

# 基于条纹光流的物体面形测量技术

代晴, 孙平\*, 类智方, 唐钰欣

山东师范大学物理与电子科学学院, 山东 济南 250014

**摘要** 提出一种运用条纹光流实现物体面形测量的新技术。介绍光流法测量面形的原理, 从光流的视角分析投影条纹的变化, 建立平行投影条件下光流与被测面形高度及相位分布之间的理论关系。对建立的球冠几何模型进行数值模拟, 验证光流法直接计算面形高度的可行性; 对实际物体面形的测量与相移法测量结果对比, 证明光流法能够准确恢复物面相位, 并且对物面空洞区引入的噪声有较好的稳健性。不同于传统的面形测量技术, 光流法仅需要二帧图像就可精确恢复高度分布或相位分布。由于光流法方法本身含有时间因子, 且仅需两幅图像就能直接得到面形分布, 所以比相移法更适合动态测量。

**关键词** 测量; 面形测量; 投影条纹; 相移; 条纹光流

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1112004

## Surface Shape Measurement Technique Using Fringe-Based Optical Flow

Dai Qing, Sun Ping\*, Lei Zhifang, Tang Yuxin

School of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China

**Abstract** This study proposes a new technique for surface measurement by using fringe-based optical flow. The principle of measuring surface shape by optical flow method is introduced, and the changes of projected fringes are analyzed from the perspective of optical flow. The theoretical relationship among the optical flow, height distribution, and phase distribution of the measured surface is established under parallel projection. A numerical simulation conducted with an established spherical crown geometric model shows that the optical flow method can be used to directly calculate the height of the measured object. Practical measurement of the object and comparison of the measured results with those of the phase shift method reveal that the optical flow method can accurately restore the object's phase; in addition, it demonstrates good robustness to the noise emanating from the void area of the measured object. Unlike traditional surface shape measurement techniques, the optical flow method only needs two frames to accurately restore height or phase distributions. Because the optical flow method itself contains the time factor and only requires two images to directly obtain surface shape distribution, it is more suitable for dynamic measurement than the phase shift method.

**Key words** measurement; surface shape measurement; projected fringe; phase shift; fringe-based optical flow

**OCIS codes** 120.6650; 120.2650; 120.4630

## 1 引 言

三维面形测量在目标检测、产品检验、材料分析、生产制造、文物修复等领域具有广泛应用<sup>[1-8]</sup>。常用的结构光投影法具有非接触、高精度、实验系统简单的优点。根据测量系统的结构特点, 结构光投影法大体分为两类, 一类是倾斜投影, 即投影方向与观察方向之间成一定角度, 该类利用三角测量原理进行面形测量, 包括傅里叶变换轮廓术<sup>[9-11]</sup>、相位测量轮廓术<sup>[7, 12-13]</sup>、小波变换轮廓术<sup>[14]</sup>等; 另一类是垂

直投影, 即投影方向与观察方向在同一方向, 该类是基于调制度测量的面形测量技术, 如调制测量轮廓术<sup>[15-18]</sup>和基于条纹对比度分析的三维表面轮廓术<sup>[19]</sup>。基于倾斜投影的面形测量, 由于观察方向与投影方向存在角度, 在测量过程中可能会存在阴影、相位截断和空间不连续等问题。而垂直投影的面形测量技术, 在一定程度上解决了这些问题, 但是需要采集一系列的图像, 图像处理过程复杂。两类方法中也常用到传统的定量测量方法, 如相移法、傅里叶变换法、小波变换等。相移法一般需要采集多幅条

收稿日期: 2019-05-31; 修回日期: 2019-06-27; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(61975099, 11902317)、山东省自然科学基金(ZR201702090137)

\* E-mail: sunpingmail@163.com

纹图,进而计算出面形相位或条纹的调制度,虽然测量精度高,但测量时间较长,实现动态测量难度较大。傅里叶变换技术只需要采集两幅条纹图,具有测量速度快、适合动态测量等特点,需要将条纹图从空域变换到频域,存在频域滤波窗口选择、移频误差、频谱重叠或泄漏等问题。

