

基于光栅预校正的三维面形测量方法

边心田^{1,2}, 程菊^{1,2}, 左芬², 雷枫², 张恩泽¹

¹南京理工大学近程高速目标探测技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094;

²淮阴师范学院江苏省现代检测技术与智能系统重点建设实验室, 江苏 淮安 223300

摘要 针对传统的采用发散照明的相位测量轮廓术投影到参考面上的光场产生畸变的情况, 提出一种利用逆推法从参考面上的位置坐标与光栅条纹坐标分布之间的映射关系建立投影光栅模型的方法, 确保校正光栅投影到参考面上的条纹满足周期性分布。通过相位-高度映射关系恢复出被测物体的面形分布。该方法无须像传统测量方法一样将相位-高度之间的映射关系以数据表形式存储在计算机中, 放宽了系统测量的约束条件, 简化了测量装置, 并能实现高精度测量。计算机模拟和实验均证实了该方法的有效性。

关键词 测量; 三维测量; 光栅投影; 相位测量轮廓术; 逆推法

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011202

A Method of 3D Shape Measurement Based on Alignment Grating Projection

Bian Xintian^{1,2}, Cheng Ju^{1,2}, Zuo Fen², Lei Feng², Zhang Enze¹

¹The Ministerial Key Laboratory of JGMT, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

²Jiangsu Province Key Laboratory of Modern Measurement Technology and Intelligence, Huaiyin Normal University, Huai'an, Jiangsu 223300, China

Abstract We propose a new grating model building method by the inverse-deducing method using the coordinate relationship between the reference plane and fringe pattern. The method can make sure the fringe pattern projected to the reference has standard periodicity and can solve the problem of optical distortion in reference plane in traditional phase measurement profilometry produced by divergent illumination. The 3D shape of the tested object can be reconstructed with the help of phase-height mapping algorithm. The proposed method does not need to store the relationship between phase and height as the traditional method. It does not contain the 3D measurement much, simplifies the design of measurement system and has high measuring precision. Computer simulations and experiment results validate the feasibility of this method.

Key words measurement; 3D measurement; grating projection; phase measurement profilometry; inverse-deducing method

OCIS codes 120.2650; 120.6650; 120.5050; 150.6910

1 引言

光栅投影三维测量技术具有非接触、测量速度快、精度高、视场大、获取数据多等特点^[1-4], 在航空航天、文物保护、生物医学、影视特技、产品检测等领域具有广阔的应用前景^[5-7]。在光栅投影三维测量领域中, 激光三角法具有独特的优势。但是基于单成像系统的三角法光学系统建立时存在 3 个明显的约束条件: 1) 投

收稿日期: 2016-08-25; **收到修改稿日期:** 2016-10-02; **网络出版日期:** 2016-12-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30920140122005)、江苏省高校自然科学基金面上项目(15KJB460004)、淮安市应用研究与科技攻关(工业)项目(HAG2014019)、淮阴师范学院青年优秀人才支持计划(13HSQNZ03)

作者简介: 边心田(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学三维传感方面的研究。E-mail: bianxt@126.com

影系统光瞳与成像系统光瞳连线平行于参考面;2) 成像光轴与投影光轴相交于参考面;3) 成像光轴垂直于参考面。上述约束条件的存在,使经典的三角测量法在应用中受到一定的限制。针对这种情况,许多研究者进行了相应的研究和探讨,并给出许多解决方法。盖绍彦等^[8]提出了光栅相位自校正的方法;毛先富等^[9]改进了相位-高度之间的映射公式,提高了测量精度;陈文静等^[10]研究了双色光栅投影消零频对傅里叶变换轮廓术的影响,在提高测量精度的同时实现快速测量;田爱玲等^[11]和许庆红等^[12]在传统二维模型基础上进行改进放宽了对平行性、垂直性的要求。Fu等^[13]提出在传统的二维模型基础上建立光栅投影模型的方法,提高了测量精度。Wang等^[14]提出一种自动检测系统几何参数进行测量的方法,使得测量精度明显提升,同时也放宽了测量系统的约束条件。

本文将传统光栅投影测量中条纹畸变的问题通过调整投影仪的光栅模式进行校正,通过逆推法分析投影条纹并建立了双光轴异面情况下的高度计算模型,保证投影到参考面上的条纹强度为标准的周期性分布,在系统模型中彻底放宽经典三角法在应用中约束条件的限制,从而为后续的相位准确提取奠定基础,物体高度可以直接通过映射公式获得。计算机仿真和实验验证了该方法的可行性。

