



## ビームウエスト径を固定してウエスト位置を 可変する光学系

小野 雄三\*・宮崎 宏之\*\*

\* 日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

\*\* 日本電気(株)産業オートメーション事業部 〒183 府中市日新町 1-10

(1993年8月16日受付, 1993年11月10日受理)

### Optics for Moving Beam Waist Position with a Fixed Waist Size

Yuzo ONO\* and Hiroyuki MIYAZAKI\*\*

\* Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,  
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 216

\*\* Industrial Automation Division, NEC Corporation,  
1-10, Nisshin-cho, Fuchu 183

(Received August 16, 1993; Accepted November 10, 1993)

Simple optics, which employ a three lens configuration for moving a beam waist position without changing the waist size, is described. In the optics, the beam waist position can be moved by moving the first lens, which is in front of the second and the third lenses, which form a beam expander configuration. The movement in the waist position is proportional to the movement in the first lens. The proportional ratio is equal to a longitudinal magnification for the second and the third lens combination. It is also shown that both the first and the second lenses can be concave. Experimentally, for 10 mm movement in the first lens, the beam waist moved 795 mm with  $123.5 \pm 2 \mu\text{m}$  beam waist change in radius. The magnification for movement in the waist position also agreed fairly well with a designed value.

#### 1. はじめに

収束ビームスポットのビーム径を一定に保ったままで、その収束面を光軸方向に可変にしたいという要求は、実験室用途以外にも多々ある。例えば、レーザースキャナを用いたバーコード読み取り装置においては、読み取り深度を収束ビームスポットの焦点深度以上に拡大するために、ビーム収束面を数段階に可変することが行われている<sup>1)</sup>。すなわち、バーコードラベルの貼られている被読み取り物体の高さを検知して、その情報に基づいて光学系の一部を光軸方向に移動することで、走査ビームの焦点深度内に読み取りバーコード面が入るように、走査ビームの収束位置を変化させる、収束位置可変光学系が用いられている。

上述の「収束ビームスポットのビーム径を一定に保つ

たままに収束面を光軸方向に可変する」という命題に対しては、ビームエキスパンダーがそのような特性を持つ光学系であることが指摘されている<sup>2)</sup>。著者らは当初その論文の存在に気づかないまま、バーコード読み取り装置への応用を目的に、現行の2枚構成レンズから出発し<sup>3)</sup>、3枚構成レンズでの特性を検討した結果同様な解を得た。すなわち、2枚レンズ構成のビームエキスパンダーと、ビームエキスパンダーの前に配置されビームエキスパンダーへの入射ビームウエスト位置を光軸方向に可変する可動レンズとからなる構成である。しかしながら、著者らの導出した式からは、ビームエキスパンダーを構成する一方のレンズが負のガリレオ式望遠鏡構成では、ビームエキスパンダーへの入射ビームウエスト位置を可変する可動レンズが、逆望遠鏡構成のビームエキスパンダーを構成する2枚のレンズの間で移動するという

興味ある構成も導かれたので、実験結果と共に報告する。

本報告では、「収束ビームスポットのビーム径を一定に保ったままで、収束面を光軸方向に可変する」光学系の設計をまず述べ、その特性および物理的意味の解釈、四レンズ系での構成を考察した後、本方法で設計した光学系の実験結果を述べる。

## 2. 光学系の構成

従来バーコード読み取り装置では、簡便性から Fig. 1 に示す 2 枚構成のレンズの内一方をレンズ光軸方向に可変する方式がとられていた<sup>1)</sup>。このような系では、第 2 レンズの結像倍率を変化させることでビーム集束位置を変化させており、集束スポット径の変化が避けられない。また、レンズの移動量に対するビーム集束位置の変化もリニアではない。

像面ビーム径を一定に保つには、Fig. 1 の第 2 レンズの物点を固定したまま、物点ビーム径を第 2 レンズの移動に同期させて変化させる必要がある。実用上は簡便な構成が望まれるので、レンズ 1 枚だけの移動で物点の移動と物点のビーム径変化を生じさせる構成を考える。Fig. 1 においては、第 2 レンズを移動させるように描いているが、第 2 レンズの物点を移動させても同じ結果になるので、第 2 レンズを固定して (以後 Fig. 2 では Fig. 1 の第 2 レンズを第 3 レンズと呼ぶことにする)、

