

# 棱镜组产生宽区域近似无衍射栅型结构光

吴志伟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>泉州师范学院物理与信息工程学院, 福建 泉州 362000

<sup>2</sup>信息功能材料福建省高校重点实验室, 福建 泉州 362000

**摘要** 提出一种产生近似无衍射栅型结构光的新型光学系统,该系统由若干块三角棱镜组合而成。解决了现有技术产生近似无衍射栅型结构光的栅型条纹区域小,无法应用于全场测量的问题。采用干涉理论详细分析了产生近似无衍射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,模拟结果与干涉理论分析的结果基本一致;进而对几种系统误差对输出光束的影响进行分析。研究表明:平面波通过新型光学系统能够产生一种具有宽测量区域、参数调节灵活等特点,同时抗干扰性能较好的近似无衍射栅型结构光。

**关键词** 几何光学;近似无衍射栅型结构光;干涉理论;三角棱镜

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.042601

## Prism Group Generating Wide Area Approximate Non-Diffracting Grating Structure Light

Wu Zhiwei<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics and Information Engineering, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Information Functional Materials, Fujian Province University, Quanzhou, Fujian 362000, China

**Abstract** A novel optical system is proposed for generating approximate non-diffracting grating structure light, and it is composed of several triangular-section prisms. The technical problem that the striped regional of approximate non-diffracting grating structure light generating by existing technology is so small that it cannot be applied to wide range measurement is solved. Physical processes of generating approximate non-diffracting grating structure light is analyzed by interference theory, and relevant parameters are also calculated. The intensity distribution in different positions after system is simulated by Zemax software. The conclusion of simulation is consistent with that of interference theory. And impacts on output beam by several systematic errors are also analyzed. The result shows that when a plane wave illuminates on the novel optical system, approximate non-diffracting grating structure light with wide measurement area, adjustment flexibility and strong anti-interference ability is formed.

**Key words** geometric optics; approximate non-diffracting grating structure light; interference theory; triangular-section prism

**OCIS codes** 260.3160; 120.4640; 080.2740

## 1 引言

基于条纹投影的测量技术广泛应用于物体三维轮廓测量<sup>[1-7]</sup>。近似无衍射栅型结构光是一种性能优良的投影光束,与通过数字投影技术或者光栅投影技术获得的投影光束相比,其具有焦深长、分辨率高、对比度好的优点,在提高测量精度方面具有一定的优势。当前对近似无衍射栅型结构光的研究主要集中在光束的焦深<sup>[8]</sup>、能量分布<sup>[9]</sup>、参数调节<sup>[14]</sup>、应用方式<sup>[3,10-14]</sup>等几个方面,而栅型条纹区域的宽度作为一个重要参数讨论的较少。文献[15]的研究表明普通三角棱镜产生栅型条纹区域的宽度较窄,采用柱面透镜和三角棱镜构成的光学系统扩展了栅型条纹区域的宽度,但是所产生的光束存在一定程度的发散<sup>[15]</sup>。本文提出一种由若

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2014-11-30; 网络出版日期: 2015-02-10

基金项目: 福建省教育厅省属高校科研专项(JK2013038)、泉州师范学院重点学科电子科学与技术专项基金

作者简介: 吴志伟(1981—),男,硕士,讲师,主要从事光学仪器、光束变换等方面的研究。E-mail: wzwqq@126.com

干个三角棱镜构成的新型光学系统,能够产生较宽的栅型条纹区域,而且光束不存在发散,光束参数的调节也较为方便。

## 2 理论分析

### 2.1 新型光学系统的提出

产生近似无衍射栅型结构光的传统方法如图1所示。图中 $a$ 为入射光束宽度, $L$ 为栅型条纹区域的最大宽度,由图可知栅型条纹区域的最大宽度大致只有入射光束宽度的一半。

