

DOI: 10.7652/xjtub201708003

面向光学三维测量的非均匀条纹生成方法

韩江涛, 张英杰, 李程辉, 张佳瑞
(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对投影条纹间距比较小和被测表面法向处于变化范围较大的状态时局部条纹形变严重、分布密集,甚至出现条纹间重叠干涉现象,导致相位求解、条纹中心提取等方法失效的问题,提出了一种非均匀投影条纹生成算法。先利用投影均匀条纹到被测物体上,对相机采集图像中局部条纹分布密集的区域进行相位梯度调整,再运用反向条纹投影原理计算出非均匀投影条纹。对投影均匀条纹和非均匀条纹到被测物体表面进行光学三维测量,仿真和实验结果表明:当测量精度均达到 $50\ \mu\text{m}$ 时,投影均匀条纹测量时有 7.2% 的数据点丢失,投影非均匀条纹时仅有 0.24% 的数据点丢失,基本上解决了局部条纹变形严重、分布密集导致点云丢失的问题,从而保证测量数据的可靠性。

关键词: 光学三维测量;均匀条纹;非均匀条纹;反向条纹投影

中图分类号: TP391.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)08-0012-07

Generation of Non-Uniform Fringes Pattern for Optical 3D Measurement

HAN Jiangtao, ZHANG Yingjie, LI Chenghui, ZHANG Jiarui
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the problems, like local deformation and concentrated distribution of fringes, or even overlap and interference between the fringes in the case that the pitch of the projective fringes is small and the variation range of the object surface normal direction is large, a new algorithm for the generation of non-uniform projective fringe pattern is proposed. The uniform fringe pattern is projected to the measured object, and the phase gradient of local fringe pattern in the picture captured by the camera is adjusted to a reasonable value. Then the non-uniform projective fringe pattern is generated with the principle of inverse projected-fringe technique. The simulation and experiment show that although the measurement accuracy of $50\ \mu\text{m}$ can be achieved by uniform fringe pattern or non-uniform fringes, there are 7.2% missing data points by the former and only 0.24% missing data points by the latter. It is concluded that the proposed algorithm can solve the problem of serious deformation and dense distribution of the local fringes to guarantee the reliability of the measurement data.

Keywords: optical 3D measurement; uniform fringes; non-uniform fringes; inverse projected-fringe technique

快速而稳定的三维面形检测技术对于工业产品质量控制具有重要意义^[1]。结构光三维测量法^[2]是近年来迅速发展起来的一种光学三维测量技术^[3-4],

包括莫尔轮廓术^[5]、相位测量轮廓术^[6]、傅里叶变换轮廓术^[7]等,被广泛应用于工业产品的面形测量及检测中。这些方法关键在于从被测物体形面调制的

收稿日期: 2017-02-09。 作者简介: 韩江涛(1990—),男,硕士生;张英杰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375377)。

网络出版时间: 2017-04-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170418.1425.010.html>

变形条纹图中得出相位值,再结合系统标定参数获得物体的表面轮廓信息^[8]。结构光三维测量中一般投影正弦条纹,采用高频条纹的测量精度比低频条纹高得多^[9],即测量精度随着投影条纹间距变小不断提高,可以获得高精度的物体形面。然而,当条纹间距小到一定值时,且物体表面法向变化范围较大,采集图像中局部区域条纹发生剧烈变形,条纹间距变小分布密集,甚至出现重叠干涉现象,导致相位求解^[10]、条纹中心提取^[11]等方法失效,造成被测表面局部三维点云数据丢失。

为了解决局部条纹变形严重及分布干涉导致相位无法求解的问题,就要对投影条纹根据被测物体表面轮廓参数进行设计。文献[12-13]提出反向条纹投影技术,根据被测物体的三维数据生成投影的反向条纹。文献[14-15]对反向条纹投影技术进行了完整详尽的理论概括。传统光学三维测量方法一般是投影正弦条纹到物体表面记录变形条纹图像,而反向条纹投影技术则是逆向过程,即根据被测对象轮廓生成反向条纹投影到物体得到正弦条纹。

