

一种无需滤波的复合光栅投影的在线三维测量方法

彭旷^{1**}, 曹益平^{2*}, 武迎春³

¹湖北大学物理与电子科学学院, 铁电压电材料与器件湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;

²四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064;

³太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024

摘要 针对流水线上在线运动的刚性物体, 投影复合光栅可以解决像素匹配和相位展开对条纹频率不同需求的矛盾, 但在相位计算时, 需对复合光栅进行滤波, 该过程会降低重构精度。基于 Stoilov 算法, 提出一种无需滤波的复合光栅投影的在线三维测量方法, 设计复合条纹使低频条纹相移方向与被测物体的运动方向平行, 像素匹配后被测物体的运动被转化为低频条纹的相移; 高频条纹相移方向与被测物体运动方向垂直, 像素匹配后各帧变形条纹图中高频条纹的光强分布完全一致, 可直接进行相位计算, 避开了因滤波造成的精度损失。同时在复合光栅中高频条纹的强度远低于低频条纹, 故可将其看作微弱的背景光, 保证了在线三维测量的精度。通过仿真与实验验证了该方法的有效性。

关键词 测量; 像素匹配; Stoilov 算法; 复合条纹

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1112003

An On-Line Three-Dimensional Measurement Method of Composite Grating Projection Without Filtering

Peng Kuang^{1**}, Cao Yiping^{2*}, Wu Yingchun³

¹ Hubei Provincial Key Laboratory of Ferro & Piezoelectric Materials and Devices, Faculty of Physics & Electronic Sciences, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China;

² Department of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China;

³ School of Electronic and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract For rigid objects moving on-line on the pipeline, the projection composite grating can solve the contradiction between different frequency requirements for pixel matching and phase unwrapping. However, when the phase is calculated, it is necessary to filter the composite grating, which will reduce the reconstruction accuracy. Based on Stoilov algorithm, an on-line three-dimensional(3D) measurement method of composite grating projection without filtering is proposed. By the design of the composite fringe, the phase shift direction of the low-frequency fringe is parallel to the moving direction of the measured object, and the motion of the measured object after pixel matching is converted into the phase shift of the low-frequency fringe. The phase shift direction of the high-frequency fringe is perpendicular to the moving direction of the measured object, and the light intensity distribution of the high-frequency fringe in each frame deformed fringe pattern after pixel matching is exactly the same. Therefore, the phase calculation can be performed directly, and the loss of accuracy is avoided due to filtering. Meanwhile, the intensity of the high-frequency fringe in the composite grating is much lower than that of the low-frequency component, so the high-frequency fringe can be regarded as a weak background light. The accuracy of on-line 3D measurement is guaranteed. Simulations and experiments prove the proposed method's validity.

Key words measurement; pixel matching; Stoilov algorithm; composite fringe

OCIS codes 120.2830; 120.5050; 120.5060

收稿日期: 2018-04-09; **修回日期:** 2018-06-11; **录用日期:** 2018-06-19

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)、国家自然科学基金青年基金(61601318)、山西省应用基础研究项目青年科技研究基金(201601D021078)

* **E-mail:** ypcao@scu.edu.cn; ** **E-mail:** pengkuang91@163.com

1 引 言

相位测量轮廓术(PMP)^[1-5] 由于具有采集数据量大、精度高、非接触等特点,是光学三维(3D)测量手段中被广泛研究和使用的—种方法,通过投影和采集多帧条纹图即可恢复出被测物体的三维面型。随着工业的发展和应用场合的增多,测量三维形貌的需求日益增加,测量的对象也从静态物体延伸至动态物体。根据动态物体的运动特点,可分为实时三维测量和在线三维测量。实时三维测量可视为各个时刻对不同物体的测量,需要增加投影仪的投影和电荷耦合器件(CCD)的采集速率,只有使所采集到的多帧变形条纹图中被测物体的变化小于1个像素点,才能实时恢复出被测物体的面型,才能对刚性物体和非刚性物体进行测量,硬件要求较高^[6-8]。随着现代工业的发展,流水线生产的应用范围越来越广,对流水线上运载的物件进行在线测量,是对动态物体进行三维测量的发展方向。由于流水线上运动的物体是刚性物体,基于其形貌不发生变化的特点,不同时刻对同一物体进行测量时,可以采用像素匹配技术,在无须提升硬件的情况下使用 PMP 重构出被测物体的三维面型^[9-12]。

在线三维测量重构被测物体的过程中,相位能否正确地进行空间相位展开,与正弦条纹的频率高低密切相关。当频率过高时,可能因被测物体高度变化过快而导致相位展开错误;当频率过低时,求得的截断相位可以正确地进行展开,但是此时由于各帧变形条纹图频谱中零频分量和基频分量距离较小,频谱混叠现象将会增多,得到的调制度图像质量将会降低,进而影响像素匹配精度。为了解决相位展开和像素匹配对条纹频率不同需求的矛盾,可以采用复合光栅进行在线三维测量,低频条纹用于相位计算,高频条纹用于像素匹配,但在相位计算时又需要对低频条纹进行滤波,滤波过程会丢失部分被测物体的有效信息,降低三维重构精度^[13-14]。为了避免滤波造成的精度损失,武迎春等^[15]提出了一种基于满周期等相移算法的正交双频光栅,虽然在解相过程中没有对双频条纹进行滤波,但由于高频条纹在各帧变形条纹图中的光强分布并不一致,给三维重构精度引入了误差。

基于 Stoilov 算法^[3,10,16],通过调整系统结构,本文提出了一种无需滤波的复合光栅投影在线三维测量方法。本方法中使用了一种复合光栅,高频条纹用于像素匹配,相移方向与被测物体运动方向垂

直;低频条纹用于相位计算,相移方向与被测物体运动方向平行。CCD采集到多帧变形复合双频条纹图后,滤出高频条纹+1级频谱分量得到调制度图像并进行像素匹配,低频条纹用于计算相位。根据数字光处理器(DLP)与运动的被测物体摆放的相对位置,高频条纹由于相移方向与被测物体运动方向垂直,其在像素匹配后各帧复合双频变形条纹图中的光强分布完全一致,不会对相位计算造成影响,可直接利用 Stoilov 算法进行解相,由于不必对低频条纹进行滤波,避免了滤波过程造成的精度损失。同时在设计双频光栅的过程中,低频分量的光强要远远大于高频分量,可将用于像素匹配的高频分量看作微弱的背景光,进一步保证高频分量不会对重构精度造成影响。