2 基本原理

2.1 光栅模型

测量系统原理如图1所示, P, I 分别为投影系统的出瞳和成像系统的入瞳,投影系统光轴 PO 和成像系统光轴 $O_c I$ 异面,分别与参考面相交于 O, O_c 点,记 $\overline{PO}=s, \overline{IO_c}=L, PO$ 与其参考面上法线的夹角为 θ ,投影出瞳到参考面的垂足为 F ,物面上任一点 B 与参考面上点 E 在成像系统中成像于同一点。 $O'A'$ 为投影表面,过 O 做 $O'A'$ 的平行线与 PB 相交于 M 点。投影光栅的栅线垂直于 POF 平面, $\overline{OK}=L, KB$ 与 FO 交与点 C 。成像系统入瞳 I 平移到 K 位置时, E 移动到 KO 连线上的 C 点处,且 C, B, K 在一条直线上^[10],显然点 C 处的相位与点 E 处的相位相等,即 $\phi_C = \phi_E$ 。

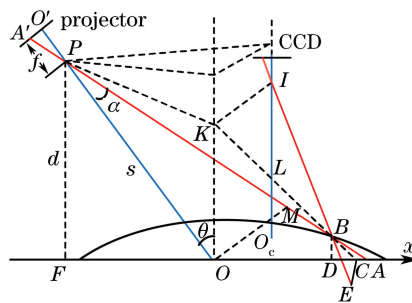


图1 测量原理图

Fig. 1 Schematic of measurement

在 $\triangle OAM$ 中,由正弦定理

$$\frac{\overline{OA}}{\sin \angle OMA} = \frac{\overline{OM}}{\sin \angle OAM}, \quad (1)$$

式中 $\overline{OM} = s \tan \alpha$ 。由几何知识,可得

$$\sin \angle OMA = \sin(90^\circ + \alpha), \quad (2)$$

$$\sin \angle OAM = \sin(90^\circ - \theta - \alpha) = \cos(\theta + \alpha). \quad (3)$$

在 $\triangle POM$ 和 $\triangle PO'A'$ 中,

$$\overline{OM} = \frac{\overline{PO}}{\overline{PO'}} \overline{O'A'} = \frac{s}{f} \overline{O'A'}, \quad (4)$$

式中 f 为投影仪的焦距。

设 $\overline{OA} = x, \overline{O'A'} = x'$,则由(1)~(4)式

$$x = \frac{s x'}{f \cos \theta - x' \sin \theta}. \quad (5)$$

投影到参考面上的条纹是等周期分布的,不妨设周期为 p_0 ,在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

$$\phi(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{sx'}{f \cos \theta - x' \sin \theta} \quad (6)$$

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

$$\phi(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{sx'}{f \cos \theta - x' \sin \theta} \quad (7)$$

当投影的光栅被移动周期的 $1/N$,条纹图的相位被移动 $2\pi/N$,产生新的相位 $\phi_n(x')$,因此投影光栅的相位函数可以表述为

$$\phi_n(x') = \frac{2\pi}{p_0} \frac{sx'}{f \cos \theta - x' \sin \theta} + \frac{2n\pi}{N}, n = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

对应的参考面上的相位函数可以表述为

$$\phi_n(x) = \frac{2\pi}{p_0} x + \frac{2n\pi}{N}, n = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

2.2 高度计算

在测量三维物体的表面时,探测器探测到三维物体表面上任意一点 B 的相位 ϕ_B ,它对应于参考面上 A 点的相位,即 $\phi_B = \phi_A$ 。参考面上的相位分布 $\phi(x)$ 是坐标 x 的线性函数,这意味着距离 \overline{OC} 和 \overline{OA} 是已知的, $\overline{OC} = p_0 \phi_C / (2\pi)$, $\overline{OA} = p_0 \phi_A / (2\pi)$ 。在 $\triangle ABD$ 和 $\triangle APF$ 中,由三角形相似可得

$$\frac{\overline{AD}}{\overline{PF}} = \frac{\overline{FA}}{\overline{BD}}, \quad (10)$$

在 $\triangle CBD$ 和 $\triangle CKO$ 中,由三角形相似可得

$$\frac{\overline{CD}}{\overline{KO}} = \frac{\overline{CO}}{\overline{BD}}. \quad (11)$$

由(10)、(11)式,可得

$$\overline{AC} = \left(\frac{\overline{FA}}{\overline{PF}} - \frac{\overline{CO}}{\overline{KO}} \right) \overline{BD}, \quad (12)$$

