

·测试、试验与仿真·

应用三步相移法的三维面形测量

马晓航, 朱听玲, 边心田

(淮阴师范学院物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223300)

摘要:提出一种基于三步非定步相移的三维面形测量方法。首先将投影仪投出的光栅进行预校正, 保证投到参考面的条纹为标准的正弦条纹。测量时, 由投影仪投影三幅等相移量的光栅到待测物体表面, CCD相机对应采集三帧变形条纹图, 由相位计算模型提取相位。最后通过高度映射公式恢复待测物体的三维面形。该方法有较好的抗噪性能, 在噪声较大情况下, 仍能进行测量, 为动态在线测量奠定了基础。模拟及初步实验均验证了该方法的可行性。

关键词:信息光学; 三维测量; 相移法; 相位测量轮廓术

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-04-0065-04

Three-dimensional Surface Figure Measurement Based on Three Step Phase-shifting

MA Xiao-hang, ZHU Ting-ling, BIAN Xin-tian

(School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huaian 223300, China)

Abstract: A method to measure the three-dimensional (3D) surface figure based on three step phase-shifting is proposed. Firstly, the grating projected by a projector is pre-corrected to assure standard sinusoidal fringe projected on the reference surface. Secondly, three frames of grating with same phase-shifting are projected on the surface of the tested object by a projector during measurement. Three frames of deformation fringe patterns are captured by a CCD camera and the phase is extracted from a phase calculation model. Finally, the 3D surface figure of the tested object can be reconstructed by height mapping formula. The method has stronger anti-noise ability, measurement process can still be performed in large noise environment, which lay a foundation for dynamic on-line measurement. The feasibility of this method is verified by simulations and initial experiments.

Key words: information optics; three-dimensional measurement; phase-shifting method; phase measuring profilometry

相位测量轮廓术(phase measuring profilometry, 简称PMP)是一种光学三维面形测量技术, 具有非接触性、测量精度高、全场性等特点。这种技术已在工业检测、机器视觉、实物仿形、文物保护等领域得到广泛的应用^[1-5]。PMP一般需要采集三帧以上的变形条纹图来恢复被测物体面形, 是目前采用结构

光三维测量方法中精度最高的一种, 引起许多学者的关注。Zhang^[6]提出2+1相移法, 采集两幅具有 $\pi/2$ 相移的光栅图和一幅背景图像完成三维面形的测量; 翟爱平^[7]提出将“2+1”相移算法应用到正交复合光栅中的三维测量方法; 盖绍彦^[8]提出对光栅相位自校正的方法; 高成勇^[9]等人提出三步非等步相

收稿日期: 2014-05-28

基金项目: 淮阴师范学院青年优秀人才支持计划项目(13HSQNZ03)资助; 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划项目

作者简介: 马晓航(1994-), 女, 江苏徐州人, 本科, 主要研究方向为光信息科学和光学三维传感; 边心田(1978-), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 主要研究方向为光学三维传感与机器视觉。

位测量轮廓术,降低了相移条件严格的问题;刘玉凤^[10]等人改进了三步非等步相移测量轮廓术,避免了在计算物体的截断相位时由光强相除导致的盲点而使相位计算出错的问题。

为了更加方便有效地测量物体的三维面形,文中将光栅条纹预校正和非定步相移引入到三维面形测量中。该方法不需要相移总步长为 2π 的整数倍,通过预校正的光栅进行投影采集条纹图,计算物体高度时可以直接通过映射公式获得,降低了严格的相移条件,避免了对映射公式中参数的标定^[10]。并且,该方法具有较好的抗噪声能力,在噪声较大情况下,仍能进行三维面形测量,为后续在线三维测量奠定了基础。计算机仿真和实验验证了本方法的可行性。

1 测量原理

测量系统原理如图1所示。通常采用发散光路投影时,投影到参考面的条纹会产生畸变,不妨设 $\overline{OA}=x$, $\overline{O'A'}=x'$,则其几何变换关系^[11]为

$$x = \frac{d^2 + L^2}{Lf + dx'} x' \quad (1)$$

投影到参考面上的条纹是等周期分布的,令其周期为 p_0 ,其相位分布 $\varphi(x)$ 可表示为

$$\varphi(x) = 2\pi f x \quad (2)$$

式中, $f=1/p_0$ 。

结合式(1),式(2)知,投影光栅的相位分布函数为

$$\phi(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{d^2 + L^2}{Lf + dx'} x' \quad (3)$$

