

# 产生宽测量区域低发散度栅型结构光的光学系统

吴志伟

(泉州师范学院物理与信息工程学院, 福建 泉州 362000)

**摘要** 提出了一种产生栅型结构光的新型光学系统,该系统由两个不同底角的双棱镜和一个柱面透镜组合而成。解决了单个双棱镜产生栅型结构光的有效区域小,无法应用于全场测量的问题。采用几何光学理论详细分析了产生栅型结构光的物理过程,给出了光束相关参数的计算公式。应用光学分析软件 Zemax 模拟了新型光学系统后不同位置处的光强分布及其随系统参数(光学元件的结构参数、元件之间的相对位置等)的变化;模拟结果与几何光学分析的结果基本一致。研究表明:平面波通过新型光学系统能够产生一种具有测量区域宽、发散度低、参数调节灵活等特点的栅型结构光。

**关键词** 几何光学;栅型结构光;宽测量区域;低发散度

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0908002

## Optical System Generating Wide Measurement Area and Low Divergence Degree Grating Structure Light

Wu Zhiwei

(Institute of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal College, Quanzhou, Fujian 362000, China)

**Abstract** A novel optical system is proposed, and it is composed of two biprisms with different bottom corners and one cylindrical lens. The technical problem that the striped regional of grating structure light generating by single biprism is so small that it cannot be applied to wide range measurement is solved. Physical processes of generating grating structure light is analyzed by geometrical optics, and relevant parameters are also calculated. The intensity distribution in different positions after system is simulated by Zemax software, and the intensity distribution with the change of system parameters, e. g. structure parameters of optical elements and relative position between optical elements, are also analyzed. The conclusion of simulation is consistent with that of geometrical optics theory. The result shows that when a plane wave illuminates on the novel optical system, the grating structure light with wide measurement area, low divergence degree and adjustment flexibility is formed.

**Key words** geometrical optics; grating structure light; wide measurement area; low divergence degree

**OCIS codes** 080.2740; 230.5480; 080.3620

## 1 引 言

栅型结构光是一种应用于三维形貌测量的面光源,可以通过数字投影技术或者正弦光栅投影来获得<sup>[1-8]</sup>。数字投影存在分辨率、条纹对比度较低的缺点,而光栅的制作工艺较为复杂。瞿丹等<sup>[9-13]</sup>对一种新型光源-无衍射栅型结构光进行了较为深入的研究,并将其成功应用于兔眼角膜形貌的测量。目前主要是利用单个双棱镜产生无衍射栅型结构光。该系统结构简单,所产生光束具有焦深长、分辨

率高、对比度好的优点;但是在实际应用中也存在一些问题,如测量范围窄(即所产生栅型条纹的有效区域小),参数无法灵活调整等,限制了该项技术的进一步发展。

通过由一个柱面透镜和两个双棱镜构成的光学系统,获得一种新型栅型结构光。相比单个双棱镜产生的无衍射栅型结构光,该光束的测量区域更宽、通过改变三个主要光学元件的相对位置可以方便地调整光束的参数。虽然该光束随传播距离的增加存

收稿日期: 2013-03-26; 收到修改稿日期: 2013-05-12

基金项目: 福建省教育厅省属高校科研专项(JK2013038)

作者简介: 吴志伟(1981—),男,硕士,讲师,主要从事光束传输与变换等方面的研究。E-mail: wzwqq@126.com

在一定程度的发散,但是通过合理选择系统参数可以使光束的准直距离大于同尺寸高斯光束。

## 2 理论分析

### 2.1 无衍射栅型结构光存在的问题

平行光通过单个双棱镜后会产生无衍射栅型结构光,如图 1 所示。图中阴影部分为产生栅型条纹的有效区域, $L$  为该区域最大宽度; $a$  为入射光束的半宽; $r$  为双棱镜底角。由图 1 可以近似计算出无衍射栅型结构光的相关参数为

$$\begin{cases} \delta = \lambda/[2(n-1)r] \\ Z = a/[(n-1)r], \\ L = Z(n-1)r \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\delta$  为条纹间距, $Z$  为光束焦深。由(1)式可以看出:1) 无论  $r$  取何值,栅型条纹有效区域的最大宽度大致只有入射光束尺寸的一半;2) 在入射光束尺寸和波长一定时,要改变光束的线宽、焦深等参数必须更换双棱镜。