式中 $\overline{AC} = \frac{p_0}{2\pi} (\phi_A - \phi_C)$, $\overline{FA} = \overline{FO} + \overline{OA} = s \sin \theta + \frac{p_0}{2\pi} \phi_A$, $\overline{PF} = s \cos \theta$, $\overline{OC} = \frac{p_0}{2\pi} \phi_C$, $\overline{KO} = L$ 。设点 A 与点 C 之间的相位差 $\phi_{AC} = \phi_A - \phi_C$, 物体的高度 $\overline{BD} = h$, 则

$$h = \frac{L s p_0 \phi_{AC} \cos \theta}{2\pi L s \sin \theta + L p_0 \phi_{AC} + p_0 \phi_C (L - s \cos \theta)}. \quad (13)$$

3 计算机仿真与实验

通过计算机仿真验证提出方法的正确性。模拟大小 $500 \text{ pixel} \times 500 \text{ pixel}$, 高度为 110 mm 的物体,如图 2(a) 所示。成像系统与参考面之间的距离 $L = 800 \text{ mm}$, 投影系统出瞳到参考面上 O 点的距离 $s = 1400 \text{ mm}$, 投影系统到参考面的距离 $d = 1000 \text{ mm}$ 。利用本文提出的方法,采用四步相移法,投影四帧校正后的光栅条纹到待测物体表面,成像系统采集到的其中一帧变形条纹图如图 2(b) 所示。对变形条纹图进行处理,利用提出方法恢复出物体的三维面形如图 2(c) 所示。同样的物体,利用传统方法恢复物体面形如图 2(d) 所示。

为了验证提出方法的可行性,搭建实验装置,使用型号为 PK301 的 Optoma DLP 微型投影仪,采用 JAI CV-A50 相机对图 3 所示的物体进行测量。利用 Zhang 等^[15]提出的基于二维平面标靶的标定方法进行系统标定,测量系统的几何参数为 $L = (1159.031 \pm 0.011) \text{ mm}$, $d = (1026.102 \pm 0.014) \text{ mm}$, $s = (852.021 \pm 0.024) \text{ mm}$ 。将校正后的相移光栅分别投影到被测物体表面。获得的其中一帧变形条纹图如图 4 所示。最终恢复出被测物体的三维数据,如图 5 所示。提出方法与传统方法的比较如图 6 所示,可以看出本文提出方法优于传统方法。

