

文章编号: 0253-2239(2006)11-1636-5

基于条纹反射的类镜面三维面形测量方法

刘元坤 苏显渝 吴庆阳

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 提出了一种基于条纹反射和相移技术的类镜面三维面形测量的新方法。首先在平板显示器上显示正弦条纹,然后用 CCD 相机分别记录由待测面和标准面反射的正弦条纹像,通过相移得到各自的相位分布,与标准面相位分布相比较得到待测表面起伏引起的相位变化。推导了相位变化量与待测表面梯度的对应关系,分别对待测面进行水平和垂直两个方向光栅相位测量,通过计算可得到梯度分布并由梯度分布恢复待测表面面形。同时初步分析了影响条纹反射技术测量精度的因素。测量中,光栅由计算机产生,可以实现精确的相移,而且可以方便地调节光栅的周期及方向,通过预设标记点来引导相位展开有效地解决待测面和标准面的条纹对应问题。实测了建筑用釉面瓷砖表面起伏,验证了该方法的可行性。

关键词: 光学测量; 条纹反射; 相移; 面形重建; 三维面形测量

中图分类号: TM930.12⁺6 文献标识码: A

Three-Dimensional Shape Measurement for Specular Surface Based on Fringe Reflection

Liu Yuankun Su Xianyu Wu Qingyang

(Department of Optoelectronic, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: A novel three-dimensional shape measurement method for specular surface, based on fringe reflection and phase shift is presented. A sinusoidal fringe is displayed on a plane monitor, and then the images will be recorded by a CCD camera after reflected by the tested and standard surfaces, respectively. The difference between the tested surface and standard surface is obtained as soon as the phase distributions are worked out by phase shift. Then the shape of the tested surface will be restored from the surface gradients, which is calculated by the relations between the tested gradients and phase difference of horizontal and vertical fringes. The measurement resolution of this method has also been discussed. Notably, the computer-generated fringe will bring a no-error phase shift and make the shift of periods and directions more easily. A marked point is used to guide the phase unwrapping procedure. The experimental results of a tile surface are presented and prove its validity.

Key words: optical measurement; fringe reflection; phase shift; shape reconstruction; three-dimensional shape measurement

1 引 言

光学三维面形测量技术以其高精度、高效率和非接触性等优点已被广泛应用于高速检测、产品开发、质量控制、反求工程以及 CAD/CAM 等领域^[1]。但是,现有成熟技术中,条纹投影轮廓术主要是针对漫反射物体,而难以有效地测量镜面物体;干涉术主要针对光学表面,对于非球面测量需要较复杂的光学系统,例如采用计算全息光学元件对波面进行补偿。在工程中,特别是在现代制造业中,存在大量类镜面物体需要测量。例如,汽车工业中的喷

对漫反射物体,而难以有效地测量镜面物体;干涉术主要针对光学表面,对于非球面测量需要较复杂的光学系统,例如采用计算全息光学元件对波面进行补偿。在工程中,特别是在现代制造业中,存在大量类镜面物体需要测量。例如,汽车工业中的喷

作者简介: 刘元坤(1975~),男,四川大学博士研究生,从事光电三维传感、系统设计等领域的理论和应用研究。

E-mail: liu0041@sina.com

导师简介: 苏显渝(1944~),男,四川大学电子信息学院光电科学技术系教授,博士生导师,长期从事光学、信息光学、三维传感与机器视觉领域的教学与科研工作。

收稿日期: 2005-12-02; 收到修改稿日期: 2006-05-08

涂后的车身表面、抛光模具表面,建筑陶瓷行业中的瓷砖表面等均具有类镜面反射性质。

利用待测表面的镜面反射特性,Markus C. Kanuer^[2]和 Thorsten Bothe^[3]等分别用基于条纹反射和相移技术的光学三维面形测量方法对光学表面进行了高精度测量;Y. Y. Hung 等^[4]用条纹反射的方法测量了类镜面的车身表面;刘元坤等^[5]将条纹反射技术用于测量汽车观后镜面形,得到了较好的测量结果。在此基础上,本文详细探讨了条纹反射技术对类光学表面或者是部分镜面反射表面的面形测量,建立了一套适合于测量类光学表面的面形测量系统。通过对待测类镜面即建筑用瓷砖表面测量,验证了这一技术的可行性,可以有效的测量部分镜面反射表面,也可用于光学元件粗加工过程中的质量控制。