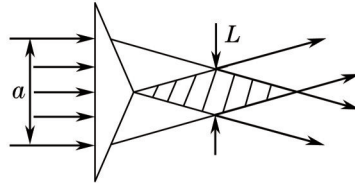


图1 产生近似无衍射栅型结构光示意图

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

为了克服这一问题,提出一种新型光学系统由针孔空间滤波器、准直扩束系统、消偏振分光棱镜、三角棱镜组构成,如图2所示。棱镜组中棱镜的数量、形状可以根据实际需要确定,改变棱镜的数量和参数可以实现对栅型条纹区域宽度、条纹间距、焦深等参数的调整。激光器输出光束通过针孔空间滤波和准直扩束系统后变换为近似平行光,再通过消偏振分光棱镜分解为两束相干平行光,这两束平行光在棱镜组的作用下相干叠加形成明暗相间的条纹。

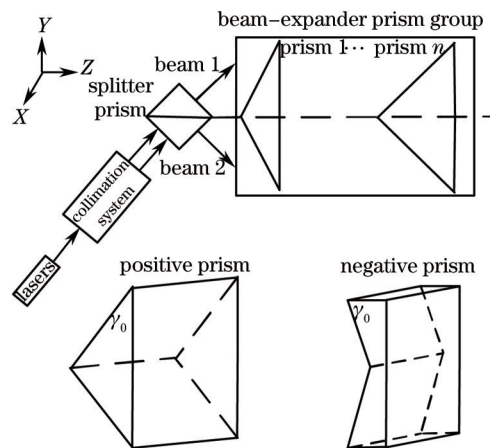


图2 新型光学系统及其元件示意图

Fig.2 Structure diagram of novel optical system and its elements

### 2.2 产生近似无衍射栅型结构光的原理

可以采用干涉理论对栅型条纹的产生进行描述。由图2可知,棱镜在 $X$ 方向上对光束没有变换作用,而且光束在 $X$ 方向上具有一致性,因此分析中只考虑光束在 $YZ$ 平面内的变换。光学系统后光束交叉区域 $ABCD$ [如图3(a)所示]内的光场为两个平行光束 $E_1$ 和 $E_2$ 经过棱镜组偏折后相干叠加形成,则该区域内任意位置 $(y,z)$ 处的光强分布为

$$I(y,z) = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\Delta d 2\pi/\lambda), \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 为光束波长, $\Delta d$ 为两入射平行光束在位置 $(y,z)$ 处的光程差。

由于入射光束在 $X$ 方向上具有一致性,可以假设平行光束 $E_1$ 中的光线1和光束 $E_2$ 中的光线2相交于位置 $(y,z)$ ,则 $(y,z)$ 处的光强分布取决于两条光线的光程差。由于光学系统关于光轴对称,可以在光束 $E_1$ 中作光线2'与光线2关于光轴对称,如图3(b)所示。图3(b)中 $l_0$ 为入射光束的波阵面, $l_1$ 和 $l_2$ 为光束 $E_1$ 经过棱镜变换前后的波阵面, $l_1'$ 和 $l_2'$ 为光束 $E_2$ 经过棱镜变换前后的波阵面, $l_1$ 与 $l_1'$ 关于光轴对称, $l_2$ 与 $l_2'$ 关于光轴对称。由图3(b)可直观看出光线1和光线2'从波阵面 $l_0$ 到 $l_1$ 等光程。光线1从波阵面 $l_1$ 到波阵面 $l_2$