光流法是用来描述观测目标相对观察者运动在像面所形成的表面或边缘的运动,主要用于运动分析,在跟踪、立体匹配、物体分类、刚体和弹性运动、流体传播、辅助驱动等领域有着广泛的应用<sup>[20-21]</sup>。运用光流法测量物体的面内位移比图像相关方法具有更高的测量精度<sup>[22-23]</sup>。条纹光流是组成条纹的像素点在像面内的平面运动,用于变形测量,能够高精度测量离面位移和物体的三维位移场<sup>[24-26]</sup>。目前还没有发现光流方法在面形测量方面的应用先例。

本文提出一种基于条纹光流的物体三维面形测量方法。投影仪将条纹图样以很小的角度投影到物体表面,CCD 摄像机采集放置物体前后两幅条纹图样,通过光流场的计算恢复物体三维面形信息。由于物面的调制,投影条纹发生微小的变形,形成变形条纹的光流场。本文给出光流场与物面高度分布和相位分布之间的理论关系,根据该理论关系进行数值模拟与实验验证。结果表明,光流法能够测量复杂的面形,且对投影条纹图样没有严格要求。由于是近似垂直照明,因此光流法能够避免倾斜投影存在的阴影和遮挡问题。与传统的相移法或傅里叶变换法相比,条纹光流法不需要采集多帧条纹图样,不需要将条纹图样转换到频域,仅用两帧条纹图像就可以恢复物体面形分布,计算简单。由于光流法本身含有时间因子,因此该方法很适合动态测量。

## 2 光流法测量原理

### 2.1 光流场计算的基本原理

令  $t$  时刻像面上的像素点  $A_i(x_i, y_i)$  处灰度值为  $I_i(x_i, y_i, t)$ ,  $x_i$  为像素点在  $x$  轴方向坐标,  $y_i$  为像素点在  $y$  轴方向坐标,下标  $i$  为像素点索引号。在  $t + \Delta t$  时刻该点运动到新的位置  $B_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i)$ , 灰度值记为  $I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$ ,  $\Delta x_i$  和  $\Delta y_i$  分别为像素点  $A_i(x_i, y_i)$  在  $\Delta t$  时间内在  $x$  轴方向和  $y$  轴方向上的位移分量。根据图像一致性假设,即图像沿着运动轨迹亮度保持不变,即  $I_i(x_i, y_i, t) = I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$ 。将  $I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$  进行泰勒展开,并忽略二阶以上的高次项,有

$$\frac{\partial I_i}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{\partial I_i}{\partial y_i} \Delta y_i + \frac{\partial I_i}{\partial t} \Delta t = 0. \quad (1)$$

两边同除以  $\Delta t$  后,得到

$$I_{ix}u + I_{iy}v + I_{it} = 0, \quad (2)$$

式中:  $u = \frac{\Delta x_i}{\Delta t}$ ,  $v = \frac{\Delta y_i}{\Delta t}$  为两帧图像之间的光流场,

即观察点  $(x_i, y_i)$  在  $x$  和  $y$  方向的速度分量;  $I_{ix}$ 、 $I_{iy}$  和  $I_{it}$  为图像  $I_i(x_i, y_i, t)$  分别对于  $x_i, y_i, t$  的偏导数,它们的值可用图像序列中相邻图像目标像素点的一阶差分估计得到。(2)式即为光流基本等式,由于只有一个方程,故需加入约束条件才能求解速度分量。根据约束条件可以将光流场的计算分为全局光流算法和局域光流算法。其中 Horn-Schunck (H-S) 算法<sup>[27]</sup> 和 Lucas-Kanade (L-K) 算法<sup>[28]</sup> 分别是典型的全局和局域光流算法。本文采用全局的 H-S 算法计算条纹图像的光流运动,基本思想是在求解光流时要求光流本身尽可能的平滑。所谓平滑,就是在给定的邻域内  $\nabla^2 u + \nabla^2 v$  尽可能小,即

$$\min \left\{ \left[ \frac{\partial u}{\partial x_i} \right]^2 + \left[ \frac{\partial u}{\partial y_i} \right]^2 + \left[ \frac{\partial v}{\partial x_i} \right]^2 + \left[ \frac{\partial v}{\partial y_i} \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