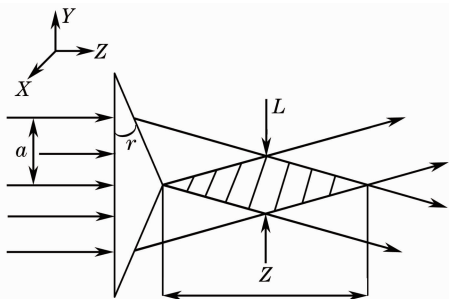


图 1 产生无衍射栅型结构光示意图

Fig. 1 Schematic diagram of generating non-diffracting grating structure light

### 2.2 新型光学系统的提出与分析

为了克服无衍射栅型结构光存在的不足,设计了一种新的光学系统,如图 2 所示。该系统由一个柱面透镜和两个双棱镜构成,将三个光学元件垂直

光轴依次放置于光具座,首先是柱面透镜,紧挨着柱面透镜放置双棱镜 1,之后为双棱镜 2。双棱镜 1 到柱面透镜的距离应小于柱面透镜的焦距,双棱镜 2 到柱面透镜的距离应大于柱面透镜的焦距。

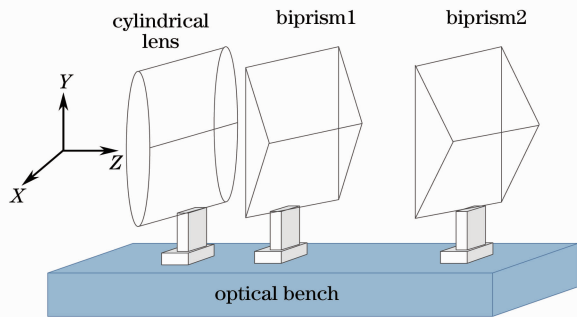


图 2 新型光学系统结构与系统坐标

Fig. 2 Structure diagram of novel optical system and coordinate system

将一束平行光垂直入射柱面透镜,平面波经过柱面透镜的变换,变成一束柱面波。柱面波通过位于其焦距范围内的双棱镜,将在柱面透镜焦距处产生两条平行于光轴的焦线。可以近似将这两条焦线等效为两条线光源,产生两束具有一定发散角的光束照射在第二个双棱镜的底部。因为光束具有发散角,可以有效增加光束在双棱镜底部的照射宽度,从而达到增加双棱镜后栅型条纹有效区域宽度的目的。

光学系统对光束折射示意图如图 3 所示。根据几何光学的理论,在光束傍轴,柱面透镜、棱镜皆为薄透镜和薄棱镜的条件下。假设柱面透镜焦距为  $f$ ,双棱镜 1 底角为  $r$ ,折射率为  $n$ ,双棱镜距离柱面透镜  $L$ ,光线 1 和光线 2 为  $YZ$  平面内任意两条平行光线:

$$\begin{cases} r_1 \approx \tan r_1 = a_1/f \\ b_1 = a_1 - L \tan r_1 \approx a_1 - La_1/f \\ r_1 \approx nr_3, r_4 = r_3 + r \\ nr_4 \approx r_5, r_5 = r_2 + r \\ r_1 + (n-1)r = r_2 \end{cases} \quad (2)$$

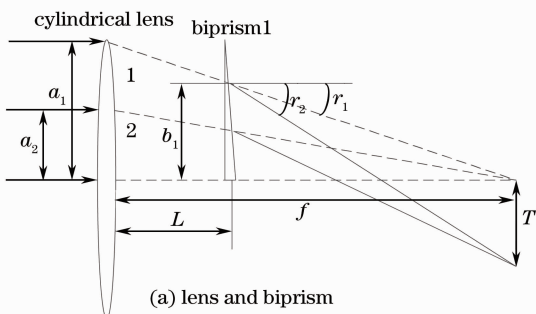


图 3 光学系统对光束折射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam refraction by optical system

