

基于编码光栅的空间不连续三维物体表面的绝对相位获取方法

肖素枝 陶卫* 赵辉

上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240

摘要 为快速获取空间不连续三维物体表面的绝对相位,提出了一种基于编码光栅的相位展开方法。该方法只需投射一幅带有编码信息的光栅条纹图像,即可获得相位展开所必需的条纹级数信息,从而得到整个被测表面的绝对相位信息。根据相位-深度关系,可获得整个被测表面的三维信息。与基于格雷码的相位展开方法相比,该方法不依赖被测物体的灰度信息,抗噪声性能更好。该方法只需额外投射一幅编码条纹图像,更适用于对实时性要求比较高的三维测量。通过实验证明了该方法的有效性和可行性。

关键词 测量; 相位展开; 编码光栅; 空间不连续表面

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1212004

Absolute Phase Acquisition Method for Spatial Discontinuous Three-Dimensional Object Surface Based on Encoding Grating

Xiao Suzhi Tao Wei Zhao Hui

School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract In order to obtain absolute phase of spatial discontinuous object surface quickly, a phase unwrapping method based on encoding grating is proposed. In this method, a grating fringe image with encoding information is projected, the fringe order information which is needed for phase unwrapping is obtained, and then the absolute phase information of the whole measured surface is obtained. The three-dimensional information of the whole measured surface is obtained according to the phase-depth relationship. Compared with the phase unwrapping method based on the Gray code, the proposed method does not depend on gray information of the measured object and has better noise resistance. Only one additional encoding fringe is needed for the proposed method, so it is more suitable for three-dimensional measurement with high real-time requirement. The effectiveness and feasibility of the proposed method is demonstrated by experiments.

Key words measurement; phase unwrapping; encoding grating; spatial discontinuous surface

OCIS codes 120.5050; 100.5070; 100.5088; 120.6650

1 引 言

光栅投影结构光三维测量方法,又称光栅投影轮廓术,具有非接触、低成本、高精度和高效率等优点,广泛应用于三维测量中。该方法通过数字投影仪将光栅投影到被测目标表面,光栅由于受被测目标高度的调制而发生变形。利用相机采集变形图像,通过计算机处理变形光栅,解调出代表被测目标高度的相位信息,再结合系统标定参数获得被测目标的三维点云信息^[1-2]。

对变形的光栅条纹图像快速解包裹(又称为相位展开)是数字光栅投影的关键技术之一,该技术将相位

收稿日期: 2016-06-06; 收到修改稿日期: 2016-07-29

基金项目: 上海市科委项目(15JC1402500)、闵行区科委项目(2014MH116)

作者简介: 肖素枝(1979—),女,博士研究生,主要从事三维测量方面的研究。E-mail: vsxiao@sjtu.edu.cn

导师简介: 赵辉(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事现代传感器和视觉检测技术方面的研究。

E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: taowei@sjtu.edu.cn

值分布在 $(-\pi, \pi]$ 区间内的包裹相位展开为绝对相位^[3]。传统相位展开方法^[3-5], 如 Goldstein 相位展开方法、质量图路径导向、多重网格相位展开方法、最小二乘相位展开法等, 可以获得连续被测目标表面准确的绝对相位图, 但对于复杂场景中包含的不连续被测表面, 上述方法无法得到准确的绝对相位图。因此, 实现空间不连续多目标的检测需要追加额外的辅助信息, 国内外研究者们对此进行了不同的研究^[6-11]。Sansoni 等^[6] 基于投射格雷码的方法进行相位展开, 该方法原理简单, 容易实现, 得到广泛应用; 但是, 该方法依赖图像的灰度信息, 对环境干扰的抵抗能力较差, 需要采集多幅额外的投射图像, 速度慢, 实时性差, 无法满足动态检测的要求。Jiang 等^[12-13] 利用彩色结构中光的色彩信息, 大幅减小了数字光投影的数量, 提高了投影速度; 但是由于被测物体存在本底颜色, 影响了测量准确性。李中伟等^[14-15] 利用多频外差原理进行相位展开, 由于该方法不受被测表面颜色的影响, 因此可获得较好的稳定性和较高的精度; 但是由于该方法需要投射多幅不同频率的光栅图像进行解相位计算, 因此不适合实时性要求非常高的应用。Wang 等^[16] 利用相位编码的方法, 通过将条纹级数信息嵌入相移图获得空间不连续物体的绝对相位信息, 该方法不依赖图像的灰度信息, 具有较好的抗干扰能力; 但是由于该方法需要额外投射三幅图像进行相位展开, 对实时性要求非常高的应用不适用。Xiao 等^[17] 利用投射一幅条纹宽度沿相移方向呈规律性变化的光栅图像获取了准确的条纹级数信息(利用光栅条纹的频率信息而非灰度信息), 这种方法具有很强的抗干扰能力, 并且只需投射单幅光栅图像, 适用于对实时性要求较高的应用场景; 但是, 该方法要求相移条纹宽度最少为 32 个投影单元, 并且需要校准时获得参考编码光栅的信息, 增加了信息处理复杂度。