综合(2)式和(3)式, H-S 算法将光流  $(u, v)$  的计算归结为变分问题,即

$$\min \left\{ \iint \left\{ (I_{ix}u + I_{iy}v + I_{it})^2 + \alpha^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x_i} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y_i} \right)^2 \right] \right\} dx_i dy_i \right\}, \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为平滑参数,  $(I_{ix}u + I_{iy}v + I_{it})^2$  为构造能量函数。若要计算该能量函数的最小值,可以分别对  $u$  和  $v$  求导数,再令导数为 0,可得欧拉-拉格朗日方程,即

$$\begin{cases} I_{ix}^2 u + I_{ix} I_{iy} v = \alpha^2 \nabla^2 u - I_{ix} I_{it} \\ I_{iy}^2 v + I_{ix} I_{iy} u = \alpha^2 \nabla^2 v - I_{iy} I_{it} \end{cases} \quad (5)$$

再利用高斯-赛德尔方法进行求解,得到图像上每个位置的第  $(n+1)$  次迭代估计  $(u^{n+1}, v^{n+1})$ :

$$\begin{cases} u^{n+1} = u^n - \frac{I_{ix}(I_{ix}u^n + I_{iy}v^n + I_{it})}{\alpha^2 + I_{ix}^2 + I_{iy}^2} \\ v^{n+1} = v^n - \frac{I_{iy}(I_{ix}u^n + I_{iy}v^n + I_{it})}{\alpha^2 + I_{ix}^2 + I_{iy}^2} \end{cases}, \quad (6)$$

根据(6)式迭代所得到的  $u$  和  $v$ ,即为两帧图像之间的运动矢量场的分量。

### 2.2 光流法面形测量原理

图 1 为投影栅线法测量物体三维面形的常用光路设置,采用平行光轴非准直投影光路<sup>[29]</sup>,其中  $P$

为投影仪位置,  $O_c$  为 CCD 摄像机位置, 投影光轴  $PO$  与成像光轴  $OO_c$  之间的夹角为投影角  $\theta$ 。投影仪和 CCD 摄像机到参考平面  $xOy$  的距离为  $L$ , 投影仪和 CCD 摄像机之间距离为  $d$ 。  $M_c$  为摄像机的放大率,  $M_c = -f_c/L$ , 其中  $f_c$  为摄像机的像方焦距。投影仪将光栅条纹投影到参考平面  $xOy$  上, 放置物体后, 物面的栅线由于物面调制发生变形, 利用 CCD 摄像机采集变形前后的条纹图像。放置物体前, 参考平面上条纹图样光强分布为

$$I(x, y, t) = a + b \cos[2\pi(f_x x + f_y y)], \quad (7)$$

式中:  $a$  为背景光强,  $b$  为条纹对比度,  $f_x$  和  $f_y$  为  $(x, y)$  处的条纹频率。在  $t$  时刻, CCD 摄像机采集到的图像为

$$I_i(x_i, y_i, t) = a + b \cos[2\pi(f_{ix} x_i + f_{iy} y_i)], \quad (8)$$

式中:  $f_{ix}$ ,  $f_{iy}$  为记录图像的条纹频率,  $f_{ix} = f_x/M_c$ ,  $f_{iy} = f_y/M_c$ 。放置物体后,  $t + \Delta t$  时刻, 采集到的调制条纹图样的光强表达式为

$$I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t) = a + b \cdot \cos\{2\pi[f_{ix}(x_i + \Delta x_i) + f_{iy}(y_i + \Delta y_i)]\}. \quad (9)$$

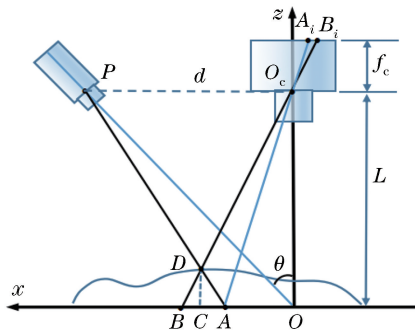


图 1 投影栅线法三维面形测量典型光路

Fig. 1 Typical light path for three-dimensional surface shape measurement using fringe-projection method

