

doi: 10.3788/gzxb20124109.1094

基于椭圆形光强分布光栅投影的三维面形测量方法

边心田, 姬保卫, 程菊, 左芬

(淮阴师范学院 物理与电子电气工程学院, 江苏 淮安 223300)

摘 要:基于椭圆形光强分布光栅投影测量物体三维面形的方法,将椭圆形光强分布光栅投影到被测物体表面,用摄像机获取变形条纹图,通过系统参量和条纹图携带的相位信息求解出物体的三维面形.推导出通过椭圆形光强分布光栅条纹求解相位的计算公式并对提出方法作了计算机仿真.实验结果表明该方法可以比较准确地测量物体的三维面形,在噪音较大的情况下测量结果仍具有较高准确度.

关键词:三维测量;椭圆形光强分布光栅;条纹分析;相位展开

中图分类号:TN247

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)09-1094-4

0 引言

光学三维测量^[1]在机器视觉、逆向工程、在线监测、质量控制等领域有着广阔的应用前景.比较有代表性的有相位测量轮廓术(Phase Measurement Profilometry, PMP)^[2-6]、傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)^[7-9]、莫尔轮廓术^[10-11]、调制度轮廓术^[12-13]等.其中相位测量技术具有对背景、对比度和噪音变化不敏感,准确度高,易于实现自动化测量等优点得到广泛的研究和应用. Mauric Halioua 等人提出了基于相移技术的三维面形测量方法,相移算法提供了一种精确测定相位的手段,其测量原理^[1]是:将一个受周期函数调制的光栅投影到三维漫反射物体表面时,由于受物体高度的调制,使得成像系统获取的光栅条纹发生变形.采用相移技术对被测的光场进行解调,当投影的光栅被移动其周期的 $1/N$ 时,条纹的相位移动 $2\pi/N$,产生新的强度函数.通过三个或更多对应不同相移值的条纹图可以计算出相位,进而根据相位与高度的映射关系求解出物体的面形.传统的相位测量轮廓术主要是采用正弦光栅投影,进行三维面形测量^[2,14],这种方式的优点是测量准确度高,近年来研究者提出了基于三角形分布光栅的测量轮廓术^[15-16],从光栅的制作工艺和生产成本上来讲,这种测量方式的研究使用有一定的现实意义,因为正弦光栅的制作难度大,而三角形光栅的透射率呈线性变化,制作时只需在平板玻璃上开锯齿槽,然后加

入均匀的吸收介质,减小制作成本,对于普及相位测量轮廓术具有一定的现实意义,不过利用三角形光栅进行测量的准确度要低一些.本文根据相位测量轮廓术的基本原理,提出了基于椭圆形光强分布光栅投影的三维面形测量方法,并对测量结果与基于正弦光栅投影的测量结果比较,通过计算机模拟和实验表明,提出的方法具有较高的测量准确度和可行性.

1 相位测量轮廓术原理

相位测量轮廓术一般是采用正弦光栅投影到被测物体表面上,即光栅透过率呈正弦型规律变化的一个光栅图形被投影三维漫反射物体表面上时,从成像系统获取的变形条纹图像为

$$I(x, y) = R(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos \varphi(x, y)] \quad (1)$$

式中, $R(x, y)$ 是物体表面的不均匀反射率, $A(x, y)$ 表示背景强度, $B(x, y)/A(x, y)$ 是条纹的对比,相位函数 $\varphi(x, y)$ 表示了条纹的变形,并且与物体的高度有关系.

当被投影的正弦光栅被移动周期的 $1/N$ 时,条纹的相位移动 $2\pi/N$,产生一个新的相移条纹图,当 $N \geq 3$ 时,就可以通过 N 幅相移条纹图的强度函数计算出相位函数^[1]

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \quad (2)$$

当以椭圆形分布的光栅代替正弦光栅投影时,

基金项目:淮安市科技支撑计划(No. HAG2010002)资助

第一作者:边心田(1978-),男,讲师,博士,主要研究方向为光学三维传感与机器视觉. Email: bianxt@126.com

收稿日期:2012-03-05;修回日期:2012-03-27

从成像系统获取的变形条纹图像参照式(1)的形式可以表示为

$$I(x, y) = R(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \cdot \text{cim } \varphi(x, y)] \quad (3)$$

式中

$$\text{cim } \varphi(x, y) = (-1)^{\text{round}(2f_0x + \frac{\varphi_h(x, y)}{\pi})} \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\pi^2}{4} - [2\pi f_0x + \varphi_h(x, y) - \pi \cdot \text{round}(2f_0x + \frac{\varphi_h(x, y)}{\pi})]^2 \right\}^{1/2}$$

