

# 一种多距离融合的大深度测量范围相移阴影叠栅轮廓术

艾永旭<sup>1</sup> 周翔<sup>1,2</sup> 杜虎兵<sup>3</sup> 郭家玉<sup>1</sup> 费梓轩<sup>1</sup> 李东<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>西安交通大学苏州研究院, 江苏 苏州 215123

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

**摘要** 针对传统阴影叠栅轮廓术深度测量范围有限的问题, 根据阴影叠栅条纹对比度的变化特点, 提出了大深度范围内的阴影叠栅轮廓新型测量方法。该方法将光栅置于不同的高度, 在物体表面形成叠栅条纹, 通过将不同高度范围内的条纹相位测量结果相互融合, 实现了大深度范围内的阴影叠栅轮廓测量。分析了光栅处于不同位置时叠栅条纹的相位分布特点, 提出了基于重叠区域的相位融合方法和误差补偿方法。通过实验验证了所提出方法的可行性和准确性。

**关键词** 测量; 深度测量范围; 阴影叠栅轮廓术; 相位融合; Talbot效应; 叠栅迭代误差补偿

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1212001

## A Multi-Range Merging Method for Phase Shift Shadow Moiré Profilometry with Large Depth Measuring Range

Ai Yongxu<sup>1</sup> Zhou Xiang<sup>1,2</sup> Du Hubing<sup>3</sup> Guo Jiayu<sup>1</sup> Fei Zixuan<sup>1</sup> Li Dong<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Suzhou Academy, Xi'an Jiaotong University, Suzhou, Jiangsu 215123, China

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

**Abstract** The depth measuring range is limited by conventional shadow moiré profilometry. In order to solve the problem, a new method of shadow moiré profilometry, which can increase the depth measuring range, is proposed according to the fringe contrast characteristic of shadow moiré. When the grating is placed at different depths, moiré fringes will be formed on the surface. The shadow moiré profilometry with large depth measurement range is realized by merging the fringe phase measurement results of different depth ranges. The phase distributions of moiré fringes at different depths are analyzed. Methods for phase merging and error compensation are proposed based on the overlapping region. The feasibility and veracity of the proposed method are verified by experiments.

**Key words** measurement; depth measuring range; shadow moiré profilometry; phase merging; Talbot effect; moiré iterative error compensation

**OCIS codes** 120.4120; 120.6650; 050.1940

## 1 引言

相移阴影叠栅轮廓术是一种高精度、非接触的全场三维轮廓测量方法<sup>[1-2]</sup>。由于光栅衍射和孔径效应的影响<sup>[3-4]</sup>,  $z$ 向测量范围十分有限。增大光栅的周期有助于提高阴影叠栅的 $z$ 向测量范围,同时可以增大分辨率。

**收稿日期:** 2016-06-06; **收到修改稿日期:** 2016-07-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(61471288)、中央高校基本科研业务费专项资金、苏州市应用基础研究项目(SYG201545)

**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: aiyongxuxj@163.com

**导师简介:** 周翔(1978—),男,博士,副教授,博士生导师,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)

在高精度测量领域,光栅衍射使叠栅条纹对比度迅速衰减,成为限制阴影叠栅深度测量范围的主要因素<sup>[5]</sup>。

当平行的单色光垂直入射到具有周期性结构的物体时,物体的像在一定距离会重现,这一现象被称为 Talbot 效应<sup>[6]</sup>。Rayleigh<sup>[7]</sup>运用菲涅耳衍射理论对 Talbot 现象作解释,指出在任一距离( $R_n$ )平面上都会出现清晰的物体的像, $R_n = np^2/\lambda$ ,其中  $R_n$  为物体与光栅的距离, $p$  为光栅周期, $\lambda$  为波长, $n$  为正整数。研究者们针对不同光照条件下的 Talbot 自成像特性进行了深入研究<sup>[8-11]</sup>,指出在 Talbot 自成像范围,干涉形成的周期性光场分布对比度最好,可以把 Talbot 像看作光源在该位置的几何投影。

