

# 点光源下的 Talbot 效应在阴影叠栅中的应用

艾永旭<sup>1</sup> 周翔<sup>1,2</sup> 杜虎兵<sup>3</sup> 郭家玉<sup>1</sup> 杨涛<sup>1</sup> 赵磊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049

<sup>2</sup>西安交通大学馥莉食品装备工程与科学学院, 陕西 西安 710049

<sup>3</sup>西安工业大学机电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 传统的阴影叠栅轮廓术的测量深度十分有限。根据点光源照明下 Talbot 自成像的空间分布规律, 提出将点光源下的 Talbot 效应应用于阴影叠栅三维轮廓测量的方法。推导点光源模型下阴影叠栅测量系统中相机接收到的光强随物体到光栅距离变化的数学表达式。数值模拟和实验表明, 相对于传统的阴影叠栅轮廓术, 利用 Talbot 效应会大大增加阴影叠栅轮廓术的测量深度。分别使用文中所提出的方法和传统的阴影叠栅轮廓术对同一物体表面进行测量, 两次测量结果之差在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 内。说明将点光源下的 Talbot 效应应用于阴影叠栅轮廓测量能够准确地反映物体表面的三维形貌。

**关键词** 测量; 光学三维测量; 阴影叠栅轮廓术; 菲涅耳-克希霍夫积分; Talbot 效应

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0412003

## Shadow Moiré Using Talbot Effect Under Point Light Illumination

Ai Yongxu<sup>1</sup> Zhou Xiang<sup>1,2</sup> Du Hubing<sup>1</sup> Guo Jiayu<sup>1</sup> Yang Tao<sup>1</sup> Zhao Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an, Shaanxi 710049, China

<sup>2</sup>Fuli School of Food Equipment Engineering and Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

<sup>3</sup>School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

**Abstract** The measurement depth of traditional shadow moiré profilometry is very limited. According to the space distribution of Talbot self-imaging under the illumination of point light source, a new technique using Talbot effect under point light illumination for shadow moiré profilometry is proposed. An exact mathematical formula describing the relationship between the intensity of shadow moiré fringes under the point light illumination and the distance between measured object and gratings is derived. The numerical simulation and experiment show that the measurement depth of the shadow moiré profilometry is increased notably by using the Talbot effect compared with the traditional shadow moiré profilometry. Respectively, the proposed method and the traditional shadow moiré method are used to measure the surface of the same object, the difference of the results obtained by the two methods is within  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Thus the validity of the proposed technique is proved. The proposed method can reflect the three-dimensional morphology of object surface accurately.

**Key words** measurement; optical three-dimensional measurement; shadow moiré profilometry; Fresnel-Kirchhoff integral; Talbot effect

**OCIS codes** 120.4120; 050.1940; 120.6650

## 1 引言

阴影叠栅是一种广泛应用的三维轮廓测量方法, 近年来结合相移技术, 已使阴影叠栅轮廓测量的精度

收稿日期: 2015-10-21; 收到修改稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金(51105301)、国家973计划(2015CB057402)、陕西省自然科学基金(2015JM5190)

作者简介: 艾永旭(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学三维测量方面的研究。E-mail: 1228743074@qq.com

导师简介: 周翔(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学三维测量方面的研究。

E-mail: zhouxiang@xjtu.edu.cn (通信联系人)

大大提高<sup>[1-2]</sup>。然而,由于衍射的影响,随着物体与光栅距离增大,叠栅条纹会逐渐模糊,达到一定距离时将会消失<sup>[3]</sup>。这严重影响了阴影叠栅轮廓术的测量深度,特别是一些要求参考光栅和测量对象有一定距离的场合,测量深度严重限制该方法的应用。