为了进一步增强检测更小尺寸物体的能力并避免参考编码光栅的使用, 本文改进了基于频率分析的空间不连续物体表面的绝对相位获取方法, 重新对光栅结构进行了编码, 使得相移条纹宽度从 32 个投影单元降为 28 个, 从而可以检测更小的目标, 并且将空间分区由 4 个降为 2 个, 省去了在校准过程中获取参考编码光栅图像的步骤, 降低了信息处理复杂度。

2 相位展开算法

2.1 三步相移算法

在光栅投影中, 通常采用相移法从摄像机拍摄的光栅条纹图像中提取相位场分布, 其中三步相移法为常用的相移方法。光栅条纹图像可表示为

$$\begin{cases} I_1(m, n) = I'(m, n) + I''(m, n) \cos [\varphi(m, n) - 2\pi/3] \\ I_2(m, n) = I'(m, n) + I''(m, n) \cos [\varphi(m, n)] \\ I_3(m, n) = I'(m, n) + I''(m, n) \cos [\varphi(m, n) + 2\pi/3] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $I_i(m, n)$ ($i=1, 2, 3$) 为第 i 幅图中图像坐标为 (m, n) 的灰度值, $I'(m, n)$ 为条纹图背景的灰度值, $I''(m, n)$ 为调制强度, $\varphi(m, n)$ 为待求的相位主值。 $\varphi(m, n)$ 可表示为

$$\varphi(m, n) = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{3} [I_1(m, n) - I_3(m, n)]}{2I_2(m, n) - I_1(m, n) - I_3(m, n)} \right\}. \quad (2)$$

由于在求取相位的过程中利用了反正切函数, 通过(2)式计算得到的相位主值 φ 在 $(-\pi, \pi]$ 之间, 因而需要对相位主值进行相位展开, 获得真实相位值 Φ , 即绝对相位。真实相位值 Φ 可表示为

$$\Phi(m, n) = \varphi(m, n) + 2\pi k(m, n), \quad (3)$$

式中 k 为条纹级数。

2.2 基于编码光栅的相位展开算法

文献[17]介绍了一种基于光栅频率分析的不连续三维表面绝对相位获取方法, 编码光栅条纹为不等间隔的非均匀正弦光栅条纹, 如图 1 所示。编码光栅条纹的节距 λ 与频率的变化规律是周期性的。光栅条纹节距 λ 每相位周期变化一次, 条纹节距 λ 从最小值 λ_{\min} 逐渐增加至最大值 λ_{\max} , 此区间的条纹可称为一个分区。整个视场内存在分区的数量取决于投影仪沿正弦光栅条纹方向的空间分辨率和三相移条纹节距 λ_0 。每组条纹的宽度 l 相同, 等于三相移光栅条纹的节距 λ_0 。为了实现条纹频率信息的准确测量, 每组条纹的宽度不少于条纹节距 λ 的 4 倍, 即 $l > 4\lambda$, 以便获得准确的波形频率信息。

选用黑白数字摄像机(Vision Components VC6210nano), 其分辨率为 752 pixel \times 408 pixel。投影仪选

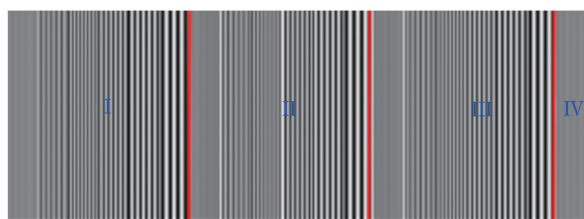


图 1 基于频率分析的编码光栅

Fig. 1 Encoding grating based on frequency analysis

用 TI DLP LightCrafter, 核心数字显微镜器件中包含 684×608 个投影像素单元, 可以灵活准确地控制光栅周期、相移步长, 从而实现各种投影光栅的编码模式。编码光栅的最大条纹节距 $\lambda_{\max} = 8$ pixel, 为满足每组条纹宽度 $l \geq 4\lambda$, 设三相移的条纹节距 $\lambda_0 = 32$ pixel。 λ_0 越小, 在同样深度测量范围内检测小尺寸空间物体的能力越强, 这是由于为了获得可靠的相位展开关键参数 k 值, 要求被测物体表面的尺寸沿光栅移动方向大于或等于编码条纹的宽度 l 。此外, 由于不连续三维表面绝对相位的获取方法在实际应用时存在几个分区, 为了识别编码条纹属于哪一个分区, 以获取正确的相位展开参数 k 值, 在实际应用时需要采集一幅参考编码光栅图, 即投射编码光栅到一被测白板, 并采集获取的信息。利用特征点分析参考编码光栅分区序列和实际被测物体分区序列, 确定正确的分区序列值, 该过程加大了信息处理的复杂度。