对于被测物体上高度为  $h$  的任意点  $D(x_c, y_c)$ , 其在参考平面上垂点为  $C(x_c, y_c)$ 。  $D$  点在参考面上的投影位置为  $A(x, y)$ 。在  $\Delta t$  内栅线变形后  $A$  点移动到  $B(x_B, y_B)$  点, 变形量  $\Delta x = x_B - x$ ,  $\Delta y = y_B - y$ 。对应 CCD 像面上的  $A_i(x_i, y_i)$  点和  $B_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i)$  点, 变形量为  $\Delta x_i, \Delta y_i$ 。像面变形与物面变形的关系为  $\Delta x_i = M_c \Delta x$ ,  $\Delta y_i = M_c \Delta y$ 。则变形条纹的光流, 即像面上观察点  $A_i(x_i, y_i)$  移动的速度分量为

$$u = \frac{\Delta x_i}{\Delta t} = M_c \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad v = \frac{\Delta y_i}{\Delta t} = M_c \frac{\Delta y}{\Delta t}. \quad (10)$$

若投影栅线垂直于投影仪与摄像机的连线, 与  $y$  轴平行。由几何关系知物体三维面形高度为<sup>[29]</sup>

$$h(x_c, y_c) = \frac{L \Delta x}{\Delta x + d} = \frac{u \Delta t}{u \Delta t / L + M_c \tan \theta}, \quad (11)$$

式中:  $x_c$  为物面上任意点  $D$  的  $x$  轴方向坐标,  $x_c = (1 + h/L)x$ ;  $y_c$  为  $D$  点的  $y$  轴方向坐标,  $y_c = (1 + h/L)y$ ,  $\tan \theta = d/L$ 。(11)式表明, 通过计算像面光流分量  $u$ , 可直接计算出物体的三维面形分布。

光流方法也能计算面形的相位分布。根据光流场基本等式(2)式, 将受调制后的光强  $I'_i(x_i + \Delta x_i, y_i + \Delta y_i, t + \Delta t)$  在  $(x_i, y_i)$  处进行泰勒级数展开并取一级近似, 可得到条纹光流相位等式<sup>[24]</sup>为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \cdot u + \frac{\partial \varphi}{\partial y_i} \cdot v + \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0, \quad (12)$$

式中:  $u = \frac{\Delta x_i}{\Delta t}$ ,  $v = \frac{\Delta y_i}{\Delta t}$  分别为像面上  $(x_i, y_i)$  处在  $x$  和  $y$  方向上的光流分量;  $\varphi$  为变形前第一帧图像的相位分布, 由于  $\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} = 2\pi f_{ix}$ ,  $\frac{\partial \varphi}{\partial y_i} = 2\pi f_{iy}$ , 则像面上相位变化的分布可表示为

$$\Delta \varphi = -2\pi(f_{ix} \cdot u + f_{iy} \cdot v) \Delta t. \quad (13)$$

可令(13)式中  $\Delta t = 1$ <sup>[24]</sup>。可见根据计算出像面上  $(x_i, y_i)$  处的光流速度分量  $(u, v)$  和条纹频率  $(f_{ix}, f_{iy})$ , 可得到像面上高度相位分布  $\Delta \varphi$ , 也就是物面的高度相位分布。像面上的条纹频率  $(f_{ix}, f_{iy})$  可采用窗口傅里叶变换方法求得<sup>[30-31]</sup>。

### 3 理论模拟

#### 3.1 利用平行投影条纹的光流面形测量模拟

模拟球冠作为被测物面, 物面大小为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ , 如图 2 所示。球半径为  $20 \text{ mm}$ , 球冠高度  $h_{\max}$  为  $10 \text{ mm}$ , 球冠高度表达式为

$$h(x, y) = -(R - h_{\max}) + \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}, \quad (14)$$

式中:  $R$  为球面半径。

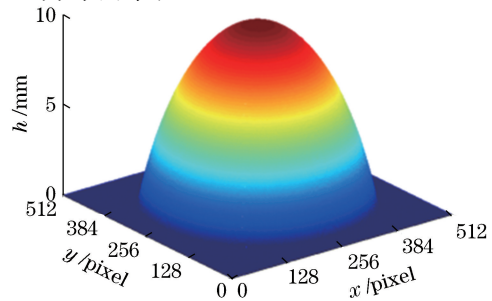


图 2 被测球冠

Fig. 2 Spherical crown to be measured

根据(7)式模拟生成  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  大小的平行条纹图样,如图 3(a)所示,作为参考面采集到的条纹图样,其中  $a=0, b=1, f_{ix}=0.4 \text{ mm}^{-1}, f_{iy}=0$ 。设置成像距离为  $1800 \text{ mm}$ ,投影角度  $\theta=\pi/80$ ,图像放大率  $M_c=-12.8 \text{ pixel} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。CCD 摄像机采集的放置物体后调制条纹如图 3(b)所示。