由(2)式可知,距离光轴  $a_1$  的光线 1,经过柱面透镜和双棱镜后,从距离光轴  $(a_1 - La_1/f)$  的位置以与光轴成  $[a_1/f + (n-1)r]$  的角度出射。可以计算出光线 1 传播到距离柱面透镜  $f$  处,偏离光轴的距离  $T$  为

$$T = (f-L)(\tan r_2 - \tan r_1), \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式可得

$$T \approx (f-L)(n-1)r. \quad (4)$$

由(4)式可知,偏离光轴的距离与入射光线到光轴的距离无关。同理可以推导光线 2 传播到距离柱面透镜  $f$  处,偏离光轴的距离也为  $(f-L)(n-1)r$ 。由此可知 YZ 平面内任意两条平行光线 1、2 会聚于同一

点。由于光学元件在 X 方向上对光束没有变换作用,因此光束在 X 方向上具有一致性。Y-Z 平面内的焦点在 X 方向上会延伸为一条焦线,即图 3 中的平行光束在柱面透镜的焦平面上会聚成一条离轴焦线,焦线距离光轴  $(f-L)(n-1)r$ 。

由图 3 可知光束和元件都是关于光轴对称的,图中只对上半部分的光束进行分析。同理,元件对下半部分光束也具有相同的变换作用。因此平行于光轴的光束连续通过柱面透镜和双棱镜会在柱面透镜的焦平面上形成两条关于光轴对称的焦线,焦线距离光轴  $(f-L)(n-1)r$ ,如图 4 所示。

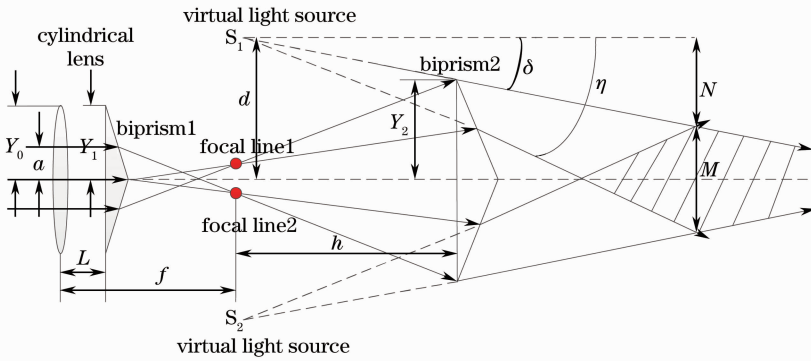


图 4 产生新型栅型结构光示意图

Fig. 4 Schematic diagram of generating novel grating structure light

两条焦线发出两束具有一定发散角的光束入射双棱镜 2 的底部,经过双棱镜 2 的变换,相互重叠干涉形成栅型条纹,条纹有效区域为图 4 中阴影部分。双棱镜 2 后叠加的两束光可以等效为由双棱镜 2 前两个虚光源  $S_1$ 、 $S_2$  发出,则可以采用杨式双缝干涉的原理分析栅型条纹有效区域的最大宽度、条纹间距、入射光束有效半宽等参数。

栅型条纹间距  $l$  为

$$l = (Z+h)\lambda/2d, \quad (5)$$

式中  $Z$  为条纹所处平面到双棱镜 2 的距离,  $d$  为虚光源到光轴的距离。

$$d \approx (f-L+h)(n-1)r + (n-1)(\phi-r)h, \quad (6)$$

式中  $f$  为柱面透镜焦距,  $L$  为双棱镜 1 到柱面透镜距离,  $h$  为双棱镜 2 到两条焦线的距离,  $r$  为双棱镜 1 底角,  $\phi$  为双棱镜 2 底角,  $n$  为双棱镜 1、2 的折射率。

将(6)式代入(5)式可以得到栅型条纹间距:

$$l = \frac{(Z+h)\lambda}{2[(f-L+h)(n-1)r + (n-1)(\phi-r)h]}. \quad (7)$$

根据图 4 光束之间的几何关系,可以求得

$$\frac{N}{N+M} = \frac{\tan \delta}{\tan \eta} \approx \frac{\delta}{\eta}, \quad (8)$$

$$\delta = (n-1)\phi - a/f - (n-1)r, \quad (9)$$

$$\eta = (n-1)\phi - (n-1)r, \quad (10)$$

$$N + \frac{M}{2} = d, \quad (11)$$

将(9)式和(10)式代入(8)式,联立(11)式可以求得栅型条纹有效区域的最大宽度  $M$  为

$$M = \frac{(f-L+h)(n-1)r + (n-1)(\phi-r)h}{0.5 + \frac{(n-1)\phi - a/f - (n-1)r}{a/f}}. \quad (12)$$