Han 等<sup>[12-13]</sup>分析了在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,指出将 Talbot 自成像应用于阴影叠栅轮廓术可有效增大深度测量范围。本文作者曾分析了点光源模型下阴影叠栅条纹对比度变化的规律,提出了将点光源下的 Talbot 自成像应用于阴影叠栅轮廓术<sup>[14]</sup>(简称 Talbot 叠栅)。相对于平行光源,点光源下的阴影叠栅轮廓术具有更大的测量面积,且对设备要求更低。参照文献<sup>[14]</sup>,本文提出了一种多距离融合的阴影叠栅轮廓术,该方法在原有 Talbot 叠栅的设备基础上,只需多采集几组相移条纹图,即可实现更大深度范围的阴影叠栅轮廓测量。

## 2 相移阴影叠栅轮廓术

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  $h$  时,光源发出的光透过周期为  $p$  的光栅在距离光栅为  $z$  的物体表面上投影出周期为  $p'$  [ $p' = p(h+z)/h$ ] 的条纹<sup>[14]</sup>。相机透过光栅观察,光栅阴影和光栅自身相干涉,形成低周期的条纹。当光栅周期足够小时,相机无法分辨光栅及其阴影,只能看到干涉条纹,其光强可表示为<sup>[15]</sup>

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [\Phi(x, y)], \quad (1)$$

式中  $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$  分别为条纹图的背景和调制因子; $\Phi(x, y)$  为条纹相位,携带物体表面的高度信息,可表示为

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi dz(x, y)}{h + z(x, y)}, \quad (2)$$

式中  $z(x, y)$  为被测物体表面的高度分布(简写为  $z$ )。通过上下移动光栅产生相移,条纹光强分布<sup>[16]</sup>可近似表示为

$$I_m = a(x, y) + b(x, y) \cos [\Phi(x, y) + \delta_m], \quad (3)$$

式中  $\delta_m$  为光栅上移产生的相移。采集相移条纹图,利用相应的相位解调算法可得到叠栅条纹的相位  $\Phi(x, y)$ ,代入(2)式可得到物体表面形貌。

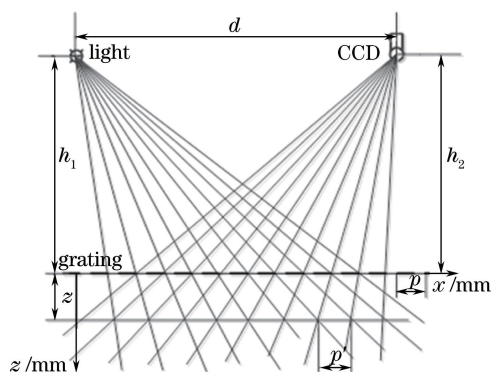


图 1 阴影叠栅光路原理图

Fig. 1 Schematic of shadow moiré light path

## 3 多距离融合阴影叠栅轮廓术

### 3.1 测量原理

目前,研究者们已研究了叠栅条纹对比度的变化规律<sup>[12,14]</sup>。图 2 为多距离融合阴影叠栅轮廓术的测量

示意图。图中  $A_1 \sim A_5, B_1 \sim B_6$  都代表某一高度范围。当物体靠近光栅的部分表面时,可得到清晰的光栅阴影,叠栅条纹对比度较高( $z \in A_1$ )。由于光栅衍射的影响,随着  $z$  增大,光栅阴影越来越模糊,条纹对比度下降,在一定距离后条纹消失( $z \in A_2 \cup A_4$ )。当  $z$  增大到一定高度,又出现清晰的条纹( $z \in A_3 \cup A_5$ ),此时的叠栅条纹是由光栅的 Talbot 自成像与光栅自身干涉产生。