本文基于反向条纹投影技术原理,提出了一种非均匀投影条纹生成算法,根据被测物体表面法向的变化情况对投影条纹进行设计和布局,在保证一定测量精度的同时,解决了条纹投射到被测表面法向向量变化剧烈的区域时局部条纹变形严重及分布密集的问题。

1 条纹变形理论

传统条纹投影技术投影均匀条纹到被测物体表面上(如图 1a 所示),获得变形条纹(如图 1b 所示),对变形条纹图像进行解相位得到相位轮廓图(如图 1c 所示)。图形左侧局部条纹分布密集影响相位提取精度,引起被测物体表面三维测量误差。

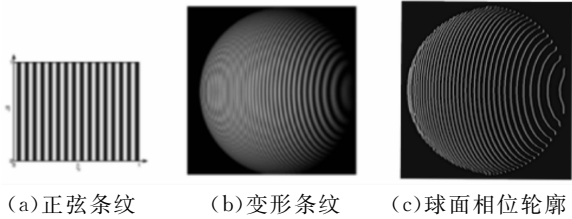


图 1 投影均匀条纹图案

当测量系统和投影条纹间距均匀固定时,条纹的变形程度取决于相机和投影仪之间的相对位置和物体表面上点的位置和法向。测量原理图如图 2a 所示,投影仪和相机(CCD)夹角 θ_{pc} 一般取 30° ,用一个小平板表示被测表面,放在投影仪和 CCD 光轴交

点处,当小平板的倾角 $\alpha=0^\circ$ 时,其法向处于光轴角平分线上。投影正弦条纹到小平板上,在小平板处于不同倾角时,使用相机进行图形采集,并且对 $\alpha=0^\circ$ 处条纹间距进行归一化处理得到条纹间距和小平板倾角之间关系,如图 2b 所示。由于一般复杂被测曲面的法向角均处于上述讨论范围之内,条纹间距变化情况都满足图 2b 所示规律。

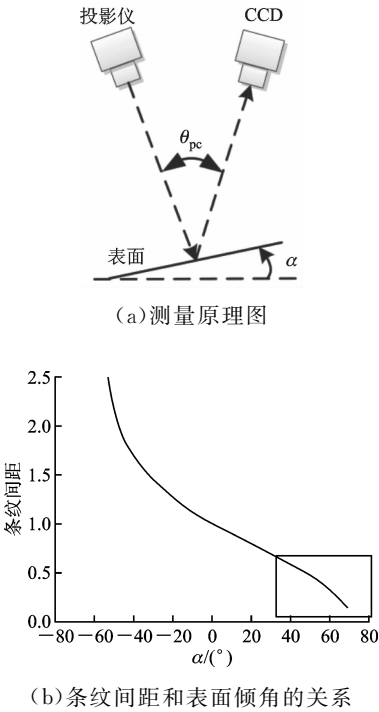
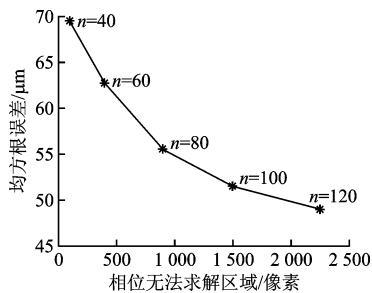
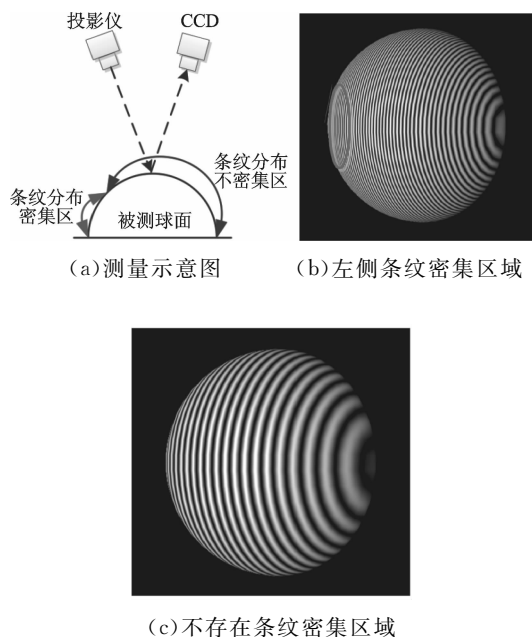


