

·测试、试验与仿真·

相位测量轮廓术中投影条纹畸变的研究

马云秀, 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:在传统的采用发散照明的相位测量轮廓术中,为了准确得到被测物体的高度分布,测量前必须将参考平面坐标与相位分布之间的映射关系计算出来并以数据表的形式存储在计算机中备用。文中研究改进了投影条纹的分布,使投影到参考面上的条纹满足周期性分布,参考面上的相位分布是坐标的线性函数,无须提前将参考面坐标与相位分布的映射关系计算好并储存于计算机中,提高了测量精度,简化了实验装置。实验表明所提出方法的可行性与有效性。

关键词:相位测量轮廓术;三维传感;相移;光学测量

中图分类号:O438

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-04-0083-03

Research on Distorted Fringe Projection in Phase Measuring Profilometry

MA Yun-xiu, BIAN Xin-tian

(School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, China)

Abstract: In phase measuring profilometry using traditional divergence lighting, for getting the height distribution of measured objects accurately, the mapping relationships between the reference plane coordinates and phase distributions must be calculated and stored in computers in the form of a data table for backup before measurement. The distributions of improved projection fringe are researched, so the stripes projected to the reference surface meet periodicity distribution. The phase distribution on the reference surface is a linear function of the coordinate. So the mapping relations between the reference surface coordinate and phase distributions are not needed to calculate and store in the computer in advance, and the measurement accuracy is improved and experimental apparatus are simplified. Experimental results show that the method is feasible and effective.

Key words: phase measuring profilometry; three-dimensional sensing; phase shift; optical measurement

相位测量轮廓术^[1-3] (phase measuring profilometry, 简称PMP)在三维面形测量中占有重要的地位,作为一种重要的三维传感手段^[4],相位测量轮廓术已广泛应用于数字博物馆、机器视觉、工业检测^[5-6]、实物仿形、生物医学^[7-8]等领域。针对传统相位测量轮廓术的局限,很多研究者提出了各种改进的测量方法,并取得了一定的进展。有文献^[9]提出对投影光栅校正的方法,方法简单有效,提高了测量精度。亦有文献^[10]对测量系统的搭建和标定做了深入的研究,使测量系统的搭建更容易,测量误差变小。

从投影光栅函数入手对传统的相位测量轮廓术进行了改进,针对发散照明PMP系统,采用了相移法^[11-12]推导出新的投影条纹的描述公式,并推导出了投影系统光轴与成像系统光轴异面时被测物体高度的计算方法。使整个系统的搭建更加灵活,测量也更加方便。

1 相位测量

测量系统光路如图1所示, P 为投影仪出瞳,摄

收稿日期:2013-06-03

基金项目:淮安市科技支撑计划(HAG2012044)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:马云秀(1991-),女,江苏徐州人,本科,主要从事光学工程方面的研究;边心田(1978-),男,江苏省淮安人,博士,讲师,主要从事信息光学方面的研究。

像系统光轴 IO 垂直于参考面并与投影系统光轴 PO 相交于 O 点, 投影光栅的栅线垂直于 POI 平面, 不失一般性, 设 $\overline{PI} = d$, $\overline{IO} = L$, PO 与其参考面上法线的夹角为 θ 。

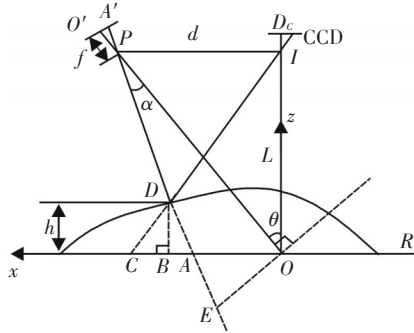


图1 测量系统光路图

在 $\triangle OAE$ 中, 由正弦定理知

$$\frac{\overline{OA}}{\sin \angle OEA} = \frac{\overline{OE}}{\sin \angle OAE} \quad (1)$$

由几何知识知

$$\sin \angle OEA = \cos \angle OPA = \cos \alpha \quad (2)$$

$$\sin \angle OAE = \sin[180^\circ - \theta - (90^\circ - \alpha)] = \cos(\theta - \alpha) \quad (3)$$