根据(6)式计算调制前后条纹(如图 3 所示)之间的光流场( $u, v$ ),由(11)式直接得到物体的高度分布,如图 4(a)所示。取图 2 和图 4(a)在  $y=256 \text{ pixel}$

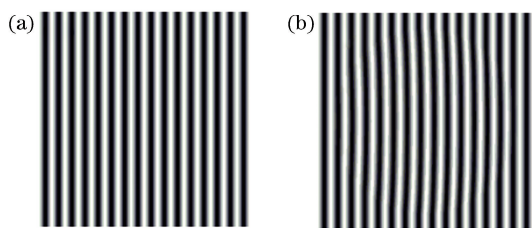


图 3 模拟的像面图样。(a)原始条纹;(b)调制后的条纹  
Fig. 3 Simulated fringe patterns. (a) Original fringes;  
(b) modulated fringes

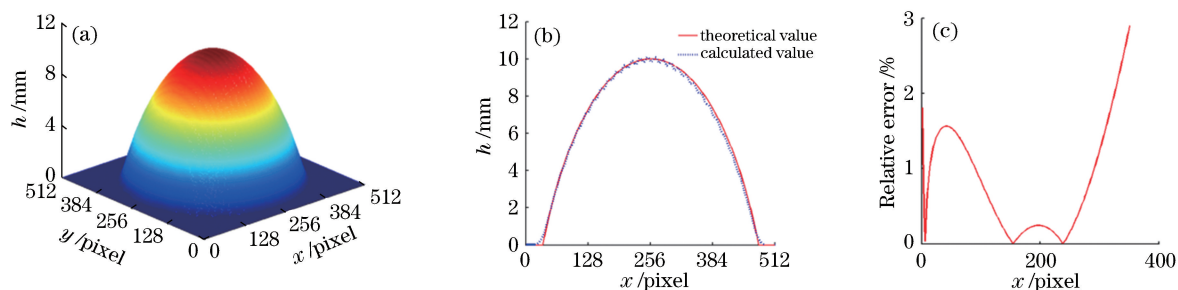


图 4 面形模拟计算结果。(a)计算值;(b)在  $y=256 \text{ pixel}$  截面上理论值与计算值的对比;  
(c)在  $y=256 \text{ pixel}$  截面上理论值与计算值的相对误差

Fig. 4 Results of surface simulation. (a) Calculated value; (b) comparison between theoretical and calculated values on cross section at  $y=256 \text{ pixel}$ ; (c) relative error between theoretical and calculated values on cross section at  $y=256 \text{ pixel}$

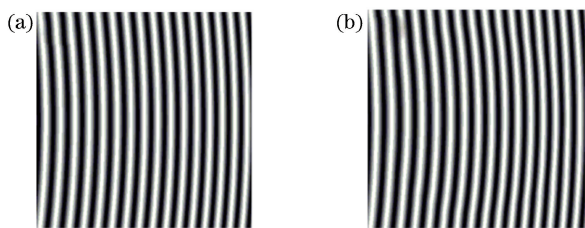


图 5 模拟的不规则条纹。(a)变形前条纹;  
(b)变形后调制条纹

Fig. 5 Simulated irregular fringe patterns. (a) Fringes before deformation; (b) fringes after deformation

## 4 实验验证

选用带有空洞的面具作为被测物体,进行光流法测量和相移法测量。通过对比,验证光流方法测量复杂面形的可行性和准确性。实验光路如图 1 所

横截面上的高度数据进行对比,如图 4(b)所示,可以看出,光流法的计算结果与实际值非常吻合,说明可用光流法测量三维物体面形。图 4(c)为物体高度计算值与理论值在  $y=256 \text{ pixel}$  横截面上的相对误差。在不考虑边缘效应的情况下,其相对误差小于  $3\%$ 。

