

一种复合光栅投影的在线相位测量轮廓术

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, 武汉 430062;
2. 四川大学 光电科学技术系, 成都 610064; 3. 太原科技大学 电子信息工程学院, 太原 030024)

摘要: 提出了一种复合光栅投影的在线相位测量轮廓术, 以解决在像素匹配和相位计算过程中对条纹频率不同需求的矛盾; 在像素匹配过程中, 提取高频信息以获得质量较高的调制度图像; 在相位计算过程中, 通过滤波提取低频分量对被测物体进行三维重构, 避开高频分量造成的误差; 在滤波过程中, 设计了一种组合滤波窗, 提升了滤波精度; 仿真和实验证明了所提方法的有效性和实用性, 使用该方法重构物体的误差约为 0.89%。

关键词: 三维测量; 相位测量轮廓术; 复合条纹

An On-line Phase Measurement Profilometry of Composite Grating Projection

Peng Kuang¹, Cao Yiping², Wu Yingchun³

(1. Hubei Provincial Key Laboratory of Ferro & Piezoelectric Materials and Devices, Faculty of Physics & Electronic Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China; 2. Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 3. School of Electronic and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: An on-line phase measurement profilometry of composite grating projection is proposed to solve the contradiction between different requirements of fringe frequency in the process of pixel matching and phase calculation. In the pixel matching process, high-frequency information is extracted to obtain a high-quality modulation pattern; in the phase calculation process, low-frequency components are extracted through filtering for the three-dimensional reconstruction of the measured object, to avoid the error caused by high-frequency components. In the filtering process, a combined filtering window is designed to improve the filtering accuracy. Simulation and experiment prove the validity and feasibility of the proposed method. The error of the reconstructed object by this method is about 0.89%.

Keywords: three dimensional measurement; phase measurement profilometry; composite fringe

0 引言

光学三维检测技术由于其高速度、高精度、非接触和易于实现等特点, 在实物仿真、工业制造、机器视觉、逆向工程等领域已被广泛运用^[1-2], 其中相位测量轮廓术(Phase Measuring Profilometry, PMP)^[3-6]通过对多帧条纹图的投影、采集和处理, 可恢复出被测物体的三维形貌, 具有抗噪性好、灵敏度高等优点。在对动态物体进行三维检测时, 根据被测物体的运动特点, 可细分为实时三维检测和在线三维检测。在实时三维检测中, 由于被测物体的位置和形貌一直在发生变化, 因此各个时刻所采集的图像

没有相关性, 像素点不是一一对应的, 因此需要使用更高速率的投影和采集设备, 使采集到的多帧条纹图中被测物体的位移小于一个像素点, 完成实时 PMP^[7-9]; 在线三维检测则是对在工厂流水线上运动的物体进行检测, 虽然被测物体一直在流水线上运动, 但是由于其形貌是固定不变的, 因此可以使用像素匹配的方法, 将各帧变形条纹图的像素点完全对应后, 使用 PMP 算法完成对在线动态物体的检测, 降低对硬件的需求。

在在线三维检测中, 可以基于调制度图像进行像素匹配, 调制度图像质量的高低直接影响到像素匹配精度^[10-12]。像素匹配过程需要对带有被测物体调制信息的基频进行滤波, 所投影正弦光栅的条纹频率越高, 在频谱图中零频与基频的距离越远, 背景光强对灰度的影响越小, 调制度图像质量越高; 但是当投影的正弦光栅条纹频率过高时, 在采集到各帧变形条纹图中, 被测物体某些部分的高度突变会使某些周期内的像素点数目不满足 Nyquist 采样定律, 导致相邻像素点间变化超过 π , 造成相位展开错误, 无法准确地重构出被测物体^[13-14]。针对相位展开和像素匹配过程对正弦条纹频率的不同要求, 武迎春等提出了一种无需滤波

收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-06-19。

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

作者简介: 彭 旷(1991-), 男, 博士, 讲师, 主要从事三维传感、光电信息处理、嵌入式系统及光机电一体化方向的研究。

通讯作者: 曹益平(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事三维传感、光电信息处理及光机电一体化方面的研究。

的双频光栅, 高频条纹进行像素匹配, 低频条纹进行相位运算, 但是在该方法的相位计算过程中, 由于没有对低频条纹进行滤波, 在各帧变形条纹图中光强分布各异的高频条纹会引入误差, 影响三维重构精度^[1]。