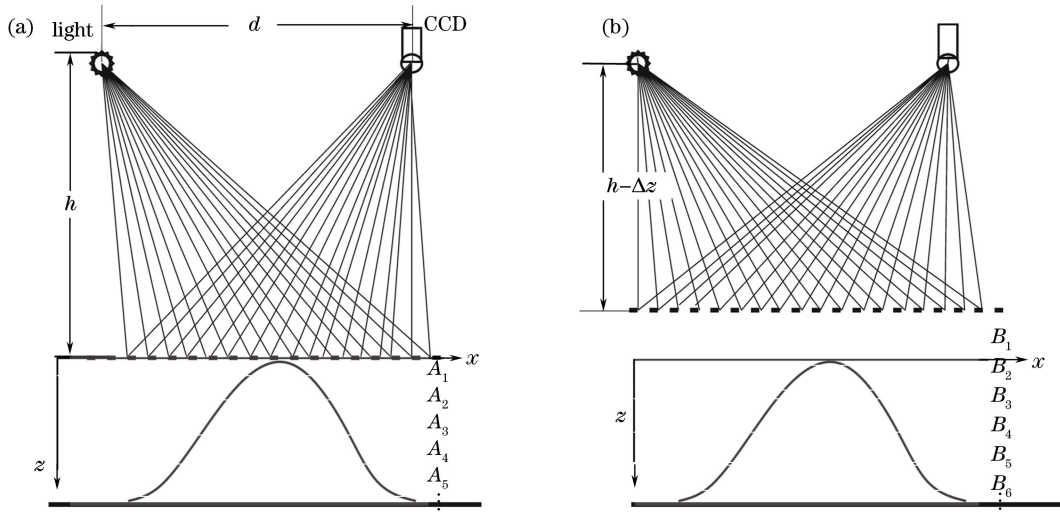


图 2 多距离融合阴影叠栅轮廓术的测量示意图。(a) 光栅靠近物体;(b) 光栅上移  $\Delta z$

Fig. 2 Measurement diagram of multi-range merging shadow moiré. (a) Object is close to grating; (b) grating is moved up  $\Delta z$

在有清晰条纹的范围内,通过相位解调可获得条纹相位,称为动态范围(图像中对应的区域称为有效区域)。在条纹对比度差的范围内,测量值无效,令  $N$  为无效测量值。第一次测量(A)得到的相位  $\phi_A(x, y)$  满足

$$\phi_A(x, y) = \begin{cases} \Phi(x, y) - k\pi, & (x, y) \in A_1 \cup A_3 \cup A_5 \cup \dots \\ N, & (x, y) \in A_2 \cup A_4 \cup \dots \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $k$  与解包裹的起始点和 Talbot 自成像的级数有关。将光栅上移  $\Delta z$ ,动态范围也将上移,如图 2(b)所示。通过相位解调,第 2 次测量(B)得到的相位  $\phi_B(x, y)$  满足

$$\phi_B(x, y) = \begin{cases} \Phi(x, y) + \frac{2\pi}{p} \times \frac{d(\Delta z)}{h+z} - k\pi, & (x, y) \in B_3 \cup B_5 \cup \dots \\ N, & (x, y) \in B_2 \cup B_4 \cup B_6 \cup \dots \end{cases}. \quad (5)$$

在每个动态范围内, $z$  的波动范围远小于  $h$ ,因此可以将相位测量值  $\phi_B(x, y)$  写成一个定量和一个无穷小变量的和的形式,即

$$\phi_B(x, y) = \begin{cases} \Phi(x, y) + u + v(\gamma - \bar{\gamma}), & (x, y) \in B_1 \cup B_3 \cup B_5 \cup \dots \\ N, & (x, y) \in B_2 \cup B_4 \cup B_6 \cup \dots \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $u$  为定值, $v = 2\pi d(\Delta z)/p, \gamma = (h+z)^{-1}, \bar{\gamma} = (u - k\pi)/v$ 。若忽略最后一项的影响,则测量结果的相位可近似表示为

$$\phi_B(x, y) = \begin{cases} \Phi(x, y) + u, & (x, y) \in B_1 \cup B_3 \cup B_5 \cup \dots \\ N, & (x, y) \in B_2 \cup B_4 \cup B_6 \cup \dots \end{cases}. \quad (7)$$

根据相移条纹图,求得条纹的调制因子为  $b(x, y)$ 。根据测量的分辨率需求,设定一个阈值,将  $b(x, y)$  与该阈值进行比较,从而确定有效区域。对于表面漫反射较强的待测物体,条纹的调制因子  $b(x, y)$  较大,有效区域也较大,两次测量便可使有效区域覆盖整个物体表面,此时  $\Delta z = R_1/2$ 。对于表面漫反射较弱的待测物体,条纹的调制因子  $b(x, y)$  较小,两次测量得到的有效区域不能完全覆盖整个物体表面,可以增加一次测量,使有效区域完全覆盖待测表面。此时第 2 次测量和第 3 次测量(C)对应的  $\Delta z$  分别为  $R_1/3, 2R_1/3$ 。将测量的相位值融合在一起,代入(2)式,便可得到整个物体表面的高度信息。