图 2 局部条纹间距和表面倾角的关系

在一般情况下,间距固定均匀的投影条纹容易获得并且也可以实现良好的测量性能。然而,当条纹间距受到限制时,很难同时保证测量精度和测量范围。采用投影均匀条纹测量一个球面物体时存在的问题如图 3 所示,测量系统见图 3a,整个半球面对投影仪和相机是可见的,理论上整个半球面是可以被测量的。由于球面上点的法线方向范围变化较大,相机采集图像的条纹间距变化显著,在局部区域条纹间距变窄、分布密集,甚至出现条纹重叠干涉现象,条纹信息提取失败,导致局部三维点云数据丢失。例如,投影 120 个窄间距条纹到被测球面,左侧被标记区域条纹分布密集,条纹信息提取不准确甚至失败,见图 3b。投影 40 个宽间距条纹,消除相机采集图像中局部条纹分布密集的问题,但是投影的条纹数目减少导致整体测量精度下降,见图 3c。通过实验得到,投影不同数目条纹图案测量精度高低和局部条纹相位值无法求解区域的关系如图 3d 所示,随着条纹数目增加,测量精度不断提高,但是局

部条纹相位值无法求解区域也不断变大。



(d) 测量精度和相位无法求解区域的关系

图3 投影均匀条纹测量球面物体

总之,当投影均匀条纹测量表面法线方向变化范围较大的对象时,测量精度和测量区域二者之间出现冲突。在很多情况下,为了保证测量精度,投影高频条纹出现局部区域条纹分布密集,导致相位无法求解,从而产生三维点云数据丢失的问题,测量范围缩小。针对此问题,在反向条纹投影技术原理的基础上,提出一种根据被测物体表面法向参数生成条纹间距变化的非均匀条纹图案的算法,解决局部条纹相位无法求解的问题,从而保证测量精度和测量区域。

2 非均匀条纹生成算法

2.1 非均匀条纹概念

传统条纹投影技术一般投影直条纹(比如正弦条纹)到被测对象,得到变形条纹。反向条纹投影技术是传统投影技术的逆向过程,根据标准样品的绝对相位测量结果以及记录平面上的期望条纹(标准

正弦条纹),生成所需要的反向条纹即变形条纹。在投影测量时,投影反向条纹到被测对象上得到的条纹,和标准的正弦条纹进行比对,若被测对象与样品一致,在记录平面上就可得到期望条纹,即标准的正弦条纹。若被测对象有变形,得到的条纹仅在变形处产生弯曲,测量值为被测对象相对于标准样品的形变量。

本文为了解决在相机平面上局部变形严重且分布密集引起相位无法求解的问题,对条纹进行设计和调整,且作为期望条纹,利用反向条纹投影技术原理反向求解,获得待投影的非均匀条纹,投影到被测对象得到变形条纹,测量值为被测对象的三维信息。本文非均匀条纹生成的方法与反向条纹投影技术最大的区别是对记录平面上期望条纹的定义,反向条纹投影技术是标准的正弦条纹,而本文方法是对条纹变形严重且分布密集的局部区域调整后的条纹。

非均匀投影条纹生成过程:首先投影条纹获得被测物体的绝对相位,然后通过相位信息建立相机和投影像素坐标之间的对应关系,对局部条纹相位值无法求解的区域进行调整,然后反向计算获得非均匀投影条纹。当被测对象的形状或者位置发生变化时,需要生成相应的非均匀投影条纹图案。该算法需要提前知道被测对象的大致形状以及相对于传感器的位置。这些参数可以通过被测对象的几何模型或者初步测量获得,其中初步测量即投影间距较大的均匀条纹图案,消除条纹分布密集区域。初步测量的目的不是获得高精度的测量结果,而是获得被测对象的绝对相位信息。

2.2 非均匀投影条纹间距设计因素

光学三维测量技术就是通过投影条纹获得被测对象的相位,相位的精度决定了最后测量结果的精度。所以,从误差来源考虑,有两种提高相位精度的方法:一是增加条纹对比度,二是减小投影条纹间距。但是,这两种方法相互制约,存在矛盾冲突。