在以往研究的基础上, 基于满周期等相移算法可精确控制相移量的特点, 本文提出了一种复合光栅投影的在线相位测量轮廓术, 高频条纹相移方向与被测物体运动方向平行, 低频条纹相移方向与被测物体运动方向垂直。条纹图被被测物体调制后, 当进行像素匹配时, 提取高频条纹的基频分量, 计算得到调制度图像; 当进行相位计算时, 从双频条纹图中提取低频分量来计算相位, 避免了在以往方法中高频分量对相位计算的干扰。同时, 在进行滤波的过程中, 设计了一种组合滤波窗, 通过矩形滤波窗对高斯滤波窗进行截断, 提升滤波精度。

1 改进型在线 PMP 原理

基于满周期等相移算法, 本文利用 DLP 投影五帧复合双频条纹图, $N = 5$, 其透过率可表示为:

$$I_{Tn}(x_T, y_T) = I_{TH}(x_T, y_T) + I_{TLn}(x_T, y_T), n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (1)$$

式中,

$$\begin{cases} I_{TH}(x_T, y_T) = a + b \cos(2\pi f_H x_T) \\ I_{TLn}(x_T, y_T) = c + d \cos[2\pi f_L y_T + (n-1) \cdot (2\pi/N)] \end{cases} \quad (2)$$

其中: (x_T, y_T) 为计算机生成的数字条纹图中的像素点坐标, $I_{TH}(x_T, y_T)$ 为高频条纹分布, 相移沿 x 坐标轴方向, 其频率为 f_H , a, b 为其背景光强度和条纹对比度, 其中 $a \geq b$; $I_{TLn}(x_T, y_T)$ 为低频条纹分布, 相移沿 y 坐标轴方向, 其频率为 f_L , $f_L < f_H$, c, d 为其背景光强度和条纹对比度, 其中 $c \geq d$ 。

基于满周期等相移算法的在线三维测量系统光路结构图如图 1 所示。CCD 与 DLP 的光轴分别为 CO 与 PO, 其相交于位于载物台上的 O 点, 所成的夹角为 θ , θ 位于 YOZ 平面内。被测物体沿着 x 坐标轴方向运动, 低频条纹的相移沿着 y 坐标轴方向。

被测物体随着传送带沿着 x 轴方向运动时, 每当被测物体运动距离 Δx 时使用计量光栅传感器发送脉冲信号, 触发 CCD 采集到的经过被测物体高度调制的五帧变形条纹图如下所示:

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

式中,

$$\begin{cases} I_H(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos(2\pi f_H x) \\ I_{Ln}(x, y) = C(x, y) + D(x, y) \cdot \cos[2\pi f_L y + \varphi_n(x, y) + (n-1) \cdot (2\pi/N)] \end{cases} \quad (4)$$

其中: (x, y) 为 CCD 坐标系中的像素坐标, $I_H(x, y)$ 、

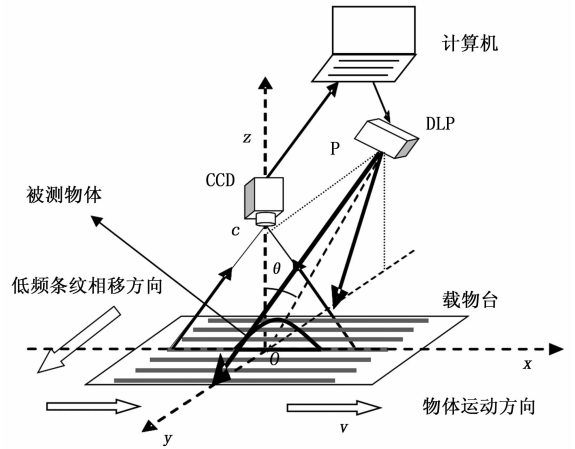


图 1 基于满周期等相移算法的在线三维测量系统

$I_{Ln}(x, y)$ 分别为复合双频变形条纹图中的高频条纹和低频条纹。 $R_n(x, y)$ 为被测物体表面反射率分布, $A(x, y)$ 、 $B(x, y)$ 为高频条纹的背景光强分布和条纹对比度, $C(x, y)$ 、 $D(x, y)$ 为低频条纹的背景光强分布和条纹对比度, $\varphi_n(x, y)$ 为因被测物体高度调制而使低频条纹产生的相位变化。由于被测物体的不断运动, 其在各帧变形条纹图像中的位置各不相同, 所以五帧图像中的反射率分布及被测物体高度对低频条纹进行调制的区域也有所区别, 用下标 n 使其得以区分。