在 $\triangle POE$ 和 $\triangle PO'A'$ 中

$$\frac{\overline{OE}}{\overline{PO}} = \frac{\overline{PO}}{\overline{PO'}} = \frac{\sqrt{d^2 + L^2}}{f} \overline{O'A'} \quad (4)$$

式中, f 为投影仪的焦距

不失一般性, 设 $\overline{OA} = x$, $\overline{O'A'} = x'$, 由式(1)~式(4)可知

$$x = \frac{d^2 + L^2}{Lf + dx'} x' \quad (5)$$

投影到参考面上的条纹是等周期分布的, 令其周期为 p_0 , 其参考面上的相位分布 $\phi(x)$ 是坐标 x 的线性函数, 参考面上 A 点的相位记作

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{p_0} x \quad (6)$$

投影仪上 A' 点与参考面上 A 点的相位相对应, 因此结合式(5), 式(6)知, 投影光栅的相位分布函数为

$$\phi(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{d^2 + L^2}{Lf + dx'} x' \quad (7)$$

当投影到参考面上的条纹被移动周期的 $\frac{1}{N}$ 时, 投影仪上的 A' 点与参考面上 A 点的相位分别移动 $\frac{2\pi}{N}$, A' 点与 A 点的相位分别变为

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{p_0} x + \frac{2\pi}{N} \quad (8)$$

$$\phi(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{d^2 + L^2}{Lf + dx'} x' \quad (9)$$

条纹移动时, 参考面上相位分布可表述为

$$\phi_n(x) = \frac{2\pi}{p_0} x + \frac{2n\pi}{N} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

由式(5), 式(10)可以计算出与参考面上相位分布相对应的投影光栅上的相位分布可表述为

$$\phi_n(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{d^2 + L^2}{Lf + dx'} x' + \frac{2n\pi}{N} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

显然, 参考面上产生 N 步相移, 对应于投影光栅面上的相位分布可以用上式表示。

2 高度计算

在测量三维物体表面时, 探测器可以测量到三维物体表面上任意一点 D 的相位 ϕ_D , 它对应于参考面上 A 点的相位, 即

$$\phi_D = \phi_A = \frac{2\pi}{p_0} \overline{OA} \quad (12)$$

参考面上 C 点的相位为

$$\phi_C = \frac{2\pi}{p_0} \overline{OC} \quad (13)$$

所以

$$\overline{AC} = \overline{OC} - \overline{OA} = \frac{p_0}{2\pi} (\phi_C - \phi_D) = \frac{p_0}{2\pi} \phi_{CD} \quad (14)$$

记三维表面上被测量点 D 的高度为 h , 由相似三角形 $\triangle PDI$ 和 $\triangle ADC$ 可以计算出物面的高度分布为

$$h = \frac{L \overline{AC}}{d + \overline{AC}} = \frac{L p_0 \phi_{CD}}{2\pi d + p_0 \phi_{CD}} \quad (15)$$

3 实验

为了验证提出方法的可行性, 进行了计算机模拟。模拟待测物体为 Peaks 函数, 最大高度为 100 mm, 如图 2 所示。投影到参考面上的条纹周期 $p_0 = 20$ 。系统参数 $d = 1200$ cm, $L = 800$ cm, $\theta = 30^\circ$, 获得变形光栅像的大小为 512×512 pixels。

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的误差如图 3 所示。由图 3 可以看出, 对于高度为 100 mm 的物体, 文中方法仍可以较好地

恢复出物体的三维面形,在条纹图中添加1%的随机噪声后,其测量误差仍保持在 $5\ \mu\text{m}$ 。

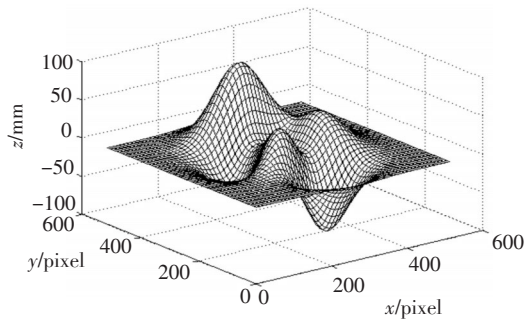


图2 原来的物体

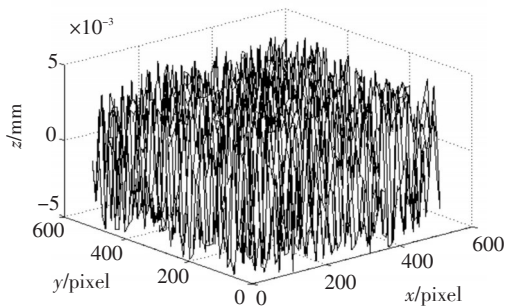


图3 加入1%噪声后的测量误差

为了验证该方法的抗噪性能,在条纹图中分别添加3%、5%的随机噪声,对模拟物体进行恢复,恢复物面与模拟物面之间的误差分别如图4、图5所示。由图4、图5可以看出,该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,测量误差仍能保