2 基本原理

测量装置如图 1 所示。薄膜晶体管(TFT)上显示的是一维光栅(由计算机控制可以方便地调节光栅的方向、周期以及衬比度),待测物体表面与薄膜晶体管、CCD 相机组成测量光学系统。首先对标准面进行测量,这里选择平面反射镜作为标准面,用 CCD 相机记录标准面的光栅像,计算出参考相位。然后将待测物体放在相同位置,得到相应的变形光栅像,计算出参考相位,除去参考相位即得到由待测物面畸变引起的相位变化。

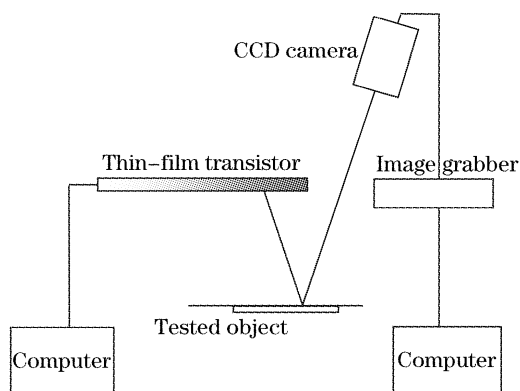


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

薄膜晶体管上产生的光栅图样传递到 CCD 的接收平面,原始的光栅强度函数可表示为

$$I_0(x, y) = a + b \cos[2\pi x/p + \phi_0(x, y)], \quad (1)$$

式中 a 和 b 分别为正常数,通常令 $a = b$, p 为光栅周期, $\phi_0(x, y)$ 是系统像差引入的附加相位调制。

经过待测物体表面后变形的的光栅强度函数相应

变为

$$I(x, y) = a + b \cos[2\pi x/p + \phi(x, y) + \phi_0(x, y)], \quad (2)$$

式中 $\phi(x, y)$ 是由待测物体表面引入的相位调制。采用 N 帧相移方法可以计算出被测物面引入的相位调制,光栅由计算机产生,因此可实现精确相移,同时也可以方便地选择相移次数,比如当光栅周期为 40 pixel 时,最大相移次数为 40,随着相移次数的增加可有效地降低由薄膜晶体管和 CCD 引起的电噪声和系统非线性的影响,相位计算的方法与相位测量轮廓术类似^[6~9]。

图 1 中,CCD 相机记录的是光栅虚像,为实现对待测物体表面的精确测量,实验中 CCD 相机直接调焦在待测物体表面,这时光栅像因离焦而变模糊,但由于采用的是正弦光栅,因此不会影响到相位测量的精度。标准面的光栅像不会发生畸变,而待测物体表面缺陷会引起光栅像变形。根据远心光路模型,测量原理如图 2 所示。

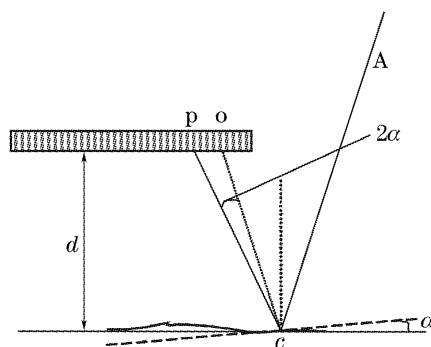


图 2 光线偏折示意图

Fig. 2 Schematic of ray deflection

对于 c 点,待测物体表面相对于标准面偏转了角度 α ,反射光线则偏转了 2α , α 为待测物体表面面形函数在 c 点的法向量在 XOZ 平面上投影偏离 z 轴的角度。即 CCD 上一条光线 A,对于标准面,其在薄膜晶体管上的对应于 o 点;而对于待测物体表面,其对应点则为 p 点,那么(2)式中的 $\phi(x, y)$ 可以表示为

$$\phi(x, y) = 2\pi \frac{d}{p} \tan 2\alpha. \quad (3)$$

因此在水平和垂直方向上得到两个方向的相位调制,据(3)式就可以得到待测物体表面的梯度分布。

由梯度分布恢复待测表面面形,最简单的方法是按路径积分。但由于实际数据包含噪声,这时积分就与路径相关。按照不同的路径积分得到的结果是不同的,尤其是在测量表面起伏剧烈的类镜面反