2 测量原理

为了解决相位计算和像素匹配对条纹频率需求不同的矛盾,设计出一种与被测物体运动方向平行相移的复合双频条纹图,其透过率表示为

$$I_T(x_T, y_T) = I_{TL}(x_T, y_T) + I_{TH}(x_T, y_T) = a + b\cos(2\pi f_L x_T) + c + d\cos(2\pi f_H y_T), \quad (1)$$

式中: (x_T, y_T) 为数字光栅图的像素点坐标; $I_{TL}(x_T, y_T)$ 为低频条纹分布,频率为 f_L ,相移沿 x 坐标轴方向, a, b 为其背景光强度和条纹对比度,且 $a \geq b$; $I_{TH}(x_T, y_T)$ 为高频条纹分布,频率为 f_H , $f_H > f_L$,相移沿 y 坐标轴方向, c, d 为其背景光强度和条纹对比度,且 $c \geq d$ 。同时, $a \gg c, b \gg d$,可将用于像素匹配的高频分量看作背景光,保证高频分量不会影响重构精度。由于利用 Stoilov 算法进行解相,DLP 只须投影—帧复合双频条纹图。

基于 Stoilov 算法的在线三维测量系统光路结构图如图1所示,其中 AC 为 CCD 的光轴,BC 为 DLP

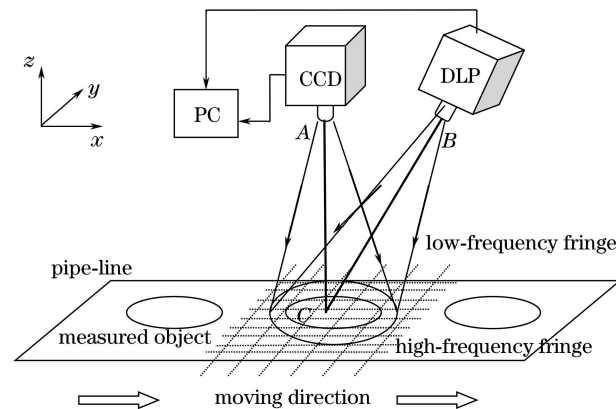


图1 基于 Stoilov 算法的在线三维测量系统
Fig. 1 Online 3D measurement system based on Stoilov algorithm

的光轴,点 C 为被测物体在 y 轴方向的中心对称点,仔细调整 DLP、CCD 和被测物体的相对位置关系,使 AC 和 BC 都位于 xz 平面内,以保证所投影的高频条纹相移方向与被测物体运动方向垂直^[17-18]。被测物

体随传送带沿 x 轴方向运动,DLP 对条纹图进行投影,每当被测物体移动固定间距 Δx 时,控制计算机(PC)让 CCD 进行采集,所采集到的包含被测物体高度调制信息的 5 帧复合变形条纹图表示为

$$I_n(x, y) = R_n(x, y)[I_{L_n}(x, y) + I_H(x, y)], \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} I_{L_n}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[2\pi f_L x + \varphi_n(x, y)] \\ I_H(x, y) = C(x, y) + D(x, y)\cos(2\pi f_H y) \end{cases}, \quad (3)$$

其中: (x, y) 为 CCD 坐标系中的像素点坐标; $R_n(x, y)$ 为被测物体表面反射率分布; $I_{L_n}(x, y)$ 、 $I_H(x, y)$ 分别为复合双频变形条纹图中的低频条纹和低频条纹; $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 分别为低频条纹的背景光强分布和条纹对比度; $C(x, y)$ 、 $D(x, y)$ 分别为高频条纹的背景光强分布和条纹对比度; $\varphi_n(x, y)$ 为低频条纹因被测物体高度调制而产生的相位变化,因为被测物体是不断运动的,所以在各帧变形条纹图中反射率分布及被测物体对低频条纹进行调制的区域也各不相同,用下标 n 加以区分。

由于被测物体的在线运动导致采集到的各帧变形条纹图中被测物体的位置各不相同,需要基于高频条纹进行像素匹配,像素匹配可以得到像素点完全对应的变形条纹图。由于高频条纹的相移方向与被测物体的运动方向垂直,根据 DLP 与运动被测物体摆放的相对位置可知,被测物体高度不对其产生相位调制,高频条纹在 5 帧像素匹配后的变形条纹图中光强分布完全一致,可以直接用匹配后的复合双频变形条纹图进行相位计算,不必提取其中的低频分量,避免了滤波过程中有效信息的丢失,提高了三维重构的精度。

2.1 基于整体调制度的像素匹配

对(2)式所示的各帧复合双频变形条纹图两边进行傅里叶变换可得

$$\begin{aligned} G_n(\xi, \eta) = & B_n(\xi, \eta) + P_n(\xi - f_L, \eta) + \\ & P_n^*(\xi + f_L, \eta) + Q_n(\xi, \eta - f_H) + \\ & Q_n^*(\xi, \eta + f_H), \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $G_n(\xi, \eta)$ 、 $B_n(\xi, \eta)$ 、 $P_n(\xi, \eta) + P_n^*(\xi, \eta)$ 和 $Q_n(\xi, \eta) + Q_n^*(\xi, \eta)$ 分别为 $I_n(x, y)$ 、 $R_n(x, y) \cdot [A(x, y) + C(x, y)]$ 、 $\frac{1}{2}R_n(x, y) \cdot B(x, y) \cdot \exp[-j \cdot \varphi_n(x, y)]$ 、 $\frac{1}{2}R_n(x, y) \cdot D(x, y)$ 的傅里叶频谱。

由于高频条纹+1级频谱区域离零频频谱区域较远,频谱混叠较少,在滤波窗类型和参数的选择上没有太多的限制,选用高斯滤波窗,将(4)式中复合双频变形条纹图高频条纹的+1级频谱 $Q_n(\xi, \eta - f_H)$ 滤出后,对其进行逆傅里叶变换、取模,可得到 5 帧变形条纹图对应的调制度图像,公式表示为

$$\begin{aligned} M_n(x, y) = & \frac{1}{2}R_n(x, y) \cdot D(x, y), \\ & n = 1, 2, 3, 4, 5. \end{aligned} \quad (5)$$