1836年Talbot<sup>[4]</sup>发现,光栅在平行光垂直照射下,在与光栅一定的距离处会呈现出光栅自身的像,这一现象称为Talbot效应。后来Rayleigh<sup>[5]</sup>对普遍的Talbot现象做出解释,指出在任何一个 $R = \frac{np^2}{\lambda}$  ( $R$ 为物体到光栅的距离, $p$ 为光栅周期, $\lambda$ 为波长, $n$ 为正整数)的平面上都会出现这样的清晰的像。如今,Talbot效应已成功应用于信息光学、激光技术、光学检测等许多领域<sup>[6-8]</sup>。在三维形貌测量方面,Mirza等<sup>[9]</sup>将Talbot效应应用于投影叠栅形貌测量,Serrano等<sup>[10]</sup>将Talbot效应应用于结构光三维测量,Chu等<sup>[11]</sup>将Talbot效应应用于数字相移叠栅技术,都得到了良好的效果。Han等<sup>[12]</sup>分析了平行光照射下阴影叠栅条纹的对比度随物体与参考光栅距离的变化,指出相对于传统的阴影叠栅测量系统,利用Talbot效应能够增大阴影叠栅轮廓术的测量深度。

上述研究都局限于平行光入射条件下,只限于小面积物体的三维形貌测量。点光源下的阴影叠栅轮廓术具有测量范围大、设备简单的优点<sup>[13]</sup>,因此,本文提出将点光源下的Talbot效应应用于阴影叠栅轮廓术,这将具有更广的普遍性和应用范围。

## 2 测量原理

### 2.1 阴影叠栅轮廓术

点光源入射下的阴影叠栅测量原理如图1所示,当光源和相机位于同一高度( $h_1=h_2=h$ )时,点光源发出的光透过周期为 $p$ 的光栅照射在距离光栅 $z$ 的物体表面上,其光栅阴影是周期为 $p' = \frac{h+z}{h}p$ 的条纹。相机透过光栅观察到光栅阴影和光栅自身重叠的像。

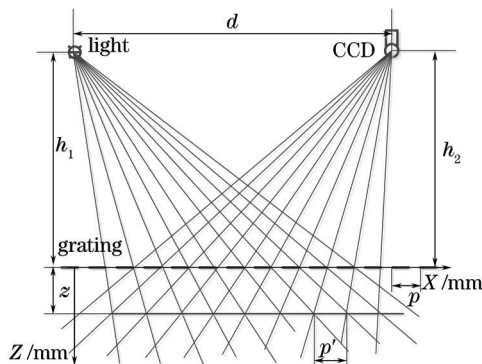


图1 阴影叠栅原理图

Fig.1 Illumination of shadow moiré

令光栅的透射率函数为 $T(x,y)$ ,在物体表面投射的光栅阴影可以表示为<sup>[14]</sup>

$$I_1(x,y) = \frac{I_0}{2r^2} T\left(\frac{hx}{h+z}, y\right) \times \cos[\varphi(x,y,z)], \quad (1)$$

式中 $I_0$ 为光源的光强, $h$ 为光源到光栅的距离, $r$ 为光源到物体表面的距离, $\varphi(x,y,z)$ 为物体表面法线与入射光的夹角。透过光栅观察,相机每一像素点接收到的光强是 $I_1(x,y)$ 与光栅透射率的乘积在物体表面一定区域的积分<sup>[15-16]</sup>,可以近似表达为

$$I_2(x,y) = \frac{1}{2a} \int_{x-a/2}^{x+a/2} I_1(x,y) \times T\left(\frac{hx+dz}{h+z}, y\right) dx, \quad (2)$$

式中 $a$ 的大小视相机分辨率和相机到物体的表面距离而定。当光栅足够密时,相机不能分辨高频的光栅和光栅阴影,只能看到低频的携带物体表面形貌信息的叠栅条纹,所以相机观察到的光强往往表达为

$$I_2(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cos\left(\frac{2\pi}{p} \left(\frac{dz}{h+z}\right)\right), \quad (3)$$

式中  $p$  为光栅周期,  $A(x,y)$  和  $B(x,y)$  是随  $(x,y)$  缓慢变化的量。其中第二项携带物体表面形貌信息, 通过相应的算法即可求得物体表面的高度分布。