射表面时,按路径积分将得不到正确的面形分布。因此这里选用自适应光学中 Southwell^[10]波前重建法恢复待测面形。

标准面与待测物体表面各自的截断相位分布必须从同一位置开始进行相位展开,因此必须精确定位展开点。实验中,由计算机产生一幅有特定标记的点阵图,用参考平面镜和待测物体分别成像,于是得到两幅点阵图,进行图像处理得到各自标记点的位置,然后以其中任一对标记点作为相位展开的起点。从而有效地解决了条纹越级问题。

3 系统测量不确定度分析

在相位测量系统中,相位测量不确定度由 CCD 的量化误差以及系统的光电噪声决定,当相位测量精度一定时,待测物面高度的测量精度就和相机特性有关。

由(3)式得到由 $\delta\alpha$ 引起的相位不确定度为

$$\delta\varphi = 2\pi \frac{2d}{p} \tan \delta\alpha, \quad (4)$$

而待测表面的高度表示为

$$\delta z = \delta x \cdot \tan \delta\alpha = \delta x \cdot \frac{p}{2d} \frac{\delta\varphi}{2\pi}, \quad (5)$$

δx 表示待测物面的像元大小。由(5)式可知,测量系统的高度分辨力与光栅周期、屏幕到待测面的距离、系统的横向分辨力以及相位测量的分辨力有关。理论上光栅周期越小则测量精度越高,但实际上条纹是离焦的,引起的模糊进而直接影响条纹质量,而且光栅周期越小则相邻像元的相位变化越大,容易导致错误的相位展开。在确定系统的所有参量后,系统的测量不确定度就直接由相位测量不确定度决定,通过对标准平面镜的两次测量,按照时间和空间各态历经等效的统计方法^[3],其相位测量不确定度

可达 1/500 个等效波长(在满周期相移情况下,比如周期为 40 pixel 时,就相移 40 次)。但是对于实际测量的瓷砖表面,部分漫反射导致所成的正弦像是模糊的,其相位测量不确定度经实测只能达到 1/20 个等效波长,在本实验中系统的横向分辨力为 0.25 mm,距离 d 为 135 mm,因此可以得到深度分辨力 δz 小于 0.2 μm ,也就是实现了亚微米测量。

4 实验结果与分析

实验中,选用分辨力为 1024×768 的液晶显示器显示光栅图,用 JAI 公司的 CCD 相机拍摄。用平面镜作为标准面,待测物体为建筑用釉面瓷砖,薄膜晶体管与瓷砖的间距为 135 mm,测量区域为 105 mm×85 mm。为了降低 CCD 的电噪声影响,实验中采用多帧平均。

实验中,周期 p 已知,只有距离 d 需要标定,其具体标定方法为:首先标定 CCD 相机内参量,在标准平面镜上作标记点,由此可以在 CCD 相机坐标系中标定平面镜所在平面的外参量;由液晶显示屏点间距即可计算得到各点的相位分布,反之在得到标准平面镜对应的相位分布后,就可以得到各点在液晶显示器平面上的坐标,又知,标准平面镜上每个点都分别对应着液晶显示屏上一个点,并遵从反射定律,因此可以得到基于 CCD 相机坐标系下的液晶显示屏平面的空间位置,进而计算出标准面上各点到显示屏平面的距离 d ,将 d 代入(3)式即可实现绝对测量。

图 3 为实际得到的变形条纹图(光栅为每周期 40 pixel),对应的相位分布如图 4,图 5 为计算所得的梯度分布,图 6 为待测釉面瓷砖的面形分布,其中图 6(b)为剖面分布。被测表面高度起伏的标准差为 0.0058 mm,最大高度起伏 0.025 mm。