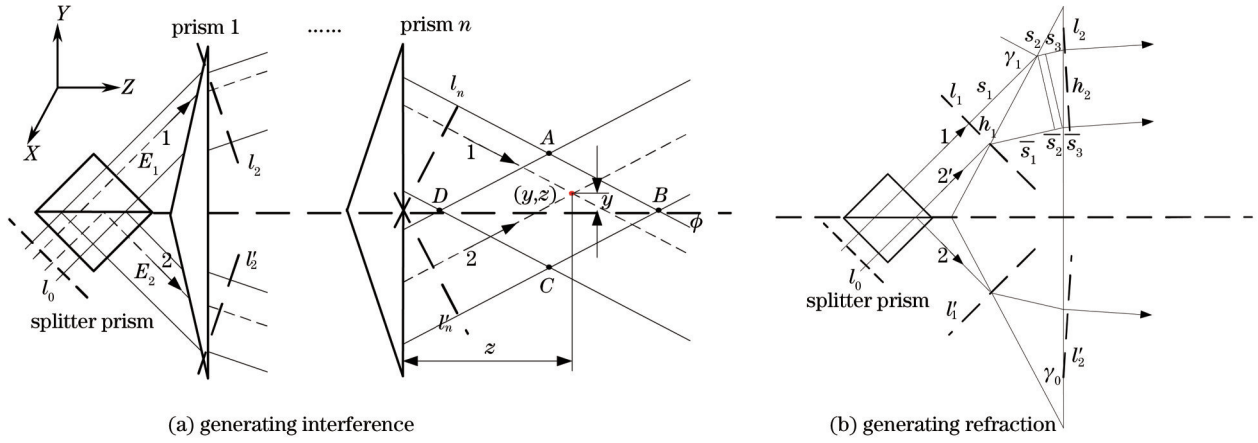


图3 光学系统对光束偏折和干涉示意图

Fig.3 Schematic diagram of beam refraction and interference by optical system

的光程  $\Delta d_1$  为

$$\Delta d_1 = s_1 + ns_2 + ns_3 = h_1 \tan \gamma_1 + ns_2 + n \frac{h_2}{\cos \gamma_4} \frac{\sin \gamma_4}{n}, \quad (2)$$

光线 2' 从波阵面  $l_1$  到波阵面  $l_2$  的光程  $\Delta d_2$  为

$$\Delta d_2 = n\bar{s}_1 + n\bar{s}_2 + \bar{s}_3 = \frac{nh_1}{\cos \gamma_1} \frac{\sin \gamma_1}{n} + n\bar{s}_2 + h_2 \tan \gamma_4, \quad (3)$$

式中  $n$  为棱镜折射率,  $\gamma_1$  为入射光束与棱镜表面法线之间的夹角,  $\gamma_4$  为出射光束与光轴方向的夹角。由图 3(b)可知  $s_2 = \bar{s}_2$ , 因此(2)式中的  $\Delta d_1$  与(3)式中的  $\Delta d_2$  相等, 即光线 1 和 2' 从波阵面  $l_1$  到  $l_2$  等光程。由以上分析可知, 光线 1 和光线 2' 从波阵面  $l_0$  到  $l_2$  等光程。进一步由光学系统的对称性可知, 光线 1 从波阵面  $l_0$  到  $l_2$  的光程与光线 2 从波阵面  $l_0$  到  $l'_2$  的光程相等。

由于光学系统是由若干个结构相似的三角棱镜构成, 通过类似的分析可知, 图 3(a)中光线 1 从波阵面  $l_0$  到  $l_n$  的光程与光线 2 从波阵面  $l_0$  到  $l'_n$  的光程相等。因此光线 1 和光线 2 到位置  $(y, z)$  处的光程差  $\Delta d$  可以等价于波阵面  $l_n$  与波阵面  $l'_n$  到位置  $(y, z)$  处的光程差为

$$\Delta d = (z + y \tan \phi) \cos \phi - (z - y \tan \phi) \cos \phi = 2y \sin \phi, \quad (4)$$

式中  $\phi$  为系统出射光束与光轴方向的夹角, 其值与棱镜组中棱镜的数量、底角的大小有关。将(4)式代入(1)式可得经光学系统后的光强分布为:

$$I(y, z) = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(4\pi y \sin \phi / \lambda), \quad (5)$$

由(5)式可知: 1) 光学系统后的光强分布与  $Z$  方向上的坐标无关, 只要  $Y$  方向上的坐标确定, 无论  $Z$  取何值光强分布都是确定的, 具有近似无衍射特性; 2) 光强在  $Y$  方向上呈余弦栅型分布。