连续投影相移量为 β 的预校正投影光栅,则投影到物体上产生的变形条纹图可表示为

$$I_1 = R[A + B \cos(\varphi + \varphi_h)] \quad (4)$$

$$I_2 = R[A + B \cos(\varphi + \varphi_h + \beta)] \quad (5)$$

$$I_3 = R[A + B \cos(\varphi + \varphi_h + 2\beta)] \quad (6)$$

式中, φ_h 是由物体高度引起的相位变化。

由式(4)、式(5)、式(6),可知

$$\varphi + \varphi_h =$$

$$\arctan \frac{[2(I_2 - I_1)\cos\beta + (I_1 - I_3)]\cos\beta + I_1 + I_3 - 2I_2}{[2(I_2 - I_1)\cos\alpha + (I_1 - I_3)]\sin\beta} \quad (7)$$

同理,将投影光栅投到参考面上得到三幅参考面的条纹图可以计算出 φ 。

计算出的相位分布 φ_h 被截断在反三角函数的主值范围内,必须将其展开成连续的相位分布 φ_u 。相位与高度之间的映射关系可以表示^[12]为

$$h = \frac{L\varphi_u}{2\pi f d + \varphi_u} \quad (8)$$

将 φ_u 代入式(8)即可获得被测物体的三维面形分布。

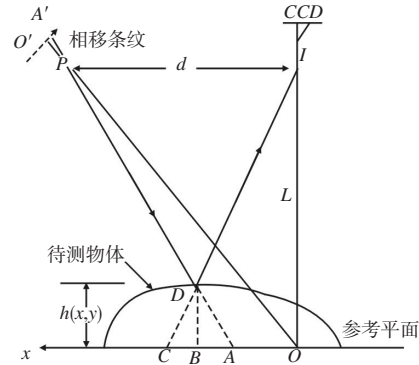


图1 测量系统原理图

2 计算机仿真

为了验证该方法的可行性,进行了计算机模拟。模拟待测物体大小为 600×600 pixels,高度为6 cm的Peaks函数,如图2所示。测量系统的几何参数 $L=1\ 200$ mm, $d=350$ mm,光栅周期为28 pixel,取相移量为 $3\pi/4$,采集到的对应变形条纹图其中一帧如图3所示。

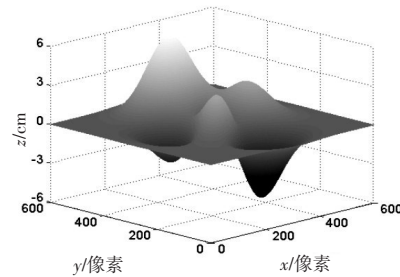


图2 原始物体

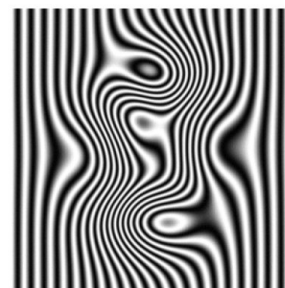


图3 变形条纹

图4为利用本方法恢复物体面形。在条纹图中添加了1%的随机噪声后恢复物体与实际待测物体的误差如图5a所示。由图4、图5a,可以看出,文中方法可以较好地恢复其三维面形,在存在噪声情况下,将测量误差最大值控制在 5×10^{-3} cm。

为了检验该方法的抗噪性能,在条纹图中分别加上3%、5%的随机噪声,对待测物体进行恢复。恢复物体与原物体的误差分别由图5b和图5c表示。

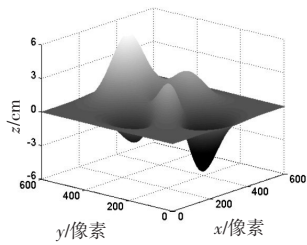
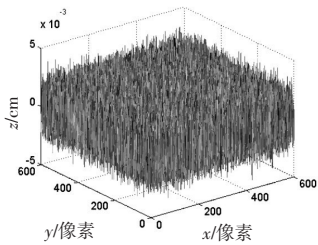
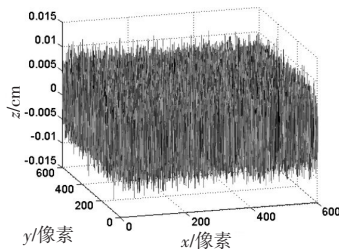