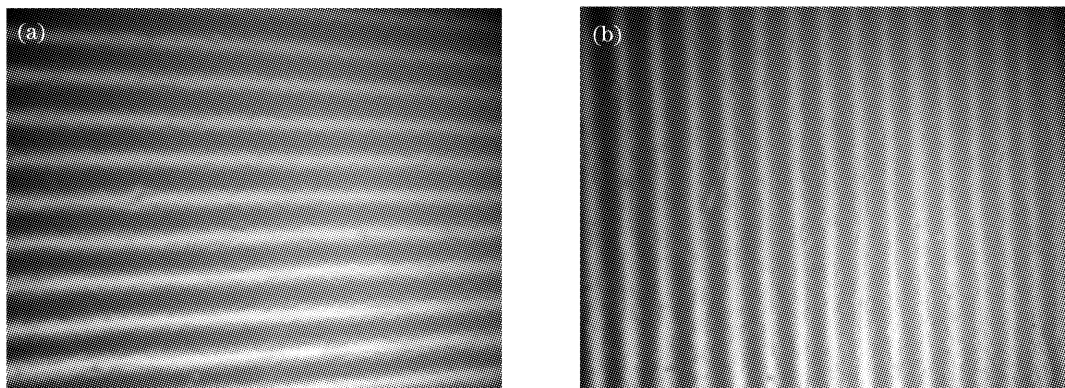


图 3 变形条纹图。(a)水平,(b)垂直

Fig. 3 Deformed fringe patterns. (a) Horizontal, (b) vertical

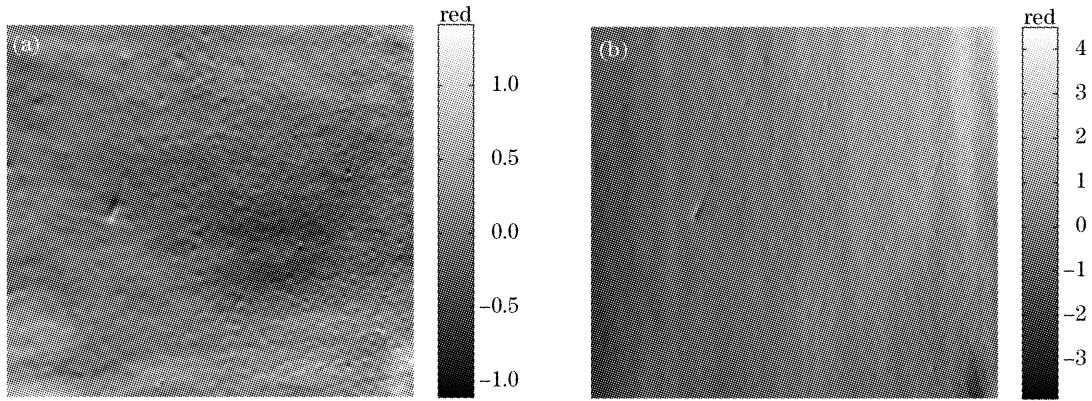


图 4 待测釉面瓷砖引起的相位变化分布。(a)水平条纹,(b)垂直条纹

Fig. 4 Phase distributions of the tested tile surface. (a) Horizontal fringe, (b) vertical fringe