在第一帧调制度图像中截取被测物体的整体调制度图像 $T(x, y)$ ($m \times n$ 像素)作为像素匹配模板,与其他各帧调制度图像中每一块与 $T(x, y)$ 尺寸相同的矩形区域 $F^{(i,j)}(x, y)$ 进行相关运算,其中

$$\eta = \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n F^{(i,j)}(x, y) T(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F^{(i,j)}(x, y)]^2} \sqrt{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [T(x, y)]^2}}, \quad (6)$$

式中: i, j 为该矩形区域左上角的像素点坐标; η 为相关系数,当相关系数的值最大时,则找到了在各帧调制度图像中与匹配模板 $T(x, y)$ 对应的目标区域,进而得到被测物体在各帧复合双频变形条纹图中的位移 Δx 。将各帧变形条纹图沿着被测物体运动的方向移动 $(n-1) \cdot \Delta x$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 位移后,截取像素点完全对应的复合双频变形条纹图,完成像素匹配。

2.2 基于 Stoilov 算法的相位计算

像素匹配后得到的像素点一一对应的复合双频变形条纹图 $I'_n(x, y)$ 可表示为

$$\begin{aligned} I'_n(x, y) = & R'(x, y)[I'_{L_n}(x, y) + I'_H(x, y)], \\ & n = 1, 2, 3, 4, 5, \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\begin{cases} I'_{L_n}(x, y) = A'(x, y) + B'(x, y) \cos[2\pi f_L x + \varphi'(x, y) + (n-1)\delta_L] \\ I'_{H}(x, y) = C'(x, y) + D'(x, y) \cos(2\pi f_H y) \end{cases}, \quad (8)$$

$$\delta_L = \Delta x \cdot 2\pi/P, \quad (9)$$

其中: δ_L 为被测物体的运动距离转化为低频条纹的等效相移, P 为一个低频条纹周期对应参考平面上的距离大小。由于被测物体在像素匹配后的各帧变形条纹图中的位置完全相同, 所以可以省去下角标 n , 将对被测物体的在线三维测量转化为对被测物体的静态三维测量, 被测物体的运动距离被转化为低频条纹的等效相移。

由于高频条纹相移方向与被测物体运动方向垂

直, 根据 DLP 与运动的被测物体摆放的相对位置可知, 被测物体的高度不对其产生相位调制, 又因高频条纹在像素匹配后各帧变形条纹图中与被测物体的相对位置保持不变, 故光强分布完全相同。Stoilov 算法是一种点对点解相的算法, 要求多帧变形条纹图间的相移大小相等, 像素匹配将被测物体在各帧变形条纹图中的等距离运动转换为等效的相移, 因此可以直接使用像素匹配后的复合双频变形条纹图 $I'_n(x, y)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) 进行相位计算^[3, 10, 16] :

$$\varphi'_w(x, y) = \arctan\left\{\frac{2[I'_2(x, y) - I'_4(x, y)]}{2I'_3(x, y) - I'_1(x, y) - I'_5(x, y)} \cdot \sin \delta\right\}, \quad (10)$$

式中

$$\sin \delta = \sqrt{1 - \left[\frac{I'_1(x, y) - I'_5(x, y)}{2[I'_2(x, y) - I'_4(x, y)]}\right]^2}. \quad (11)$$

由于在相位计算过程中直接利用复合双频变形条纹图进行解相, 不必使用滤波窗滤出其低频分量, 避免了滤波过程中有效信息的丢失, 可以改善被测物体的重构质量, 提高在线三维测量精度。最后再依次通过相位展开和相位高度映射, 可恢复出被测物体的三维轮廓信息^[10-12, 19-20]。

3 数据仿真

为了验证本文提出的方法的有效性, 对一个椭圆碗底形状的物体进行计算机数值仿真, 该被测物体如图 2(a) 所示, 其长轴沿 y 轴方向, 长度为 180 个像素点, 短轴沿 x 轴方向, 长度为 130 个像素点。被测物体和参考平面的反射率分布如图 2(b) 所示, 在该物体沿着 x 轴方向运动过程中, 加入 1% 的随机噪声后, 由 CCD 采集到的 5 帧复合双频变形条纹图中的前两帧图像 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$ 分别如图 2(c) 和图 2(d) 所示, 高频条纹周期选取为 8 个像素点, 使其频谱区域远离零频区域, 相移方向沿 y 轴方向, 与被测物体运动方向垂直, 根据 DLP 与运动的被测物体摆放的相对位置, 被测物体高度不会对其相位进行调制, 不使其发生形变。根据被测物体的形貌变化特点, 为保证可以正确地进行相位展开, 低频条纹周期选取为 32 个像素点, 相移方向沿 x 轴方向, 与被测物体运动方向平行, 被测物体的高度会对其相位进行调制, 使其产生形变。

对第一帧复合双频变形条纹图进行傅里叶变换后得到的频谱分布图如图 3(a) 所示, y 坐标轴红色虚线边框内为高频条纹的 +1 级频谱区域。使用高斯滤波窗对其进行滤波, 高斯滤波窗的高斯分布参数 σ 大小为零频频谱区域到高频条纹 +1 级频谱区域距离的 1/9, 滤出后的频谱分布如图 3(b) 所示, 依次对其进行逆傅里叶变换和取模后, 得到如图 3(c) 所示的第一帧复合双频变形条纹图对应的调制度图像 $M_1(x, y)$, 截取被测物体的整体调制度作为匹配模板, 与各帧调制度图像 $M_n(x, y)$ ($n=2, 3, 4, 5$) 进行相关运算, 即可求得被测物体在相邻两帧复合双频变形条纹图中运动的距离 Δx , 完成像素匹配。