## 2.2 Talbot 效应

如图 2 所示, 点光源  $S$  在距光栅有限距离的情况下经过光栅照射在距离光栅  $z$  的平面上。

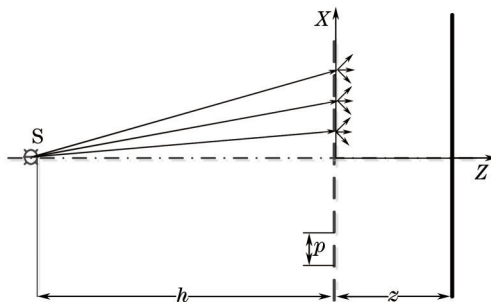


图 2 点光源下 Talbot 效应示意图

Fig.2 Schematic of Talbot effect under point light source illumination

光栅的透射率可以展开为傅里叶级数:

$$T(x,y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left(i2\pi n \frac{x}{p}\right), \quad (4)$$

根据菲涅耳-克希霍夫积分, 平面上任意一点  $(x,y)$  的复振幅可以简化表示为<sup>[17-18]</sup>

$$E(x,y) = \kappa \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left[i2\pi n \left(\frac{h}{h+z}\right) \frac{x}{p}\right] \exp\left[\frac{-i\pi n^2 h z \lambda}{p^2 (h+z)}\right], \quad (5)$$

式中  $\kappa$  为与光源距离有关的量,  $\lambda$  为波长。当  $\frac{1}{h} + \frac{1}{z} = \frac{2mp^2}{\lambda}$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  时,  $\exp[-i2\pi n^2 m] = 1$ , (5) 式可以改写为

$$E(x,y) = \kappa \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left[i2\pi n \left(\frac{h}{h+z}\right) \frac{1}{p} x\right]. \quad (6)$$

(6) 式正好是一个光栅透过函数的傅里叶展开, 其周期为  $p' = \frac{(h+z)p}{h}$ , 相对于光栅, 周期放大了  $\frac{h+z}{h}$  倍。  $\frac{2p^2}{\lambda}$  即为通常意义下的 Talbot 距离  $D_T$ 。

当  $\frac{1}{h} + \frac{1}{z} = \frac{(2m+1)p^2}{\lambda}$ ,  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  时,

$$E(x,y) = \kappa \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left(i2\pi n \frac{x}{p'}\right) \exp[-i\pi n^2 (2m+1)] = \left(\frac{h}{h+z}\right) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left(i2\pi n \frac{x}{p'}\right) \exp(-i\pi n^2), \quad (7)$$

对于任意整数  $n$ ,  $\exp(-i\pi n^2) = \exp(-i\pi n)$ , 所以(7)式可以改写为

$$E(x,y) = \kappa \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left(i2\pi n \frac{x}{p'}\right) \exp(-i\pi n) = \left(\frac{h}{h+z}\right) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} B_n \exp\left[i2\pi n \left(\frac{x}{p'} - \frac{1}{2}\right)\right], \quad (8)$$

(8) 式相当于将(6)式沿着  $+x$  方向平移半个周期。当  $h$  趋于无穷大时, 正好类似于平行光入射, 这时将在成像平面衍射出周期和光栅相同的像。

Latimer 等<sup>[19]</sup>采用波动光学的方法, 得到类似的结论。Wang 等<sup>[20]</sup>采用分级傅里叶级数的方法, 得到相位光栅的 Talbot 像也有相似的性质。还有学者从不同角度解释了 Talbot 效应产生机理<sup>[21]</sup>。尽管解释的理论不同, 但有关光场分布的结论是相近的, 即在满足 Talbot 距离处, 干涉形成的周期性光场分布的对比度最好, 可以将 Talbot 像看作光源在该位置的几何投影。

## 2.3 Talbot 效应下的阴影叠栅轮廓术

既然可以将 Talbot 像看作光源在成像位置的几何投影, 那么也就有可能将其应用于阴影叠栅三维轮廓测量。本节将推导物体与光栅的距离不同时叠栅条纹的光强表达式, 并以此验证将点光源下的 Talbot 效应