投影条纹的最小间距受到数字投影仪的限制:当条纹间距过小时,投影仪散焦会引起条纹对比度明显下降,导致相机获取的条纹图像对比度较差;相机的有限分辨率也限制了投影条纹的间距,相机采集图像中局部区域条纹间距过小、条纹分布密集,影响相位的求解精度,甚至无法求解。

基于上述限制因素,本文提出了在条纹对比度较好且不会引起条纹分布密集的情况下生成条纹间距变化的非均匀条纹的算法,在保证最佳测量精度的同时解决局部条纹相位值无法求解的问题。

2.3 非均匀条纹生成算法及步骤

2.3.1 获得被测对象水平和竖直相位 投影均匀条纹获得被测对象的绝对相位,根据对应点等相位原理获得投影仪图像坐标和相机图像坐标之间的对应关系。

分别投影水平和竖直均匀条纹获得被测对象的水平和竖直绝对相位 $\Phi^{(H)}$ 、 $\Phi^{(V)}$,投影条纹间距适中,避免相机采集图像中局部条纹分布密集导致的相位求解失败。 T_P 表示最好测量效果下的最小条纹间距,则 cT_P 表示投影竖直条纹间距,其中系数 c 一般大于 2。

$\Phi_P^{(V)}(\xi, \eta)$ 和 $\Phi_P^{(H)}(\xi, \eta)$ 分别表示投影条纹的竖直和水平相位分布函数,具体表达式如下

$$\left. \begin{aligned} \Phi_P^{(V)}(\xi, \eta) &= \frac{2\pi}{cT_P} \xi \\ \Phi_P^{(H)}(\xi, \eta) &= \frac{2\pi}{cT_P} \eta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

同理,在投影仪成像平面上对应点 (ξ_1, η_1) 相位根据对应点等相位原理可知

$$\left. \begin{aligned} \Phi_P^{(V)}(\xi_1, \eta_1) &= \Phi_C^{(V)}(u_1, v_1) \\ \Phi_P^{(H)}(\xi_1, \eta_1) &= \Phi_C^{(H)}(u_1, v_1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(1)、式(2),可得

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= \frac{cT_P}{2\pi} \times \Phi_C^{(V)}(u_1, v_1) \\ \eta_1 &= \frac{dT_P}{2\pi} \Phi_C^{(H)}(u_1, v_1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:系数 d 控制水平条纹间距大小,一般约等于 c ; $\Phi_C^{(V)}(u, v)$ 、 $\Phi_C^{(H)}(u, v)$ 分别表示投影相位为 $\Phi_P^{(V)}(\xi, \eta)$ 、 $\Phi_P^{(H)}(\xi, \eta)$ 的条纹到被测对象上对应的相位值,点 (u_1, v_1) 可以用一对相位值 $\Phi_C^{(V)}(u_1, v_1)$ 和 $\Phi_C^{(H)}(u_1, v_1)$ 表示。

2.3.2 建立非均匀投影条纹图像的相位梯度函数

设 $\Phi_P^{(N)}(s, t)$ 表示非均匀投影条纹相位分布函数,定义在二维空间 $\xi\eta$ 内, (s, t) 表示像素坐标。 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(s, t)$ 表示 $\Phi_P^{(N)}(s, t)$ 沿 ξ 轴上的梯度函数,表达式如下

$$[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(s, t) = \Phi_P^{(N)}(s, t+1) - \Phi_P^{(N)}(s, t) \quad (4)$$

式中: $s=1, 2, 3, \dots, S$; $t=1, 2, 3, \dots, (T-1)$; S, T 表示 $\Phi_P^{(N)}$ 的维度。

要想获得非均匀条纹,首先按照以下步骤生成调整行像素的相位梯度函数 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}$ 。

(1)将 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}$ 中所有元素初始化为 $2\pi/T_P$,其中 T_P 是上述所提的投影条纹最小间距临界值。