为了减少分区数量、缩短编码条纹的宽度 l , 在基于频率分析的编码光栅基础上进行改进, 增加了新的编码信息, 编码光栅设计如表 1 所示。为获取可靠的频率分量, 要求表 1 所示每个编码结构中具有相同节距的条纹数量不少于 4, 定义条纹最小节距 $p_1 = 2$ pixel, 依次类推, 定义条纹最大节距 $p_4 = 5$ pixel。每个编码按表 1 形式排列, 为保证表 1 中每个光栅编码被竖线隔开的 p_i 条纹数量不低于 4, 定义竖线左边区域的 p_i 条纹数量固定为 4, 因此每个编码光栅的条纹宽度 l 不低于 28 pixel, 即三相移的条纹节距 λ_0 最小为 28 pixel。与文献[17]中的三相移条纹宽度相比, 缩短了 4 pixel。此外, 由于投影仪沿相移方向包含 608 个投影像素单元, 利用公式 $\text{ceil}(608/28)$ 得到投影平面包含 22 组编码条纹。由于表 1 中一个周期包含 11 组编码, 因此整个被测表面的最大分区数由文献[17]中的 4 个减小为 2 个, 只需结合表 1 及特征点图像坐标位置, 即可正确获取特征点的条纹级数信息, 不需要额外的参考编码光栅图。改进的编码光栅结构如图 2(a) 所示, 改进的光栅、三相移正弦光栅、相位主值分布如图 2(b) 所示。红色曲线为水平方向的光栅截面图, 信号变化快慢与编码信号直接相关, 纵坐标轴表示灰度值; 蓝色曲线为相移值为零的三相移正弦光栅截面图, 条纹周期为 28 pixel, 纵坐标轴表示灰度值, 每一个正弦周期对应一个光栅编码; 紫色折线为相位主值, 每一个相位主值周期 (2π) 对应一个光栅编码, 纵坐标轴表示相位主值, 为了更清楚地反映相位周期与光栅周期之间的关系, 将相位值放大 30 倍。

表 1 编码光栅

Table 1 Encoding grating

Fringe order k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Code	$p_1 p_1$	$p_3 p_2$	$p_1 p_3$	$p_1 p_2 p_1$	$p_4 p_1$	$p_2 p_2$	$p_3 p_1$	$p_2 p_1$	$p_2 p_3$	$p_1 p_2$	$p_1 p_1$

以一个具体实例说明如何利用相位展开算法获取被测表面的绝对相位信息, 过程如下。

- 1) 利用投影仪 TI DLP LightCrafter 将三相移图像及编码光栅图像投射到被测物体(包含一个斜圆柱体和一个圆锥体)表面, 并利用相机 VC6210 nano 采集变形的的光栅条纹图, 采集的编码光栅图像如图 3(a) 所示。
- 2) 利用(2)式获取被测表面被包裹的相位信息, 即相位主值 φ 。
- 3) 利用分水岭分割算法^[17]并根据被测表面的连续性对被测表面进行分割, 获得 2 个局部连续区域 Q_1 和 Q_2 ; 对每一个局部连续区域应用 Goldstein 相位展开方法获取相应的相位信息 Φ'_1 和 Φ'_2 , 如图 3(b) 所示。
- 4) 在每一个局部连续区域中分别选取特征点, 选择位于同一条纹节距下的编码光栅的中间位置或附近的点作为特征点, 尽可能避开条纹节距变化的位置(即编码序列边缘位置)。选取 A 点作为局部连续区域 Q_1 的特征点, 选取 B 点作为局部连续区域 Q_2 的特征点。
- 5) 结合表 1 中 A 点和 B 点的条纹级数信息 $k_A = 7$ 和 $k_B = 3$ 以及它们之间相差的 2π 周期数 $s = 7$, 对 A

