

多面转镜双光束远场扫描规律研究*

张逸新 陈玲华

(无锡轻工大学计算科学和信息传播系,无锡,214036)

摘要:应用几何光学理论研究了多光束转镜扫描场的非对称性,导出多光束扫描入射点位置矢量、反射线标量表达式、观察面上的扫描轨迹方程,并研究了扫描远场的非对称性。

关键词:激光扫描 多光束扫描 多面转镜

The study of dual beam scanning far-field by polygoy

Zhang Yixin, Chen Linhua

(Department of Computing Science and Information Communication,
Wuxi University of Light Industry, Wuxi, 214036)

Abstract: In this paper, a ray-optics analysis is performed to investigate the asymmetry of dual beam scanning field produced by a rotating polygoy. Some basic equations of dual beam scan are derived, such as, the position vector for the incident point, the scalar expression for reflected ray, scan pattern on observation plane ect. The far-field asymmetry of the scanning field has been discussed.

Key words: laser scanning dualbeam scanning polygonal scanner

引 言

多光束扫描输出是解决光学记录领域中采用单光束扫描输出速度慢等问题的有效方法,为此,目前人们把研究注意力转向研究运用双或多光束扫描的方法来提高扫描部件的扫描速度。由于多面转镜扫描结构具有扫描速度快,扫描角度大,回扫快和速度的稳定性高等特点,所以,在目前众多的扫描装置中,多面转镜扫描结构是激光扫描器中常用的结构。对于这种扫描装置,已有许多研究工作报道^[1~14]。但由于多光束扫描采用了轴外光源的扫描,给系统带来更严重的扫描场非对称性和像差,因此,这是一个值得研究的问题,但目前尚未见有关研究报道。我们应用几何光学处理方法,研究了多面转镜扫描结构的双光束扫描场的扫描规律和扫描远场非对称性问题。

1 多光束扫描场基本方程

1.1 入射点的位置矢量

由双光束扫描几何光路图(见图 1)所表示的各物理量,我们可得以下关系:

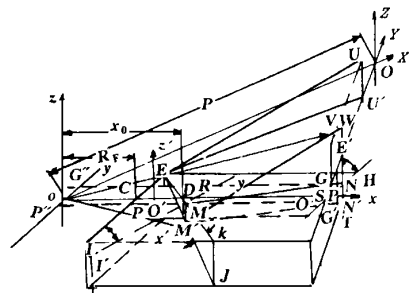


Fig. 1 The analysis diagram of dual beam scanning optical path

* 江苏省青蓝工程基金资助。

$$CR = R_F / \cos \gamma - R_F \quad (1)$$

$$CD = x_0 - R_F \quad (2)$$

$$CE = CD \tan(\gamma - \beta) = (x_0 - R_F) \tan \gamma \quad (3)$$

$$ED = CD / \cos \gamma = (x_0 - R_F) / \cos \gamma \quad (4)$$

另外,在 DRM 中: $DM \cos \gamma - RM \cos(90^\circ + \beta) = R_F / \cos \gamma - R_F$ (5)

$$DM \sin \gamma = RM \sin(90^\circ + \beta) \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式,并求解方程组后,得到: $DM = (R_F - x_0 \cos \beta) / \cos(\gamma - \beta)$ (7)

那么, $EM = ED + DM = (x_0 - R_F) / \cos \gamma + (R_F - x_0 \cos \beta) / \cos(\gamma - \beta)$ (8)

$$= \frac{x_0 \sin \gamma \sin \beta + R_F [\cos \gamma - \cos(\gamma - \beta)]}{\cos \gamma \cos(\gamma - \beta)}$$

$$PM = EM \cos \gamma = \frac{x_0 \sin \gamma \sin \beta + R_F [\cos \gamma - \cos(\gamma - \beta)]}{\cos(\gamma - \beta)} \quad (9)$$

在由以上关系通过计算可求得入射点 M 的位置坐标:

$$\begin{cases} PM = PM + oC = (R_F \cos \gamma + x_0 \sin \gamma \sin \beta) / \cos(\gamma - \beta) = x_M \\ OP = DM \sin \gamma = (R_F - x_0 \cos \beta) \sin \gamma / \cos(\gamma - \beta) = y_M \\ MM = EM \tan \alpha = \frac{x_0 \sin \gamma \sin \beta + R_F [\cos \gamma - \cos(\gamma - \beta)]}{\cos \gamma \cos(\gamma - \beta)} \tan \alpha = z_M \end{cases} \quad (10)$$

