm; ... 20, 30, 40, ... : unit [100 μm]) with magnification M₂=1000 is also projected on the screen (... 10, 5, 0, ... : unit [5 cm]).

3. 具体的測定例と考察

Fig. 2 に M₁=80 倍、M₂=1000 倍として総合倍率 M_t=80000 倍にしたスポットの写真を示す。この写真では、レンズ L₃ で拡大した顕微鏡の目盛の 10 μm 間隔 (... 20, 30, 40, ... は 100 μm 間隔) とスクリーン上の 10 mm 間隔 (... 10, 5, 0, 5, ... は 5 cm 間隔) の目盛が一致しているので、レンズ L₃ での倍率 M₂=1000 倍であることが確認できる。拡大されたスポットはラゲール・ガウス分布的で同心円的に明暗ができていたが、顕微鏡目盛板の格子間隔が一定であるので倍率そのものには変化はないことがわかる。この写真ではいちばん内側のスポット径が約 100 μm ある。総合倍率 M_t を2万倍にするとそのスポット径は約 25 mm になるが、暗室にする必要はなく、普通の明るい部屋でもそのスポット径は約 10 mm 程度 (出力 1 mW 程度の He-Ne レーザー光源を用いて) として認識でき、2 mm 程度の変位は肉眼で識別できるので、レンズ L₁ の変位は 0.1 μm の精度で肉眼で測定できることになる。しかも光軸に対して横方向の二次元的な振動姿態もこのように高倍率に投影されているので精密な観測が可能となる。

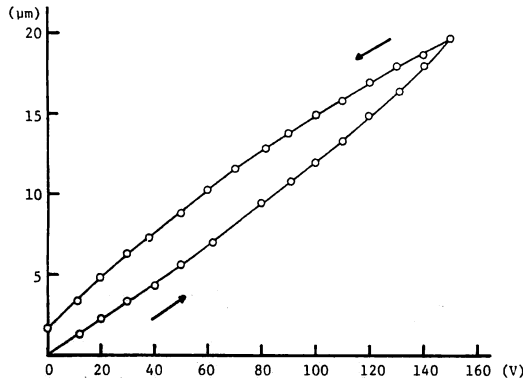


Fig. 3 Measured extension of piezoelectric stack actuator. The extension is measured by observing the lateral displacement of the spot center with magnification $M_t=20000$; it is possible to recognize the displacement 2 mm by the naked eye in a bright room.

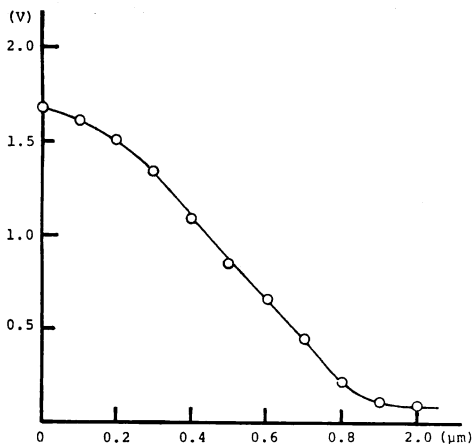


Fig. 4 Brightness gradient of a magnified spot with magnification $M_t=20000$; displacement of a photo-detector vs. out-put voltage.

Fig. 3 に電歪アクチュエータの印加電圧に対する変位の実測例を示す。

次に総合倍率 $M_t=2$ 万倍に設定し、中心の光スポット径をやや大きくなるようにレンズ L_1 と L_2 との距離を調節し、そのスポット内の輝度を二つのフォトトランジスタで検出し差動増幅器を用いて増幅する。すなわち光スポットそのものは固定して、一方のフォトトランジスタを移動台に載せて 20 mm 移動させた場合の出力電圧特性を **Fig. 4** に示す。等価的にはレンズ L_1 を 1.0 μm 移動させた場合の出力電圧特性となっている。ただし、外乱や床の振動等による電圧変動を軽減させるた

め、共振周波数 64.0 Hz, $Q=200$ の音叉を 2 個用いて、一つは光ビームを断続し、もう一つは差動増幅器の出力信号の狭帯域フィルタとして用いている。音叉からの出力電圧の変化の応答は約 1 秒の時定数があり、出力電圧の変動は 10 mV 以下となるとき測定している。この図より、0.3~0.8 μm の範囲では 0.1 μm の変位に対して、約 300 mV の割合で直線的に変化しているため、5 nm の精度で測定可能である。この例では、直線的となる範囲は 0.5 μm と狭いが、中心の主スポットそのものが直線的に変化する範囲は **Table 1** にその目安を与えているように、 μm のオーダーであるから、この方式は、光軸に対して横方向の二次元的変位の精密な測定方式の一つとしてきわめて有意義と思われる。なお、このようなガウスビームが入射して、ラゲール・ガウス分布に変換されて出射する現象は、レンズ L_1 の焦点付近の最大解像力像平面⁹⁾を観測するようにレンズ L_2 を配置した場合で、分布屈折率レンズは一般に中心より半径が、ある値以上になると急激に収差が大きくなり^{6,10)}、レンズのレスポンス関数が正、負と変化するためと思われる^{11,12)}。したがって、レンズの中心付近(半径 0.15 mm 以内、**Table 1** 参照)では精密な測定が可能である。詳細な検討は今後の課題としたい。

4. む す び

平行光線が出射するように二つの分布屈折レンズを配置すると、光軸から横方向へのレンズの相対的ずれに比例して出射角が変化すること、および出射光は輝度に同心円的な明暗のあるラゲール・ガウス分布であることに着目することにより、1 万倍以上の高倍率が容易に得られ、光軸に対して横方向の二次元的微小変位や振動等を精密に測定できる。またフォトトランジスタを走査することにより 5 nm の精度で微小変位が測定できることを示した。

文 献

- 1) T. Kohno, N. Ozawa, K. Miyamoto and T. Musha: "High precision optical surface sensor," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 103-108.
- 2) 計量管理協会, 光応用計測技術調査研究委員会編: 光計測のニーズとシーズ (コロナ社, 東京, 1987) pp. 173-183, 221-223, 223-229.
- 3) G. E. Sommargren: "Optical heterodyne profilometry," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 610-617.
- 4) D. Pantzer, J. Politch and L. Ek: "Heterodyne profiling instrument for the angstrom region," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 4168-4172.
- 5) 河野嗣男: "光計測の分解能," *光学*, **17**(1988) 107.
- 6) 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, **17** (1988) 129-132.
- 7) 伊賀健一: レーザー光学の基礎 (オーム社, 東京, 1988) pp. 65-68.
 - 8) A. Yariv: *Quantum Electronics* (John Wiley & Sons, New York, 1975) pp. 99-103.
 - 9) 久保田広, 浮田祐吉, 会田軍太夫編: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 東京, 1976) pp. 235-236.
 - 10) I. Kitano, M. Toyama and H. Nishii: “Spherical aberration of gradient-index lenses,” *Appl. Opt.*, **22** (1983) 396-399.
 - 11) J. W. Goodman: *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, San Francisco, 1968) pp. 121-123.
 - 12) A. M. Goodbody: “The influence of spherical aberration on the response function of an optical system,” *Proc. Phys. Soc.*, **72** (1958) 411-424.