像素匹配后像素点完全对应的第一帧和第二帧复合双频变形条纹图 $I'_1(x, y)$ 和 $I'_2(x, y)$ 分别如图 4(a) 和图 4(b) 所示。依次使用 Stoilov 算法进行相位计算, 菱形算法进行相位展开, 可以得到包含被测物体物面信息的连续相位分布, 利用同样方法求出参考平面的连续相位分布后, 对其相减并进行相位高度映射, 可得到如图 4(c) 所示的重构的被测物体。图 4(d) 为被测物体与重构被测物体相减得到的误差分布, 最大误差高度不大于 0.365 mm, 误差均方根 (RMS) 为 0.057 mm, 可见重构精度较高。图 4(e) 和图 4(f) 分别为被测物体与重构被测物体在第 250 行和第 250 列的截图对比, 蓝色实线代表被测物体, 红色虚线代表重构的被测物体, 两条线段在两幅图中都基本重合, 可见三维测量结果较好。数值仿真结果证明了该方法的有效性。

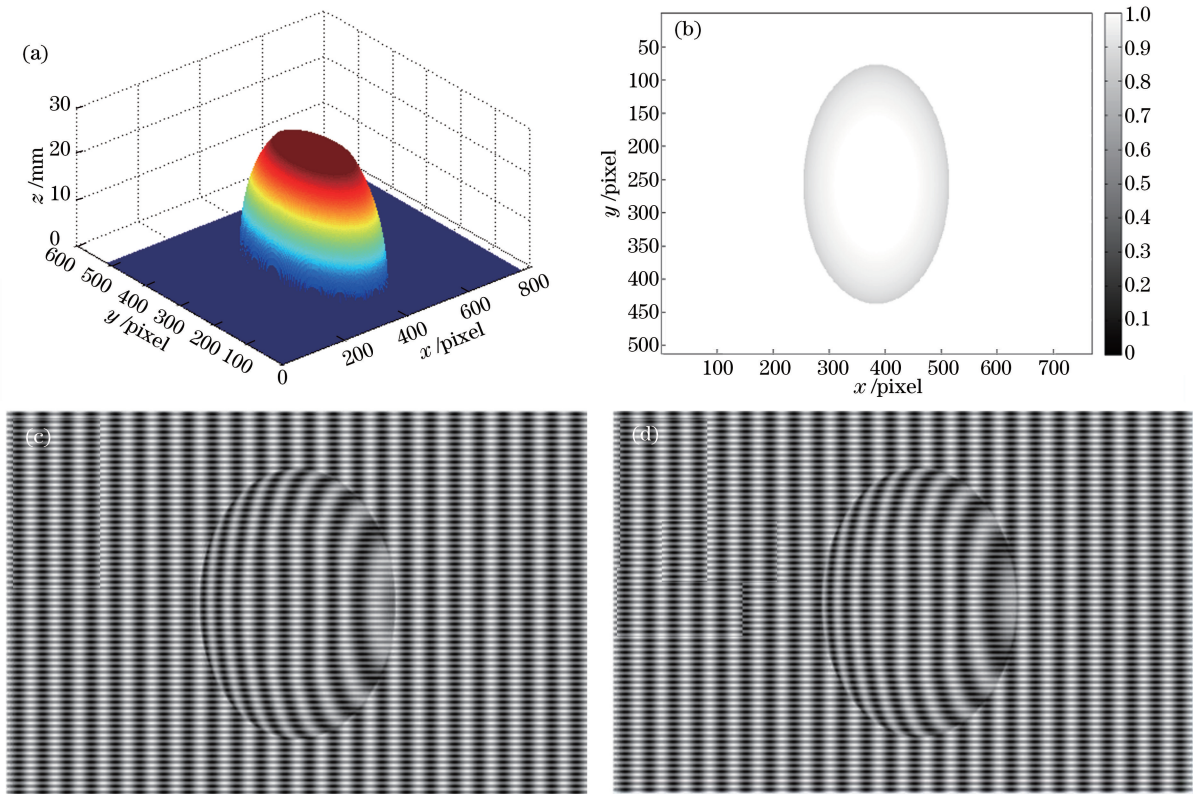


图 2 仿真原始数据。(a)被测物体；(b)反射率分布；(c)第一帧变形条纹图 $I_1(x,y)$ ；(d)第二帧变形条纹图 $I_2(x,y)$
 Fig. 2 Original simulation data. (a) Measured object; (b) reflectance distribution; (c) the first deformed pattern $I_1(x,y)$;
 (d) the second deformed pattern $I_2(x,y)$

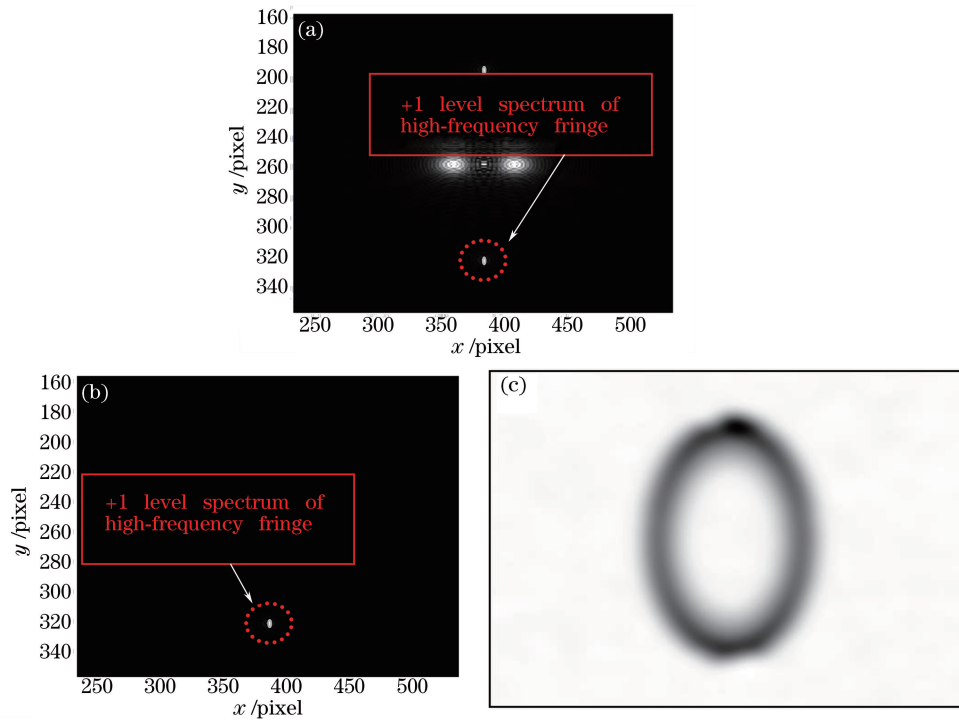


图 3 仿真调制图像提取。(a)复合双频变形条纹图频谱分布；(b)滤波后高频条纹+1级频谱区域；(c)调制图像
 Fig. 3 Extraction of the modulation patterns in the simulation. (a)Spectrum distribution of the composite dual-frequency
 deformed pattern; (b) area of the positive first-level frequency spectrum after filtering; (c) modulation pattern