Fig. 2 に示すようにその前に 2 枚のレンズを配置する。この配置により、第 1 レンズの移動のみで第 3 レンズの物点の移動と物点のビーム径変化を生じさせることができる。

この構成では、物点移動とビーム径変化は独立ではないので、最終像面 (第 3 レンズの像面) のビーム径を一定にできる保証はないが、最近点と最遠点のビーム径が等しいという条件を入れることで、ビーム径変化を小さくできることが期待できるので、この構成について考察することにする。

Fig. 2 に示す光学系の第 1 および第 2 レンズの合成焦点距離  $F$  は、各々のレンズの焦点距離を  $f_1$  および  $f_2$ 、レンズの間隔を  $d$  として、

$$1/F = 1/f_1 + 1/f_2 - d/(f_1 f_2) \quad (1)$$

で与えられる。一方、 $F$  は第 2 レンズの像面ビーム半径  $w$  と次の関係にある。

$$F\lambda/(\pi w) = w_0 \quad (2)$$

ここに、 $w_0$  は第 1 レンズへ入射するコリメートビームの半径、 $\lambda$  は光の波長である。一方、第 2 レンズから第 2 レンズの結像面までの距離を  $s'$  とすると、第 2 レンズによる結像関係は、

$$1/s' - 1/(f_1 - d) = 1/f_2 \quad (3)$$

となる。次に、第 3 レンズの結像関係は次式で表される。

$$1/a + 1/b = 1/f_3 \quad (4)$$

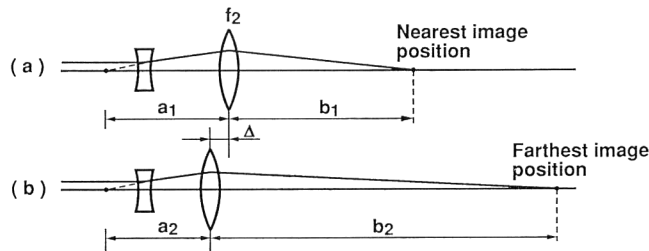


Fig. 1 Two lens configuration for moving a beam waist position.

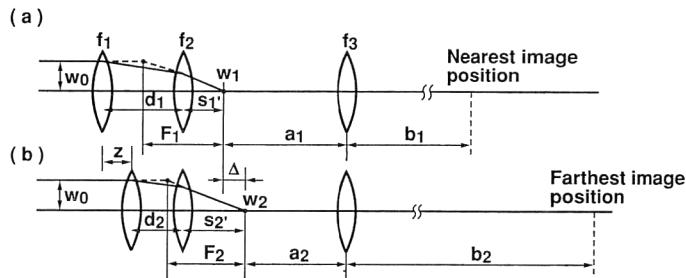


Fig. 2 Three lens configuration for moving a beam waist position. (a) Nearest position. (b) Farthest position.

また、最終像面のビーム径を  $w_3$  とすると、

$$w_3 = wb/a \quad (5)$$

なる関係がある。今、第1レンズが第2レンズから最も遠ざかった位置にある時 (Fig. 2 (a)) をサフィックス1で表し、最も近づいた時 (Fig. 2 (b)) をサフィックス2で表すことにすると、(1)~(5)式の関係は両方のサフィックスについて成立するので、各々の式は2個ずつあることになり、計10個の関係式が得られたことになる。これら10個の関係式の中で、設計上与えられる既知数は、 $\lambda$ ,  $w_0$ ,  $w_3$  だけである。一方、未知数は、 $F_1$ ,  $F_2$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $s_1'$ ,  $s_2'$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  の13個である。このままでは関係式の数足りないので、未知数間の関係は求められない。

そこで、最近点と最遠点で像面ビーム径が等しいという条件と、像面を最近点から最遠点まで移動するのに必要な第1レンズの移動距離が  $z$  であるという設計条件を付加する。これらの条件は、次式で表される。

$$w_1 b_1 / a_1 = w_2 b_2 / a_2 \quad (6)$$

$$z = d_1 - d_2 \quad (7)$$

以上で、関係式は12個になったので、連立して解くことで、13個の未知数間の関係を既知パラメーターを用いて表すことができる。

以上の連立方程式の解のうち、実際の光学配置をするためと以下の議論に必要な、 $f_1$ ,  $f_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $s_1'$ ,  $s_2'$  を次式に示す (複号同順)。