一方面为了保证系统可以形成低发散度栅型条纹(应满足  $\delta > 0$ ),且其有效区域的最大宽度能够大于入射光束的尺寸(应满足  $M > 2a$ ),则入射光束半宽应满足

$$\begin{cases} a < (n-1)(\phi-r)f \\ a > 2(n-1)(\phi-r)f - (f-L+h)(n-1)r - \\ \quad (n-1)(\phi-r)h \end{cases} \quad (13)$$

另一方面为了提高光束能量利用率应将光束约束于各光学元件口径范围内,在系统结构参数一定时,入

射光束半宽应满足

$$\begin{cases} a < Y_0 \\ a < Y_1 / (1 - L/f) \\ a < \{ [Y_2 - (f-L)(n-1)r] / h - (n-1)r \} f \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $Y_0$  为柱面透镜在  $Y$  方向上半宽,  $Y_1$  为双棱镜 1 在  $Y$  方向上半宽,  $Y_2$  为双棱镜 2 在  $Y$  方向上半宽, 如图 4 所示。

取入射光束半宽  $a = 0.05 \text{ mm}$ , 透镜焦距  $f = 2 \text{ mm}$ , 双棱镜 1 紧挨柱面透镜  $L = 0$ , 双棱镜 2 到两条焦线的距离  $h = 98 \text{ mm}$ , 棱镜折射率  $n = 1.5$ , 双棱镜 1 底角  $r = 0.02 \text{ rad}$ , 双棱镜 2 底角  $\phi = 0.15 \text{ rad}$ 。将参数代入(12)式计算可得栅型条纹有效区域的最大宽度大致为  $3.5 \text{ mm}$  左右, 远大于入射光束的尺寸  $0.1 \text{ mm}$ 。另一方面, 由(7)式和(12)式可知通过改变双棱镜 1 与柱面透镜之间的距离  $L$  以及双棱

镜 2 与柱面透镜之间的距离  $f+h$ , 可以方便调节栅型条纹的间距和栅型条纹有效区域的宽度。

### 3 光学系统仿真

#### 3.1 系统数值仿真

在光学设计软件 Zemax 非序列模式下建立柱面透镜、双棱镜光学系统的模型, 如图 5 所示。利用建立的模型模拟了平面波正入射光学系统产生栅型结构光的物理过程和光束在不同位置截面光强分布。其中模拟参数: 入射光束为矩形平面光, 波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , 光束半宽为  $X = 0.1 \text{ mm}$ 、 $Y = 0.1 \text{ mm}$ ; 柱面透镜焦距  $f = 2 \text{ mm}$ , 双棱镜 1 到柱面透镜距离  $L = 0$ , 双棱镜 2 到两条焦线的距离  $h = 98 \text{ mm}$ , 双棱镜材料选择 BK7 光学玻璃, 双棱镜 1 底角  $r = 0.02 \text{ rad}$ , 双棱镜 2 底角  $\phi = 0.15 \text{ rad}$ 。模拟的结果为  $M \approx 9.6 \text{ mm}$ , 与(12)式计算的结果基本一致。