(2) T_C 表示相机图像中能够精确检测到条纹最小间距,取决于相机分辨率。 $[\nabla\Phi]_u(i, j)$ 表示

$\Phi_C^{(V)}(u, v)$ 在 u 轴上的梯度,并且建立一个图像标记板 M_C 对 $[\nabla\Phi]_u(i, j)$ 进行标记。在相位图中对于所有像素点 (i, j) ,若满足

$$[\nabla\Phi]_u(i, j) > \frac{2\pi}{cT_C} \quad (5)$$

则

$$M_C(i, j) = [\nabla\Phi]_u(i, j) \quad (6)$$

若不满足式(5),则

$$M_C(i, j) = 0 \quad (7)$$

运用区域生长法,将 M_C 中非零点连接形成一系列的联通区域,若相位梯度满足式(5)时,则判定局部区域条纹分布密集相位无法求解。

(3)用 $S_M(l)$ ($l=1, 2, 3 \dots L$) 表示 M_C 中的各联通区域。建立一个图像标记板 $M_C^{(N)}$ 对 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}$ 中需要调整行像素点标记,找到联通区域 $S_M(l)$ 的边界,通过式(3)映射到 $M_C^{(N)}$ 中,并进行填充形成 $S_M^{(N)}(l)$ 。

(4)考虑 $M_C^{(N)}$ 中一个区域 $S_M^{(N)}(l_1)$ 。对 $S_M^{(N)}(l_1)$ 区域进行搜索,找到相位梯度最大的一行像素,比如第 i 行像素,在该行中,根据对应点等相位原理即式(3),计算像素点 (i, j) 在投影仪中对应点 (x, y) ,结合图 2 中条纹间距和被测表面倾角之间的关系,提出相位梯度调整数学模型,在 ξ 轴上进行梯度计算

$$[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(x, y) = \frac{4\pi^2}{cT_P T_C [\nabla\Phi]_u(i, j)} \quad (8)$$

对所用的区域 $S_N(l)$ 同样处理。相机像素点坐标 (i, j) 是整数,但对应的投影仪像素点坐标 (x, y) 值通常不是整数,为此运用整数插值运算方法对 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(x, y)$ 进行整数插值,求得 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(s, t)$,即

$$[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}\left(\begin{smallmatrix} s \\ t \end{smallmatrix}\right) = f[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}\left(\begin{smallmatrix} x \\ y \end{smallmatrix}\right) \quad (9)$$

式中: f 表示整数插值运算函数; s, t 是整数,表示投影仪像素坐标。

(5)对得到 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(s, t)$ 进行高斯滤波平滑处理,以防止梯度跳跃变化。

(6)对于不满足式(5)的区域梯度 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}$ 不用进行调整,取初始值 $2\pi/T_P$ 。

2.3.3 建立非均匀条纹图像的调整行像素(一维相位函数 $\Phi_P^{(N)}$) 一旦生成调整行像素的相位梯度函数 $[\nabla\Phi]_\xi^{(N)}$,根据式(4)计算得到一维相位函数 $\Phi_P^{(N)}$

$$\Phi_P^{(N)}(s, t) = \Phi_P^{(N)}(s, t-1) + [\nabla\Phi]_\xi^{(N)}(s, t-1) \quad (10)$$

式中: (s, t) 表示投影仪图像像素点坐标矩阵, s 表示

调整相位梯度的像素所在的行, $t=2,3,4,\cdots,T$, $\Phi_p^{(N)}(s,1)$ 初始化值设为 0。

2.3.4 根据相位生成非均匀投影条纹 对调整行相位 $\Phi_p^{(N)}$ 用正弦函数编码, 并且沿 η 轴方向复制扩展得到非均匀条纹, 即

$$I_p^{(N)}(s,t) = \frac{I_{pmax}^{(N)}}{2} [1 + \sin(\Phi_p^{(N)}(s,t))] \quad (11)$$

式中: $I_p^{(N)}(s,t)$ 表示投影条纹图像中像素点强度; $I_{pmax}^{(N)}$ 表示最大强度。

非均匀投影条纹生成示意图如图 4 所示。

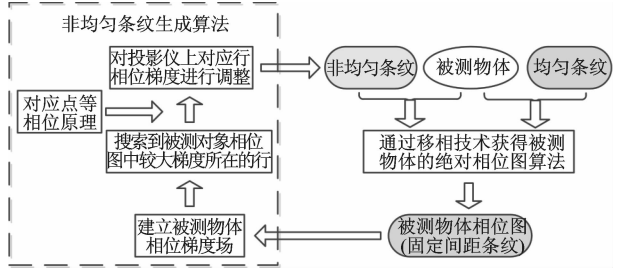


图 4 非均匀投影条纹生成示意图

针对球形面生成一个非均匀条纹图案如图 5 所示, 图 5a 表示用于投影的正弦条纹, 图 5b 表示投影均匀条纹到球面上得到相位轮廓, 左侧表示因条纹分布密集, 相位无法求解, 图 5c 表示本文算法生成的非均匀条纹。