### 3.2 不规则条纹的光流场模拟

将模拟产生的不规则条纹图样作为参考条纹,如图 5(a)所示,变形后条纹如图 5(b)所示。

为方便对比,对同一球冠进行测量,光流法计算结果如图 6(a)所示。图 6(b)为在  $y=256 \text{ pixel}$  横截面上的计算值和理论值的对比。可以看出,两者吻合得很好。说明光流法不局限于平行投影条纹,不规则投影条纹也可用于测量物体三维面形。其计算值与理论值在  $y=256 \text{ pixel}$  横截面上的相对误差分布如图 6(c)所示。在不考虑边缘效应的情况下,其相对误差均小于  $3.5\%$ 。

示,实验中采用远距离投影光路,从而实现平行光轴投影。光流法测量时要求两幅条纹之间发生微小变形,因此投影时的投影角度为小角度或者被测物体为小物体。实验中成像距离为  $1830 \text{ mm}$ ,CCD 摄像机与投影仪之间距离为  $95 \text{ mm}$ ,被测物体高度为  $60 \text{ mm}$ 。

首先,运用相移法对面具面形进行测量。模拟生成相移量分别为  $0, \pi/2, \pi$  和  $3\pi/2$  四幅条纹图样,其中,条纹变形前后相移量为  $0$  的二帧图像如图 7(a)和图 7(b)所示。将 4 幅条纹图分别投影,CCD 摄像机分别采集经物体表面调制前后的条纹图样。运用四步相移算法得到相位分布。由于四步相移法需要 4 幅具有相移的条纹图像,在空洞区域中 4 幅条纹图像分别对应不同位置,在空洞边缘容易引入噪声,需要进行阈值滤波,滤波后相位分布如图



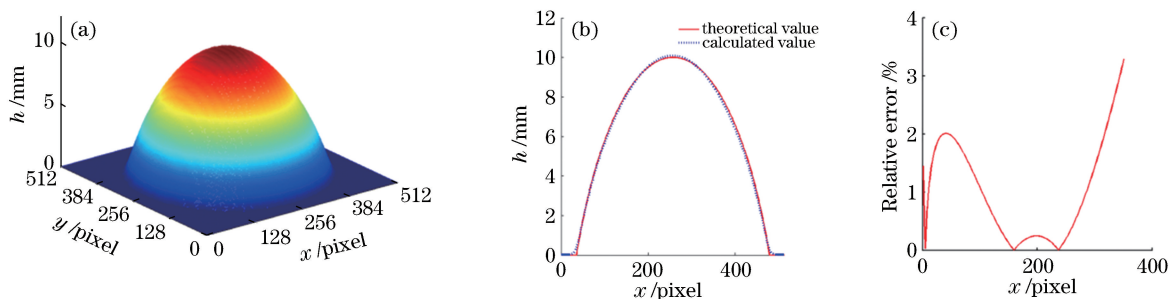


图 6 不规则投影光流法测量结果。(a)计算得到的面形分布;(b)  $y=256$  pixel 横截面上理论值与计算值的对比;  
(c)  $y=256$  pixel 横截面上理论值与计算值的相对误差

Fig. 6 Results of optical flow method using irregular fringe patterns. (a) Calculated surface shape distribution; (b) comparison between theoretical and calculated values on the cross section at  $y=256$  pixel; (c) relative error between theoretical and calculated values on cross section at  $y=256$  pixel

8(a)所示。对采集的图像中选取相移量为 0 的二帧图像运用光流法计算面形相位分布,根据(13)式得到被测面具的相位分布,如图 8(b)所示。

相移法和光流法所得面形的三维相位分布如图 9(a)和图 9(b)所示。取  $y=290$  pixel 横截面(通过

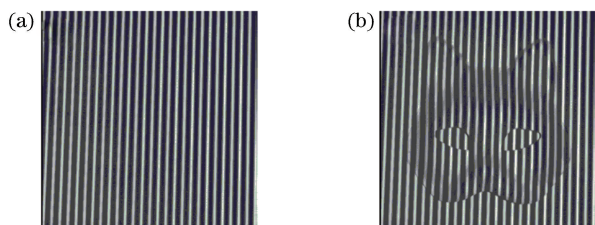


图 7 实验条纹。(a)调制前条纹图;(b)调制后条纹图  
Fig. 7 Fringes in experiment. (a) Fringes before modulation; (b) fringes after modulation