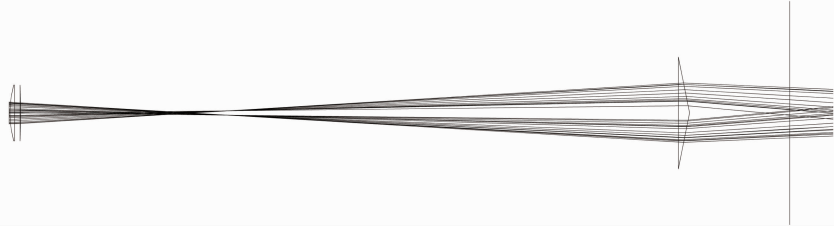


图 5 新型光学系统的 Zemax 模型

Fig. 5 Zemax model of novel optical system

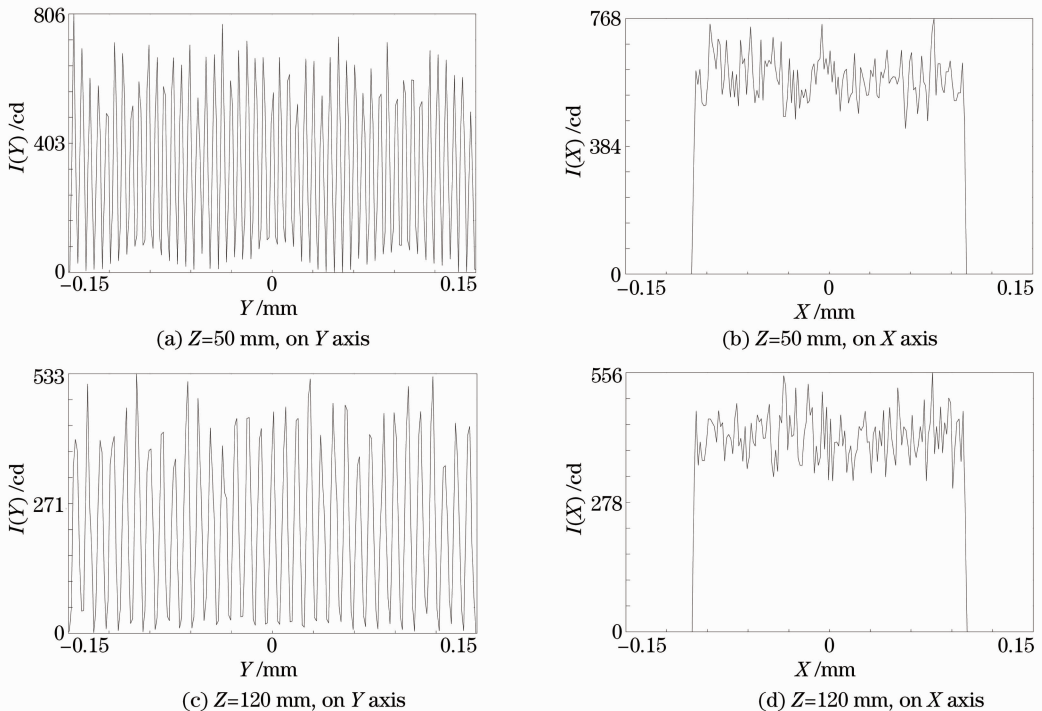


图 6 不同位置处截面光强分布图

Fig. 6 Intensity distribution on transverse section in different positions

数值模拟的结果如图 6 所示,结果表明:1)平面光通过柱面透镜、双棱镜光学系统后 Y 方向上的光强分布具有正弦栅型的特点;2)相比单个双棱镜产生无衍射栅型结构光,栅型条纹有效区域的宽度得到增加,在一定范围内该宽度大于入射光束的尺寸;3)随传播距离的增加,光束存在发散,Z=50 mm 处条纹间距大致为 6.4 μm,Z=120 mm 处条纹间距大致为 9 μm,但是发散的程度不大。采用“瑞利长度”度量高斯光束发散的方法来衡量该栅型结构光的发散<sup>[14]</sup>:栅型条纹的间距从 6.4 μm 扩展到 9 μm,光束传播 70 mm,因此该光束的准直距离大致为 70 mm,发散角大致为 0.037 mrad。常见激光器的波长范围在 193 nm(准分子激光器)至 3370 nm(HCN 气体激光器)之间,在此波长范围内,束腰为 6.4 μm 高斯光束的准直距离范围为 38~666 μm,远场发散角范围为 19.2~335.4 mrad。由以上分析可以看出,通过设置合理的系统参数可以使新型光束的发散程度小于同尺寸的高斯光束。

### 3.2 参数对系统性能的影响

为了得到高质量的栅型结构光,必须对系统内光学元件的相对位置、透镜焦距、棱镜底角等相关参数进行优化。

#### 1) 柱面透镜的焦距、双棱镜 1 底角对光束的影响

在系统其他参数不变的情况下,减小双棱镜 1 的底角或者增大柱面透镜的焦距会导致栅型条纹有效区域宽度减小,如图 7 所示。例如,当柱面透镜焦距  $f$  由 2 mm 增大到 3 mm,栅型条纹有效区域的最大宽度  $M$  由 9.6 mm 减小到 5.2 mm;当双棱镜 1 的底角由 0.02 rad 减小到 0.01 rad,栅型条纹有效区域的最大宽度  $M$  由 9.6 mm 减小到 8.4 mm。