### 2.3 展宽栅型条纹区域的原理

由三角棱镜的光束变换特性可知, 当光束以大角度入射棱镜, 出射光束的束宽会大于入射光束的束宽。由图 3(b)可以求得单个三角棱镜对入射光束的偏折角  $\varphi$  和光束的扩束比  $M$  分别为

$$\varphi = |\gamma_4 - (|\gamma_1| - \gamma_0)| = \left| \arcsin \left\{ n \sin \left[ \arcsin \left( \frac{\sin |\gamma_1|}{n} \right) - \gamma_0 \right] \right\} + \gamma_0 - |\gamma_1| \right|, \quad (6)$$

$$M = h_2 / h_1 = \frac{\cos \left( \arcsin \frac{\sin |\gamma_1|}{n} \right) \cos \left\{ \arcsin \left[ n \sin \left[ \arcsin \left( \frac{\sin |\gamma_1|}{n} \right) - \gamma_0 \right] \right] \right\}}{\cos |\gamma_1| \cos \left( \arcsin \frac{\sin |\gamma_1|}{n} - \gamma_0 \right)}, \quad (7)$$

式中  $h_1$  为入射光束束宽,  $h_2$  为出射光束束宽,  $n$  为棱镜折射率,  $\gamma_0$  为棱镜底角 (棱镜为正三角棱镜则保持  $\gamma_0$  不变, 棱镜为负三角棱镜则用  $90^\circ - \gamma_0$  代替  $\gamma_0$ ),  $\gamma_1$  为入射光束与棱镜表面法线之间的夹角,  $\gamma_4$  为出射光

束与光轴方向的夹角。

假设光学系统中三角棱镜的数量为  $N$ , 入射光束束宽为  $a$ , 由(6)式、(7)式可求得出射光束束宽为  $aM_1 \cdots M_N$ , 出射光束与光轴方向的夹角  $\phi$  为

$$\phi = |45 \pm \varphi_1 \cdots \pm \varphi_N|, \quad (8)$$

当棱镜为图2所示正三角棱镜,(8)式中取“-”;当棱镜为图2所示负三角棱镜,(8)式中取“+”。

产生近似无衍射栅型结构光的焦深  $Z_{\max}$  为

$$Z_{\max} = \frac{aM_1 \cdots M_N}{\sin \phi}, \quad (9)$$

栅型条纹区域的最大宽度  $H$  为

$$H = \frac{aM_1 \cdots M_N}{\cos \phi}, \quad (10)$$

栅型条纹的间距  $\delta$  为

$$\delta = \frac{\lambda}{2 \sin \phi}. \quad (11)$$

例如可以取入射光束束宽 0.1 mm, 三角棱镜数量为 4, 第一块为底角  $26^\circ$  的正三角棱镜、第二块为底角  $51^\circ$  的正三角棱镜, 第三块为底角为  $37^\circ$  的负三角棱镜、第四块为底角  $38^\circ$  的正三角棱镜, 棱镜材料选择 BK7 光学玻璃。由(9)~(11)式可以计算出近似无衍射栅型结构光栅型条纹区域的最大宽度为 2.06 mm, 远大于入射光束束宽 0.1 mm, 而且通过改变三角棱镜的底角和折射率可以方便地调整近似无衍射栅型结构光的焦深等参数。

### 3 光学系统仿真

#### 3.1 系统数值模拟

利用 Zemax 软件建立新型光学系统的模型(如图4所示), 模拟近似无衍射栅型结构光产生的物理过程, 并对其光场特性、误差等进行分析。假设系统光源采用波长为 632.8 nm 的氦氖激光束, 入射光束为矩形平面光, 光束半宽  $X=0.05$  mm、 $Y=0.05$  mm, 三角棱镜组由四块三角棱镜构成, 第一块为底角  $26^\circ$  的正三角棱镜、第二块为底角  $51^\circ$  的正三角棱镜、第三块为底角为  $37^\circ$  的负三角棱镜、第四块为底角  $38^\circ$  的正三角棱镜, 棱镜材料选择 BK7 光学玻璃。