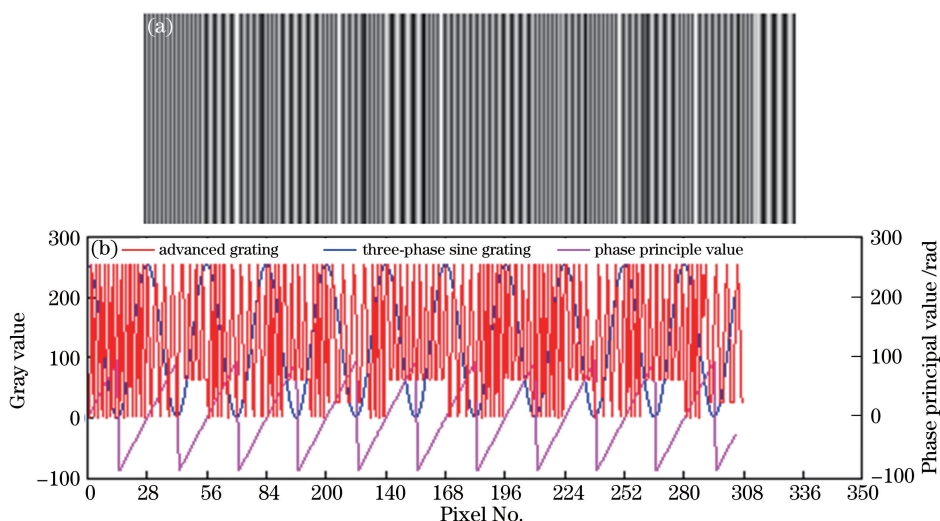


图 2 (a) 改进的编码光栅结构; (b) 改进的光栅、三相移正弦光栅、相位主值分布

Fig. 2 (a) Advanced encoding grating structure; (b) distribution of advanced grating, three-phase sine grating and phase principal value

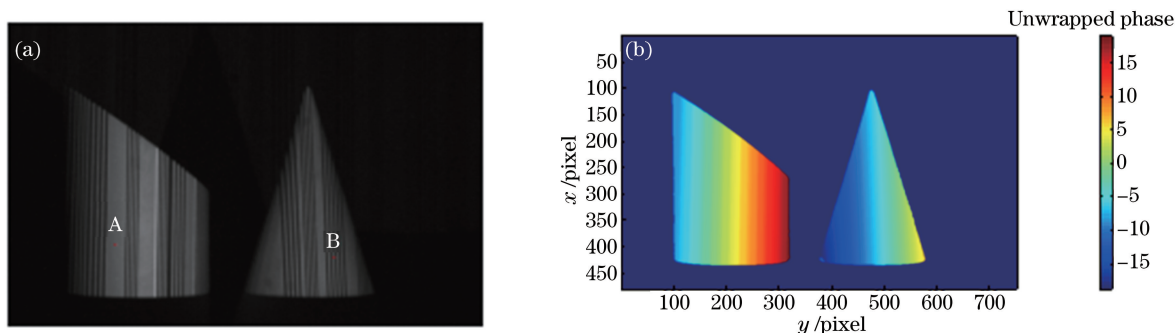


图 3 (a) 采集的编码光栅; (b) 连续区域展开的相位信息

Fig. 3 (a) Encoding grating collected; (b) unwrapped phase of continuous region

点和 B 点进行解码。以 A 点为例, 解码过程为: 根据相位主值图获取过 A 点的完整 2π 周期信号, 并且获得过 A 点的 2π 周期编码光栅的像素起始和结束位置, 如图 4(a) 所示; 根据条纹周期性获取左半部分 4 个条纹的编码信号并对其进行快速傅里叶变换 (FFT), 结合文献 [17] 中不同条纹节距对应的信号频率范围, 设定采样频率为 280 (高于条纹信号最高频率的 2 倍), 得到随频率变化的振幅信号, 从而获得相应条纹信号对应的频率分量, 如图 4(b) 所示; 对右半部分的剩余条纹信号作 FFT, 得到的频率分量如图 4(c) 所示。根据图 4(b)、(c) 的频率信号, 参考文献 [17] 中频率与编码 p_i 的对应关系 (当调整好相机与投影仪后, 在系统校准时可获取频率与编码 p_i 的对应关系), 结合编码光栅表, 得到 $k_A = 7$, 即编码为 $p_3 | p_1$ 。需要说明的是, $p_1 | p_2 | p_1$ 比较特殊, 如果左数第一位编码为 p_1 , 则需要判断右侧的 4 个条纹节距信号; 如果最右侧条纹编码也为 p_1 ,

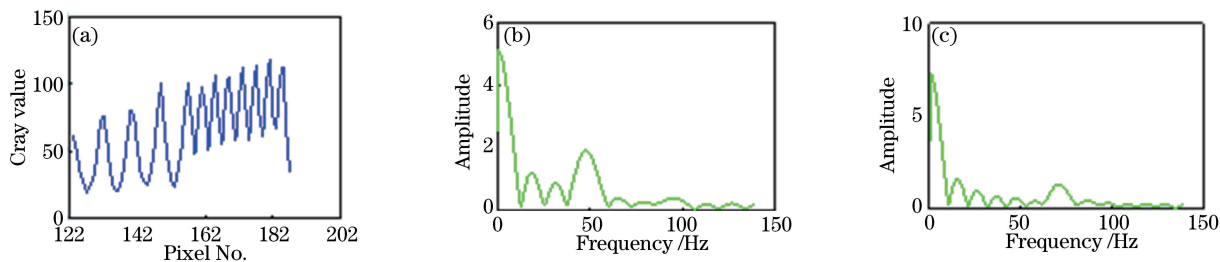


图 4 编码光栅信号分析。 (a) 特征点 A 对应的编码信号; (b) 左侧编码信号的频率分量; (c) 右侧编码信号的频率分量

Fig. 4 Signal analysis for encoding grating. (a) Encoding signal of feature point A; (b) frequency component of left encoding signal; (c) frequency component of right encoding signal