$\varphi_h(x, y)$ 表示由物体的高度引起的相位调制, $\text{round}()$ 表示四舍五入取整。

当投影的椭圆形分布光栅被移动周期的 $1/N$ 时, 条纹的相位移动 $2\pi/N$, 产生一个新的相移强度函数 $I_n(x, y)$, 使用 $N(N \geq 3)$ 幅对应不同相移值的条纹图, 相位函数就可以从 N 个强度函数中单独分离出。例如, 在四步相位算法中, 相位移动增量为 $\pi/2$, 所产生的四个干涉图可表示为

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= R(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \text{cim } \varphi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= R(x, y) [A(x, y) - B(x, y) \text{sim } \varphi(x, y)] \\ I_3(x, y) &= R(x, y) [A(x, y) - B(x, y) \text{cim } \varphi(x, y)] \\ I_4(x, y) &= R(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \text{sim } \varphi(x, y)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\text{sim } \varphi(x, y) = (-1)^{\text{floor}(2f_0x + \frac{\varphi_h(x, y)}{\pi})} \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\pi^2}{4} - [2\pi f_0x + \varphi_h(x, y) - \frac{\pi}{2} - \pi \text{floor}(2f_0x + \frac{\varphi_h(x, y)}{\pi})]^2 \right\}^{1/2}$$

式中, $\text{floor}()$ 表示高斯取整函数。

函数 $\text{sim}()$ 和 $\text{cim}()$ 分别对应于采用正弦光栅投影相位测量轮廓术中的 $\sin()$ 和 $\cos()$, 根据此思想, 与函数 $\tan()$ 对应的 $\text{tim } \varphi(x, y) = \text{sim } \varphi(x, y) / \text{cim } \varphi(x, y)$, $\text{tim}()$ 函数的反函数用 $\text{atim}()$ 表示。

从式(4)可计算出相位函数

$$\varphi(x, y) = \text{atim } \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (5)$$

参照式(2), 对于 N 步相位算法, 其相位求解公式可表示为

$$\varphi(x, y) = \text{atim } \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \text{sim}(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \text{cim}(2\pi n/N)} \quad (6)$$

由式(5)或式(6)计算出的相位分布 $\varphi(x, y)$, 被截断在反函数 atim 的主值范围内, 是不连续的, 必须将截断的相位恢复成连续的相位分布 $\varphi_u(x, y)$ 。

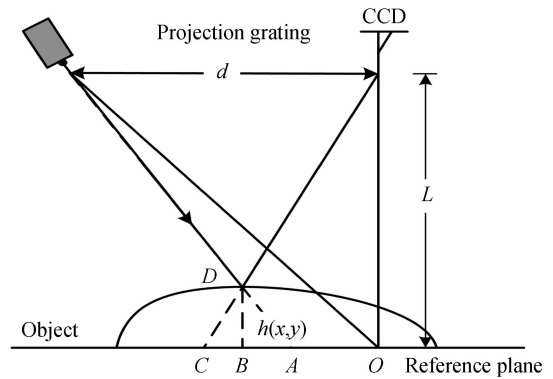


图1 PMP原理光路

Fig. 1 Optical geometry of PMP principle

从恢复后的相位 $\varphi_u(x, y)$ 到高度的计算取决于光学系统的结构。一般情况下, 采用发散照明的 PMP 系统, 如图 1, 根据相位和高度之间的映射关系可以获得物体的三维面形信息。物体的三维面形信息可用高度分布表示^[1]为

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\varphi_u(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\varphi_u^2(x, y)} \quad (7)$$

式中, 参量 $a(x, y)$, $b(x, y)$, $c(x, y)$ 可以通过标定参考面的方式, 利用最小二乘法进行计算。在投影条件不变的情况下, 式(7)中的系数 $a(x, y)$, $b(x, y)$, $c(x, y)$ 是不变的, 参考面坐标与相位分布 $\varphi_u(x, y)$ 之间的映射关系就可以求出被测物体的高度。

2 实验

计算机模拟中选用大小为 512×512 的 peaks 图像作为被测物体, 其高度为 40 mm, 如图 2(a)。测量系统的几何参量 $L = 900$ mm, $d = 270$ mm。受物体高度调制后的变形光栅像如图 2(b) 所示。在模拟中加入 5% 的随机噪音, 利用四步相移法解调出的截断相位分布如图 2(c), 重建物体的三维面形分布如图 2(d), 测量误差如图 2(e)。由图 2(d), (e) 可以看出, 本方法具有较好的抗噪性能, 在条纹图中对强度添加 5% 的随机噪音后, 测量误差在 1.5 mm 内。

实验对一碗状物体进行了测量, 如图 3(a), 实验装置原理图如图 1。测量系统中的几何参量 $L = 850$ mm, $d = 220$ mm, 投影光栅条纹周期 $T = 16$ pixel, 采用四步相移, 由 CCD 采集到的其中一帧变形条纹如图 3(b)。利用提出的方法对被测物体进行测量, 恢复得到物体面形如图 3(c)。