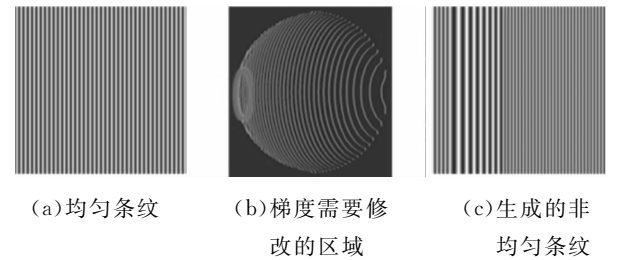


图 5 球形面生成的非均匀条纹

3 计算机模拟仿真及结果分析

在计算机模拟中, 运用 MATLAB 和 3D MAX 软件采用正投影斜拍摄的方式, 对两个曲面进行模拟仿真: 一个球形面如图 6a 所示, 一个双峰曲面如图 7a 所示。

本文算法对不同被测对象生成的非均匀条纹如图 6c 和图 7c 所示, 分别投影得到图像如图 6d 和图 7d 所示。作为对比, 将周期(间距)为 15 像素的正弦条纹分别投影到被测表面, 得到图像如图 6b 和图 7b 所示, 获得的三维点云如图 6e、图 7e 所示, 由于局部条纹分布密集相位无法求解, 导致局部三维点云丢失。对文本方法生成的非均匀条纹进行测量,

获得三维点云如图 6f、图 7f 所示, 解决了因局部条纹分布过于密集相位无法求解, 导致三维点云丢失的问题, 进而获得被测对象完整的三维点云数据。

投影正弦条纹、非均匀条纹以及多帧不同间距的正弦条纹测量结果的性能对比如图 6g 和图 7g 所示, n 表示投影正弦条纹数目。从图中可知, 投影正弦条纹数目从 40 增加到 100, 测量精度也从 69.5 μm 提高到 52 μm , 但相机采集图像中条纹相位无法求解区域也从 0.2% 增大到 7.3%, 所以提高测量精度和减小相位无法求解区域二者不能同时满足; 本文的非均匀条纹既可以缩小相位无法求解区域, 又可以实现很高的测量精度; 多帧变条纹间距测量数据融合方法也可以克服被测形面的局部数据丢失问题, 即将不同间距的正弦条纹的测量数据进行融合, 测量精度和相位无法求解区域取决于多次测量数据融合精度。从图 6、图 7 数据可知, 本文的非均匀条纹测量性能更优。

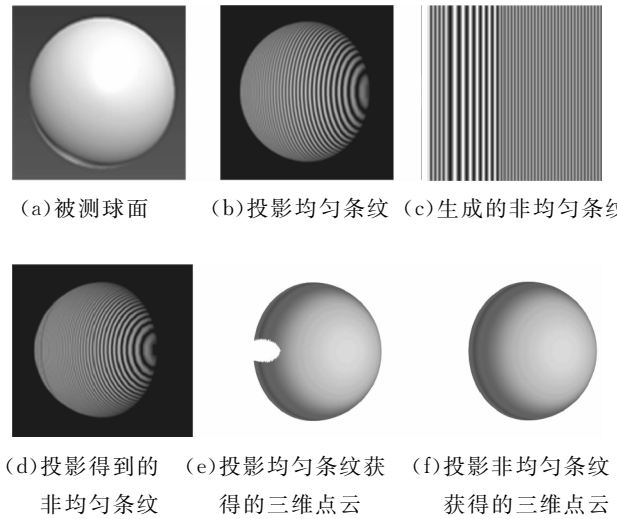
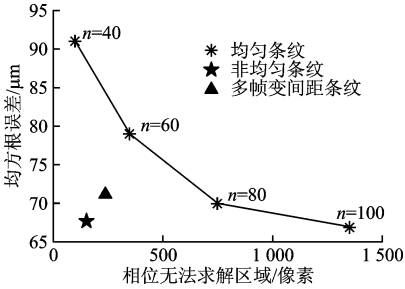
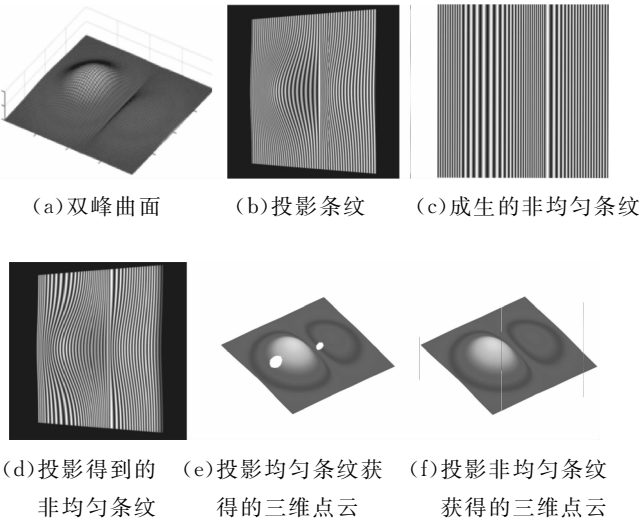