$$f_1 = \pm (\pi w_0 w_3 / \lambda) \{z / (b_2 - b_1)\}^{1/2} \quad (8)$$

$$f_2 = \pm f_3 \{z / (b_2 - b_1)\}^{1/2} \quad (9)$$

$$d_1 = (f_1 + f_2) - (b_1 - f_3) f_2^2 / f_3^2 \quad (10)$$

$$d_2 = (f_1 + f_2) - (b_2 - f_3) f_2^2 / f_3^2 \quad (11)$$

$$s_1' = \{-f_3^2 + (b_1 - f_3) f_2\} / (b_1 - f_3) \quad (12)$$

$$s_2' = \{-f_3^2 + (b_2 - f_3) f_2\} / (b_2 - f_3) \quad (13)$$

### 3. 考 察

#### 3.1 光学配置

第2レンズと第3レンズの距離  $d_{23}$  は、

$$d_{23} = S_1' + a_1 \quad (14)$$

であるから、(12)式とサフィックスを1とした(4)式を用いて、

$$d_{23} = f_2 + f_3 \quad (15)$$

となる。すなわち、第2レンズと第3レンズの距離はその焦点距離の和になっていることがわかる。すなわち、既に丸山によって指摘されているようにビームエキスパンダーの構成になっている<sup>2)</sup>。

#### 3.2 ビーム径の変化

像面ビーム径  $w_3$  は(8)、(9)式から次のように求まる。

$$w_3 = \{f_1 \lambda / (\pi w_0)\} (f_3 / f_2) \quad (16)$$

(16)式は  $z$  を含まないので、 $w_3$  は第1レンズの移動量によらず常に一定値であることがわかる。また、(16)式は次のように理解することができる。すなわち、右辺の  $\{ \}$  でくくられた項は、第1レンズにビーム径  $w_0$  の平行ビームが入射した時にできるビームウエストのビーム径を表している。2番目の  $( )$  でくくられた項は、 $\{ \}$  で表されるビームウエストが、第2レンズおよび第3レンズで  $f_3 / f_2$  倍に変換されることを意味している。ここで、入射ビーム径が、第2レンズと第3レンズでその焦点距離比倍になるということは、第2レンズと第3レンズが焦点距離の和の距離の位置に置かれていること、すなわち、上で求めた、(15)式の関係に配置されていることを意味している。

#### 3.3 像面変化のリニアリティ

第1レンズの移動量に対する像面変化  $\partial b / \partial d$  を求める。(4)式、サフィックス1を除いた(14)式および(3)式からわかるように、 $b$  は  $a$  の関数であり、 $a$  は  $s'$  の関数、 $s'$  は  $d$  の関数であるから、 $\partial b / \partial d$  は次式で表される。

$$\partial b / \partial d = (\partial b / \partial a) (\partial a / \partial s') (\partial s' / \partial d) \quad (17)$$

上記三つの式を各々微分して、(17)式に代入し、(10)、(11)および(4)式を用いて  $d$ ,  $a$ ,  $b$  を消去すると、

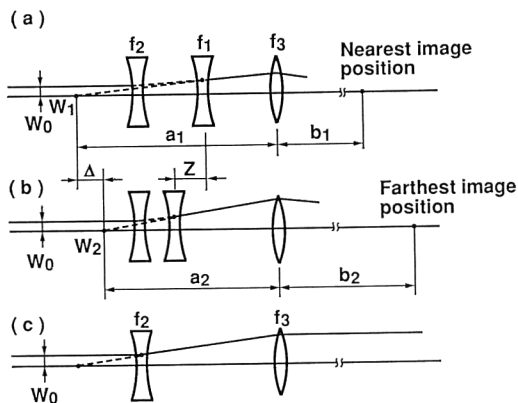
$$\partial b / \partial d = -(f_3 / f_2)^2 \quad (18)$$

となる。したがって、像面位置変化は第1レンズの移動に逆リニアであり、その比例定数は、第2および第3レンズの焦点距離の比の2乗、すなわち、第2および第3レンズからなる系の縦倍率に等しい。

実際の光学系では、第1レンズをわずかに動かすことで像点位置を大きく動かすように設計されるので、(18)式において、 $f_3 / f_2 > 1$  となる。すなわち、第2レンズおよび第3レンズは、ビームエキスパンダー (逆望遠鏡) の配置に置かれていることがわかる。

#### 3.4 凹レンズを用いた構成

$f_1$  および  $f_2$  は(8)、(9)式に示すように数式上同時に負でも成立する。すなわち、第1および第2レンズは両方同時に凹レンズでもよい。第2レンズが負でもよいことは、第2レンズと第3レンズがビームエキスパンダーの配置に置かれていることから容易に理解される。すなわち、Fig. 3 (c)に示すように、凹レンズの第2レンズと、凸レンズの第3レンズで逆望遠鏡を構成



**Fig. 3** Optical configuration using two concave lenses. (a) Nearest position. (b) Farthest position. (c) Beam expander configuration, with second and third lenses.