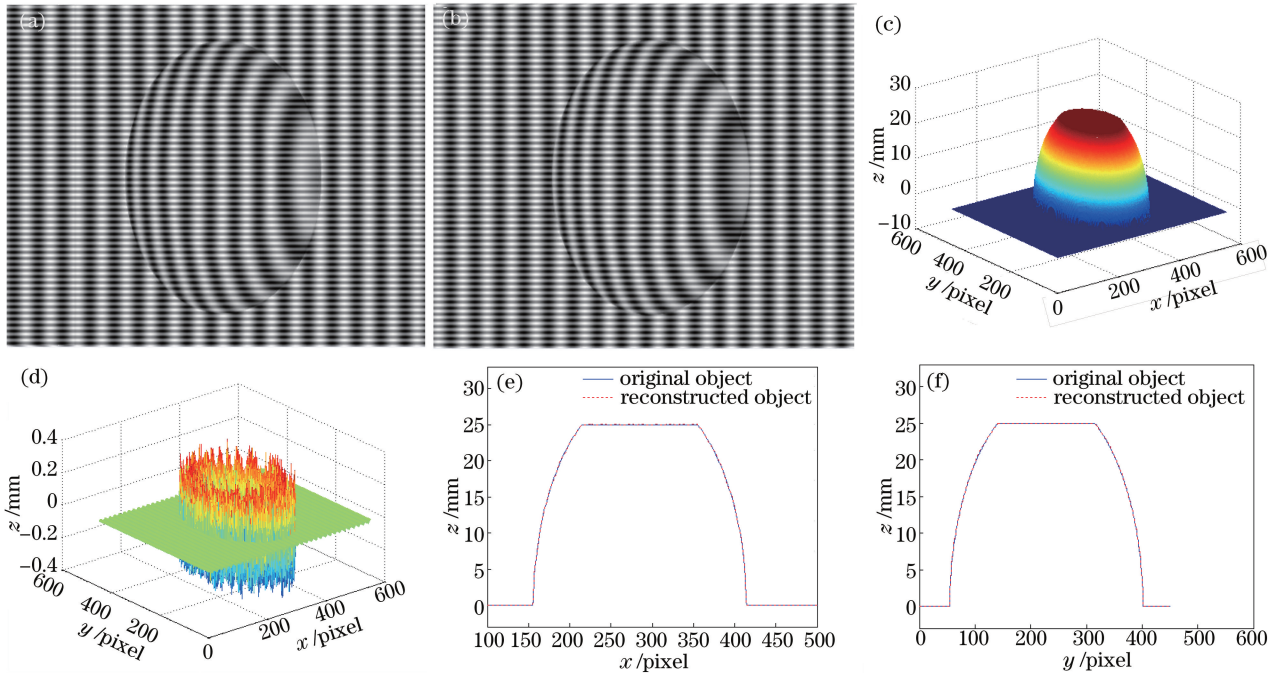


图 4 仿真像素匹配后直接进行相位计算。(a)匹配后第一帧复合双频变形条纹图 $I'_1(x,y)$;(b)匹配后第二帧复合双频变形条纹图 $I'_2(x,y)$;(c)重构的被测物体;(d)误差分布;(e)被测物体与重构被测物体第 250 行的截图;(f)被测物体与重构被测物体第 250 列的截图

Fig. 4 Phase calculation directly after pixel matching in the simulation. (a) The first composite dual-frequency deformed pattern $I'_1(x,y)$ after pixel matching; (b) the second composite dual-frequency deformed pattern $I'_2(x,y)$ after pixel matching; (c) reconstructed object; (d) error distribution; (e) section cross at $x=250$ for the measured object and the reconstructed object; (f) section cross at $y=250$ for the measured object and the reconstructed object

为了验证本文提出的方法可避免因滤波导致的误差,提升重构精度,对滤出低频分量进行相位计算的方法进行数值仿真,如图 5 所示。图 5(a)为像素匹配后第一帧复合双频变形条纹图 $I'_1(x,y)$ 的傅里叶频谱分布,其中红色边框区域为低频分量频谱区域,其携带了被物体高度调制的相位信息。选用高斯滤波窗滤出低频分量频谱区域后的频谱图如图 5(b)所示,对其进行傅里叶逆变换,可得到如图 5(c)所示的像素匹配后的第一帧低频分量变形条纹图 $I'_{FL1}(x,y)$,图 5(d)为利用同样的方法得到的第二帧低频分量变形条纹图 $I'_{FL2}(x,y)$ 。使用各帧低频分量变形条纹图重构出的被测物体如图 5(e)所示。图 5(f)为被测物体与重构被测物体高度相减得到的误差分布图,可见,在重构被测物体边缘区域误差相对较大,误差的均方根为 0.369 mm,大于采用本文方法所重构被测物体的误差均方根 0.057 mm。图 5(g)和图 5(h)分别为被测物体与重构被测物体在第 250 行和第 250 列的截图对比,蓝色实线代表被测物体,红色虚线代表重构的被测物体,两条线段误差较大的区域为图中虚线边框内的区域。以上结果表明使用滤波方法的误差较大,这是因为在对低频分量进

行滤波的同时,会丢失部分被测物体的有效信息,特别是在重构物体的边缘区域会引入较大误差,影响在线三维测量精度。该数值仿真验证了本文提出的方法对提升测量精度的有效性。