则需要对中间 4 个条纹节距信号进行判断以确定编码对应的是 $p_1|p_2|p_1$ 还是 $p_1|p_1$ 。

6) 根据不同局部连续区域的相位信息和特征点的条纹级数差, 获取整个复杂被测表面的相位展开信息。本例中, Φ'_1 对应的绝对相位信息 $\Phi_1 = \Phi'_1$, Φ'_2 对应的绝对相位信息 $\Phi_2 = \Phi'_2 + 2\pi s$, 整个被测表面的绝对相位信息为 $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$, 如图 5 所示。

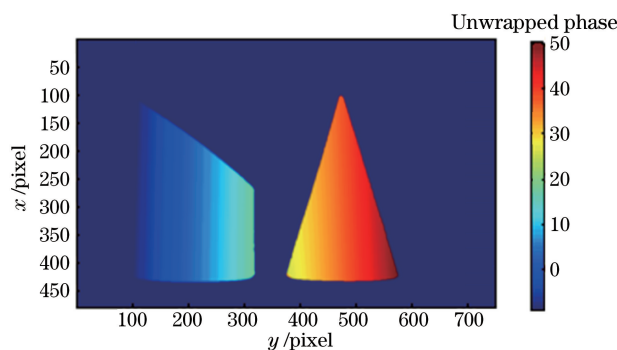


图 5 被测表面的绝对相位

Fig. 5 Absolute phase of measured surface

3 实验结果与分析

为了验证提出的基于编码光栅的空间不连续三维物体表面绝对相位获取方法比基于格雷码的方法具有更好的稳健性, 进行了如下实验。首先, 对空间不连续物体分别采用基于编码光栅的方法和基于格雷码的方法进行图像采集, 如图 6(a)、(b) 所示。调整相机, 逐渐减小光通量, 使得三相移图像的平均灰度值从 $L_1 = 37.7831$ 降为 $L_2 = 18.2426$, 然后重新对空间不连续物体分别采用基于编码光栅的方法和基于格雷码的方法进行图像采集, 如图 6(c)、(d) 所示。选取编码图像中任一点 T 作为特征点, 图 7(a) 为特征点所在编码光栅的灰度值分布, 蓝色曲线为图 6(a) 中特征点的灰度值分布曲线, 红色曲线是图 6(c) 中特征点的灰度值分布曲线, 可以看出, 虽然它们的信号强度相差很大, 但正弦曲线对应波峰、波谷的位置基本一致。对图 7(a) 中信号进行傅里叶分析, 获得的频率点位置基本一致, 如图 7(b)、(c) 所示, 表明图 7(a) 中信号对应的编码值一致。

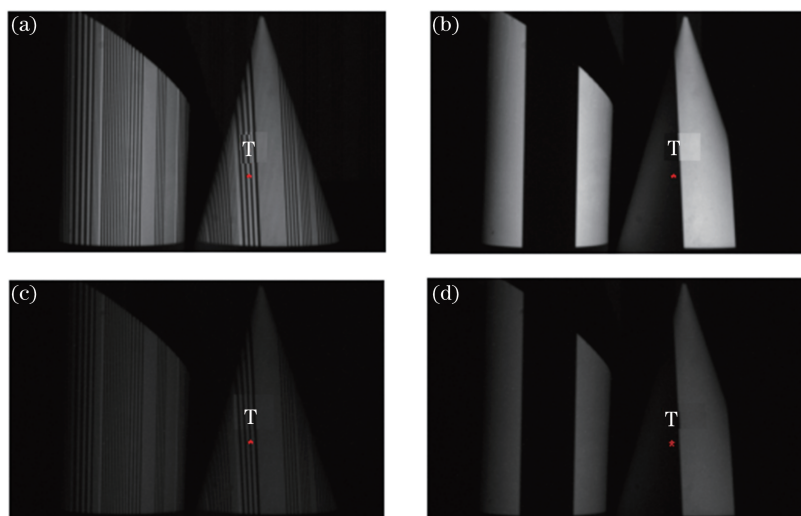


图 6 采用不同的方法对空间不连续物体进行相位采集。(a) 基于编码光栅的方法; (b) 基于格雷码的方法; (c) 减小光通量后基于编码光栅的方法; (d) 减小光通量后基于格雷码的展开