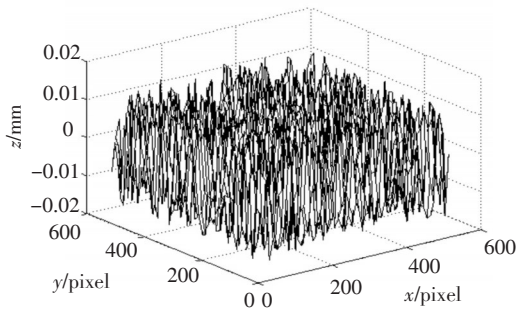


图4 加入3%噪声后的测量误差

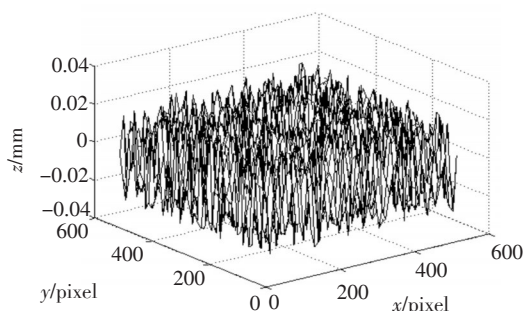


图5 加入5%噪声后的测量误差

持在 $0.04\ \text{mm}$ 。

4 结论

在发散照明的PMP基础上,提出一种测量物体三维面形的新方法。该方法在不需要提前将参考平面坐标与相位分布之间的映射关系存于计算机中的情况下,可以完成对待测物体的整体面形的测量,简化了测量过程。提出了投影仪投影光轴与摄像机成像光轴异面时的高度计算方法,使测量系统的搭建更加灵活。并且,该方法具有较好的抗噪性能,在存在较大噪声的情况下,仍能获得比较满意的结果。

参考文献

- [1] Srinivasan Y, Li u H C, Hallioua M. Automated phase measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. Appl Opt, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [2] SU Xia-yu, ZHOU Wen-sen, G von Bally, et al. Automated phase - measuring profilometry using defocused projection of the Rochi grating[J]. Opt Commun, 1992, 94(6): 561-573.
- [3] 李万松, 苏显渝, 苏礼坤, 等. 非恒定环境光条件下的相位测量剖面术[J]. 光学学报, 2000, 20(5): 617-623.
- [4] 王普疆, 杨志文. 光学三维传感[J]. 半导体光电, 2002, 23(1): 51-53.
- [5] Chung Y Kt, Kim K H. Automated visual inspection system of automobile doors and windows using the adaptive feature extraction[C]//Proc of KES' 98. New York, USA: IEEE, 1998: 286-293.
- [6] Kai W, Dieter R. Dirk S. An approach to computer aided quality control based on 3D coordinate metrology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 107(1/3): 96-110.
- [7] Hain T, Eckhardt R, Kunzi-Rapp K, et al. Indications for optical shape measurements in orthopaedics and dermatology[J]. Medical Laser Application, 2002, 17(1): 55-58.
- [8] Plassmann P, Jones T D. MAVIS: a non-invasive instrument to measure area and volume of wounds[J]. Medical Engineering & Physics, 1998, 20(5): 332-338.
- [9] 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.
- [10] 赵光兴, 于春雨. 基于双目视觉三维测量系统平台的搭建与实现[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2009, 26(4): 403-404.
- [11] HUANG P S, HU Q, Jin F, et al. Color-encoded fringe projection and phase shifting for 3-D surfing contouring[J]. Proc. SPIE, 1998, 3407: 477-482.
- [12] HE X, ZOU D, LIU S, et al. Phase-shifting analysis in morire interferometry and its application in electronic packaging. Opt. Engng., 1998, 37(5): 1410-1419.