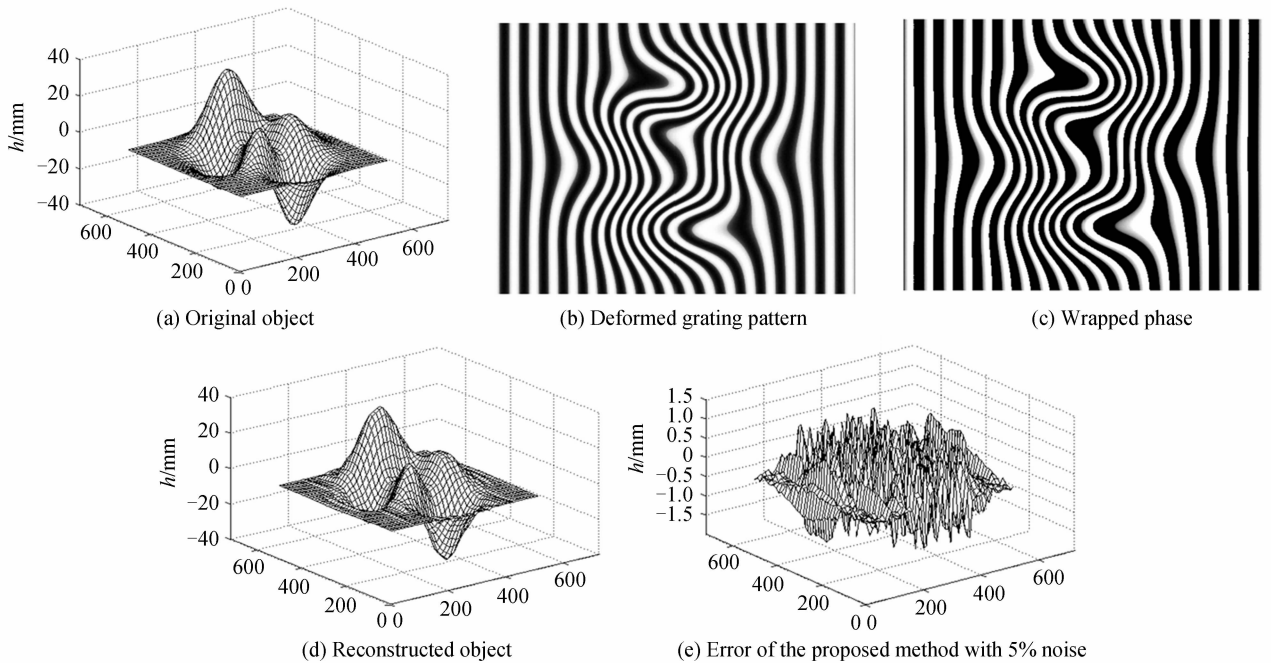


图2 计算机模拟

Fig. 2 Simulation results

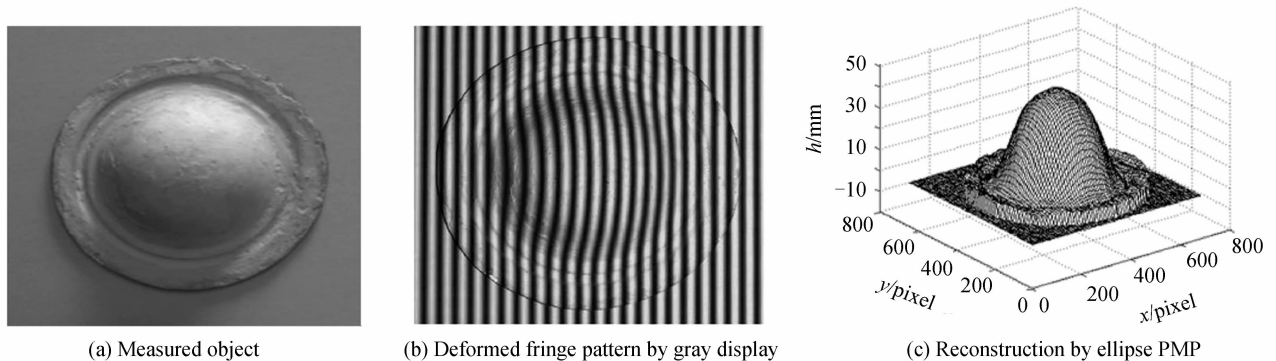


图3 测量结果

Fig. 3 Measurement results

通过对实验分析可以看出,基于椭圆形光强分布光栅的测量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。

3 结论

提出了基于椭圆形光强分布光栅投影的三维面形测量方法,该方法通过对椭圆形光强分布光栅投影产生的变形条纹进行分析解调相位,然后利用相位高度之间的映射关系恢复出物体的面形分布.实验结果表明提出的方法可以较好地恢复出物体的三维面形,获得比较满意的结果.因此,基于椭圆形光强分布光栅的相位测量轮廓术具有可行性与推广的价值。

参考文献

[1] 苏显渝. 信息光学[M]. 北京:科学出版社,2011: 316-324.
 [2] CHO JUI TAY, MADHURI THAKUR, CHENGEN QUAN. Grating projection system for surface contour measurement[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(8): 1393-1400.