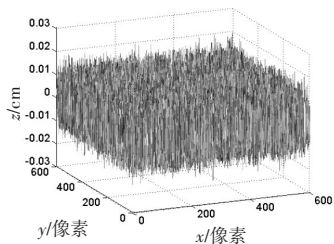
图4 恢复物体



(a)在条纹图中添加1%的随机噪声后,恢复物体与实际待测物体误差



(b)在条纹图中添加3%的随机噪声后,恢复物体与实际待测物体误差



(c)在条纹图中添加5%的随机噪声后,恢复物体与实际待测物体误差

图5 在条纹图中分别添加1%、3%、5%的随机噪声后,恢复物体与实际待测物体误差

由图5b和图5c可以看出,提出方法具有较好的抗噪性能,在条纹图中添加5%的随机噪声后,测量误差仍保持在0.03 cm。

3 实验验证

为检验该方法的实用性,用如图6所示的象脸形状的物体进行实验。实验装置原理图如图1所示。测量系统的几何参量 $L=900$ mm, $d=270$ mm,光栅周期为28 pixel,采用三步相移,采集到的其中一帧变形条纹图如图7所示。利用提出的方法对被测物体进行测量。恢复的物体面形如图8所示。



图6 待测物体

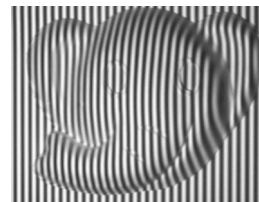


图7 变形条纹图

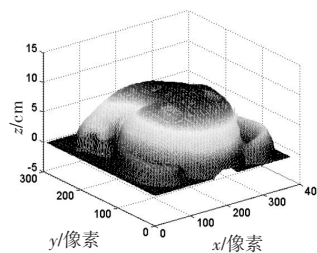


图8 恢复物体

由图8可以看出,文中提出的方法能够较好地恢复出物体的三维面形,可以应用于三维面形测量。

4 结论

提出一种改进三步相移的三维面形测量方法。该方法通过预校正的光栅进行投影采集条纹图,避免了相位——高度映射公式中参数的标定,简化了测量过程;将非定步相移引入测量降低了严

格的相移条件。并且,该方法具有较好的抗噪声能力,在噪声较大情况下,仍能获得满意的效果,计算机仿真和实验验证了本方法的可行性,为后续的在线三维测量提供了一种有效的测量方法。

参考文献

- [1] 李华伟,申作春,覃银红,等.相位测量轮廓术应用于叶片测量[J].航空动力学报,2012,27(2):275-281.
- [2] LIU Y K, SU X Y, ZHANG Q C. A novel encoded-phase technique for phase measuring profilometry [J]. Optics express, 2011, 19(15):14137-14144.
- [3] 肖焱山,曹益平,武迎春,等.相位测量轮廓术中一种快速的系统标定方法[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(1):164-168.
- [4] 赵婧,王永昌,刘凯.一种抑制相位测量轮廓术饱和误差的方法[J].中国激光,2013,40(10):1008001.
- [5] BIAN X T, XUE J P, CHENG J, et al. Phase measuring profilometry based on elliptically pattern grating [J]. Optik, 2013, 124(19):3924-3928.
- [6] Zhang S, Yau S T. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm [J]. Optical Engineering (S0091-3286), 2007, 46(11):113603.
- [7] 翟爱平,曹益平,何宇航.基于“2+1”相移算法的正交复合光三维测量方法[J].中国激光,2012,39(2):153-158.
- [8] 盖绍彦,达飞鹏.基于数字投影仪的光栅相位自校正方法[J].自动化学报,2008,34(11):1364-1366.
- [9] 高成勇,王蕴珊,周灿林.三步非定步长相移轮廓术研究[J].光电子·激光,2004,8:967-970.
- [10] 刘玉凤,曹益平,何宇航.新改进型三步非等步相位测量轮廓术算法[J].光电子·激光,2010,21(1):83-86.
- [11] 马云秀,边心田.相位测量轮廓术中投影条纹畸变的研究[J].光电技术应用,2013,28(4):83-85.
- [12] 苏显渝.信息光学[M].北京:科学出版社,2011.

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,东北电子技术研究所主办,公开发行的学术性中文科技期刊。

《光电技术应用》期刊以光电系统技术为主要专业特色,传播光电子技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

《光电技术应用》秉承“科学严谨,求实创新,服务读者,促进发展”的办刊方针,竭诚为国内光电系统技术研究、教学、开发及其应用领域的广大科研人员、工程技术人员、科技管理人员、高等院校师生等读者服务。特色栏目包括:综述,光电系统技术,光学设计技术,红外技术,激光技术,光电探测技术,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真技术等。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊。竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。