CCD 采集到被被测物体高度调制的五帧变形条纹图后, 提取复合双频变形条纹图中高频条纹的基频分量, 以得到高质量的调制度图像完成像素匹配。像素匹配后, 提取像素点一一对应的各帧复合双频变形条纹图的低频分量计算相位, 避免了各种变形条纹图中高频条纹光强分布不一致引入的误差, 保证相位计算的精度。像素匹配与相位计算过程如下所示。对式 (3) 所示的复合双频变形条纹图两边进行傅里叶变换, 可得:

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

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

滤出式 (5) 复合双频变形条纹图中高频条纹的 +1 级频谱 $P_n(\xi - f_H, \eta)$ 后, 进行逆傅里叶变换并对其取模, 可求得五帧变形条纹图对应的调制度分布图像:

$$M_n(x, y) = \frac{1}{2}R_n(x, y) \cdot B(x, y), n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (6)$$

在第一帧调制度图像 $M_1(x, y)$ 中截取被测物体的整体调制度作为匹配模板进行相关运算, 即可计算出被测物体在相邻两帧变形条纹图中的位移 Δx , 进而得到像素点一一

对应的五帧复合双频变形条纹图，完成像素匹配。得到的五帧像素点一一对应的复合双频变形条纹图如下所示：

$$I'_n(x,y) = R'(x,y)[I_{Hn}'(x,y) + I_{Ln}'(x,y)], \quad n = 1,2,3,4,5 \quad (7)$$

式中，

$$\begin{cases} I_{Hn}'(x,y) = A(x,y) + B(x,y) \cdot \cos(2\pi f_H x + (n-1)\delta_H) \\ I_{Ln}'(x,y) = C(x,y) + D(x,y) \cdot \cos[2\pi f_L y + \omega(x,y) + (n-1) \cdot (2\pi/N)] \end{cases} \quad (8)$$

被测物体在五帧复合双频变形条纹图中的位置完全相同，所以可以去掉下标 n ，此时就将对被测物体的在线三维测量转化为了对该物体的静态三维测量， δ_H 为被测物体的位移转换成的高频条纹的相移大小：

$$\delta_H = \frac{\Delta x}{P} \cdot 2\pi \quad (9)$$

其中： P 为高频条纹 $I_H(x,y)$ 的一个正弦周期对应参考平面上的距离大小。在双频变形条纹图中，根据 DLP 与运动的被测物体摆放的相对位置，由于高频条纹相移方向与被测物体运动方向平行，所以其不因被测物体的高度调制而发生变形，但是由于被测物体本身是运动的，且被测物体在相邻两帧复合双频变形条纹图 $I_n(x,y)$ 中的运动位移 Δx 与高频条纹 $I_H(x,y)$ 一个正弦周期对应参考平面上的距离大小 P 在一般情况下不成整数倍的成正比关系，即：

$$\Delta x \neq m \cdot P \quad (10)$$

其中： m 为任意的正整数。所以在像素匹配后的各帧像素点一一对应的图像 $I'_n(x,y)$ 中，高频条纹的位置分布各不相同。为避免高频条纹在计算相位时引入误差，需要先将复合双频变形条纹图在式 (5) 中的频谱区域 $B_n(\xi,\eta)$ 、 $Q_n(\xi,\eta-f_L)$ 、 $Q_n^*(\xi,\eta+f_L)$ 滤出并进行逆傅里叶变换后再计算相位。所滤出的低频分量经逆傅里叶变换的变形条纹图像可表示为：

$$I_{FLn}'(x,y) = R'(x,y) \cdot E'(x,y) + R'(x,y) \cdot D'(x,y) \cdot \cos[2\pi f_L y + \omega'(x,y) + (n-1) \cdot (2\pi/N)] \quad (11)$$

其中： $n = 1,2,3,4,5$ ，滤出的背景光强度 $E'(x,y)$ 为高频条纹 $I_{Hn}'(x,y)$ 和低频条纹 $I_{Ln}'(x,y)$ 的背景光强度之和：

$$E'(x,y) = A'(x,y) + C'(x,y) \quad (12)$$

由于低频条纹的相移方向与被测物体运动方向垂直，像素匹配后其相位分布不受被测物体运动的影响。通过所滤出的五帧满周期等相移的低频分量变形条纹图，可以计算出包含物体高度调制信息的截断相位分布：

$$\varphi_w'(x,y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I'_{FLn}(x,y) \sin \delta_{Ln}}{\sum_{n=1}^N I'_{FLn}(x,y) \cos \delta_{Ln}} \right], n = 1,2,3,4,5 \quad (13)$$

