

基于条纹反射的镜面物体面形测量技术仿真分析

朱荣刚, 陈超, 郑艺欣, 吴佳伟, 刘飞, 程渝栋

(金陵科技学院网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 详细介绍了一种镜面物体面形测量技术, 该技术应用了条纹反射原理和迭代算法实现了镜面面形的绝对测量。通过测量系统结构构建和基于梯度的面形复原两个阶段来进行仿真。仿真结果表明, 在口径 80 mm、曲率半径 400 mm 的凹球面被测件上, 该方法的测量精度能够达到 $2.62 \mu\text{m}$ 。

关键词: 光学测量; 条纹反射; 迭代算法; 三维面形测量

中图分类号: O43; TM930

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2018)04-0021-04

Simulation Analysis of Surface Measurement Technology of Mirror Object Based on Fringe Reflection

ZHU Rong-gang, CHEN Chao, ZHENG Yi-xin, WU Jia-wei, LIU Fei, CHENG Yu-dong

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In this paper, a mirror surface measurement technology is introduced in detail. This technology applies the fringe reflection principle and iterative algorithm to realize the absolute measurement of mirror surface. In this paper, the simulation is carried out through two stages: the construction of measurement system structure and gradient-based surface restoration. The simulation results show that the measurement accuracy of this method can reach $0.5 \mu\text{m}$ on a spherical surface with a diameter of 100 mm and a depth of about 5 mm.

Key words: optical measurement; fringe reflection; iterative algorithm; 3-D shape measurement

2004年,德国不莱梅光纤技术应用研究所(BIAS)的Bothe等首次比较完整地提出了一种基于条纹反射的三维面形测量技术^[1],并将这项技术命名为相位偏折术(Phase-Measuring Deflectometry, PMD)。该技术使用液晶显示器(LCD)投射光栅条纹到镜面上,并用摄像机拍摄镜面反射的条纹像。由反射定律可知,条纹反射像的形状与镜面的法向量分布有关,因此可由条纹图像解算镜面的全局斜率分布,进而重构被测面形。之后这项技术逐渐受到关注。2009年,法国的P. Rose等分析了用Michelson干涉仪产生的干涉条纹作为载频条纹图来测量被测件^[2];2010年德国的J. Balzer等详细阐述了PMD法在汽车制造中的应用^[3];2010年,亚利桑那大学J. Burge课题组的P. Su等将PMD技术应用于GMT望远镜子镜等大口径自由曲面镜面的测量中^[4]。另外,近几年新加坡南洋理工大学的一些科研人员在这方面也做了很多工作,提出了二维光栅条纹作为载波条纹图测量镜面物体^[5-7]。在国内,2010年上海大学的GUO Hong-wei等通过移动显示器来实现面形的绝对测量^[8];2011年长春光机所的张鹏等应用此法测量薄膜面形,对

收稿日期:2018-12-06

基金项目:金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-201829);中央高校基本科研业务费专项(30918014115)

通信作者:朱荣刚(1984—),男,江苏盐城人,讲师,博士,主要从事光学干涉测量以及图像处理技术等研究。

其生长过程进行监视^[9];2012年北京工业大学的LIU Zhangwei等应用PMD法测量悬浮物体在液面上形成的变形液面^[10];另外四川大学的苏显渝教授团队在此基础上做了很多理论与应用研究,包括采用双显示器的绝对面形测量技术以及对测量系统进行系统标定^[11-12]。

1 原理

1.1 条纹反射法镜面面形测量原理

条纹反射法测量系统模型如图1所示。其由TFT液晶显示屏、待测物、CCD组成。条纹的产生和采集均由计算机来控制。测量过程首先对标准参考面进行测量,由CCD记录条纹图,计算出参考相位;然后将被测件放在相同位置,计算出被调制后的相位分布;最后两者相减就得到由被测件面形变化引起的相位变化,再由原始面形数据结合梯度复原算法便可求出待测镜面形。

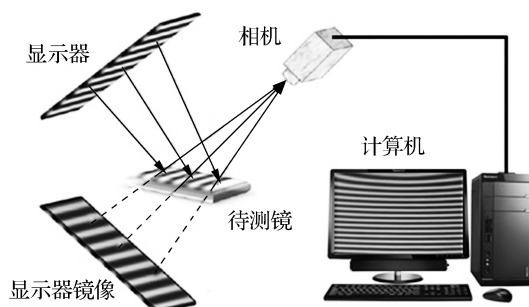


图1 测量原理图

1.2 迭代算法原理

在1.1的原理中需要已知参考镜面形数据,然后求取相位分布再进行待测镜的面形计算。迭代法则不需要已知的参考,直接默认一个参考面即可,然后将参考面的结果代入到面形测量中计算面形数据,公式如下^[4]:

$$\begin{aligned} w_x(x_m, y_m) &= \frac{\frac{x_m - x_{screen}}{d_{m2screen}} + \frac{x_m - x_{camera}}{d_{m2camera}}}{\frac{z_{m2screen} - w(x_m, y_m)}{d_{m2screen}} + \frac{z_{m2camera} - w(x_m, y_m)}{d_{m2camera}}} \\ w_y(x_m, y_m) &= \frac{\frac{y_m - y_{screen}}{d_{m2screen}} + \frac{y_m - y_{camera}}{d_{m2camera}}}{\frac{z_{m2screen} - w(x_m, y_m)}{d_{m2screen}} + \frac{z_{m2camera} - w(x_m, y_m)}{d_{m2camera}}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x_m 和 y_m 是待测镜面的坐标, x_{camera} 和 y_{camera} 是相机靶面上点的坐标, x_{screen} 和 y_{screen} 是显示器上点的坐标, $z_{m2screen}$ 和 $z_{m2camera}$ 分别是待测镜和显示器、待测镜和相机靶面之间的 z 坐标差值, $d_{m2screen}$ 和 $d_{m2camera}$ 分别是待测镜和显示器、待测镜和相机靶面之间的距离, $w_x(x_m, y_m)$ 和 $w_y(x_m, y_m)$ 分别是面形分布函数 $w(x_m, y_m)$ 在 x 和 y 方向上的斜率。

经过公式(1)求解的面形再代入此公式后,便可重复进行面形计算。图2为面形迭代结果示意图。

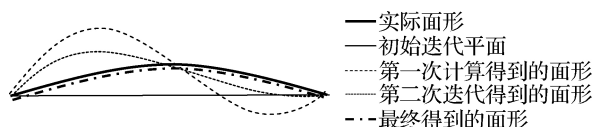


图2 迭代算法面形求解过程示意图

2 仿真实验

仿真的测量系统如图3所示,包括一个 $4\,000 \times 4\,000$ 像素的模拟显示器,单位像素大小为 $200\,\mu\text{m}$;

一个 600×600 像素的模拟相机成像靶面,单位像素大小 $5.6 \mu\text{m}$;在过相机靶面中心垂直于靶面 25 mm 处设为镜头光心。

另外,仿真被测件为一口径 80 mm 、曲率半径 400 mm 的凹反射球面镜,如图4所示。

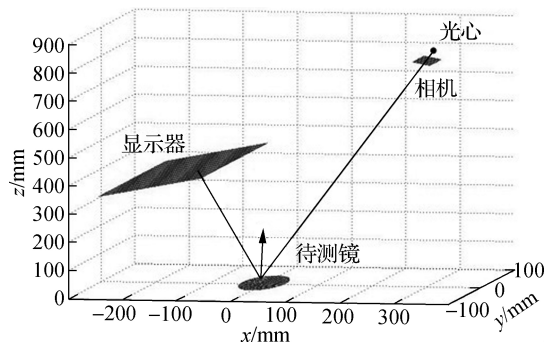


图3 测量系统结构仿真图

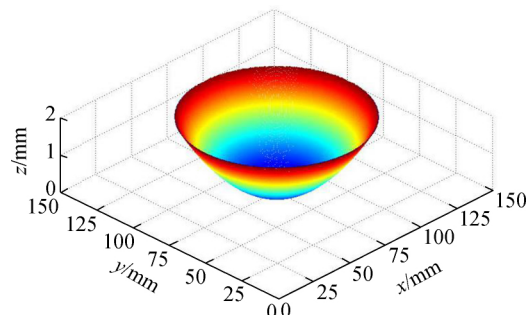
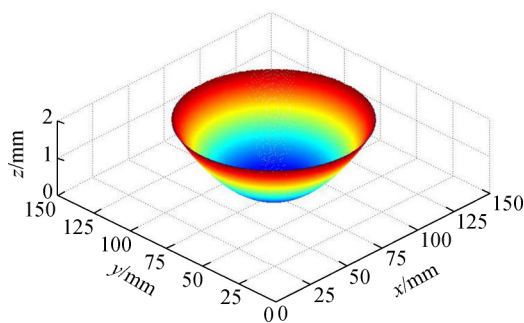
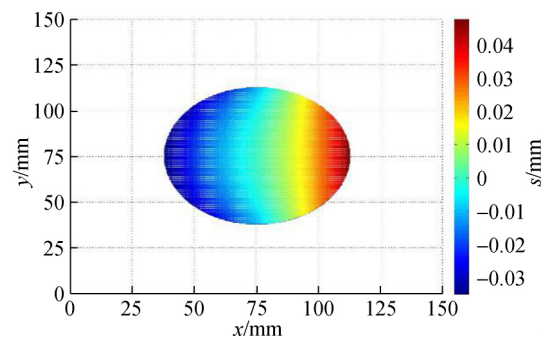


图4 仿真的凹反射球面镜

将初始的迭代面形设定为 $z=0$ 的平面,通过计算机求解光心与相机靶面上有效像素点的连线和初始面形的交点的空间位置坐标,结合相机与显示器之间像素相位的对应关系,能求出每条光路对应的显示器像素的空间位置坐标,联立相机靶面、交点和显示器像素能获取一次梯度数据,运用基于傅里叶变换的梯度复原算法来复原面形,第一次复原出的面形及偏差如图5所示。面形偏差的 PV 值为 $82.26 \mu\text{m}$,RMS 值为 $8.39 \mu\text{m}$,可以看出,第一次便能够复原出被测物体的初步面形,但精度不高。