4 实 验

为进一步验证本文提出的方法的实用性,对图 6(a)所示的心形物体进行在线三维测量,其最大高度为 14.50 mm。由 DLP 投影一帧复合双频条纹图到固定区域,图 6(b)和图 6(c)为 CCD 所采集到的 5 帧复合双频变形条纹图中的前两帧图像 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 。被测物体沿 x 轴方向运动,高频条纹相移沿 y 轴方向,与被测物体运动方向垂直,根据 DLP 与运动的被测物体摆放的相对位置可知,被测物体高度不对其产生相位调制,不会使其产生形变。低频条纹相移沿 x 轴方向,与被测物体运动方向平行,被测物体高度会对其进行调制,使其产生变形。

图 7(a)为第一帧复合双频变形条纹图的傅里叶频谱分布,红色边框区域为高频条纹 +1 级频谱区域,选用高斯滤波窗,将该区域滤出后的频谱分布如图 7(b)所示,再依次进行傅里叶逆变换、取模,可

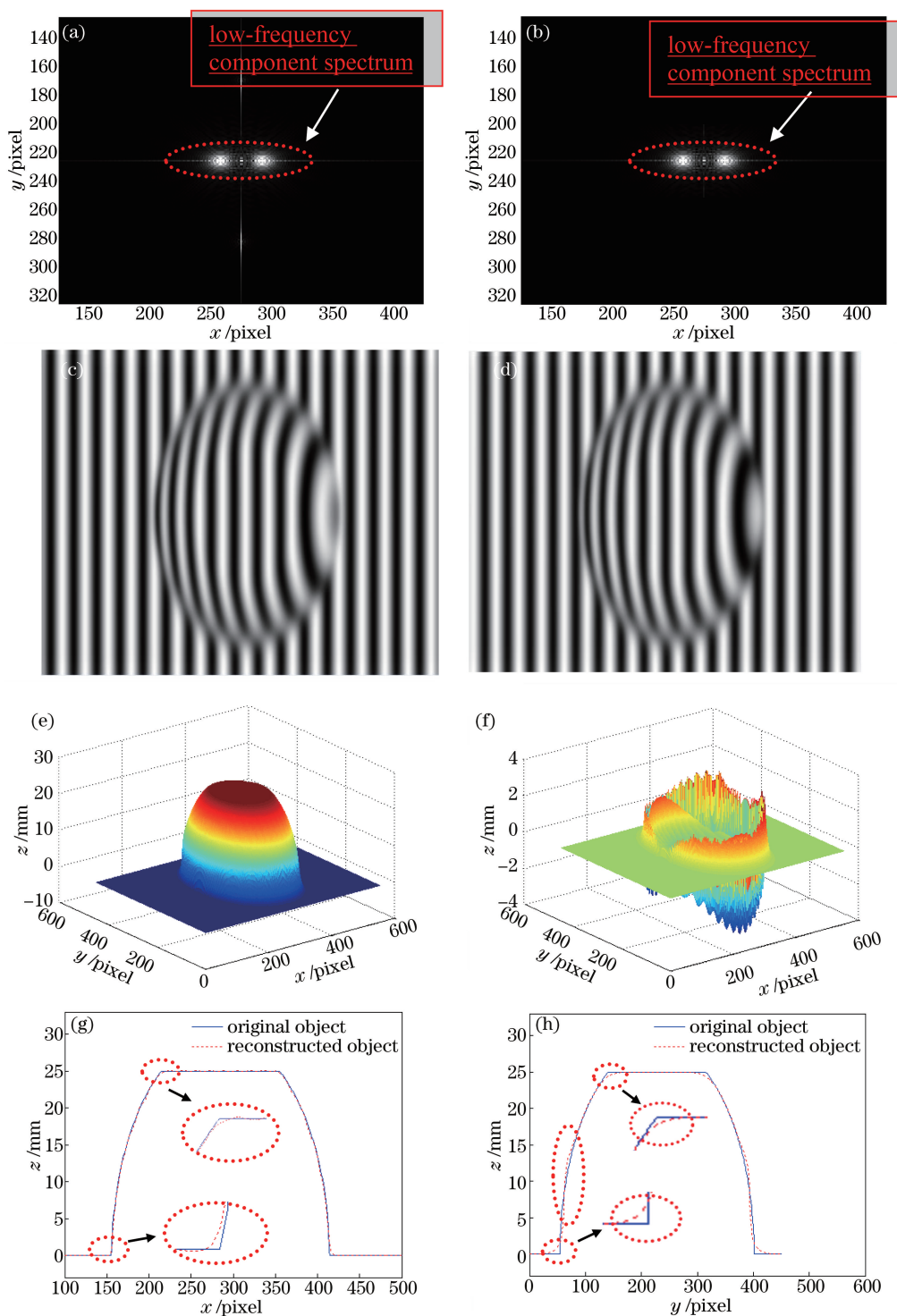


图 5 仿真滤出低频分量相位计算。(a)匹配后复合变形条纹图频谱分布；(b)滤波后低频分量频谱区域；(c)第一帧低频分量变形条纹图 $I'_{FL1}(x, y)$ ；(d)第二帧低频分量变形条纹图 $I'_{FL2}(x, y)$ ；(e)重构的被测物体；(f)误差分布；(g)被测物体与重构被测物体第 250 行的截图；(h)被测物体与重构被测物体第 250 列的截图

Fig. 5 Phase calculation after filtering out the low-frequency component in the simulation. (a) Frequency spectrum distribution of the composite deformed pattern after pixel matching; (b) frequency spectrum area of the low-frequency component after filtering; (c) the first deformed pattern of the low-frequency component $I'_{FL1}(x, y)$; (d) the second deformed pattern of the low-frequency component $I'_{FL2}(x, y)$; (e) reconstructed object; (f) error distribution; (g) section cross at $x=250$ for the measured object and the reconstructed object; (h) section cross at $y=250$ for the measured object and the reconstructed object