其中： δ_{Ln} 为：

$$\delta_{Ln} = \frac{2\pi(n-1)}{N} \quad (14)$$

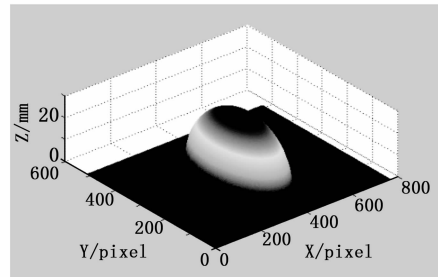
使用同样的方法，可以得到参考平面的截断相位分布。由于复合光栅条纹图由计算机生成，相邻条纹图间的低频相移量可主动地精确控制，且在像素匹配后低频条纹的相位分布不受被测物体运动的影响，所以这种相位计算方法具有较高的精度。

2 滤波窗函数的选取

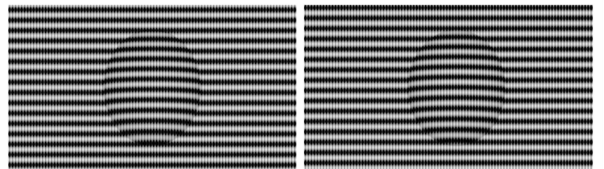
在像素匹配和相位计算中，都涉及到对特定的频谱区域进行滤波，大量的计算机数值仿真和实验表明，高斯滤波窗可以在提取目标频谱区域所需信息的同时，对频谱混叠等噪声起到抑制作用，降低非所需频谱信息在所滤得频谱区域内的干扰，但是其不能准确地控制滤波截止频率；矩形窗则可以严格地滤出所需频谱区域范围，但是对于频谱没有抑噪作用。由于在实际测量过程中存在的频谱混叠现象，本文在高斯滤波窗的基础上，使用矩形滤波窗设定截止频率，以充分发挥两种滤波窗的优点。在滤波过程中，当两个频谱岛区域距离较近，混叠现象相对较多时，该滤波窗的高斯滤波窗区域，可以在保证提取所需频谱目标区域信息的同时，抑制非所需的频谱信息，减少其对所滤出区域有效信息的干扰；该滤波窗的矩形滤波窗区域，可以准确地根据频谱分布情况截断滤波窗，滤除非所需频谱区域的信息。

3 计算机数值仿真

为了验证本文所提方法的有效性，对模拟的半个椭球形状的被测物体进行了计算机数值仿真实验，该物体如图 2 (a) 所示，该半椭球形被测物体长半轴长度为 90 个像素点，短半轴长度为 65 个像素点，最大高度为 30 毫米，长轴沿 y 轴方向，短轴沿 x 轴方向。图 2 (b) 和图 2 (c) 为由 CCD 采集到的五帧复合双频变形条纹图中的前两帧图像 $I_1(x,y)$



(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 $I_2(x,y)$

图 2 数值仿真被测物体及变形条纹图

和 $I_2(x, y)$, 低频条纹的周期为 32 个像素点, 高频条纹周期为 8 个像素点, 低频条纹和 高频条纹的条纹对比度之比 $d:b = 3:2$ 。被测物体沿着 x 轴方向运动, 与低频条纹相移方向垂直, 被测物体高度会对其进行相位调制使其产生形变。高频条纹相移方向沿 x 轴方向, 与被测物体运动方向平行, 根据 DLP 与运动的被测物体摆放的相对位置, 高频条纹不会因被测物体的高度而发生变形。

由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如图 3 (a) 所示, 在像素匹配提取调制度图像过程中, 需要对高频条纹的 +1 级频谱区域进行滤波, 该区域即为图 3 (a) 中的虚线圆形边框区域。由于在仿真实验中, 复合双频条纹的频谱分布较为理想, 频谱混叠较少, 使用高斯滤波窗即可滤得所需的高频 +1 级频谱区域, 所选用的滤波窗如图 3 (b) 所示。经滤波窗滤波后, 即可得到如图 3 (c) 虚线圆形边框区域内的高频 +1 级频谱, 再对其进行逆傅里叶变换和取模, 生成的第一帧复合双频变形条纹图对应的调制度图像 $M_1(x, y)$ 如图 3 (d) 所示, 截取被测物体的整体调制度进行相关运算, 即可计算出物体在相邻两帧复合双频变形条纹图间运动的距离 Δx , 完成像素匹配。