### 3.2 相位融合

由 3.1 节分析可得,只需将第 1 次测量中有效区域内的测量结果  $\phi_A(x, y)$  加上  $k\pi$ , 将第 2、3 次测量中有效区域内的测量结果  $\phi_B(x, y)$ 、 $\phi_C(x, y)$  分别减去  $u$ , 便可实现相位融合。首先讨论两次测量的相位融合。假设两次测量的有效区域分别为  $E(E_1, E_2, \dots)$  和  $F(F_1, F_2, \dots)$ , 以  $E_1$  为起始区域, 测量得到每个有效区域的相位为

$$\Phi_s(x, y) = \phi_A(x, y), (x, y) \in E_1. \quad (8)$$

在  $F$  中找出与  $E_1$  相邻的区域  $F_i$ , 在  $F_i$  与  $E_1$  的重叠区域  $E_1 \cap F_i$  中测量得到的相位差值的平均值  $u$  为

$$u = \text{mean}[\phi_B(x, y) - \Phi_s(x, y)], (x, y) \in E_1 \cap F_i, \quad (9)$$

式中  $\text{mean}[\ ]$  为求平均值, 此时  $\bar{\gamma}$  对应于  $\gamma$  在重叠区域内的平均值。将(9)式代入(7)式, 得到在  $F_i - E_1$  区域的相位为

$$\Phi'_s(x, y) = \phi_B(x, y) - u, (x, y) \in F_i - E_1. \quad (10)$$

至此, 完成  $W_1(W_1 = E_1 \cup F_i)$  区域的相位融合。当在  $F$  中还有其他区域与  $E_1$  邻接, 采用相同的方法完成对该区域的相位融合, 再找出在  $E$  中与  $W_1$  邻接的区域  $E_m$ , 可得

$$k_m = \text{round}\left[\frac{\Phi_s(x, y) - \phi_A(x, y)}{\pi}\right], (x, y) \in W_1 \cap E_m, \quad (11)$$

$$\Phi_s(x, y) = \phi_A(x, y) + k_m\pi, (x, y) \in E_m - W_1, \quad (12)$$

式中  $\text{round}()$  为取整函数。至此, 完成了  $W_2(W_2 = W_1 \cup E_j)$  区域的相位融合。同样, 若存在其他区域与  $W_1$  相邻, 采用相同的方法完成对该区域的相位融合。

重复上述对区域  $E$  和  $F$  中的相位融合过程, 直到遍历所有有效区域, 得到整个物体表面的相对相位分布。

当物体表面漫反射较弱时, 需要增加一次测量 C, 此时仍采用相似方法进行相位融合, 只是在融合顺序上稍有调整。每次对测量 B 的有效区域完成相位融合后, 搜索测量 C 中与已完成融合区域相邻的有效区域, 利用相同的方法完成该区域的融合, 再搜索  $E$  中与已融合区域相邻的区域, 确定  $k$  值。

融合的起始相位与真实相位相差  $k_1\pi$ ,  $k_1$  可表示为

$$k_1 = \text{floor}\left\{\frac{\min[\Phi_s(x, y)]}{\pi}\right\}, \quad (13)$$

式中  $\text{floor}()$  为向下取整函数。结合(13)式得到真实的相位分布为

$$\Phi(x, y) = \Phi_s(x, y) - k_1\pi. \quad (14)$$

将得到的相位分布代入(2)式, 可得到物体表面的高度分布。

### 3.3 误差补偿

上述相位融合方法忽略了在  $F_i$  区域内光栅上移时不同高度处相移量不一致引起的误差。对于  $F_i$  区域, 误差可以表示为  $v(\gamma - \bar{\gamma})$ 。通过与文献[17]相似的迭代过程完成对误差的补偿。讨论两次测量的误差补偿, 过程如下:

- 1) 根据 3.2 节得到的  $z$ , 求得每个重叠区域内的  $\bar{\gamma}$ ;
- 2) 利用  $z$  更新  $F - E$  区域内的  $Y(x, y)$ , 得到  $\gamma^*(x, y)$ ;
- 3)  $F - E$  区域的相位值可表示为

$$\Phi^*(x, y) = \begin{cases} \Phi(x, y) - v(\gamma - \bar{\gamma}), & (x, y) \in F - E \\ \Phi(x, y), & (x, y) \notin F - E \end{cases}, \quad (15)$$

将  $\bar{\gamma}$ 、 $\gamma^*(x, y)$  代入(15)式, 更新  $F - E$  区域的相位值;