Fig. 6 Phase collection for spatial discontinuous object obtained by different methods. (a) Method based on encoding grating; (b) method based on Gray code; (c) method based on encoding grating with luminous flux reduced; (d) method based on Gray code with luminous flux reduced

采用基于格雷码的方法判断条纹级数时通常采用取灰度值阈值的方法,即大于某一灰度值时信号值取1,反之取0。当光密度不同时,基于灰度值阈值的判断方法容易出现误判,如图7(d)、(e)所示,M点灰度值为44,对应二进制1,N点灰度值为45,对应二进制0,如果单纯采用灰度值阈值的办法进行判断,将会直接产生错误。应用提出的基于编码光栅的方法,对在光密度较低情况下采集的编码图像中的M点对应的编码条纹作傅里叶变换(FT),结果如图7(f)所示。虽然三相移图像平均灰度值从 L_1 降为 L_2 ,但仍可准确确定其对应的编码 p_3 ,并且光密度越大,信号越强,进行傅里叶变换后相应频率分量对应的强度越大,判断越可靠。因此,基于编码光栅的条纹级数获取方法比基于格雷码的方法具有更好的稳健性。根据2.2节所介绍的解码步骤和相位展开方法,获得空间不连续斜圆柱体和圆锥体表面的绝对相位,如图7(g)所示。

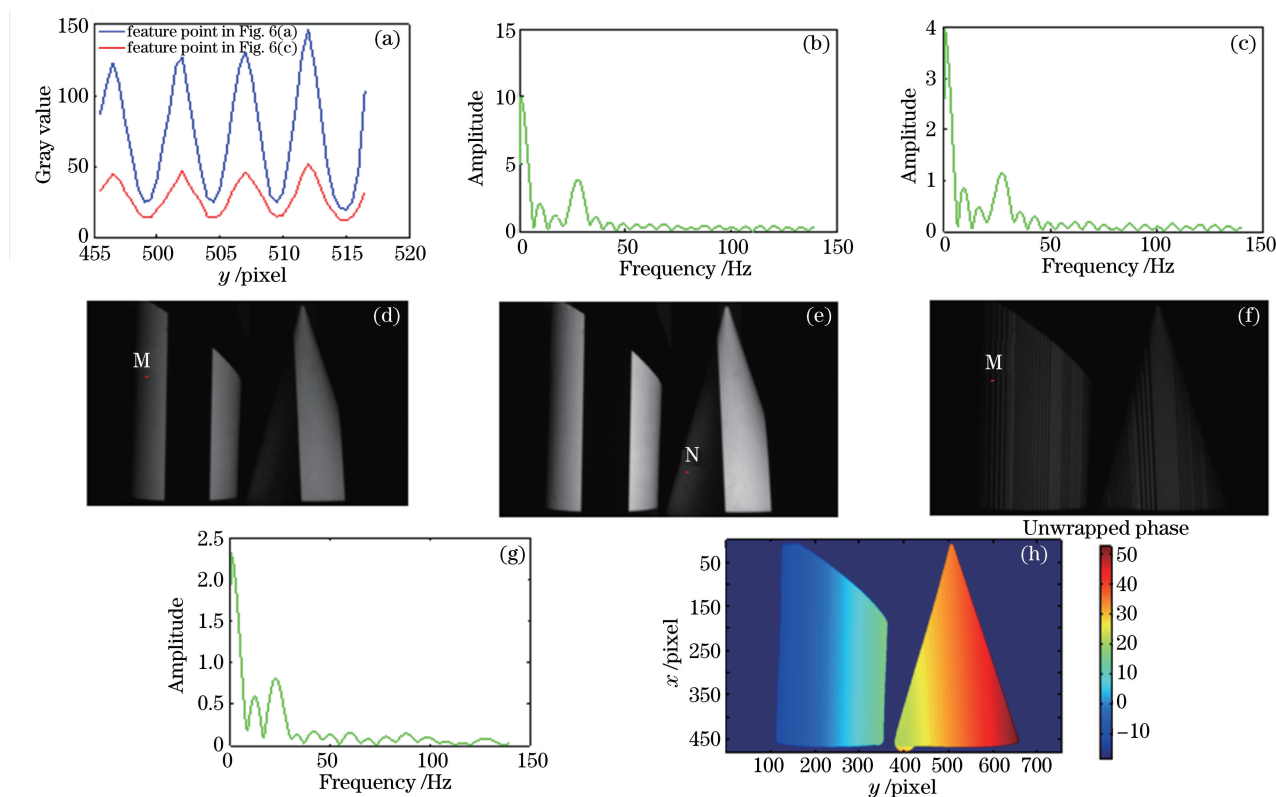


图7 (a) 编码信号的灰度值分布; (b) 编码信号的频率分量; (c) 减小光通量后编码信号的频率分量;
 (d) 低光密度 L_2 时的特征点M; (e) 高光密度 L_1 时的特征点N; (f) 低光密度 L_2 时的编码光栅特征点M;
 (g) 编码光栅特征点M所在编码条纹的频率分量; (h) 获得的绝对相位图