应用于阴影叠栅三维轮廓测量的可行性。

采用 Ronchi 光栅时,透射率为一方波。此时,投影到物体表面的光强为<sup>[3,15]</sup>

$$I_1 = E \times E^* = \kappa^2 \left\{ \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x, z) + \frac{4}{\pi^2} \left\{ \left[ \sum_{n=1}^{\infty} U_n(x, z) \right]^2 + \left[ \sum_{n=1}^{\infty} V_n(x, z) \right]^2 \right\} \right\}, \quad (9)$$

式中  $E^*$  表示  $E$  的共轭。

$$U_n = \frac{1}{2n+1} \sin \left[ 2\pi(2n-1) \frac{x}{p'} \right] \cos \left[ \pi(2n-1)^2 \frac{\lambda h z}{p^2(h+z)} \right] V_n = \frac{1}{2n+1} \sin \left[ 2\pi(2n-1) \frac{x}{p'} \right] \sin \left[ \pi(2n-1)^2 \frac{\lambda h z}{p^2(h+z)} \right], \quad (10)$$

式中  $p'$  为光栅投影像的周期。相机接收到的光强为

$$I_2(x, y) = \frac{1}{2p} \int_{x-p'/2}^{x+p'/2} I_1(x, y) \times T \left( \frac{hx+dz}{h+z}, y \right) dx = \kappa^2 \left\{ \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cos \left[ (2n+1) \frac{2\pi}{p} \frac{dz}{h+z} \right] \cos \left[ \pi(2n+1)^2 \frac{\lambda h z}{p^2(h+z)} \right] \right\}, \quad (11)$$

考虑物体表面形貌<sup>[14]</sup>、相机孔径效应<sup>[16]</sup>的影响,修正后的表达式为

$$I_2(x, y) = \frac{\cos[\varphi(x, y, z)]}{r^2} \left\{ \frac{1}{4} + \frac{2\zeta(z)}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \cos \left[ (2n+1) \frac{2\pi}{p} \frac{dz}{h+z} \right] \cos \left[ \pi(2n+1)^2 \frac{\lambda h z}{p^2(h+z)} \right] \right\}, \quad (12)$$

式中  $r$  为光源到物体表面点  $(x, y)$  的距离,  $\varphi(x, y, z)$  为光源入射光线与物体表面法线的夹角,  $\zeta(z)$  满足<sup>[12,16]</sup>

$$\zeta(z) = \begin{cases} 1 - \frac{8d_c z}{3\pi p}, & 0 < z \leq \frac{3\pi p}{8d_c} \\ 0, & z > \frac{3\pi p}{8d_c} \end{cases}, \quad (13)$$

式中  $d_c = \frac{d}{h}$  为与光圈直径  $d_c$  和相机光心到光栅的距离  $h$  有关的常量。

上述讨论是在单色光的假设条件下完成的,实际上光源发光光谱不可能为一固定值,所以相机实际接收到的光强为  $I_2(x, y)$ 、光源光谱  $\varepsilon(\lambda)$ 、相机频谱响应  $\omega(\lambda)$  三者之积在光谱范围  $(\lambda_1, \lambda_2)$  内对波长的积分,即

$$I_c(x, y) = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_2(x, y, \lambda) \varepsilon(\lambda) \omega(\lambda) d\lambda. \quad (14)$$

正如(3)式所示,若  $h \gg z$ ,当  $z$  增大时,叠栅条纹的相位几乎成比例增大,此时 CCD 上像素点接收到的光强会出现波动,其振幅的大小反映叠栅条纹的对比度。令  $p=0.05 \text{ mm}$ ,  $h=450 \text{ mm}$ ,  $d=100 \text{ mm}$ ,光源发光光谱在  $(500 \text{ nm}, 550 \text{ nm})$  内,且相对强度为 1,相机频谱响应为 1。分别取  $d_c=0, 0.003$ ,根据(14)式,相机接收到的光的相对强度随  $z$  的变化趋势如图 3 所示(由于  $h \gg z$ ,此时清晰的 Talbot 像会在  $z = \frac{N}{2} D_T, N=1, 2, 3, \dots$  附近出现)。