(a) 复原面形



(b) 偏差图

图5 第一次复原面形及偏差

图6表示5次迭代过程中 x 方向截面与原始面形的偏差变化情况。可以看出,第一次复原得到待测镜的基本形状后,随着迭代次数的增加,面形能够很快地趋向于一个稳定值,此稳定的面形数据便是最终的测量结果。最终面形复原结果及偏差如图7所示,其 PV 值为 $2.62 \mu\text{m}$,RMS 值为 $0.24 \mu\text{m}$ 。

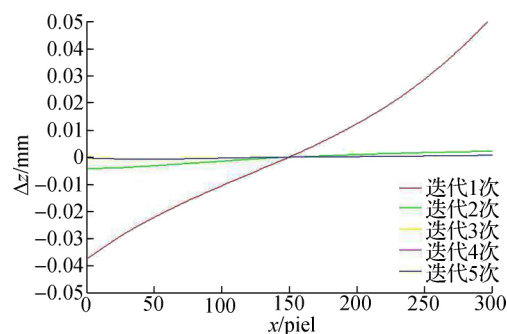


图6 x 方向截面与原始面形的偏差变化

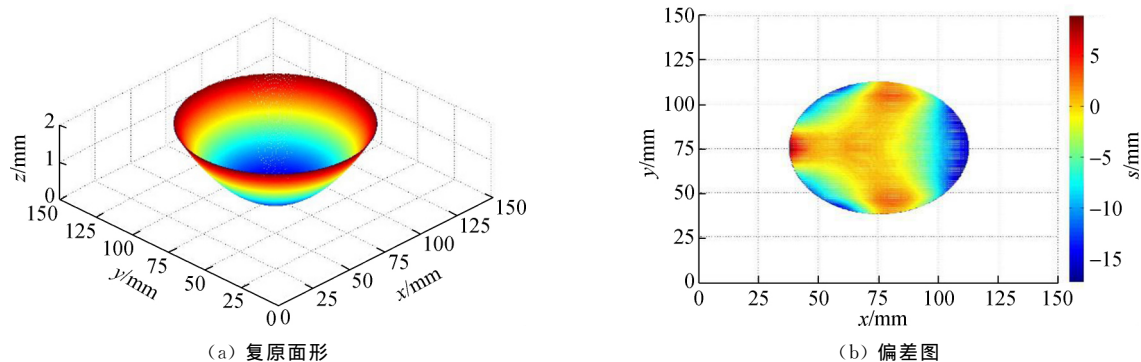


图7 最终复原面形及偏差

3 结 语

本文通过仿真实验验证了条纹反射技术在镜面物体测量中的可行性。该技术在单相机情况下,采用迭代算法来求取镜面物体面形,并且随着迭代次数的增加,复原出的面形数据会趋于稳定,该稳定的面形数据便是最终求取的测量结果。通过仿真实验得出,采用迭代法能够高精度地复原镜面物体的三维形貌。

参考文献:

- [1] Bothe T, Li W S, Von-Kopylow C, et al. High-resolution 3D shape measurement on specular surfaces by fringe reflection [C]. New York: Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2004: 411—422
- [2] Rose P, Surrel Y, Becker J M. Specific design requirements for a reliable slope and curvature measurement standard[J]. Measurement and Science Technology, 2009(20): 1—10
- [3] Balzer J, Werling S. Principles of shape from specular reflection[J]. Measurement, 2010, 43: 1305—1317
- [4] Su P, Parks R E, Wang L R, et al. Software configurable optical test system; a computerized reverse Hartmann test[J]. Applied Optics, 2010, 49(23): 4404—4412
- [5] Huang L, Asundi A. Study on three-dimensional shape measurement of partially diffuse and specular reflective surfaces with fringe projection technique and fringe reflection technique[J]. SPIE, 2011(4): 1—7
- [6] Xie P, Tang M X, Wei X R. Three-dimensional shape measurement of specular surfaces by orthogonal composite fringe reflection[J]. SPIE, 2011(14): 1—8
- [7] Huang L, Chi S N, Asundi K A. Fast full-field out-of-plane deformation measurement using fringe reflectometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50: 529—533
- [8] Guo H W, Feng P, Tao T. Specular surface measurement by using least squares light tracking technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48: 166—171
- [9] 张鹏, 张元, 金光, 等. 应用条纹投影法测量薄膜反射镜的成形[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1185—1190
- [10] Liu Z W, Huang X F, Xie H M. A novel orthogonal transmission-virtual grating method and its applications in measuring micro3-D shape of deformed liquid surface[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012(3): 78—89
- [11] 唐燕, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的非球面镜三维面形测量[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 965—969
- [12] 刘元坤, Evelyn O, 杨征, 等. 基于双频正交光栅一维相移的相位测量偏折术研究[J]. 光学学报, 2015, 42(3): 264—269

(责任编辑: 湛 江)