Fig. 7 (a) Gray value distribution of encoding signal; (b) frequency component of encoding signal; (c) frequency component of encoding signal with luminous flux reduced; (d) feature point M for low light density L_2 ; (e) feature point N for high light density L_1 ; (f) feature point M of encoding grating for low light density L_2 ;

(g) frequency component of encoding stripe which contains encoding grating feature point M; (h) absolute phase obtained

为了进一步验证基于编码光栅获取空间不连续表面绝对相位信息的方法,对该方法的准确性和适应性进行了深入研究,将被测物体从简单表面的规则目标扩展为复杂表面的不规则目标,并且被测目标由两个物体扩展为三个物体(从左向右依次为脚石膏、纸杯和手石膏模型)。对被测表面应用Goldstein相位展开方法,获得的绝对相位图如图8(a)所示,分别求取每一个不连续被测表面的相位信息,结果如图8(b)所示。从图8(a)可以看出,纸杯模型和手石膏模型对应的绝对相位出现了不同程度的错误。实验采集的编码光栅图像如图8(c)所示,运用提出的基于编码光栅的相位展开方法获取的特征点A、B、C的编码值分别为 $p_2|p_1$ 、 $p_1|p_1$ 、 $p_4|p_1$ 。A、B点的条纹级数差为4,A、C点的条纹级数差为8。通过(3)式获得3个被测物体表面的绝对相位信息如图8(d)所示。为了进一步验证该方法的准确性,采用基于格雷码的方法对同样的被测表面进行相位展开,获取特征点的条纹级数信息。从图8(d)绝对相位信息可以估算出被测表面的条纹级数最大值为15,因此选用4位格雷码(共16个不同的编码值)以覆盖整个被测表面。由于三相移条纹宽度值为

28 pixel,因此实际使用的投影像素单元大小为 28 pixel \times 16 pixel,大约占 DLP 投影仪整个投影平面面积的 73.7%。根据采集的 4 幅格雷码图像,求得特征点 A、B、C 的格雷码值分别为 1011、0001、0111。同样获得特征点 A、B 的条纹级数差为 4,A、C 点的条纹级数差为 8,与基于编码光栅的方法获取的条纹级数信息一致,验证了提出的基于编码光栅的相位展开方法的准确性。

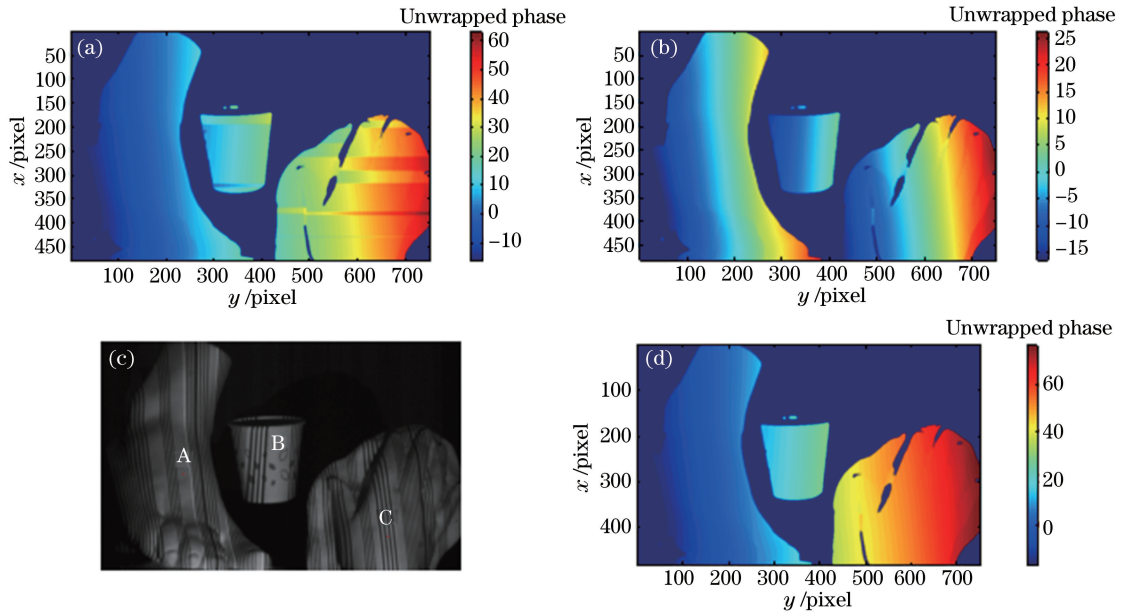


图 8 空间不连续物体的相位展开。(a) 基于 Goldstein 相位展开方法获得的被测表面的绝对相位图;
 (b) 应用 Goldstein 相位展开方法获得的每一连续区域的相位图;
 (c) 相机采集的被测表面的编码光栅图像;(d) 基于编码光栅方法获得的被测表面的绝对相位图