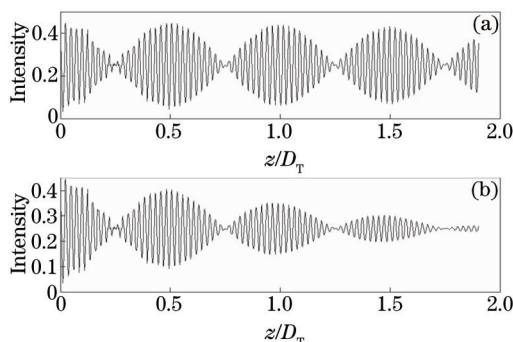


图 3 叠栅条纹光强分布规律。(a)  $d_c=0$ ; (b)  $d_c=0.003$

Fig.3 Intensity distribution of shadow moire fringes. (a)  $d_c=0$ ; (b)  $d_c=0.003$

可以看出,物体靠近光栅时,相机接收到的光强随  $z$  的增大有较大的波动,此时叠栅条纹由光栅的阴影和光栅自身干涉产生,对比度较高。随着  $z$  增大,由于衍射的影响,光栅投影像变模糊,叠栅条纹的对比度也减小。当  $z$  接近  $0.25D_T$  时光强趋于稳定值,此时几乎观测不到叠栅条纹,而后光强波动逐渐增大,在  $z=0.5D_T$

附近达到最大值,此时叠栅条纹由光栅的 Talbot 像和光栅自身干涉产生。若不考虑孔径效应,在  $z = \frac{N}{2}D_T, N = 1, 2, 3, \dots$  附近都能看到清晰的叠栅条纹[图 3(a)]。由于孔径效应的影响,随着  $z$  的增大,波动会有所减弱[图 3(b)]。也可以看出,在  $0.5D_T$  附近的很大一段区域内能产生较为清晰的叠栅条纹,若能在此附近进行阴影叠栅轮廓测量,能够增加叠栅轮廓术的测量深度。

### 3 数值模拟

根据(14)式对 Talbot 效应下的阴影叠栅三维测量进行模拟,取  $d=225 \text{ mm}, d_c=0.0025$ ,物体距离光栅约  $0.5D_T$ ,其他参数与第 2 节相同。测量对象为一个球面,最高点和最低点相差  $1 \text{ mm}$ 。采用传统的五帧相位提取算法,获得的条纹图中的一帧、重建结果和 A-B 行的误差如图 4 所示。

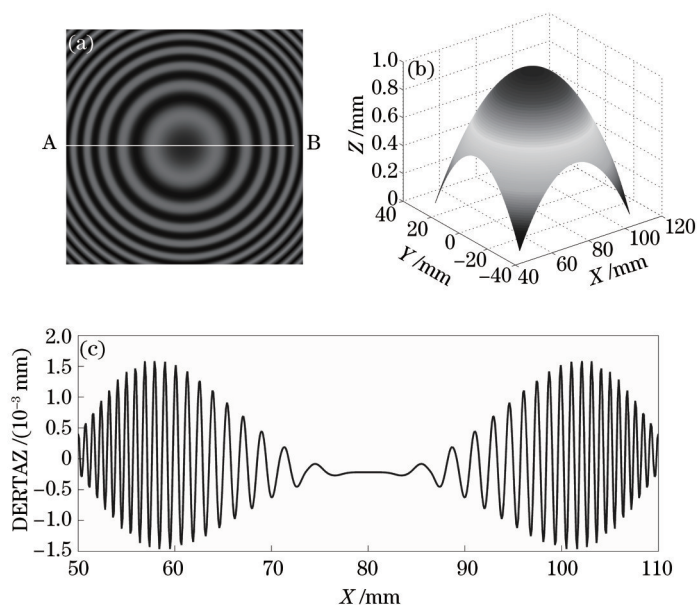


图 4 物体靠近  $0.5D_T$  时的模拟测量。(a) 条纹图; (b) 测量结果; (c) A-B 行的测量误差

Fig.4 Simulated measurement when the measured object is about  $0.5D_T$  away from the gratings. (a) Fringe pattern; (b) measurement results; (c) measurement error for the line A-B