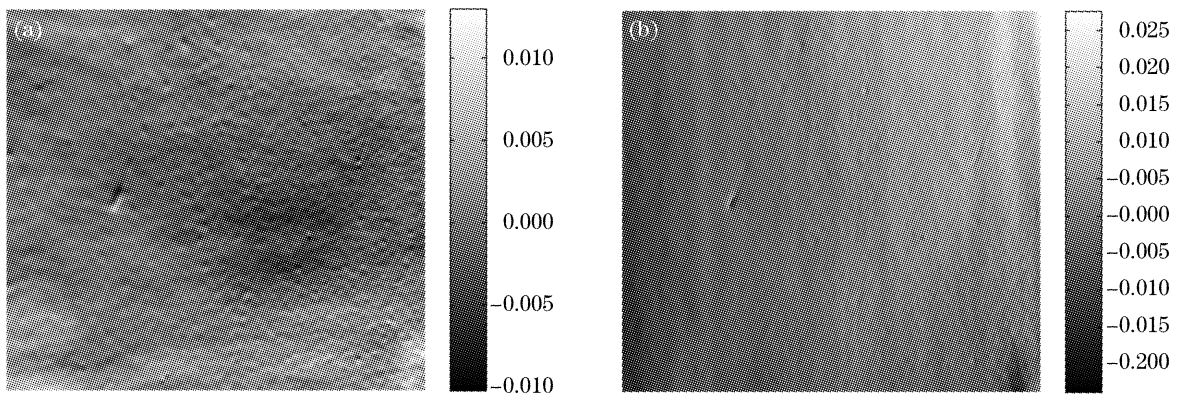


图 5 待测釉面瓷砖的斜率分布。(a)水平条纹,(b)垂直条纹

Fig. 5 Slope distributions of the tested tile surface. (a) Horizontal fringe, (b) vertical fringe

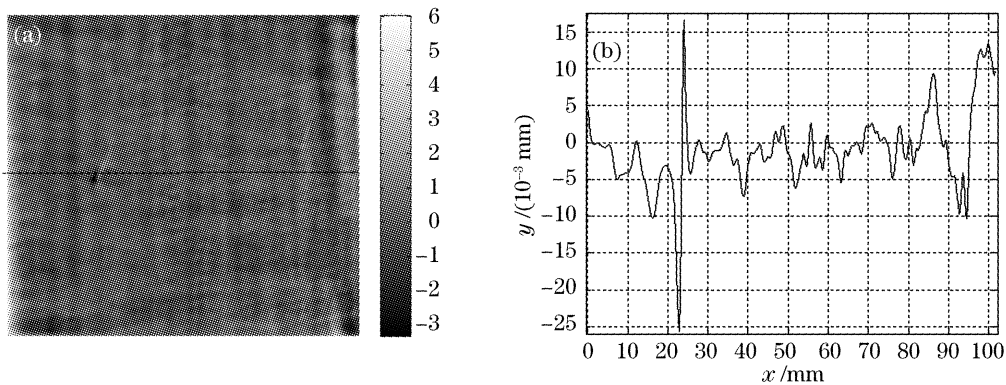


图 6 待测釉面瓷砖的面形分布。(a)灰度图,(b)轮廓图

Fig. 6 Shape distribution of the tested tile. (a) Gray image, (b) profile line

5 分析与讨论

本文提出了基于条纹反射和相移技术测量类镜面面形的新方法,继而讨论其测量原理和计算公式,通过预设标记点引导相位展开。初步实验验证了这一方法的可行性。

该方法具有结构简单、成本低、灵活性高等优点。但是在实际测量中还要考虑系统误差、薄膜晶体管显示器的平面性、标准面的表面质量和 CCD 的

噪声影响等因素。其中标准面的表面质量可以考虑用拟合的方法得到,CCD 的噪声影响通过选用更高灵敏度的 CCD 相机来进行改善,薄膜晶体管的平面性及其它的系统误差可以通过对系统的标定来校准。

参 考 文 献

- 1 Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology* [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)

- 金国藩,李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 2 Markus C. Knauer, Jürgen Kaminski, Gerd Häusler. Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5457**: 366~376
- 3 Thorsten Bothe, Wansong Li, Christoph von Kopylow *et al.*. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5457**: 411~422
- 4 Y. Y. Hung, L. Lin, H. M. Shang *et al.*. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 143~149
- 5 Liu Yuankun, Su Xianyu, Jiang Meihua. Shape measurement for reflector based on phase-shift and incoherent imaging[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(4): 458~463 (in Chinese)
刘元坤, 苏显渝, 姜美花等. 基于相移和非相干成像的反射镜面形测量方法[J]. *光电子 • 激光*, 2006, **17**(4): 458~463
- 6 Xian-Yu Su, Wen-Sen Zhou, G. von Bally *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the Rochi grating[J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 561~573
- 7 Xian-Yu Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(6): 141~150
- 8 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796 (in Chinese)
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 792~796
- 9 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. New method of three dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277 (in Chinese)
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
- 10 Zhou Renzhong. *Adaptive Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996 (in Chinese)
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996