[3] YU Rui-zhi, CAO Yi-ping. A three dimensional on-line inspection method for workpiece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139-1143.
 喻睿智,曹益平.一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J]. *光子学报*,2008, **37**(6):1139-1143.
 [4] SONG Zhang, Daniel Van Der Weide, James Oliver. Superfast phase-shifting method for 3-D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9684-9689.
 [5] KANG Xin, HE Xiao-yuan. Two-step phase-shifting technique for phase measurement profilometry by grating projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 75-79.
 康新,何小元.两步相移实现投影栅相位测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2003,**23**(1): 75-79.
 [6] XU Jian-cheng, XU Qiao, CHAI Li-qun, et al. Direct phase extraction from interferograms with random phase shifts[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(20): 20620-20627.
 [7] LIU Da-hai, LIN Bin. Fourier transform profilometry using zero frequency elimination based on gray modulation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1697-1701.
 刘大海,林斌.利用强度调制消除零频的傅里叶变换轮廓测量[J]. *光子学报*,2011,**40**(11):1697-1701.
 [8] CHEN Li-juan, XU Li-hua. Fourier transform profilometry for surface with specular reflection[J]. *Acta Optica Sinica*,

- 2010, **30**(5): 1349~1353.
- 陈利娟,徐利华. 含镜面反射面形的傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2010, **30**(5): 1349-1353.
- [9] ZHENG Rui-hua, WANG Yuxiao, ZHANG Xue-ru, *et al.* Contouring of column by phase-measuring profilometry and four digital images[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(3): 033606.
- [10] DUAN Cun-li, CEHN Fang, QI Rui-Li, *et al.* A new moire stripe method of measuring 3-D object shapes [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(7): 1425-1428.
段存丽,陈芳,祁瑞利,等. 利用莫尔条纹测量物体三维形貌新方法研究[J]. 光子学报,2008, **37**(7): 1425-1428.
- [11] QUAN C, FU Y, TAY C J. Determination of surface contour by temporal analysis of shadow moire fringes[J]. *Optics Communications*, 2004, **230**(1-3): 23-33.
- [12] SHAO Shuang-yun, SU Xian-yu, ZHANG Qi-can, *et al.* Application of modulation measurement profilometry in complex object shape measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12): 1623-1628.
邵双运,苏显渝,张启灿,等. 调制度测量轮廓术在复杂面形测量中的应用[J]. 光学学报,2004, **24**(12): 1623-1628.
- [13] DOU Yun-fu, SU Xian-yu, CHEN Yan-fei, *et al.* A flexible fast 3D profilometry based on modulation measurement[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, **49**(3): 376-383.
- [14] SONG Wan-zhong, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, *et al.* A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272-277.
宋万忠,苏显渝,曹益平,等. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. 光学学报, 2003, **23**(3): 272-277.
- [15] PEIRONG JIA, JONATHAN KOFMAN, CHAD ENGLISH. Multiple-step triangular-pattern phase shifting and the influence of number of steps and pitch on measurement accuracy[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(16): 3253-3262.
- [16] YE Hong-na, CAO Yi-ping. Phase measuring profilometry based on triangular pattern grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(11): 1108001.
叶虹呐,曹益平. 基于三角形分布光栅的相位测量轮廓术[J]. 中国激光,2011, **38**(11): 1108001.

Phase Measuring Profilometry Based on Elliptic Pattern Grating

BIAN Xin-tian, JI Bao-wei, CHENG Ju, ZUO Fen

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

Abstract: A new method to measure the three dimensional (3D) shape is proposed. In the measurement, the elliptic fringe pattern was projected to the surface of the object and the 3D shape of the object can be reconstructed by this method based on phase measurement profilometry. Some calculation formulas for phase and height are derived. A result of our method is compared with that of the phase measurement profilometry (PMP), which shows that the measurement accuracy of this method can meet accuracy requirement of the measurement. Moreover, this method owns strong ability of anti-noise. With large noise, this method also can reconstruct the 3D shape of object. Computer simulation and preliminary validate the feasibility of this method.

Key words: 3D measurement; Elliptic pattern grating; Fringe analysis; Phase unwrap