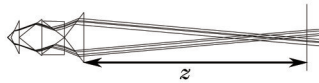


图4 新型光学系统的 Zemax 模型

Fig.4 Zemax model of novel optical system

软件模拟和干涉理论分析的结果如下: 1) 新型光学系统后大致 29~53 mm 的范围内存在栅型条纹, 图5给出光学系统后 33、41、49 mm 处的栅型条纹分布情况。由图可知当传播距离改变时, 栅型条纹间距始终保持在  $3.7 \mu\text{m}$  左右, 表明光束具有近似无衍射的特性; 采用干涉理论分析光束的焦深为 24.1 mm, 栅型条纹间距为  $3.7 \mu\text{m}$ 。2) 栅型条纹区域的最大宽度为 2 mm 左右。图5(b)、(c)、(d)给出光学系统后 41 mm 处, 光束截面  $Y$  方向上的栅型条纹分布情况。由图可知  $Y \in (-0.81 \text{ mm}, 0.81 \text{ mm})$  范围内都存在栅型条纹, 其范围远大于入射光束束宽 0.1 mm; 采用干涉理论分析栅型条纹区域的最大宽度为 2.06 mm。3) 新型光学系统后各处栅型条纹的对比度都为 0.98 左右, 基本上是一致的。

以上分析表明: 软件模拟的结果与干涉理论分析的结果基本上是一致的, 新型光学系统可以产生具有宽栅型条纹区域和较好条纹对比度的近似无衍射栅型结构光。

#### 3.2 系统误差分析

在实际的应用过程中, 很多情况会造成新型光学系统所产生近似无衍射栅型结构光的参数值偏离理论分析的结果。以下从3个方面进行讨论。

1) 入射光束存在发散

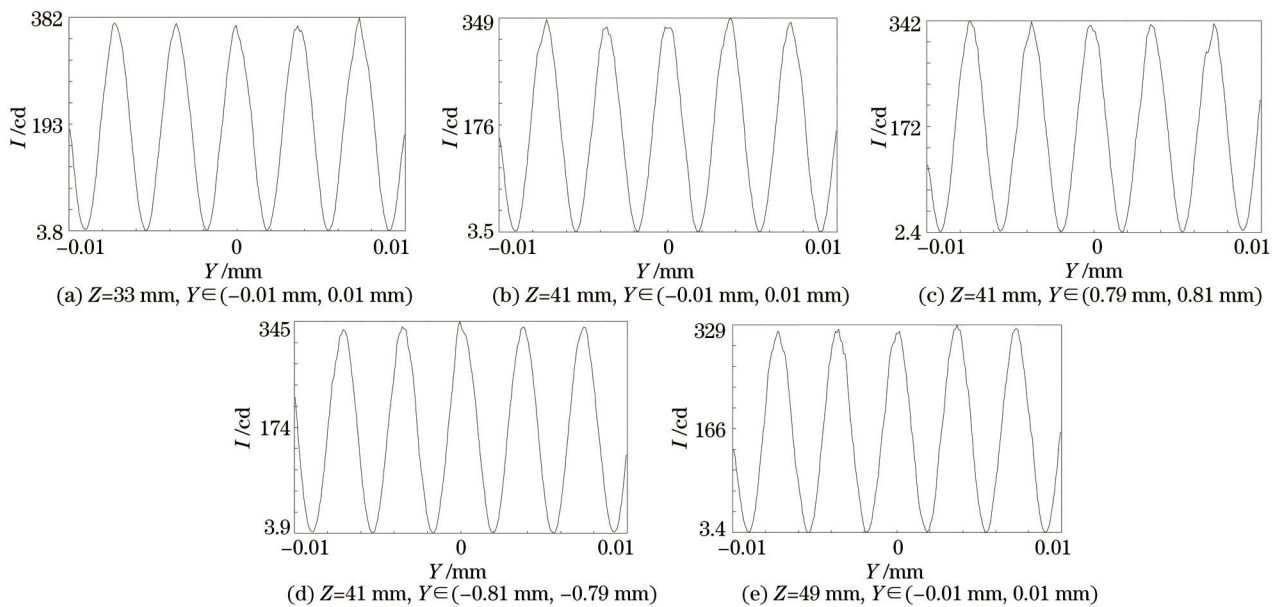


图5 系统后不同位置处截面光强分布图

Fig.5 Intensity distribution on transverse section at different positions

理论分析和仿真都假设入射光束为平行光,而实际情况却是经过准直的光束仍然存在发散。假设系统中其他参数不变,光源发散角为 $2^\circ$ ,Zemax软件模拟显示:栅型条纹区域的最大宽度由 $2\text{ mm}$ 增加到 $5.2\text{ mm}$ ,而且栅型条纹间距随光束传播距离从 $3.63\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $3.75\text{ }\mu\text{m}$ 。研究表明:入射光束发散会导致1)栅型条纹间距随光束传播距离的增加而变大;2)栅型条纹区域的最大宽度比理论值偏大;3)随入射光束发散程度的增加,系统误差也变大;4)棱镜组中棱镜的数量与系统误差大小相关,棱镜数量的增加能够减小栅型条纹间距的误差范围,但是会增大栅型条纹区域最大宽度的误差。