すればよい。

次に、第1レンズが負であることについて考察する。(10), (11)式で、通常は  $b_1 > f_3$  および  $b_2 > f_3$  であり、かつ、 $f_1$  および  $f_2$  が負であることから、 $d_1$  および  $d_2$  はともに負となる。 $d_1$  および  $d_2$  が負ということは、第1レンズが第2レンズの後ろに配置されていることを意味する。つまり、Fig. 3 (a), (b)に示すように、逆望遠鏡構成の第2および第3レンズの間で、第1レンズが光軸方向に移動することで所望の機能が実現される。この場合、光学系の全長は  $f_3 - |f_2|$  となり、第1および第2レンズがともに凸レンズである場合の全長 ( $f_2 + f_3 + d_1, d_1 > 0$ ) に比較して、短くできる点が特長である。

### 3.5 収差と回折に関する考察

実際の設計においては、光学系の全長を短くしたいこと、および第1レンズの移動距離に対する像面変化の倍率を大きくしたいことから、第2レンズの焦点距離を小さくする設計がなされる。この場合第2レンズと第3レンズの開口比が大きくなり、特に最遠点の場合の第3レンズのビーム径が大きくなり、球面収差と第3レンズの開口による回折が無視できなくなる。本光学系の変換範囲の限界は、この球面収差と回折によって決まる。 gaussianビームの口径蝕による回折がビーム径に与える影響については、Dickson の解析があり、ビーム中心強度の  $1/e^2$  で定義した gaussianビーム径の1.7倍以上の開口であれば回折の影響は無視できることが報告されている<sup>3)</sup>。マージンを含めてビーム径に約2倍の安全係数を掛けた口径で設計することが必要である。一方、球面収差については、三つのレンズともシングレットで製作すると球面収差が避けられない。球面収差の補正は、第

3レンズをダブルットとして行うことが比較的容易である。

## 4. 実験

上で導出した方式について、その妥当性を検証するために、凸レンズ3枚構成の場合について試作を行い、可変特性を測定した。像面ビーム半径はバーコード読み取り装置用に  $125 \mu\text{m}$  とした。第1レンズの移動距離を  $10 \text{ mm}$  として、これに対して像面を  $b_1 = 1090 \text{ mm}$  から  $b_2 = 1900 \text{ mm}$  まで  $810 \text{ mm}$  変化させられること、および、光学系全長を  $100 \text{ mm}$  以下にすることを設計条件に、(8), (9)式に従い、Table 1 に示す設計値を決定した。第1および第2レンズはシングレットとし、第3レンズをダブルットとして球面収差を補正した。各レンズ通過時の gaussianビーム径に対する口径の安全係数は2として設計した。Table 2 に各レンズ通過時のビーム径と、有効レンズ径を示す。第3レンズの設計上の残存球面収差は最大で  $-2 \text{ mm}$  であった。

実験では、まず第2レンズと第3レンズに He-Ne レーザーを通して、レンズ間隔を逆望遠鏡構成に調整した後、第1レンズを入れ、第3レンズから  $1900 \text{ mm}$  の位置にビームが収束するように第1レンズの位置を設定した。次に、第1レンズを  $1.25 \text{ mm}$  刻みで、第2レン

**Table 1** Designed parameters.

First lens focal length $f_1$ (mm)	46.4
Second lens focal length $f_2$ (mm)	5.56
Third lens focal length $f_3$ (mm)	50.0
Incident beam waist radius $w_0$ (mm)	0.673
Wavelength $\lambda$ (nm)	632.8
Output beam waist radius $w_3$ (mm)	0.125
Movement by the first lens $z$ (mm)	10.0
Nearest waist position $b_1$ (mm)	1090
Farthest waist position $b_2$ (mm)	1900
Magnification in movement $(b_2 - b_1)/z$	-81.0