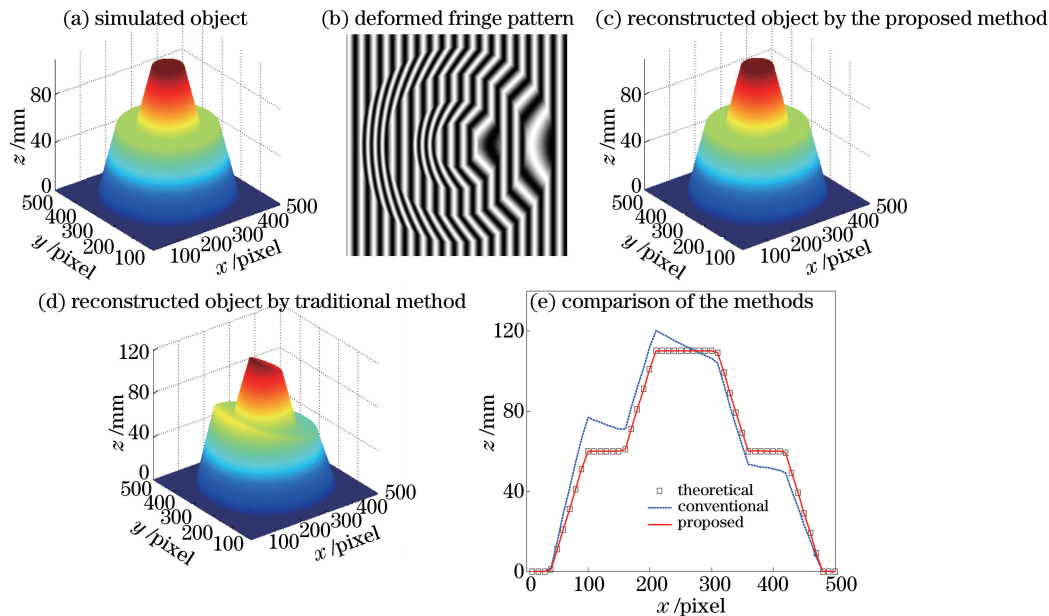


图2 计算机模拟结果

Fig. 2 Results of computer simulation

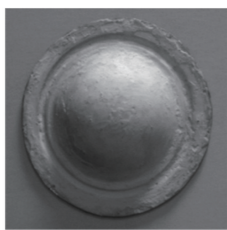


图3 被测物体

Fig. 3 Object to be measured

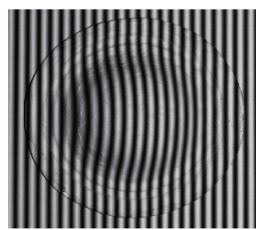


图4 变形条纹图

Fig. 4 Grating fringes modulated by 3D object

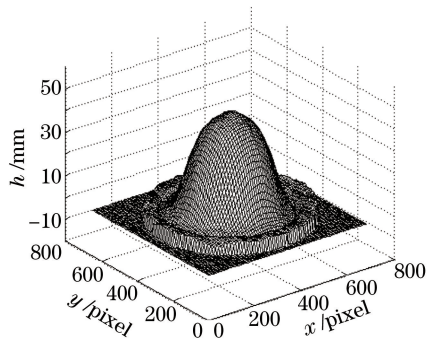


图5 重建物体图像

Fig. 5 Reconstructed object

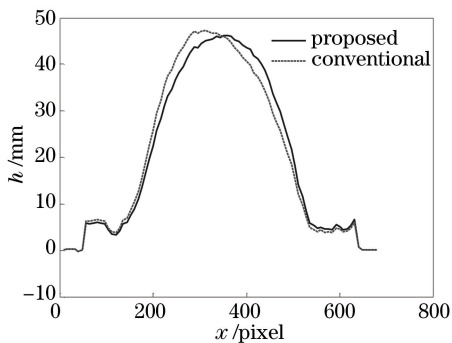


图6 两种方法比较

Fig. 6 Comparison of the two methods

4 结 论

提出一种新的三维面形测量方法,在传统的二维模型基础上建立新的三维光栅投影模型。在系统搭建时,投影系统出瞳与成像系统入瞳连线无需平行于参考面,成像光轴与投影光轴异面,该方法放宽了传统三角测量方法中对测量系统的约束条件,简化了测量装置,并能实现高精度测量。因此,测量系统的搭建变得灵活方便。计算机模拟和实验均证实了该方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Huang S J, Xie L L, Wang Z Y, *et al.* Accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 789-795.
- [2] Chen X C, Lu C, Ma M C. Color-coding and phase-shift method for absolute phase measurement [J]. *Optics Communications*, 2013, 298-299: 54-58.
- [3] Chen Wenxin, Cao Xuejia, Li Yong. Study of correcting distortion of projector in PMP by predistortion fringes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(10): 2698-2701.
陈文鑫, 曹学佳, 李 勇. 利用预失真条纹校正 PMP 系统投影仪畸变的研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(10): 2698-2701.
- [4] Du G L, Zhang C R, Zhou C L. Iterative two-step temporal phase-unwrapping applied to high sensitivity three-dimensional profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 79: 22-28.
- [5] Wang Huarong, Li Bin, Wang Zhifeng, *et al.* Surface measurement of parabolic trough unit mirror based on fringe reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0112007.
王华荣, 李 彬, 王志锋, 等. 基于条纹反射术的槽式抛物面单元镜面测量[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0112007.
- [6] Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- [7] Zheng Dongliang, Da Feipeng. Gamma correction method for accuracy enhancement in grating projection profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0512003.
郑东亮, 达飞鹏. 提高数字光栅投影测量系统精度的 Gamma 校正技术[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0512003.
- [8] Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new phase alignment method for digital projector in phase measuring profilometry[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(11): 1363-1368.
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, 32(11): 1363-1368.
- [9] Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu, *et al.* Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 225-229.
毛先富, 陈文静, 苏显渝, 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 225-229.
- [10] Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.* Improved FTP based on bi-color fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1153-1157.
陈文静, 苏显渝, 曹益平, 等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1153-1157.
- [11] Tian Ailing, Jiang Zhuangde, Huang Mengtao, *et al.* New method of three-dimensional profile measurement based on fringe pattern projection[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(9): 959-962.
田爱玲, 蒋庄德, 黄梦涛, 等. 基于条纹投影的三维轮廓测量新方法[J]. *西安交通大学学报*, 2004, 38(9): 959-962.
- [12] Xu Qinghong, Zhong Yuexian, You Zhifu. System calibration technique of profilometry by projected grating [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(2): 126-129.
许庆红, 钟约先, 由志福. 光栅投影轮廓测量的系统标定技术[J]. *光学技术*, 2000, 26(2): 126-129.
- [13] Fu Y J, Luo Q. Fringe projection profilometry based on a novel phase shift method[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21739-21747.
- [14] Wang Z Y, Du H, Bi H B. Out-of-plane shape determination in generalized fringe projection profilometry[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 12122-12133.
- [15] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.