## 2)三角棱镜底角不对称

三角棱镜在加工过程中可能出现两个底角不对称的情况,如图6所示:图中(1)为正常情况、(2)为误差底角比理论值偏大的情况、(3)为误差底角比理论值偏小的情况。假设系统中其他参数不变,Zemax模拟显示:第三块负三角棱镜的两个底角分别为 $37^\circ$ 和 $39^\circ$ 时,条纹间距由 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $3.2\text{ }\mu\text{m}$ ,焦深由 $24\text{ mm}$ 减小为 $19\text{ mm}$ 、栅型条纹区域最大宽度由 $2\text{ mm}$ 减小为 $1.8\text{ mm}$ ;两个底角分别为 $37^\circ$ 和 $35^\circ$ 时,条纹间距由 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 增加到 $4.3\text{ }\mu\text{m}$ ,焦深由 $24\text{ mm}$ 增加到 $30\text{ mm}$ 、栅型条纹区域最大宽度保持不变。研究表明:棱镜底角的不对称会破坏系统的对称性,导致:1)近似无衍射区域发生倾斜,在Y方向上偏离光轴;2)栅型条纹区域的最大宽度减小或者保持不变;3)棱镜组中负三角棱镜的底角比理论值偏大或者正三角棱镜的底角比理论值偏小,会导致栅型条纹间距和焦深减小,反之,则会导致栅型条纹间距和焦深变大;4)棱镜底角理论值确定时,棱镜组中存在误差棱镜的位置越靠近光源,栅型条纹间距和焦深的误差越小;5)存在误差棱镜在棱镜组中位置确定时,正三角棱镜底角的理论值越大或者负三角棱镜底角的理论值越小,栅型条纹间距和焦深的误差越大。

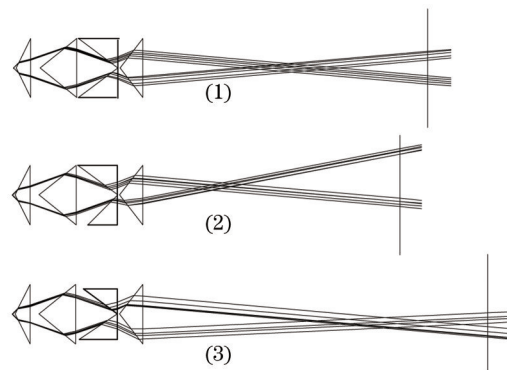


图6 棱镜底角不对称对光束影响

Fig.6 Influence of asymmetric prism bottom corner on output beam

### (3)三角棱镜放置倾斜

三角棱镜在放置过程可能出现在YZ平面内棱镜的对称轴与光轴存在一定倾角的情况,如图7所示:图中(a)为棱镜正常放置、(b)为棱镜倾斜放置。假设第四块棱镜倾斜 $5^\circ$ ,系统中其他参数不变,探测面垂直于Z方向,Zemax模拟显示:栅型条纹区域最大宽度由2 mm减小为1.8 mm,而且栅型条纹会产生相移。研究表明:棱镜倾斜会破坏系统的对称性,导致:1)近似无衍射区域发生倾斜,在Y方向上偏离光轴;2)栅型条纹区域最大宽度减小;3)存在倾斜放置的棱镜在棱镜组中的位置确定时,底角越大的正三角棱镜或底角越小的负三角棱镜发生倾斜,栅型条纹区域最大宽度的误差越大;4)棱镜底角大小确定时,发生倾斜的棱镜越靠近光源,栅型条纹区域最大宽度的误差越大;5)光束另外两个参数(焦深和栅型条纹间距)的误差也与发生倾斜棱镜在棱镜组中的位置及其底角的大小相关,但是棱镜倾斜对这两个参数的影响较小。