#### 2) 双棱镜 2 底角对光束影响

在系统其他参数不变的情况下,减小双棱镜 2

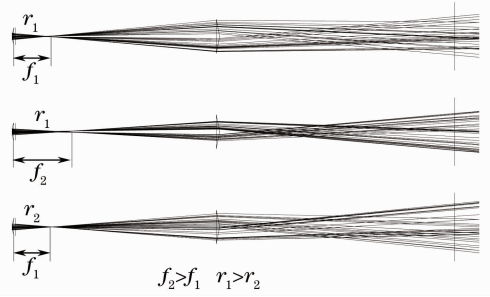


图 7 双棱镜 1 底角、透镜焦距对光束的影响

Fig. 7 Influences of bottom corner of biprism 1 and focal length of cylindrical lens on output beam

的底角能够增加栅型条纹有效区域的宽度,但是双棱镜 2 的底角应该大于双棱镜 1 的底角,否则光束发散无法形成栅型结构光,如图 8 所示。例如,将双棱镜 2 的底角由 0.15 rad 减小到 0.12 rad,栅型条纹有效区域的最大宽度  $M$  由 9.6 mm 增加到 12.4 mm。

#### 3) 双棱镜 2 到柱面透镜距离对光束的影响

在系统其他参数不变的情况下,增加双棱镜 2 到柱面透镜的距离能够增加栅型条纹有效区域的宽度,同时可以改变栅型条纹的间距。例如,将双棱镜 2 到柱面透镜距离由 80 mm 增加到 100 mm,双棱

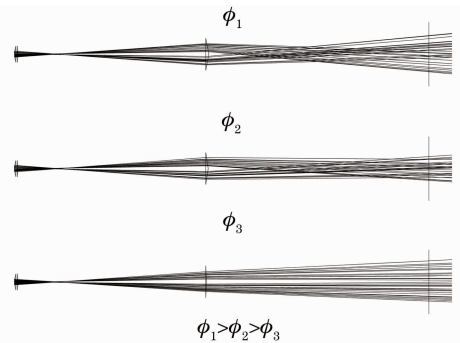


图 8 双棱镜 2 底角对光束影响

Fig. 8 Influence of bottom corner of biprism 2 on output beam

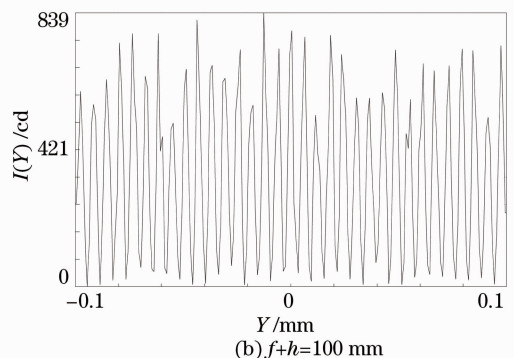
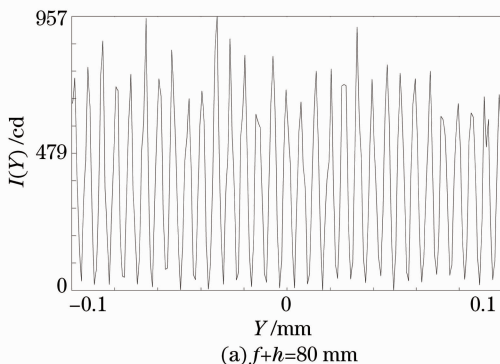


图 9 双棱镜 2 到柱面透镜距离取不同值时,Z=50 mm 处 Y 轴上光强分布

Fig. 9 Intensity distribution on Y axis on Z=50 mm with different distances between biprism2 and cylindrical lens

镜 2 后  $Z=50\text{ mm}$  处条纹间距由  $6.9\ \mu\text{m}$  减小到  $6.4\ \mu\text{m}$ , 如图 9(a)、(b) 所示; 同时栅型条纹有效区域的最大宽度  $M$  由  $7.6\text{ mm}$  增加到  $9.6\text{ mm}$ , 如图 10 所示。