1.2 观察面上扫描点的位置矢量

假设观察面平行于转轴,并且转轴与观察面相距 P,即 $oO = P$,那么,由图 1 可得出以下关系式:

$$CS = oS - oC = P / \cos \phi - R_F \quad (11)$$

$$MQ = CS - PM \quad (12)$$

将(11)式与(9)式代入(12)式,可以得到:

$$MQ = P / \cos \phi - (R_F \cos \gamma + x_0 \sin \gamma \sin \beta) / \cos(\gamma - \beta) \quad (13)$$

另外:

$$MN = MN = \frac{P}{\cos \phi \cos(2\gamma - \beta)} - \frac{R_F \cos \gamma + x_0 \sin \gamma \sin \beta}{\cos(\gamma - \beta) \cos(2\gamma - \beta)} \quad (14)$$

$$NS = MN \sin(2\gamma - \beta) + CP$$

将(14)式与(10)式代入,即得: $NS = \frac{P \sin(2\gamma - \beta)}{\cos \phi \cos(2\gamma - \beta)} - \frac{2 R_F \sin(\gamma - \beta) + x_0 \sin \gamma}{\cos(2\gamma - \beta)}$ (15)

此外,由图 1 可知,在 GNS 中:

$$\begin{cases} GS \sin(90^\circ - \phi - \gamma + 2\beta) = NS \sin(90^\circ + \gamma - 2\beta) \\ GS \cos(90^\circ - \phi - \gamma + 2\beta) + NS \cos(90^\circ + \gamma - 2\beta) = GN \end{cases} \quad (16)$$

$$GS \cos(90^\circ - \phi - \gamma + 2\beta) + NS \cos(90^\circ + \gamma - 2\beta) = GN \quad (17)$$

将(15)式代入(16)式可得: $GS = NS \cos(2\gamma - \beta) / \cos(2\gamma - \phi - \beta)$ (18)

$$= \frac{P \sin(2\gamma - \beta)}{\cos \phi \cos(2\gamma - \phi - \beta)} - \frac{2 R_F \sin(\gamma - \beta) + x_0 \sin \gamma}{\cos(2\gamma - \phi - \beta)} \quad (19)$$

由(15),(17)两式与(18)式联立可解得:

$$GN = NS [\cos(2\gamma - \beta) \operatorname{tg}(\phi + \gamma - 2\beta) + \sin(2\gamma - \beta)]$$

$$= \frac{P \sin \phi \sin(2\gamma - \beta)}{\cos \phi \cos(2\gamma - \beta) \cos(2\gamma - \phi - \beta)} - \frac{2 R_F \sin(\gamma - \beta) \sin \phi + x_0 \sin \gamma \sin \phi}{\cos(2\gamma - \beta) \cos(2\gamma - \phi - \beta)} \quad (20)$$

又由图 1 知 $MG = MN - GN$, 将(14)式与(20)式代入求解 MG , 可得:

$$MG = \frac{P}{\cos(2 - \phi - \gamma)} - \frac{R_F \cos(\gamma - \phi) + x_0 \sin \gamma \sin(\gamma - \phi)}{\cos(\gamma - \phi) \cos(2 - \phi - \gamma)} \quad (21)$$

由图 1 还可得到: $GG = MG \cos(2 - \gamma) + PM + R_F$

将(21)式与(9)式代入得: $GG = \frac{P \cos(2 - \gamma) + 2 R_F \sin(\gamma - \phi) \sin \phi + x_0 \sin \gamma \sin \phi}{\cos(2 - \gamma - \phi)}$ (22)

另外: $EU = (CS - CE \tan \phi) \cos \phi / \cos(\gamma + \phi)$

将(11)式与(3)式代入, 可得: $EU = \frac{P - R_F(\cos \phi + \tan \gamma \sin \phi) + x_0 \tan \gamma \sin \phi}{\cos(\gamma + \phi)}$ (23)

$$UU = \frac{P - R_F(\cos \phi + \tan \gamma \sin \phi) + x_0 \tan \gamma \sin \phi}{\cos(\gamma + \phi)} \tan z \quad (24)$$