**Table 2** Beam radii on three lenses and effective lens apertures.

Lens number	1	2	3
Focal length $f_n$ (mm)	46.4	5.56	50.0
Beam radius $r_1$ (mm)	0.673	0.1061	1.761
$r_2$ (mm)	0.673	0.251	3.064
Effective lens aperture $D_n$ (mm)	4.0	4.0	13.0
Safety factor $D_n/(2r_{\max})$	2.97	7.97	2.12

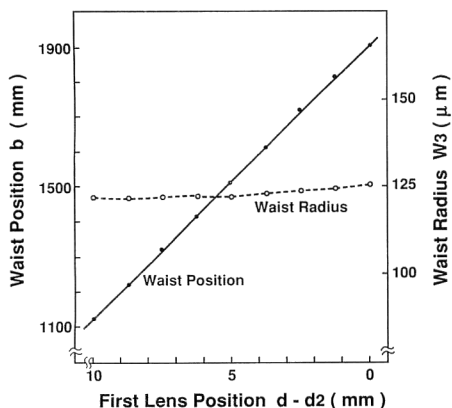


Fig. 4 Experimental results for beam waist position and radius versus change in the first lens position.

ズから遠ざけながら、ビーム収束位置とビーム収束径を、ナイフエッジ法を用いて測定した。なお、入射ビームとしては、設計値よりやや大きい半径  $0.71 \text{ mm}$  のビームを用いた。

第1レンズの移動位置に対するビーム収束位置の測定値、および第1レンズの移動位置に対するビーム収束径の測定値を Fig. 4 に示す。795 mm の像面可変範囲にわたり、ほとんど一定の  $123.5 \pm 2 \mu\text{m}$  (強度が中心強度の  $1/e^2$  になるビーム半径で定義) の収束ビーム径が得られた。ビーム径が設計値  $125 \mu\text{m}$  より小さい値になったのは、入射ビーム径が設計値より大きいことによると考えられる。また、ビーム径が遠点側で増加傾向を持っているが、球面収差と回折の影響については上記のように設計上は問題ないレベルにしてあるので、むしろ第2および第3レンズの配置精度によるものと見ている。

像面変化に関しては、第1レンズの移動に対して逆リニアで、像面変化率として  $-79.5$  が得られた。この値も Table 1 の設計値  $-81$  によく一致している。

## 5. ま と め

3枚構成のレンズの一枚だけを光軸方向に移動するだ

けで、収束ビーム径を一定にしたまま像面を変化させることができる簡便な光学系を解析的に求めた。結果を箇条書にすると、

- ① 第2レンズと第3レンズは焦点距離の和の位置に配置されており、ビームエキスパンダー(逆望遠鏡)を構成している。
- ② 像面には、第1レンズで作られたビーム径を、第2および第3レンズで構成されている系の横倍率  $(f_3/f_2)$  倍したビーム径が作られる。
- ③ 第1レンズの移動に対して像面変化は逆リニアで、その変化率は  $-(f_3/f_2)^2$ 、すなわち、第2および第3レンズで構成される系の縦倍率に等しい。
- ④ 第1および第2レンズを同時に凹レンズとする構成が可能で、この場合、第1レンズは逆望遠鏡を構成している第2レンズと第3レンズの間に配置される。したがって、光学系の全長が短くなる利点がある。
- ⑤ 実際の設計においては、第2レンズで発生する球面収差を第3レンズで補正することで、光学系全長の短い光学系を実現できる。
- ⑥ 第1レンズの移動量  $10 \text{ mm}$  に対して、像面を  $795 \text{ mm}$  移動でき、その時のビーム径変化は  $123.5 \pm 2 \mu\text{m} (1/e^2)$  であること、また、像面変化率も設計とよく一致することを実験で確認した。

本光学系は、実験室での用途のみならず、収束レーザービームを用いた種々の光学装置の焦点深度を実効的に拡大して、装置の性能を向上する上で極めて有用である。

## 文 献

- 1) 宮崎宏之: "バーコードリーダー", O plus E, No. 127 (1990) 120-124.
- 2) 丸山修治: "ガウスビームとその変換", 光学, 13 (1984) 294-298.
- 3) L.D. Dickson: "Characteristics of a propagating Gaussian beam," Appl. Opt., 9 (1970) 1854-1861.