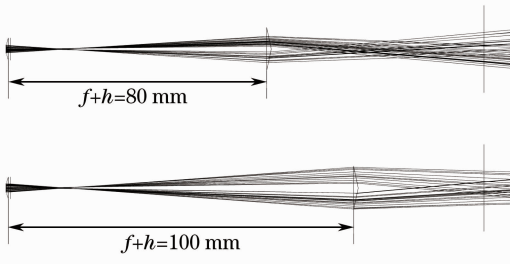


图 10 双棱镜 2 到柱面透镜距离对光束影响

Fig. 10 Influence of distance between biprism 2 and cylindrical lens on output beam

## 4 结 论

从几何光学的角度分析了一种由柱面透镜、双棱镜构成的光学系统产生栅型结构光的物理过程。光线追迹模拟的结果显示: 新的光学系统能够产生比入射光束尺寸宽得多的栅型条纹有效区域, 因此具有较宽的测量范围。相比单个双棱镜系统, 新的光学系统具有明显的优势: 单次测量范围更宽, 测量效率更高, 适用于大范围全场测量的场合; 可以根据测量需要, 方便改变栅型条纹的参数, 而不必更换光学元件, 降低成本。但是系统也存在不足之处: 结构相对复杂, 增加调校的难度; 且栅型条纹存在一定程度的发散。新型光学系统是对产生栅型结构光的一种有益探索。

## 参 考 文 献

- 1 Song Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149–158.
  - 2 Da Feipeng, Gai Shaoyan. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(3): 377–385.
  - 3 Dai Meiling, Yang Fujun, Du Xiaolei, *et al.*. Three-dimensional shape measurement based on single-shot color fringe projection of sinusoidal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0712002.
- 戴美玲, 杨福俊, 杜晓磊, 等. 基于单幅彩色正弦光栅投影的三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0712002.

- 4 Luo Gangyin, Tang Yuguo, Qiao Peiyu, *et al.*. High-precision 3D morphology measurement by digital gating method based on structured light [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(9): 2331–2335.
- 罗刚银, 唐玉国, 乔培玉, 等. 结构光数字栅线法对物体三维形貌的高精度测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2331–2335.
- 5 He Guanghong, Wang Xiaoyong, Ma Quanzhi. Simulation of phase 3-D shape measurement [J]. *Laser Journal*, 2011, 32(1): 19–20.
- 何光宏, 王小勇, 马全之. 位相法三维形貌测量数值模拟系统[J]. *激光杂志*, 2011, 32(1): 19–20.
- 6 Hu Luyao, Da Feipeng, Wang Luyang. A novel color fringe projection method for 3D measurement of colorful objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212002.
- 胡路遥, 达飞鹏, 王露阳. 一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212002.
- 7 Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108002.
- 曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向标定[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108002.
- 8 Dong Fuqiang, Da Feipeng, Huang Hao. Windowed Fourier transform profilometry based on advanced S-transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0512008.
- 董富强, 达飞鹏, 黄昊. 基于 S 变换的改进窗口傅里叶三维测量法[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0512008.
- 9 Qu Dan, Zhong Liping, Xu Long, *et al.*. Approximate non-diffracting grating structured light and implementation method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(9): 140–144.
- 瞿丹, 周莉萍, 徐龙, 等. 一种新型近似无衍射栅型结构光及其实现方法[J]. *光电工程*, 2010, 37(9): 140–144.
- 10 Gan Jianghong, Zhou Liping, Chen Liangzhou, *et al.*. Novel non-diffract grating structure for light projection system [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2011, 39(5): 14–17.
- 干江红, 周莉萍, 陈良洲, 等. 新型无衍射栅型结构光投影系统[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 14–17.
- 11 Zhou Liping, Gan Jianghong, Xu Long. Non-diffraction fringes produced by thin biprism [J]. *Optica Applicata*, 2012, 42(4): 699–711.
- 12 Qu Dan. Study on Approximate Non-Diffracting Grating Structured Light and Its Related Theory [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 5–6.
- 瞿丹. 近似无衍射栅型结构光的实现方法及相关理论研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 5–6.
- 13 Gan Jianghong. 3D Shape Precision Measurement and Application Based on Non-Diffracting Light Projection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012, 85–88.
- 干江红. 基于无衍射光投影的三维形貌精密测量及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. 85–88.
- 14 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Lasers Theory (4th Edition.) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000. 70–71.
- 周炳琨, 高以智, 陈侗嵘, 等. *激光原理(第4版)* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. 70–71.

栏目编辑: 张 腾