从图 4 可以看出,模拟条件下,利用点光源下 Talbot 自成像与光栅自身干涉形成的叠栅条纹进行三维轮廓测量能够较为准确地反映物体的三维形貌。由于相移误差和高次谐波的影响<sup>[13]</sup>,其测量结果存在  $\pm 1.5 \mu\text{m}$  的误差。

### 4 实 验

为了验证上述分析的正确性,分别使物体位于靠近光栅处和距离光栅约  $0.5D_T$  处进行测量。实验系统如图 5 所示。测量对象是一个金属块,尺寸约为  $80 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ ,表面经过精铣,与水平面呈一定倾角放置。光栅为 20 线的 Ronchi 光栅。采用如图 6 所示呈紧密直线排列的蓝光 0805 封装 LED 作为光源,排列方向与光栅栅线平行(光源平行于栅线方向排列不影响测量原理及结果),能产生对比度良好的叠栅条纹,且能防止散斑的产生。光源与相机的距离为  $225 \text{ mm}$ 。相机光心和光栅表面的距离为  $450 \text{ mm}$ ,光栅水平放置,光源和相机光心位于同一水平面。为了提高测量精度,采用高精度位移平台作为相移器,分辨率为  $1 \mu\text{m}$ 。

调整光栅的位置,使之靠近待测物体,相机观察到的叠栅条纹如图 7(a)所示。物体表面 A 点距光栅约  $0.2 \text{ mm}$ ,B 点距光栅约  $2 \text{ mm}$ 。可以看出在 A 点附近能看到清晰的条纹,随着与光栅距离的增大,叠栅条纹逐渐模糊,在 B 点附近已观察不到条纹。向上移动光栅,条纹会逐渐消失,在物体距光栅约为  $0.5D_T$  时,又能呈现出清晰的条纹,如图 7(b)所示。此时的条纹由  $0.5D_T$  处的 Talbot 像与光栅干涉产生,可以看出此时整个物体表面都能观察到清晰的叠栅条纹,说明利用 Talbot 效应能有效增大阴影叠栅轮廓术的测量深度。

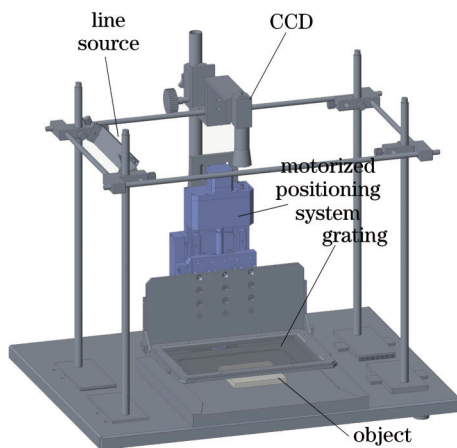


图 5 实验系统示意图

Fig.5 Illustration of experimental system



图 6 光源结构

Fig.6 Structure of light source

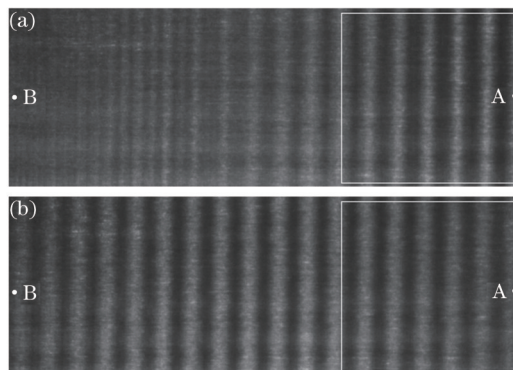


图 7 叠栅条纹图。(a) 物体靠近光栅时; (b) 物体距光栅  $0.5D_T$

Fig.7 Moiré fringe patterns. (a) When the measured object is close to gratings; (b) when the measured object is  $0.5D_T$  away from gratings