Fig. 8 Phase unwrapping of spatial discontinuous objects. (a) Obtained absolute phase map of measured surface with Goldstein phase unwrapping method; (b) obtained phase map of each continuous region with Goldstein phase unwrapping method; (c) encoding grating image of measured surface obtained by camera; (d) absolute phase map of measured surface obtained from encoding grating based method

为获取准确的编码值,要求被测物体的尺寸至少为一个相位周期。基于 DLP 投影仪相移宽度随深度变大成比例变宽的特性,最小检测尺寸随被测表面距离测试系统的深度不同而不同。根据 DLP LightCrafter 投影仪投影比关系,得到透镜到投影平面的中心距离与投影平面的宽度之比约为 1.66,相移宽度设为 28 pixel,从而得到被测物体沿相移方向的尺寸 L' 与投影仪镜头中心到投影平面中心的距离 D 之间的关系为 $L' = D(28/608)/1.66$ 。被测物体距离投影仪镜头约为 800 mm,因此理想情况下被测物体沿相移方向的最小尺寸约为 22.2 mm,垂直于相移方向的最小尺寸无具体要求。实际应用中,为了保证在任何情况下都可以获取完整的编码信号,实现可靠解码,要求被测物体沿相移方向的最小尺寸需覆盖两个 2π 相位周期 (56 pixel)。

4 结 论

针对空间不连续物体绝对相位的获取问题,提出了一种改进的基于编码光栅的相位展开方法。该方法只需投射一幅编码图像,便可获取条纹级数信息。相比基于格雷码的方法,该方法更适用于对实时性要求比较高的场合。由于充分利用了空间编码光栅的频率信息,且不依赖灰度信息,因此该方法具有更好的抗噪声性能。此外,为了可靠、准确地对采集的编码光栅图像进行解码,要求表 1 中每个编码信息对应不同节距 p_i 的编码宽度至少为整条纹周期的 4 倍,因此限制了进一步检测更小尺寸物体的能力。该方法在特征点附近的编码条纹具有可延展性,下一步希望通过对正弦编码条纹延展性的研究来进一步提高检测更小尺寸物体的能力。

参 考 文 献

- 1 Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- 2 An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512004.
安 冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512004.
- 3 Judge T R, Bryanston-Cross P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21(4): 199-239.
- 4 Su X Y, Chen W J. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 245-261.
- 5 Huang K M, Yamada T. Phase unwrapping by regions using least-squares approach[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(11): 2965-2970.
- 6 Sansoni G, Carocci M, Rodelia R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- 7 Saldner H O, Huntley J M. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(13): 2770-2775.
- 8 Wissmann P, Schmitt R L, Forster F. Fast and accurate 3D scanning using coded phase shifting and high speed pattern projection[C]. *International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*, 2011: 12122111.
- 9 Liu K, Wang Y C, Lau D L, *et al.* Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 5229-5244.
- 10 Xu Y, Jia S H, Luo X, *et al.* Multi-frequency projected fringe profilometry for measuring objects with large depth discontinuities[J]. *Optics Communications*, 2013, 288: 27-30.
- 11 Li E B, Peng X, Xi J, *et al.* Multi-frequency and multiple phase-shift sinusoidal fringe projection for 3D profilometry[J]. *Optics Express*, 2005, 13(5): 1561-1569.
- 12 Jiang C, Jia S H, Dong J, *et al.* Multi-frequency color-marked fringe projection profilometry for fast 3D shape measurement of complex objects[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24152-24162.
- 13 Sun Shijie, Zhai Aiping, Cao Yiping. A fast algorithm for obtaining 3D shape and texture information of objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312001.
孙士杰, 翟爱平, 曹益平. 一种快速获取物体三维形貌和纹理信息的算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0312001.
- 14 Li Zhongwei. Three dimensional measurement technology and system of structured light based on digital grating projection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009: 19-27.
李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009: 19-27.
- 15 Chen Songlin, Zhao Jibin, Xia Renbo. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0412004.
陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0412004.
- 16 Wang Y J, Zhang S. Novel phase-coding method for absolute phase retrieval[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2067-2069.
- 17 Xiao S Z, Tao W, Zhao H. A flexible fringe projection vision system with extended mathematical model for accurate three-dimensional measurement[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 612.