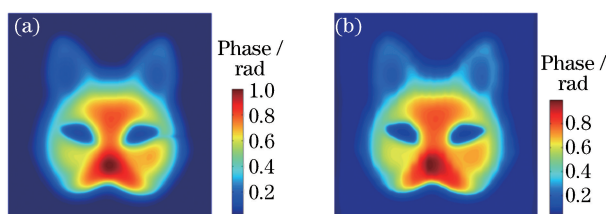


图 8 面具相位分布。(a)相移法;(b)光流法

Fig. 8 Phase distributions of mask. (a) Phase shift method; (b) optical flow method

面具眼睛的空洞区域)的数据作对比,如图 9(c)所示,说明相移法和光流法均可很好地恢复面形分布。从实验过程和测量结果可以看出,光流法仅需二幅图像,不受空洞噪声影响,在同等测量条件下具有可和相移法比拟的准确度。

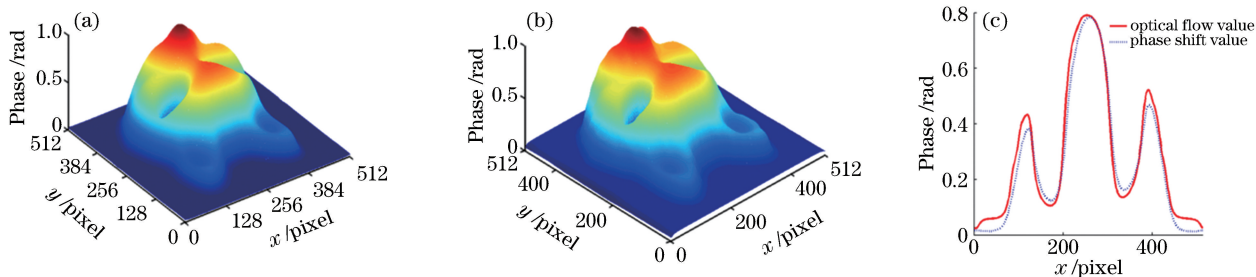


图 9 面具三维面形相位分布。(a)相移法;(b)光流法;(c)相移法与光流法所得结果在  $y=290$  pixel 横截面对比  
Fig. 9 Three-dimensional phase distributions of surface shape of mask. (a) Phase shift method; (b) optical flow method; (c) comparison of results calculated by phase shift method and optical flow method on cross-section at  $y=290$  pixel

## 5 结 论

提出一种基于条纹光流的物体面形测量新方法,该方法仅需两幅条纹图即可恢复面形高度分布或相位分布。计算高度分布时,不需要相位到高度的转换,通过计算光流直接得到高度分布,计算简单,无需其他操作。由于测量系统采用远距离、小角