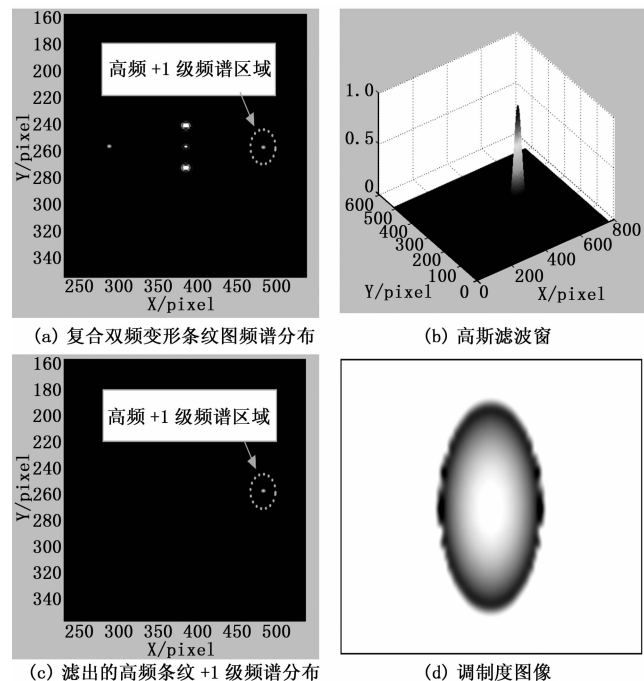


图 3 数值仿真调制度图像提取

像素匹配后, 从第一帧复合光栅变形条纹图中截取的像素点一一对应的图像 $I_1'(x, y)$ 如图 4 (a) 所示。图 4 (b) 为其频谱分布, 虚线椭圆形边框区域为像素匹配后复合双频变形条纹图的低频分量, 选用如图 4 (c) 所示的由矩形窗和高斯窗结合生成的组合滤波窗对其进行滤波并进行逆傅里叶变换, 可以得到如图 4 (d) 所示的匹配后低频分量变形条纹图像 $I_{FL1}'(x, y)$, 其相位分布受到被测物体

的高度调制, 对 $I_{FLn}'(x, y)$, $n = 1, 2, 3, 4, 5$ 使用满周期等相移算法即可得到包含物体高度调制信息的截断相位分布, 利用同样的方法可以得到参考平面的截断相位分布。

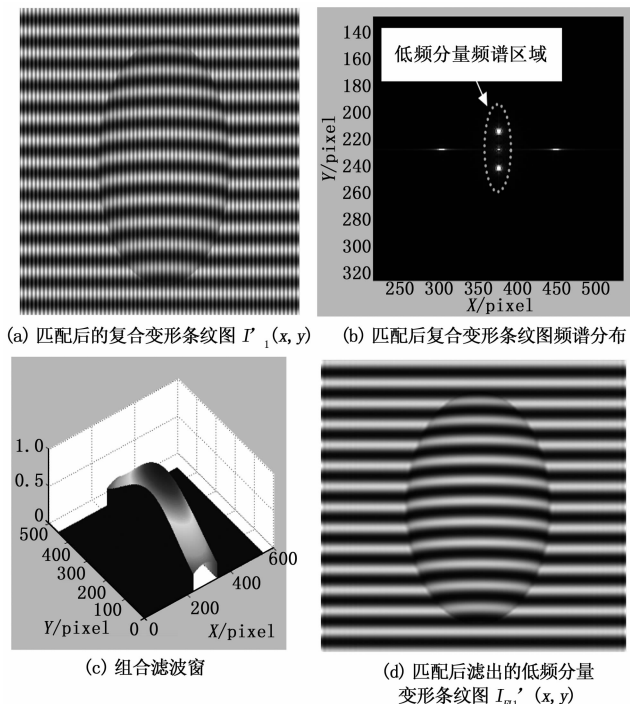


图 4 数值仿真低频分量提取

对包含被测物体高度信息的截断相位分布和参考平面的截断相位分布使用菱形算法依次进行展开、相减和相位高度映射后, 数值仿真三维重构结果如图 5 所示。图 5 (a) 为三维重构的半椭球形被测物体, 其与原始被测物体的误差均方根为 0.116 mm。图 5 (b) 和图 5 (c) 分别为被测物体和重构的被测物体在第 150 行和第 200 列的截图, 其中实线代表被测物体, 虚线代表重构的被测物体, 图中两条线段基本重合, 重构精度较高。