分别使光栅位于上述两个位置,相移 4 次,每次相移  $\frac{\pi}{2}$ ,采集 5 帧叠栅条纹图。采用文献[22]中的相位提取算法,计算表面高度分布,结果如图 8 所示。图 8(a)所示为物体靠近光栅时的测量结果,在距离光栅较近的一端,条纹较清晰,能够得到物体表面的三维形貌。在距离光栅较远的一端,条纹已接近消失,不能得到物体表面的三维形貌。当物体距离光栅约  $0.5D_T$  时的测量结果如图 8(b)所示,可以看出,此时能够得到被测物体表面的完整形貌。

由于物体表面的实际形貌未知,认为传统叠栅轮廓术在有清晰条纹的区域(图 7 中白色方框内)内的测量结果为准确值。选取两次测量中相应区域的测量结果作差,以此验证本文所提出方法的测量结果的准确性。结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,两次测量的结果相差非常小,在  $\pm 5 \mu\text{m}$  之内,说明物体靠近光栅时和距离光栅  $0.5D_T$  时,阴影叠栅轮廓术的测量结果非常接近。这说明利用点光源下 Talbot 自成像进行阴影叠栅三维轮廓测量能够准确地反映物体表面的三维形貌。

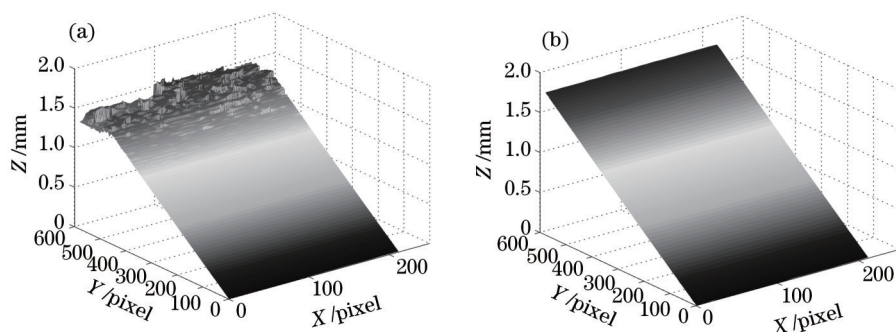


图8 测量结果。(a) 物体靠近光栅时;(b) 物体距光栅  $0.5D_T$  时

Fig.8 Measurement results. (a) When the measured object is close to gratings; (b) when the measured object is  $0.5D_T$  away from gratings

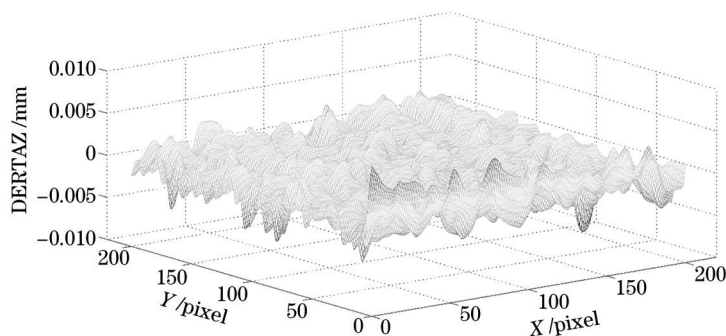


图9 本文提出方法与传统叠栅轮廓术测量结果之差

Fig.9 Difference between the results obtained by the proposed method and the traditional shadow moiré profilometry