而: $VG = (MG - EM) \tan z$

将(21)式与(8)式代入, 解得:

$$VG = \frac{P \tan z}{\cos(2 - \gamma - \phi)} + R_F \tan z \left[\frac{1}{\cos \gamma} - \frac{2 \cos(\gamma - \phi)}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \right] + \frac{x_0 \tan z \tan \gamma \sin(\phi - 2)}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \quad (25)$$

这样, 我们就得到了观察面上的扫描点位置方程:

$$\left\{ \begin{aligned} GG &= \frac{P \cos(2 - \gamma) + 2 R_F \sin(\gamma - \phi) \sin \phi + x_0 \sin \gamma \sin \phi}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \end{aligned} \right. \quad (26)$$

$$\left\{ \begin{aligned} GS \cos \phi &= \frac{P \sin(2 - \gamma) - 2 R_F \sin(\gamma - \phi) \cos \phi - x_0 \sin \gamma \cos \phi}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \end{aligned} \right. \quad (27)$$

$$\left\{ \begin{aligned} VG &= \frac{P \tan z}{\cos(2 - \gamma - \phi)} + R_F \tan z \left[\frac{1}{\cos \gamma} - \frac{2 \cos(\gamma - \phi)}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \right] + \frac{x_0 \tan z \tan \gamma \sin(\phi - 2)}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

由图 1 可知: $GO = P \tan \phi - GS$

将(19)式带入上式, 可得: $GO = -P \tan(2 - \gamma - \phi) + \frac{2 R_F \sin(\gamma - \phi) + x_0 \sin \gamma}{\cos(2 - \gamma - \phi)}$ (29)

这样, 加上已知条件与 GG 的关系式, 又可得到一组观察面坐标系下的扫描点位置方程:

$$\left\{ \begin{aligned} X &= GO = P \end{aligned} \right. \quad (30)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Y &= -GO = P \tan(2 - \gamma - \phi) - \frac{2 R_F \sin(\gamma - \phi) + x_0 \sin \gamma}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \end{aligned} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{aligned} Z &= GG = \frac{P \cos(2 - \gamma) + 2 R_F \sin(\gamma - \phi) \sin \phi + x_0 \sin \gamma \sin \phi}{\cos(2 - \gamma - \phi)} \end{aligned} \right. \quad (32)$$

1.3 远场观察面的扫描轨迹

当观察面远离转镜转轴时, 即当 $P \gg R_F$ 且 $P \gg x_0$ 时, (31)与(32)两式可近似为:

$$Y = P \tan(2 - \gamma - \phi) \quad (33)$$

$$Z = P \tan z / \cos(2 - \gamma - \phi) \quad (34)$$

(33)式是转镜扫描系统的 $F \tan$ 方程, 当以相对转镜直径 R_F/P 为参数, $x_0 = R_F$, $\gamma - \phi = 30^\circ$ 时, 从数值上对比方程(31)与(33), 可以得到扫描点在 Y 方向上的相对移动增量 $Y/P = (Y - Y_{(\gamma=0)})/P$ 的曲线图。图 2a 即对比后所得的结果。其中标有 $R_F/P = 0.5, 0.6667$ 与 0.9091 的曲线由方程(31)得来。而标有 $R_F/P = 0$ 的曲线则由方程(33)得来。在同样条件下, 从数值上对比(32)与(34)两式, 可得扫描点在 Z 方向上的相对移动增量 Z/P

$= (Z - Z_{(\theta=0)}) / P$ 对 θ 的曲线图,见图 2b。类似地,其中标有 $R_F/P = 0.5, 0.6667$ 与 0.9091 的曲线由方程(32)得来。而标有 $R_F/P = 0$ 的曲线则由方程(34)得来。图 2a 与图 2b 中的曲线分别表示了观察面的距离对扫描点在 Y 方向与 Z 方向上运动的影响。随着 P 值的增加,曲线的不对称性减少,但对应于同一个 θ , $|Y|$ 与 $|Z|$ 值增大,且随着 θ 的增加, $|Y|$ 与 $|Z|$ 值增长幅度增大,这说明,在远场情况下,虽然正负扫描线对称性较好,但 Y 方向上速度非线性误差及 Z 方向上离轴扫描线像差较大。