为验证所提组合滤波窗的有效性, 表 1 所示为使用几种滤波窗提取低频分量重构出的被测物体与原始被测物体高度误差均方根比较。使用高斯滤波窗、矩形滤波窗、组合滤波窗进行滤波时所重构的被测物体与原始被测物体的误差 RMS 分别为 0.195 mm、0.120 mm、0.116 mm, 使用组合滤波窗时所重构的被测物体精度较高。

表 1 几种滤波窗重构被测物体的误差均方根比较

	高斯滤波窗	矩形滤波窗	组合滤波窗
误差均方根/mm	0.195	0.120	0.116

4 实验与分析

为了进一步验证本文所提方法的实用性, 对实物进行了在线三维测量, 搭建了基于满周期等相移算法的在线三

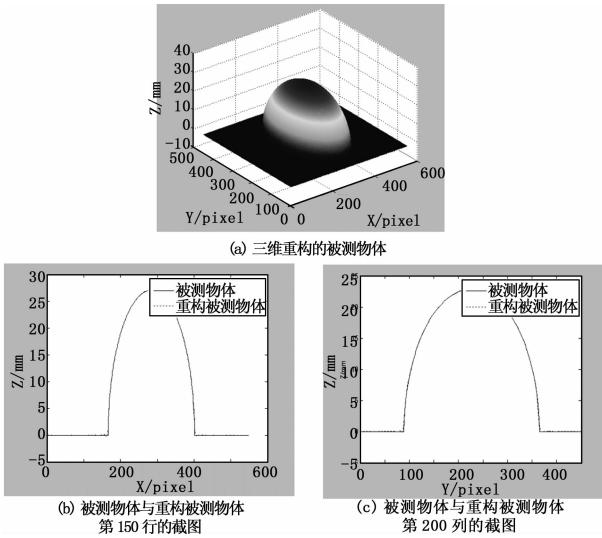


图 5 数值仿真三维重建结果

维测量系统，其中使用的 DLP 的型号是 HCP-75X，CCD 的型号是 GEV-B1610M-SC000。被测物体放在载物台上，步进电机控制箱控制电控位移平台使被测物体沿着 x 坐标轴正方向进行运动。

实验中测量的心形物体如图 6 (a) 所示，其最大高度为 14.50 mm，当被测物体在载物台上沿着 x 坐标轴正方向进行运动时，CCD 采集到的五帧复合双频变形条纹图的前两帧图像 $I_1(x,y)$ 和 $I_2(x,y)$ 如图 6 (b) 和图 6 (c) 所示。高频条纹相移方向沿 x 轴方向，与被测物体运动方向平行，但是由于被测物体的运动，被测物体在各帧复合双频变形条纹图中与高频条纹的相对位置是变化的。低频条纹相移方向沿 y 轴方向，与被测物体运动方向垂直，由于被测物体的面形对其相位产生了调制，低频条纹会产生相应的变形。

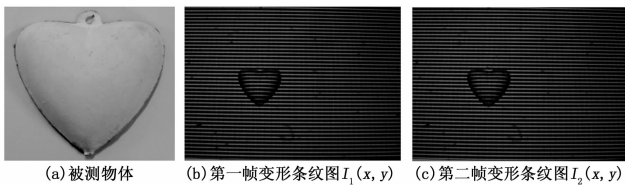
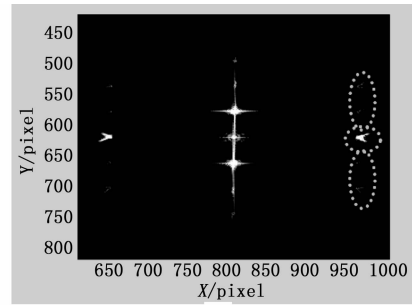