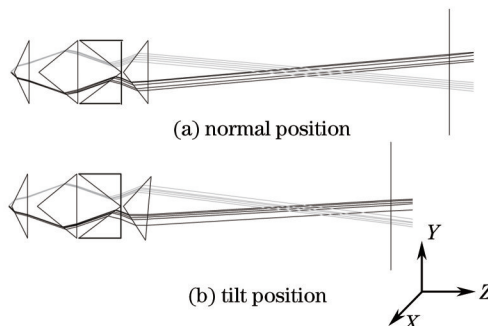


图7 棱镜放置倾斜对光束影响

Fig.7 Influence on output beam by tilting of prism

## 4 结 论

采用干涉理论分析了一种由若干个三角棱镜构成的光学系统产生近似无衍射栅型结构光的物理过程。软件模拟的结果证实:新型光学系统能够获得较宽的栅型条纹有效区域,并能够通过改变系统中棱镜的数量和参数获得不同参数的近似无衍射栅型结构光。误差分析表明各类误差对栅型条纹的间距、空间位置等参数有影响,但是对于条纹的相位分布没有影响(条纹始终为等距平行直条纹),因此光学系统具有较好抗干扰性能。相比现有光学系统,新型光学系统具有更高的测量效率;且由于系统中未使用透镜,可以有效避免像差引入的测量误差。但是也存在不足之处:光束大角度入射棱镜,棱镜表面必须镀膜,增加成本。新型光学系统是对产生近似无衍射栅型结构光的一种有益探索。

### 参 考 文 献

- 1 Peng Kuang, Cao Yiping, Wu Yingchun, *et al.*. On-line three-dimensional measurement method based on low modulation feature [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708006.  
彭 旷, 曹益平, 武迎春, 等. 基于低调制度特征的在线三维测量方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708006.
- 2 An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512004.  
安 冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512004.
- 3 Zhou Liping, Gan Jianghong, Xu Long. Corneal contour measurement based on non-diffracting grating structure light projection [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308001.  
周莉萍, 干江红, 徐 龙. 基于无衍射栅型结构光投影的角膜轮廓测量[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308001.
- 4 Lü Jiangzhao, Da Feipeng, Zheng Dongliang. Projector defocusing profilometry based on Sierra Lite dithering algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0312004.  
吕江昭, 达飞鹏, 郑东亮. 基于Sierra Lite抖动算法的散焦投影光栅测量[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0312004.
- 5 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.
- 6 Feipeng Da, Shaoyan Gai. Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector [J]. Appl Opt, 2008, 47(3): 377-385.

- 7 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.
- 8 Wu Zhiwei. Step refractive index combined triangular-section prism generating non-diffracting linear structured beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0523005.  
吴志伟. 变折射率组合三角棱镜产生无衍射线结构光[J]. *光学学报*, 2012, 32(5):0523005
- 9 Wu Zhiwei. Novel prism generating non-diffracting-like linear structured beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(8): 956-961.  
吴志伟. 新型棱镜产生近似无衍射线结构光[J]. *光子学报*, 2012, 41(8): 956-961.
- 10 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.
- 11 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.
- 12 Zhou Liping, Gan Jianghong, Xu Long. Non-diffraction fringes produced by thin biprism [J]. *Optica Applicata*, 2012, 42(4): 699-711.
- 13 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.
- 14 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.
- 15 Wu Zhiwei. Optical system generating wide measurement area and low divergence degree grating structure light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0908002.  
吴志伟. 产生宽测量区域低发散度栅型结构光的光学系统[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0908002.

栏目编辑: 韩峰