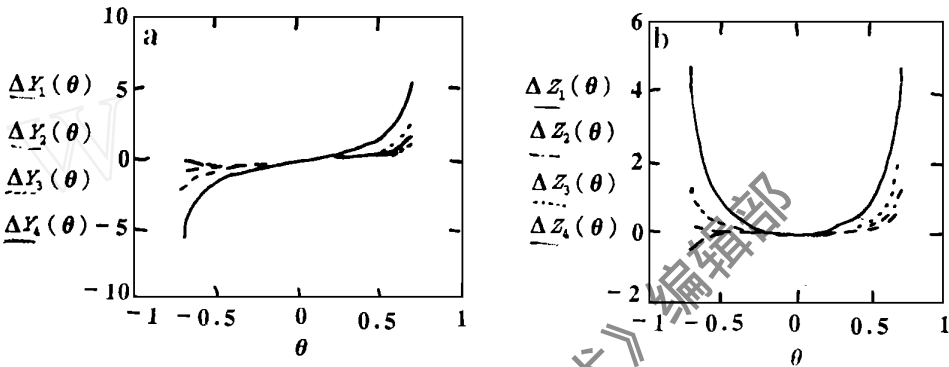


Fig. 2 The effect of observation distance on the position of scan spot

a — Y/P — (rad) ——— $Y_1, Z_1 R_F/P=0$ - - - $Y_3, Z_3 R_F/P=0.6667$
 b — Z/P — (rad) $Y_2, Z_2 R_F/P=0.5$ - - - $Y_4, Z_4 R_F/P=0.9091$

1.4 采用远场近似时扫描线两端的误差

图 3 表明扫描场的 3 个特殊光线: $R_{(-)}, R_0$ 与 $R_{(+)}$ 分别是光线在负扫描结束、扫描开始及正扫描结束处的反射光线,对应于转镜转角 θ 为 $\theta_{(-)}, \theta_0$ 与 $\theta_{(+)}$ 时的反射光。图 4 为远场扫描系数分析。这里假定旋转角度受到范围的限制:

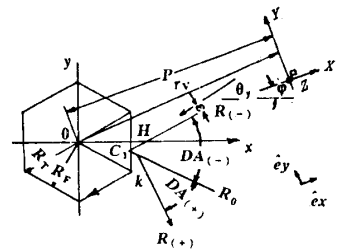


Fig. 3 The location of scan vector and observation plane

通常, $\theta_{(-)} < \theta_{(+)}$ 。由图 3,经过简单的三角运算,可以得出: $\theta_{(-)} = \theta_0 - B$, $\theta_{(+)} = \theta_0 + B$ (36) 式中, $B = \arcsin(\sin \phi \sin \theta_0 / R_T)$, 角 B 是 (R_T, x_0, ϕ)

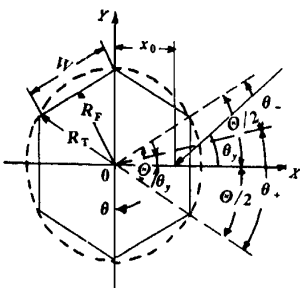


Fig. 4 The parameter analysis of scan in far-field

的多值函数。将 B 代入(36)式可得正负扫描结束处转镜的转角:

$$\theta_{(-)} = \theta_0 - \arcsin \left\{ \frac{x_0 \sin \phi \cos \theta_0}{R_F} \right\} \quad (37)$$

$$\theta_{(+)} = \theta_0 + \arcsin \left\{ \frac{x_0 \sin \phi \cos \theta_0}{R_F} \right\} \quad (38)$$