- 4) 将得到的相位分布代入(2)式, 得到新的高度分布  $z^*$ ;
- 5) 重复步骤 2)~4), 通过迭代逼近, 得到精确的高度分布, 其收敛条件为

$$\max(z^q - z^{q-1}) \leq \epsilon, \quad (16)$$

式中  $\epsilon$  为迭代停止标准,  $q$  为迭代次数。

当需要增加一次测量时, 采用上述误差补偿方法对测量 B 和测量 C 的有效区域进行误差补偿。不同的

是,此时测量 B 和测量 C 所对应的  $\Delta z$  分别为  $R_1/3$  和  $2R_1/3$ 。

## 4 实 验

利用 Talbot 叠栅进行三维轮廓测量的精度已在文献[12,14]中得到证明。因此只需证明所提出的相位融合方案的准确性。实验装置<sup>[14]</sup>如图 3 所示,光栅为 Ronchi 光栅(20 line/mm),水平放置;光源到光栅的垂直距离为 310 mm;光源到相机中心的水平距离为 86 mm;光源为蓝色发光二极管,波长为 490~520 nm; $R_1 \approx 5$  mm。采用传统的阴影叠栅轮廓术,其深度测量范围小于  $0.5R_1$ 。测量对象为一机加工斜面,尺寸为 150 mm×50 mm,高度约为 5 mm,上方为一个大小为 50 mm×20 mm 的平面,如图 4 所示。

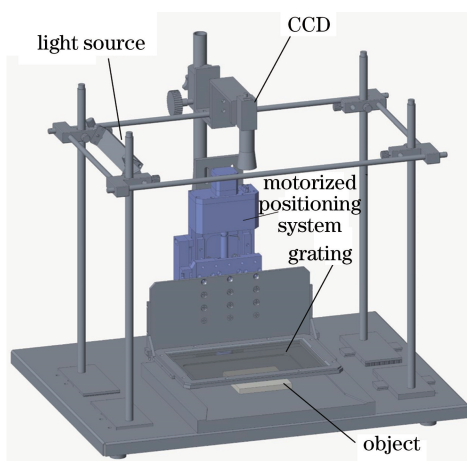


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of experimental system

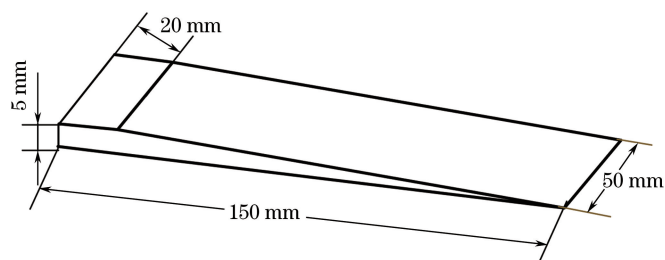


图 4 测量对象示意图

Fig. 4 Diagram of measurement object

首先上下调节物体的位置,使物体靠近光栅下表面,采集到的 1 帧叠栅条纹图如图 5(a)所示。将光栅相对起始位置上移  $0.5R_1$ ,采集到的 1 帧条纹图如图 5(b)所示。

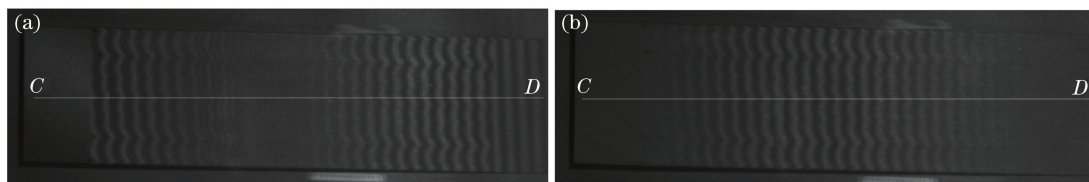


图 5 叠栅条纹图。(a) 光栅靠近被测物体; (b) 光栅上移  $0.5R_1$

Fig. 5 Moiré fringes. (a) Measured object is close to grating; (b) grating is shifted upward  $0.5R_1$

利用 3.1 节中设定阈值的方法,求取两次测量的有效区域,结果分别如图 6(a)、(b)所示。图中白色区域为提取的有效区域。为了减小相移误差的影响,选用 Huang 等<sup>[18]</sup>提出的相位解调方法,两次测量的有效区域内的相位分布分别如图 6(c)、(d)所示。采用 3.2 节的方法进行相位融合,融合结果如图 6(e)所示。为了更清晰地显示融合效果,选择图 5(a)、(b)中的白线 CD 上各个阶段的测量结果绘图,如图 6(f)所示。由于