图 6 模拟仿真测量球面

在模拟仿真中, 发现相机采集到的变形条纹中的局部区域条纹间距较大, 如图 6d 球体左上角和左下角区域, 采样数据有所下降, 这是因为非均匀条纹



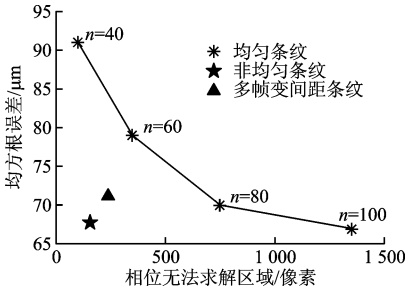
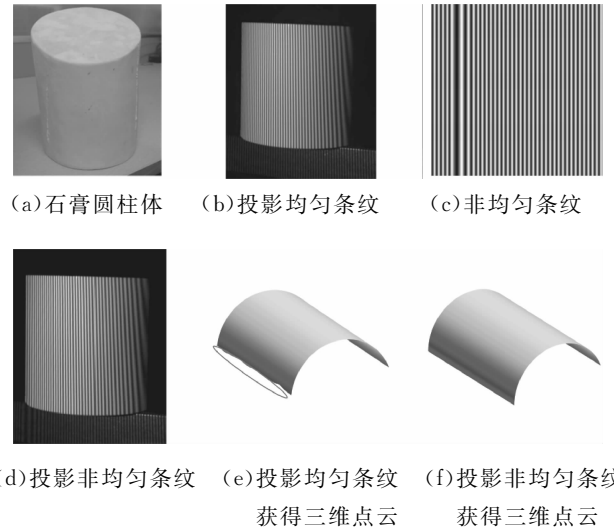
(g) 3 种测量方法性能对比
图 7 模拟仿真测量双峰曲面

根据条纹分布最密集区调整后反向计算得到的。虽然在某些区域出现采样点数据有所减少,但在一定范围之内,对测量质量影响比较有限,因为这些区域表面轮廓简单,三维信息较少,并且在采样点有所下降(不是很严重)的情况下,对测量点云数据进行合理的插值运算,可以保证一定的测量精度。

4 实物测量实验及结果分析

实际测量实验系统如图 2a 所示,被测对象是一个圆柱体,如图 8a 所示,数字投影仪型号为奥图码 DN322,分辨率为 $1\,024 \times 768$ 像素,相机型号为 PointGray 的 GX-FW-28S5M-C,分辨率为 $1\,400 \times 1\,200$ 像素。圆柱直径为 90 mm,高度为 120 mm,非均匀条纹如图 8c 所示,分别投影正弦条纹(周期为 10 个像素)和非均匀条纹到圆柱体上,如图 8b 和图 8d 所示。当投影正弦条纹的间距小于 15 像素时,圆柱体左侧局部区域出现条纹分布密集相位值无法求解的问题,三维重建点云如图 8e 所示;投影本文的非均匀条纹时圆柱体上左侧局部条纹分布较为合理,三维重建点云如图 8f 所示。图 8g 表示 3 种方法的测量性能对比,当两种条纹测量精度达到 $67\,\mu\text{m}$