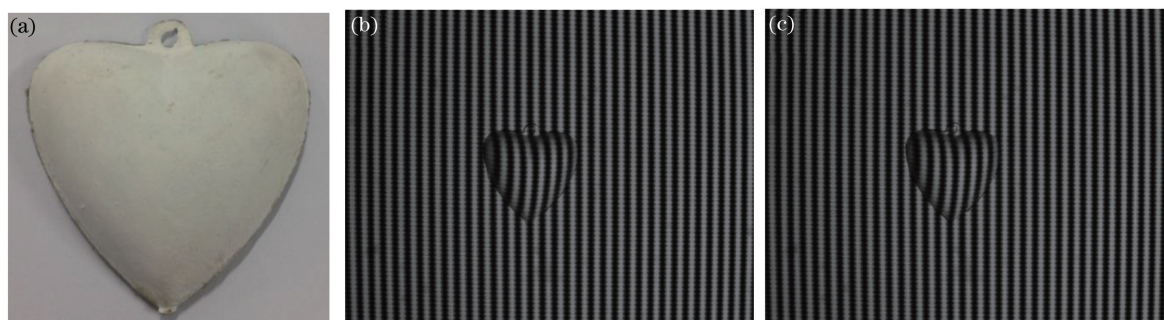


图 6 被测物体及变形条纹图。(a)被测物体；(b)第一帧变形条纹图 $I_1(x, y)$ ；(c)第二帧变形条纹图 $I_2(x, y)$
 Fig. 6 Measured object and deformed patterns. (a) Measured object; (b) the first deformed pattern $I_1(x, y)$;
 (c) the second deformed pattern $I_2(x, y)$

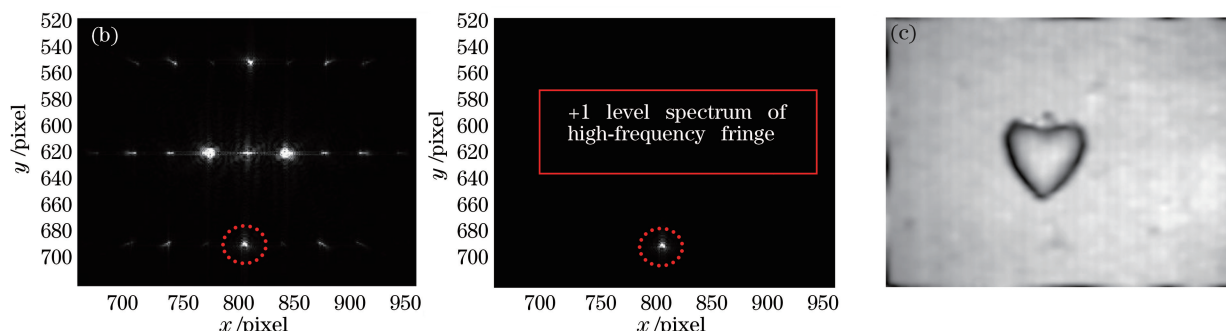


图 7 频谱分布中的被测物体和调制度图像。(a)复合双频变形条纹图频谱分布中的被测物体；(b)滤波后高频条纹+1级频谱区域；(c)调制度图像

Fig. 7 Measured object in the spectral distribution and the deformed patterns. (a) Measured object in the spectral distribution of the composite dual-frequency deformed pattern; (b) positive first-level frequency spectrum area of the high-frequency fringe after filtering; (c) modulation pattern

得到第一帧复合双频变形条纹图对应的调制度图像 $M_1(x, y)$, 如图 7(c) 所示。截取 $M_1(x, y)$ 中被测物体的整体调制度作为匹配模板, 与其他各帧调制度图像 $M_n(x, y)$ ($n=2, 3, 4, 5$) 进行相关运算, 可计算出被测心形物体在各帧复合双频变形条纹图中移动的距离 Δx , 完成像素匹配。

像素匹配后得到的 5 帧复合双频变形条纹图中的前两帧 $I'_1(x, y)$ 和 $I'_2(x, y)$ 分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示, 其像素点是一一对应的, 故将对心形被测物体的在线三维测量转化为对其的静态三维测量。利用 Stoilov 算法进行解相, 菱形算法进行相位展开后, 可以得到含有被测物体高度信息的连续相位分布, 使用同样的方法可求得参考面的连续相位分布, 将两者相减并进行相位高度映射后, 恢复出的被测心形物体三维轮廓如图 8(c) 所示。图 8(d) 为本文提出的方法和滤波方法重构被测物体第 340 列的截图, 其中蓝色实线为使用本文方法所重构物体的截线图, 红色虚线为使用滤波方法重构物体的截线图, 由图 8(d) 可见其截线大致重合, 但使用滤波方法在被测物体的边缘区域误差较大。为了进一步

验证本文方法的精度, 对高度已知的 3, 5, 10 mm 的标准平面进行测量并进行误差分析, 结果见表 1。

表 1 高度为 3, 5, 10 mm 平面的测量误差
 Table 1 Measurement errors of planes with height of 3, 5 and 10 mm

Parameter	Measurement error		
	3	5	10
Average height of measurement	2.96	5.03	9.97
RMS	0.072	0.083	0.077

由表 1 可知, 对各平面测量精度都较高, 同时其均方根值变化不大, 可见该方法有较好的噪声稳定性。

5 结 论

提出了一种无需滤波的复合光栅投影的在线三维测量方法, 在利用 Stoilov 算法进行相位计算时, 根据 DLP 与运动被测物体摆放的相对位置, 被测物体的高度信息不会对高频条纹产生相位调制, 同时在像素匹配过程中被测物体的运动不会转换为高频条纹的等效相移, 高频条纹在各帧变形条纹图中的