相位解调是在各个有效区域内独立进行的,相位融合前得到的相位值是几段不相连的曲线。通过相位融合,使各个有效区域的测量结果融合在一起,从而得到一条完整的曲线。采用传统的阴影叠栅轮廓术只能测量  $A_1$  区域。利用 Talbot 叠栅轮廓术的测量范围显著增大,但也只能单独测量  $A_3$ 、 $B_3$  区域。采用所提出的测量方法,可将  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $B_3$  区域的测量结果融合在一起,以实现更大深度范围的测量。

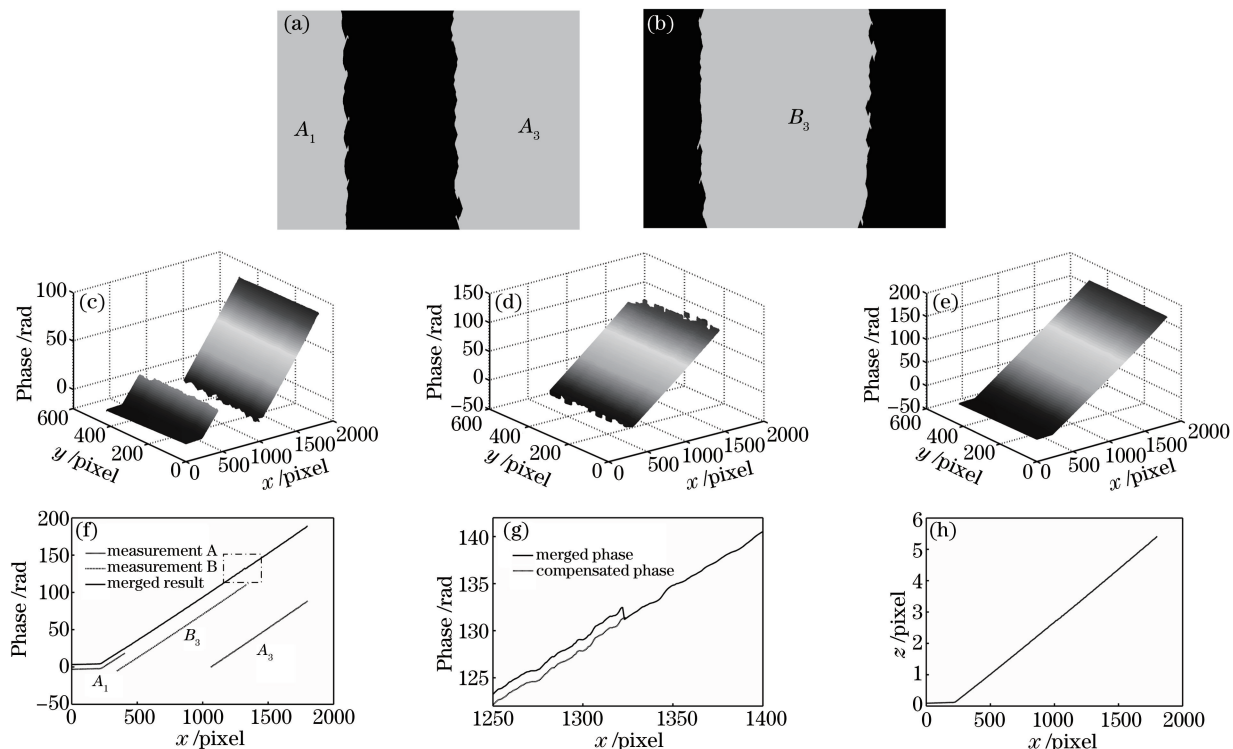


图 6 测量结果。(a) 被测物体靠近光栅时的有效区域;(b) 光栅上移  $0.5R_1$  后的有效区域;  
(c) 被测物体靠近光栅时的相位测量结果;(d) 光栅上移  $0.5R_1$  后的相位测量结果;(e) 融合后的相位;  
(f) 沿直线  $CD$  的相位测量结果;(g) 误差补偿;(h) 沿直线  $CD$  的最终测量结果

Fig. 6 Measurement results. (a) Valid region when measured object is close to grating; (b) valid region when grating is shifted upward  $0.5R_1$ ; (c) phase measurement result when measured object is close to grating; (d) phase measurement result when grating is shifted upward  $0.5R_1$ ; (e) merged phase; (f) phase measurement results along the line  $CD$ ; (g) error compensation; (h) final measurement result along the line  $CD$