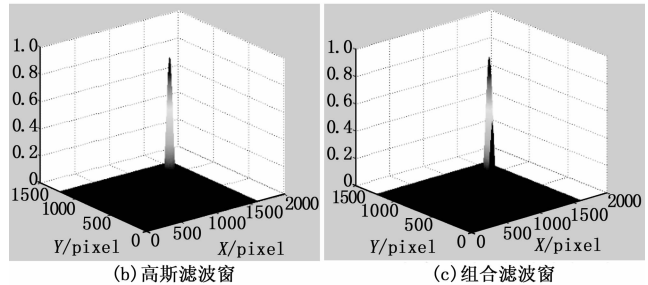
图 6 被测物体及变形条纹图

图 7 (a) 所示为第一帧复合双频变形条纹图经过傅里叶变换后得到的频谱图像，其中虚线圆形边框区域为高频条纹的 +1 级频谱区域，由于在实际三维测量过程中有诸多的误差和噪声，所以在频谱分布图中存在很多频谱混叠，如图 7 (a) 中虚线椭圆形边框区域所示。在实验过程中，分别使用了如图 7 (b) 所示的高斯滤波窗和如图 7 (c) 所示的本文所提出的组合滤波窗对复合双频变形条纹图 +1 级频谱区域进行了滤波。使用高斯滤波窗和组合滤波窗得到的傅里叶频谱如图 7 (d) 和图 7 (e) 所示，由于像素匹配主要是利用有明显灰度特征的被测物体边缘信息进行相关

运算，当使用高斯滤波窗滤出高频条纹 +1 级频谱分布时，在保证得到足够的被测物体调制度边缘灰度信息的前提下，会引入如图 7 (d) 虚线圆形边框所示的频谱混叠误差，在使用本文所提出的组合滤波窗时，可以滤除频谱混叠误差，得到质量较高的频谱分布。将两种滤波窗滤出的频谱分布信息进行逆傅里叶变换后取模，可以得到如图 7 (f) 和图 7 (g) 所示的第一帧复合双频变形条纹图对应的调制度图像，由于高斯滤波窗滤得的频谱分布中的频谱混叠现象，在如图 7 (f) 所示的调制度图像中存在低频横条纹，这会影响到像素匹配的精度。截取图 7 (g) 所示的调制度图像 $M_1(x,y)$ 中被测物体的整体调制度信息作为匹配模板进行相关运算，即可完成像素匹配。

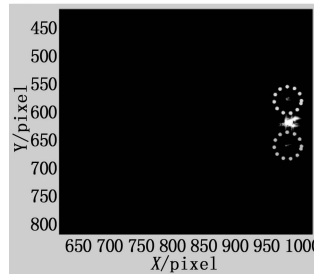


(a) 复合双频变形条纹图频谱分布

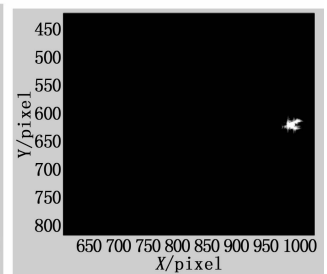


(b) 高斯滤波窗

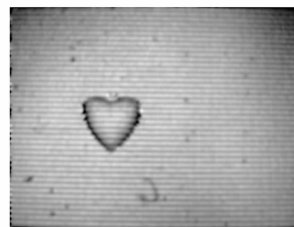
(c) 组合滤波窗



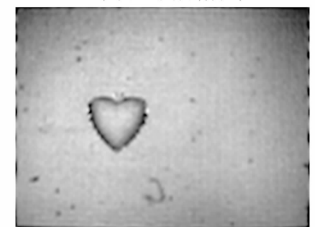
(d) 高斯滤波窗滤出的高频条纹+1级频谱分布



(e) 组合滤波窗滤出的高频条纹+1级频谱分布



(f) 高斯滤波窗提取的调制度图像



(g) 高斯滤波窗提取的调制度图像

图 7 调制度图像提取

像素匹配后得到的五帧像素点完全对应的复合双频变形条纹图中的第一帧图像 $I_1'(x,y)$ 如图 8 (a) 所示，图

8 (b) 为其频谱分布, 虚线椭圆形边框区域为像素匹配后复合双频变形条纹图的低频分量区域, 使用如图 8 (c) 所示的组合滤波窗对其进行滤波, 滤出的匹配后低频分量变形条纹图像 $I_{FL1}'(x, y)$ 如图 8 (d) 所示, 低频分量由于被测物体的高度调制而发生变形。对各帧匹配后低频分量变形条纹图像 $I_{FLn}'(x, y)$, $n = 1, 2, 3, 4, 5$ 使用满周期等相移算法即可得到包含物体高度调制信息的截断相位分布, 在利用同样的方法得到参考平面的截断相位分布后, 对两者依次进行相位展开、相减、相位高度映射, 三维重构的被测心形物体如图 8 (e) 所示, 其最大高度为约 14.37 mm, 被测物体的真实最大高度为 14.50 mm, 误差约为 0.89%。图 8 (f) 为重构被测物体第 320 列的截图, 重构精度较高。对心形物体的在线三维测量实验结果验证了本文所提方法的实用性。