时,投影均匀条纹时因局部条纹相位求解失败有 7.2% 的点云数据丢失;投影本文的非均匀条纹仅有 0.30% 的点云数据丢失,投影非均匀条纹的相位值无法求解区域是投影均匀条纹的 1/24;多帧变条纹间距测量数据融合方法测量精度为 $72\,\mu\text{m}$,有 0.46% 的点云数据丢失,所以本文非均匀条纹测量性能更优。



(g) 3 种测量方法性能对比
图 8 实际测量圆柱体的实验结果

对上述实验结果分析可知,模拟仿真和实物测量结果比较一致。投影间距不断变小的多幅正弦条纹时,测量精度不断提高,但相机采集图像中局部条纹相位无法求解区域不断变大,测量范围相应减小。对本文投影生成的非均匀条纹进行测量,在保证比较高的测量精度的同时,解决了局部条纹分布密集导致相位求解失败的问题。

5 结 论

本文基于反向条纹投影技术,提出了一种根据被测表面轮廓生成非均匀条纹的算法。首先通过投影均匀条纹到被测对象上,利用对应点等相位原理建立相机和投影仪像素坐标映射关系,然后对相机采集图像中局部条纹分布密集的区域进行相位梯度

调整,运用反向条纹投影原理计算出非均匀投影条纹。通过仿真和实验可知,相比于投影均匀条纹的光学三维测量系统,本文提出的非均匀投影条纹生成算法在保证一定测量精度的同时,解决了局部条纹变形严重、分布密集导致相位无法求解的问题,从而保证测量数据的可靠性。本文算法生成非均匀条纹速度快、精度高,而且很好地改善了条纹的变形和分布状况,但是在测量前需要根据被测对象表面轮廓生成相应的非均匀条纹,所以可用于生产单一类型零件的流水生产线上,根据被测对象的形状特征事先生成对应的非均匀条纹图像进行在线检测。

参考文献:

- [1] 黄锦, 张晓兵. 基于图像处理的三维测量方法 [J]. 电子器件, 2002, 25(4): 364-368.
HUANG Jin, ZHANG Xiaobing. 3D measuring techniques based on image processing [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2002, 25(4): 364-368.
- [2] MEADOWS D M, JOHNSON W O, ALLEN J B. Generation of surface contours by Moiré patterns [J]. Applied Optics, 1970, 9(4): 942-947.
- [3] ZUO C, CHEN Q, GU G, et al. High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes [J]. Optics Express, 2012, 20(17): 19493-19510.
- [4] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [5] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [6] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes [J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [7] LI Y, ZHANG Z, YUAN L. Survey on linear structured light stripe center extraction [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002-1321.
- [8] 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): 122-127.
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): 122-127.
- [9] 张舜德. 光学轮廓术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010: -.
- [10] 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): 147-157.
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): 147-157.
- [11] XIE Z X, XIN Y X, JIN M, et al. Influence on the accuracy of structured-light sensors by the brightness of laser stripe [J]. Optical Technique, 2008, 34(Sup): 52-54.
- [12] SCHOENLEBER M, TIZIANI H J. Fast and flexible shape control with adaptive LCD fringe masks [C]// Lasers and Optics in Manufacturing: III. Washington DC, USA: International Society for Optics and Photonics, 1997: 35-42.
- [13] 肖朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2120-2124.
XIAO Chao, SU Xianyu, JING Hailong. A new method for generation of inverse projected fringe [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2120-2124.
- [14] KALMS M K, OSTEN W, JUEPTNER W P O. Inverse projected fringe technique [M]// Proceedings of SPIE 4317: The International Society for Optical Engineering. [S.l.]: SPIE, 2001: 505-510.
- [15] KALMS M K, OSTEN W, JUEPTNER W P O. Active industrial surface inspection with the inverse projected-fringe technique [C]// International Symposium on Photonics and Applications. Washington DC, USA: International Society for Optics and Photonics, 2001: 37-47.

(编辑 杜秀杰)