在同一动态范围内的不同高度处,光栅移动引起的相位增量不同。在测量  $A_3$  与  $B_3$  的相位融合处会产生一个微小台阶,如图 6(g)中实线所示,该曲线是由图 6(f)中融合后的曲线在虚线方框内的部分经过放大后得到。利用 3.3 节的误差补偿方法进行补偿,迭代停止标准  $\epsilon = 10^{-5}$  mm。补偿后的结果如图 6(g)中虚线所示。可以看出,通过误差补偿可以减小相位融合过程中产生的误差,从而得到平滑的结果。

## 5 结 论

阴影叠栅轮廓术的深度测量范围有限,受 Talbot 的影响,在光栅的各级 Talbot 自成像范围内会呈现一些彼此不连续的动态范围。分析了各个动态范围内叠栅条纹的相位分布规律。通过上下移动光栅可使动态范围互补,从而增大了阴影叠栅轮廓术的深度测量范围。提出了基于重叠区域的相位融合方法和误差补偿方法。将上述方法应用于实际测量,得到了连续光滑的融合结果,实现了大深度范围阴影叠栅轮廓的测量。所提出的方法适用于连续物体表面的形貌测量,当物体表面存在一定阶跃变化时,相邻的动态范围可能不存在重叠区域,此时利用所提出的方法无法实现相位融合。但所提出的方法容许的台阶范围远大于条纹周期,此时影响台阶测量范围的主要因素为相位包裹。综上所述,所提出的方法明显增大了阴影叠栅轮廓术的深度测量范围,特别是在要求更小的分辨率时需要采用周期更小的光栅,此时可以利用更多级的 Talbot 叠栅

条纹相互融合,从而显著增大叠栅轮廓术的深度测量范围。所提出的方法只需多采集几组相移条纹图,无需在原有叠栅测量硬件的基础上作改进,具有很强的实用性。

## 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[M]. New York: Springer Science & Business Media, 1994.
- 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 Kafri O, Keren E. Fringe observation and depth of field in moiré analysis[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(17): 2885-2886.
- 5 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.
- 6 Talbot H F, Esq F R S. LXXVI. Facts relating to optical science. No. IV[J]. *Philosophical Magazine Series 3*, 1836, 9(56): 401-407.
- 7 Lord Rayleigh F R S. XXV. On copying diffraction-gratings, and on some phenomena connected therewith [J]. *Philosophical Magazine Series 5*, 1881, 11(67): 196-205.
- 8 Latimer P, Crouse R F. Talbot effect reinterpreted[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(1): 80-89.
- 9 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: 11033082.
- 10 Sun Qiongge, Ma Jinpeng, Yang Yu, *et al.* Talbot effect in linear canonical transformation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(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.
- 11 Lu Yangyi, Li Jing, Huang Xianbin, *et al.* Numerical investigation on factors affecting the visibility of monochromatic X-ray grating talbot self-imaging fringes[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 033401.  
卢阳沂, 李 晶, 黄显宾, 等. 单色 X 射线光栅泰伯条纹可见度影响因素模拟研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 033401.
- 12 Han C, Han B. Contrast of shadow moiré at high-order talbot distances[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(2): 028002.
- 13 Han C. UV shadow moiré for specular and large surface shape measurement [J]. *Progress in Optomechatronic Technologies*, 2014, 306: 73-79.
- 14 Ai Yongxu, Zhou Xiang, Du Hubing, *et al.* Shadow moiré using Talbot effect under point light illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412003.  
艾永旭, 周 翔, 杜虎兵, 等. 点光源下的 Talbot 效应在阴影叠栅中的应用[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412003.
- 15 Meadows D M, Johnson W O, Allen J B. Generation of surface contours by moiré patterns[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(4): 942-947.
- 16 Servin M, Estrada J C, Quiroga J A. The general theory of phase shifting algorithms[J]. *Optics Express*, 2009, 17(24): 21867-21881.
- 17 Du H, Zhao H, Li B, *et al.* Phase-shifting shadow moiré based on iterative self-tuning algorithm[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(36): 6708-6712.
- 18 Huang P S, Guo H. Phase shifting shadow moiré using the Carré algorithm[C]. *SPIE*, 2008, 7066: 70660B.