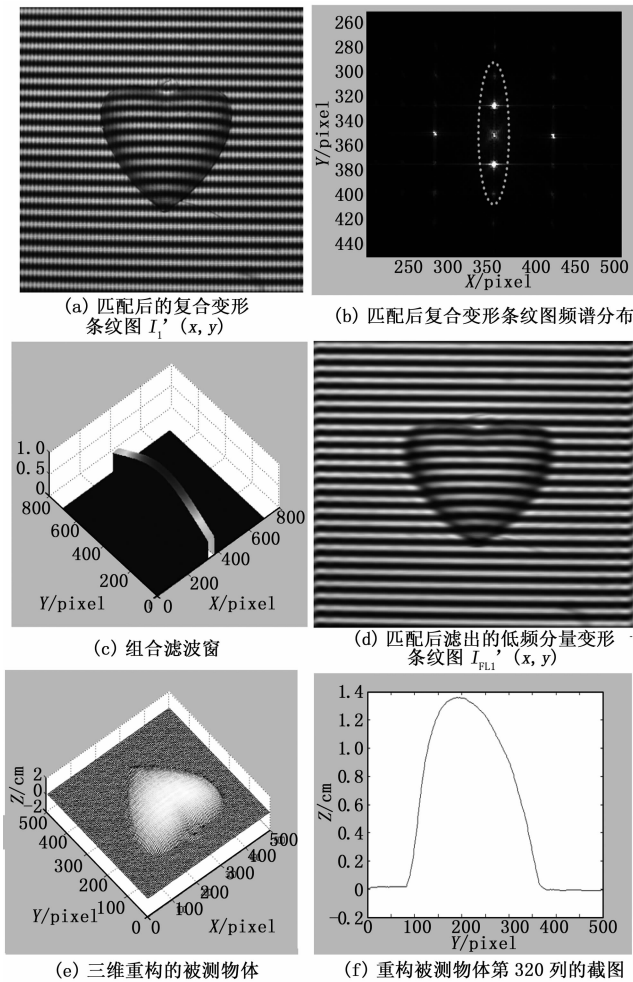


图 8 利用低频分量重构被测物体

5 结论

本文提出了一种复合光在线相位测量轮廓术。CCD 采集到多帧复合双频变形条纹图后, 提取高频条纹基频分量生成调制度图像进行像素匹配。像素匹配后可以得到像素点一一对应的多帧复合双频变形条纹图, 需要提取复合双

频变形条纹图的低频分量进行相位计算, 避免高频分量对三维重构的干扰, 利用该方法恢复出的被测物体误差约为 0.89%。在像素匹配和相位计算的过程中, 本文使用了一种由高斯滤波窗和矩形滤波窗生成的组合滤波窗进行滤波, 使用该滤波窗重构的三维面型误差 RMS 约为 0.116 mm, 提高了滤波精度。计算机数值仿真与实验验证了本文所提方法的有效性 with 实用性。

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] 李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用 [J]. *光学学报*, 2000, 20 (6): 792-796.
- [3] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach [J]. *Applied Optics*, 1985, 24 (2): 185-188.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Chen F, Su X Y, Xiang L Q. Analysis and identification of phase error in phase measuring profilometry [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (11): 11300-11307.
- [7] Rusinkiewicz S, O Hall-Holt, Levoy M. Real-time 3D model acquisition [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21 (3): 438-446.
- [8] Ekstrand L, Zhang S. Three-dimensional profilometry with nearly focused binary phase-shifting algorithms [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (23): 4518.
- [9] Hyun J S, Chiu T C, Zhang S. High-speed and high-accuracy 3D surface measurement using a mechanical projector [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (2): 1474.
- [10] 李 坤, 曹益平. 一种无需标记的在线三维测量 [J]. *光学与光电技术*, 2009, 7 (2): 57-61.
- [11] 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.
- [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] 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.
- [14] Li J L, Su H J, Su X Y. Two frequency grating used in phase measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 1997, 36 (1): 277-280.