## 5 结 论

针对传统阴影叠栅轮廓术测量深度有限的问题,提出了将点光源下 Talbot 自成像应用于阴影叠栅三维轮廓测量的方法。从理论和实验角度验证了上述方法,结果表明,利用光栅的 Talbot 像与光栅自身干涉形成的叠栅条纹进行三维轮廓测量,既能增加阴影叠栅轮廓术的测量深度,又能准确地反映待测物体的表面形貌。此外,提出的方法能使光栅和待测物体保持一定间距。相对于传统的叠栅轮廓术,该方法更具实用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Jin L H, Kodera Y, Yoshizawa T, *et al.*. Shadow moiré profilometry using the phase-shifting method[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(8): 2119-2123.
- 2 Post D, Han B, Ifju P. High sensitivity moiré: Experimental analysis for mechanics and materials[J]. *Experimental Techniques*, 1994, 18(2): 100-104.
- 3 Keren E, Kafri O. Diffraction effects in moiré deflectometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(2): 111-120.
- 4 Talbot H F, LXXVI. Facts relating to optical science No. IV[J]. *Philosophical Magazine*, 1836, 9(56): 401-407.
- 5 Rayleigh L, XXV. On copying diffraction-gratings, and on some phenomena connected therewith[J]. *Philosophical Magazine*, 1881, 11(67): 196-205.
- 6 Zhao Qi, Jiang Zewei, Meng Qing'an, *et al.*. Calibration of foci-meter based on Talbot-Moiré interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 031204.  
赵琦, 蒋泽伟, 孟庆安, 等. 基于泰伯-莫尔干涉技术的焦距测量系统校准技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 031204.
- 7 Jiang Yao, Bai Jian, Luo Jia, *et al.*. An error calibration method against aberration in long focal length measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1222002.  
江瑶, 白剑, 罗佳, 等. 长焦距测量系统的像差误差校正方法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1222002.
- 8 Chen Ran, Guo Yongkang. New development of Talbot effect research[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1996, 33(8): 8-13.  
陈然, 郭永康. Talbot 效应研究新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 1996, 33(8): 8-13.
- 9 Mirza S, Shakher C. Surface profiling using phase shifting Talbot interferometric technique[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(1): 013601.

- 10 Serrano D I, Martínez A, Serrano-Heredia A, *et al.*. Development and application of Talbot images technique for reconstruction of three dimensional objects[C]. SPIE, 2006, 6292: 629211.
- 11 Chu T C, Chen J H, Chen K H. Curvature measurement based on Talbot effect and image moiré interferometry[C]. Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, Optical Society of America, 2015: DTh3A.7.
- 12 Han C, Han B. Contrast of shadow moiré at high-order Talbot distances[J]. Optical Engineering, 2005, 44(2): 028002.
- 13 Chiang F P. Moiré methods of strain analysis[J]. Experimental Mechanics, 1979, 19(8): 290-308.
- 14 Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. Applied Optics, 1970, 9(4): 942-947.
- 15 Bar-Ziv E. Effect of diffraction on the moiré image. I. Theory[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1985, 2(3): 371-379.
- 16 Kafri O, Keren E. Fringe observation and depth of field in moiré analysis[J]. Applied Optics, 1981, 20(17): 2885-2886.
- 17 Cowley J M, Moodie A F. Fourier images: I - the point source[J]. Proceedings of the Physical Society Section B, 1957, 70(5): 486-496.
- 18 Liao Jianghong, Gu Quwu. Diffraction self-imaging phenomenon of the grating in the optical system: General Talbot effect[J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(4): 331-335.  
廖江红, 顾去吾. 光学系统中的光栅衍射自成像现象: 广义的 Talbot 效应[J]. 光学学报, 1985, 5(4): 331-335.
- 19 Latimer P, Crouse R F. Talbot effect reinterpreted[J]. Applied Optics, 1992, 31(1): 80-89.
- 20 Wang H S. A study of Talbot illuminator with a binary phase grating and a fractional Fourier transformation under a spherical wave illumination[C]. International Conference on Information Engineering and Computer Science, 2009: 1-3.
- 21 Sun Qiongge, Ma Jinpeng, Yang Yu, *et al.*. Talbot effect in linear canonical transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, (7): 0711004.  
孙琼阁, 马金鹏, 杨 瑀, 等. 线性正则变换中的泰伯效应[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0711004.
- 22 Du Hubing, Zhao Hong, Li Bing, *et al.*. Demodulating the phase of phase-shifting shadow moiré using arbitrary phase shift[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0512006.  
杜虎兵, 赵 宏, 李 兵, 等. 阴影叠栅相移非线性误差补偿算法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0512006.

栏目编辑: 张 雁