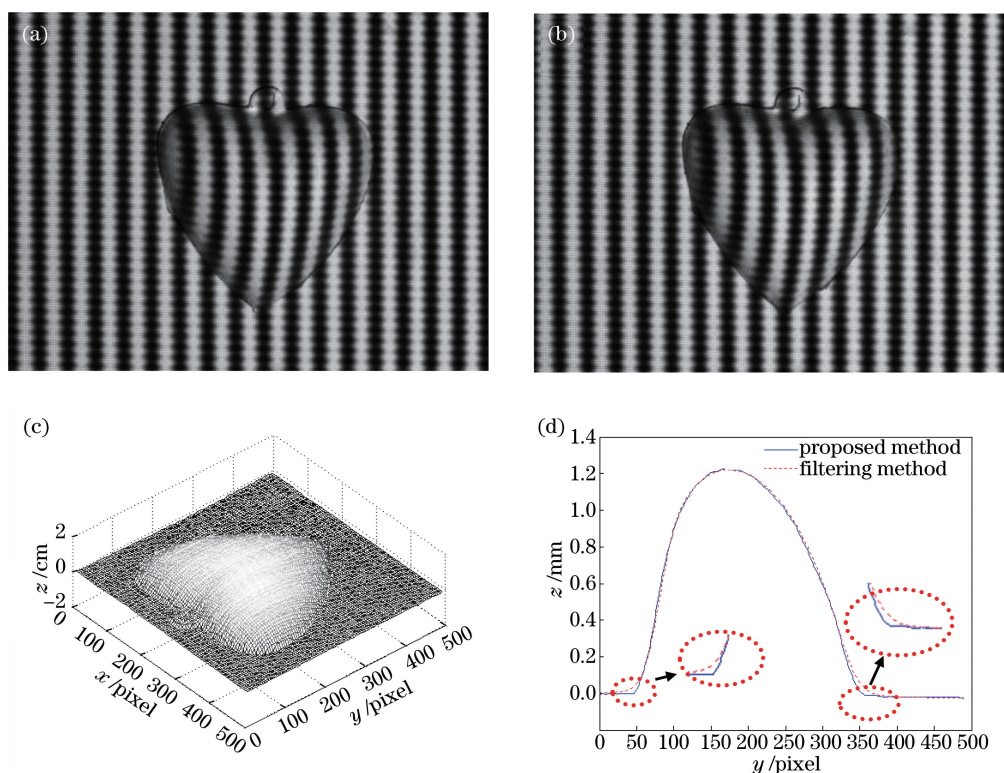


图 8 被测物体的三维重构。(a)匹配后第一帧复合双频变形条纹图 $I'_1(x, y)$; (b)匹配后第二帧复合双频变形条纹图 $I'_2(x, y)$; (c)重构的被测物体; (d)本文方法和滤波方法重构被测物体第 340 列的截图

Fig. 8 3D reconstruction of the measured object. (a) The first composite dual-frequency deformed pattern $I'_1(x, y)$ after pixel matching; (b) the second composite dual-frequency deformed pattern $I'_2(x, y)$ after pixel matching; (c) reconstructed object; (d) cross section at $y = 340$ for the reconstructed object by the proposed method and the filtering method

光强分布是完全相同的,根据 Stoilov 算法点对点解相的特点,可以直接用复合双频变形条纹图进行相位计算。由于没有对低频分量进行滤波,避免了在滤波过程中部分有效相位信息的丢失,在仿真实验中本文所提出的方法的误差均方根为 0.057 mm,小于滤波方法误差的均方根 0.369 mm。在设计中高频条纹的强度远远低于低频条纹,可将其视为微弱的背景光强,可有效地保证重构精度。该方法为复合多频光栅的处理提供了一种新思路。

参 考 文 献

- [1] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [3] Xu X F, Cao Y P. An improved Stoilov algorithm based on statistical approach[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 733-737.

许幸芬, 曹益平. 基于统计逼近的 Stoilov 改进算法 [J]. 光学学报, 2009, 29(3): 733-737.

- [4] Chen F, Su X N, Xiang L Q. Analysis and identification of phase error in phase measuring profilometry [J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11300-11307.
- [5] Ri S, Fujigaki M, Morimoto Y. Intensity range extension method for three-dimensional shape measurement in phase-measuring profilometry using a digital micromirror device camera [J]. Applied Optics, 2008, 47(29): 5400-5407.
- [6] Rusinkiewicz S, Hall-Holt O, Levoy M. Real-time 3D model acquisition [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 438-446.
- [7] Ekstrand L, Zhang S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms [J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4518-4520.
- [8] Hyun J S, Chiu G T, Zhang S. High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 1474-1487.

- [9] Xu X F, Cao Y P, Peng K. Pixel matching method in on-line three-dimensional measurement based on phase prediction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0612005.
许幸芬, 曹益平, 彭旷. 基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0612005.
- [10] Li K, Cao Y P, Chen Y Q, *et al.* A new method for online three dimensional inspection without marked[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(2): 62-65.
李坤, 曹益平, 陈永权, 等. 一种无需标记的在线三维测量方法[J]. *光学与光电技术*, 2009, 7(2): 62-65.
- [11] Zhong L J, Cao Y P. An on-line phase measuring profilometry with phase-shifting perpendicular to moving direction of measured object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 417-420.
钟立俊, 曹益平. 相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 417-420.
- [12] Peng K, Cao Y P, Wu Y C, *et al.* A new pixel matching method using the modulation of shadow areas in online 3D measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(9): 1078-1084.
- [13] Guan C, Hassebrook L G, Lau D L. Composite structured light pattern for three-dimensional video[J]. *Optics Express*, 2003, 11(5): 406-417.
- [14] He Y H, Cao Y P, Zhai A P. A 3-D measurement method with orthogonal composite light based on fringe contrast and background calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3191-3196.
何宇航, 曹益平, 翟爱平. 基于条纹对比度和背景光校准的正交复合光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3191-3196.
- [15] Wu Y C, Cao Y P, Shi S P, *et al.* On-line three-dimensional inspection based on orthogonal two-frequency grating projection[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0508003.
武迎春, 曹益平, 史顺平, 等. 基于正交双频光栅投影的在线三维检测[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0508003.
- [16] Stoilov G, Dragostinov T. Phase-stepping interferometry: five-frame algorithm with an arbitrary step[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 28(1): 61-69.
- [17] Yue H M, Su X Y, Li Z R. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 767-771.
岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 767-771.
- [18] Yue H M, Su X Y. Study on composite phase measuring profilometry[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(1): 22-23.
岳慧敏, 苏显渝. 复合相位测量轮廓术研究[J]. *激光杂志*, 2006, 27(1): 22-23.
- [19] Lu M T, Su X Y, Cao Y P, *et al.* A method of both height mapping and camera calibration at the same time in modulation measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0612002.
卢明腾, 苏显渝, 曹益平, 等. 调制度测量轮廓术中高度映射与相机同时标定的方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0612002.
- [20] Bian X T, Cheng J, Zuo F, *et al.* A method of 3D shape measurement based on alignment grating projection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011202.
边心田, 程菊, 左芬, 等. 基于光栅预校正的三维面形测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011202.