度投影,避免了阴影和遮挡问题。模拟和实验结果表明,光流法能够测量三维面形高度分布,对投影条纹没有严格的限制。模拟结果显示,面形测量的相对误差小于 3.5%。由于光流法本身含有时间因子,仅需两幅条纹图像即可得出物体面形,因此该方法很适合动态测量。本文没有讨论背景光和调制度对测量结果的影响,该部分内容还需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Mao C L, Lu R S, Dong J T, *et al.* Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(5): 628-640.  
毛翠丽, 卢荣胜, 董敬涛, 等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. *计量学报*, 2018, 39(5): 628-640.
- [2] Spagnolo G S, Ambrosini D, Paoletti D. Low-cost optoelectronic system for three-dimensional artwork texture measurement [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(3): 390-396.
- [3] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 133-140.
- [4] Hui T W, Pang G K H. Solder paste inspection using region-based defect detection [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 42(7/8): 725-734.
- [5] Feng S J, Zhang L, Zuo C, *et al.* High dynamic range 3D measurements with fringe projection profilometry: a review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(12): 122001.
- [6] Zhang X L, Ouyang Q, Peng S, *et al.* Continuous casting slab surface crack depth measurement using sinusoidal phase grating method[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2014, 41(5): 387-393.
- [7] Zhang S. Absolute phase retrieval methods for digital fringe projection profilometry: a review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 28-37.
- [8] Ling Q Y, Hu C G, Zha R D, *et al.* Shape measurement based on deformation of two-dimensional optical lattice [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0112003.  
凌秋雨, 胡春光, 查日东, 等. 基于二维光学点阵形变的面形测量 [J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0112003.
- [9] Song K C, Hu S P, Wen X, *et al.* Fast 3D shape measurement using Fourier transform profilometry without phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 84: 74-81.
- [10] Yun H, Li B W, Zhang S. Pixel-by-pixel absolute three-dimensional shape measurement with modified Fourier transform profilometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(5): 1472-1480.
- [11] Zuo C, Tao T Y, Feng S J, *et al.* Micro Fourier Transform Profilometry ( $\mu$ FTP): 3D shape measurement at 10,000 frames per second[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 70-91.
- [12] Xing S, Guo H W. Directly recognizing and removing the projector nonlinearity errors from a phase map in phase-shifting fringe projection profilometry [J]. *Optics Communications*, 2019, 435: 212-220.
- [13] Du G L, Zhang C R, Zhou C L, *et al.* Iterative two-step temporal phase-unwrapping applied to high sensitivity three-dimensional profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 79: 22-28.
- [14] Zhong K, Li Z W, Shi Y S, *et al.* Fast phase measurement profilometry for arbitrary shape objects without phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(11): 1213-1222.
- [15] Zhong M, Chen F, Xiao C, *et al.* Noise reduction in modulation measurement profilometry based on the wavelet transform method[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(5): 054102.
- [16] Zhong M, Chen F, Xiao C, *et al.* Elimination of nonlinearity in modulation measurement profilometry by Wavelet Transform[J]. *Optik*, 2018, 168: 488-502.
- [17] Zhong M, Chen F, Xiao C, *et al.* 3-D surface profilometry based on modulation measurement by applying wavelet transform method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 88: 243-254.
- [18] Dou Y F, Su X Y, Chen Y F, *et al.* A flexible fast 3D profilometry based on modulation measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(3): 376-383.
- [19] Dou Y F, Su X Y. A flexible 3D profilometry based on fringe contrast analysis [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(4): 844-849.
- [20] Song S, Yang J, Wang Y T. Technology and prospect of global optical flow [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2014, 26(5): 841-850.  
宋爽, 杨健, 王涌天. 全局光流场估计技术及展望 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2014, 26(5): 841-850.
- [21] Li Q H, Li A H, Wang T, *et al.* Double-stream convolutional networks with sequential optical flow image for action recognition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0615002.  
李庆辉, 李艾华, 王涛, 等. 结合有序光流图和双流卷积网络的行为识别 [J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0615002.
- [22] Hartmann C, Wang J, Opristescu D, *et al.* Implementation and evaluation of optical flow methods for two-dimensional deformation measurement in comparison to digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 107: 127-141.
- [23] Feng W, Jin Y, Liu W L. Displacement field

- determination using an iterative optical flow strategy [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(7): 075402.
- [24] Zhao R, Sun P. Deformation-phase measurement by optical flow method [J]. Optics Communications, 2016, 371: 144-149.
- [25] Zhao R, Sun P. Deformation-phase measurement by digital speckle correlation method [J]. Applied Physics B, 2016, 122(10): 251.
- [26] Xiao F, Zhao R, Sun P. Three-dimensional displacement measurement based on the combination of digital image correlation and optical flow [J]. Applied Optics, 2016, 55(29): 8207-8212.
- [27] Horn B K P, Schunck B G. Determining optical flow [J]. Artificial Intelligence, 1981, 17(1/2/3): 185-203.
- [28] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]//Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 24-28, 1981, Vancouver, British Columbia, Canada. New York: IEEE, 1981: 674-679.
- [29] Maurel A, Cobelli P, Pagneux V, *et al.* Experimental and theoretical inspection of the phase-to-height relation in Fourier transform profilometry [J]. Applied Optics, 2009, 48(2): 380-392.
- [30] Qian K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. Applied Optics, 2004, 43(13): 2695-2702.
- [31] Zhao R, Li X L, Sun P. An improved windowed Fourier transform filter algorithm [J]. Optics & Laser Technology, 2015, 74: 103-107.