在 Y 方向上,由近似方程(33)和扫描两端的误差的定义:

$$E_Y = | (Y_{(-)} - Y_{(+)}) / Y | \times 100 \% \quad (39)$$

将方程(31),(33)与(38),(37)代入(39)式,可得 Y 方向上正、负扫描结束处的误差分别为:

$$E_{Y_{(-)}} = \frac{2 R_F \sin [-(\cdot) - y] + x_0 \sin y}{P \sin [-2(\cdot) - y - \phi] - 2 R_F \sin [-(\cdot) - y] - x_0 \sin y} \quad (40)$$

$$E_{Y_{(+)}} = \frac{2 R_F \sin [(\cdot) - y] + x_0 \sin y}{P \sin [2(\cdot) - y - \phi] - 2 R_F \sin [(\cdot) - y] - x_0 \sin y} \quad (41)$$

与 Y 方向上类似,若采用(34)式计算像高,在 Z 方向上,定义扫描线两端产生的误差 E_Z 为:

$$E_{Z_{(-)}} = E_{Z_{(+)}} = \frac{Z' - Z}{Z} \times 100 \% \quad (42)$$

将方程(32),(34)与(38),(36)代入(42)式可得:

$$E_{Z_{(-)}} = E_{Z_{(+)}} = \frac{R_F \tan z \cos y \left[\frac{1}{\cos y} - \frac{2 \cos(\cdot + y)}{\cos 2(\cdot)} \right] - x_0 \tan y \tan z \sin [y + 2(\cdot)]}{\frac{P \tan z}{\cos 2(\cdot)} + R_F \tan z \left[\frac{1}{\cos y} - \frac{2 \cos(\cdot + y)}{\cos 2(\cdot)} \right] - \frac{x_0 \tan y \tan z \sin [y + 2(\cdot)]}{\cos 2(\cdot)}} \quad (43)$$

例如:对于转镜面数 $M = 6$, $y = 30^\circ$ 的系统,当观察面与转镜转轴相距 $P = 12 R_F$ 时,由(43)与(38)两式可得: $(\cdot) = 25.66^\circ$, $(\cdot) = 34.34^\circ$ (44)

将(44)式代入(30)式,可得 Y 方向上扫描线两端的误差 $E_{Y_{(-)}} = 14.01\%$, $E_{Y_{(+)}} = 6.19\%$ 。而将(44)式代入(43)式,可得 Z 方向上扫描线两端的误差 $E_{Z_{(-)}} = E_{Z_{(+)}} = 10.10\%$ 。

2 结 论

我们采用几何光学理论分析了多面转镜双光束扫描规律,分别得到了光束在入射到转镜表面的入射位置矢量,观察面上扫描点的位置矢量,并由此关系分析了扫描场的非对称性问题,该结果还可以用于分析扫描仪镜面的利用率以及控制系统结构参量降低像差等问题。

参 考 文 献

- 1 Kataka K, Shibayama Y, Ohuchi M *et al.* Appl Opt, 1997; 36(25): 6296 ~ 6307
- 2 Dunn S E, Kenneth R. SPIE, 1997; 3131: 42 ~ 51
- 3 Chiang T T J. SPIE, 1997; 3131: 165 ~ 569
- 4 Arimoto A, Saitoh S, Mochizuki T *et al.* Appl Opt, 1987; 26(23): 2554 ~ 2557
- 5 Beiser L. Laser Scanning Notebook. Wash, Bellingham, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1992
- 6 Beiser L. Appl Opt, 1995; 34(17): 7307 ~ 7317
- 7 Li Y, Katz J. Appl Opt, 1995; 34(15): 6403 ~ 6416
- 8 Li Y, Katz J. Appl Opt, 1995; 34(15): 6417 ~ 6430
- 9 Marshall G F. Optical Scanning. First edit, New York: Dekker, 1991: 526 ~ 613, 351 ~ 408
- 10 Beiser L. Laser Applications, 1974; 2: 53 ~ 159
- 11 Beiser L. SPIE, 1991; 1454: 60 ~ 66
- 12 Klein J E. Proc SPIE, 1985; 554: 469 ~ 477
- 13 Varughese K O G, Khshua K S R. Appl Opt, 1993; 32(3): 1104 ~ 1108
- 14 Li Y, Katz J. Appl Opt, 1997; 36(1): 342 ~ 352

* * *

作者简介:张逸新,男,1956年4月出生。教授,理学硕士。目前主要从事图像处理、激光扫描成像、机器人视觉和光波大气传输等研究工作。