

〈综述与评论〉

## 位测量轮廓术中相位-高度映射系统标定的研究现状

万安军<sup>1</sup>, 林玉明<sup>2</sup>, 赵勋杰<sup>1</sup>

(1. 苏州大学物理与光电·能源学部, 江苏 苏州 215006; 2. 朝阳广播电视台, 辽宁 朝阳 122000)

**摘要:** 相位测量轮廓术在物体三维重建与检测技术中有着广泛的应用, 其三维重建过程可分为3个部分: 结构光栅的产生和投影, 相位提取与相位展开和相位-高度映射系统标定。相位-高度映射系统标定对三维重建精度起到决定性的作用。因此, 相位-高度映射系统标定成为相位测量轮廓术三维重建研究中的热门课题。本文对三维重建和相位测量轮廓术的基本原理做简要介绍, 然后详细介绍相位-高度映射系统标定的研究现状。

**关键词:** 三维重建; 相位测量轮廓术; 相位-高度映射; 系统标定

中图分类号: TN919 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2018)07-0701-06

## Research Status of Phase-Height Mapping System Calibration in Phase Measurement Profilometry

WAN Anjun<sup>1</sup>, LIN Yuming<sup>2</sup>, ZHAO Xunjie<sup>1</sup>

(1. College of Physics, Optoelectronics and Energy of Soochow University, Suzhou 215006, China;

2. Chaoyang Radio and TV University, Chaoyang 122000, China)

**Abstract:** The phase measurement profilometry is widely used in three-dimensional reconstruction and detection of objects. The three-dimensional reconstruction process can be divided into three parts: generation and projection of structure grating, phase extraction and phase unwrapping, and phase-height mapping system calibration. Among them, the phase-height mapping system calibration plays an important role in the reconstruction accuracy. Therefore, it has become a hot topic in the research of three-dimensional reconstruction of phase measurement profilometry. This article briefly introduces the basic principles of three-dimensional reconstruction and phase measurement profilometry and then discusses the current research status of phase-height mapping system calibration in detail.

**Key words:** three-dimensional reconstruction, phase measurement profilometry, phase-height mapping, system calibration

### 0 引言

三维重建技术是通过接触式和非接触式方式获得物体三维空间信息的方法和技术。根据待测物体与三维重建设备之间的位置关系可分为接触式三维重建技术<sup>[1]</sup>与非接触式三维重建技术<sup>[2]</sup>; 根据成像照明方式的不同可分为被动三维重建技术和主动三维重建技术。其中, 接触式三维重建技术最具代表性的就是三坐标测量机, 它是通过移动探头与待测物体表面接触来获取接触点的三维坐标, 最后通过大量的坐标点

拟合出物体的三维形状, 然后进行尺寸检测。三坐标机由于检测精度高、成本低、易操作等特点而被快速发展。但是, 由于需要与物体接触, 使得探头易磨损, 使用时间长了会降低三维重建的精度, 测量速度很慢, 不适合大面积物体的检测与测量, 并且还不能检测柔性的物体等缺点, 无法满足大部分行业的需求。非接触式的三维重建以速度快, 精度高, 成本低等优点恰好弥补接触式的缺点, 使得非接触式的三维重建得到飞速发展, 大有取代接触式的趋势。

非接触式三维重建又可分为电磁学三维重建(如

收稿日期: 2018-01-30; 修订日期: 2018-05-31。

作者简介: 万安军(1992-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机视觉及应用。

通信作者: 赵勋杰(1960-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 计算机视觉与应用, 红外目标检测与跟踪。E-mail: zhaoxunjie999@126.com。

核磁共振成像、计算机断层扫描等)、声学三维重建(超声波测距)和光学三维重建,它们在各自领域都有着广泛的应用。光学三维重建是指通过光学原理和图像处理等技术来获得被测物体的三维空间信息,从而进行物体的三维重建与检测。在光学三维重建中,根据是否需要额外的照明光源又分为被动式光学三维重建和主动式光学三维重建。

### 1) 被动式光学三维重建

被动式光学三维重建是指在自然光照(不需要额外的光源)的情况下进行待测物体图像的获取,从获得的图像中寻找物体的三维信息进行三维重建。被动式光学三维重建的方法有:双目及多目视觉法<sup>[3]</sup>、摄影测量法<sup>[4]</sup>、阴影恢复形状法<sup>[5]</sup>等。

### 2) 主动式光学三维重建

主动式光学三维重建是通过不同的投影设备向待测物体表面投影不同结构的光,同时通过摄像机拍摄待测物体表面因为高度调制而发生形变的结构光图像,然后从发现形变的图像中计算出待测物体的三维信息,从而实现待测物体的三维重建与检测。常用的主动式光学三维重建方法有:激光扫描法<sup>[6]</sup>(Laser Scanning, LS)、相位测量轮廓术<sup>[2, 7]</sup>(Phase Measuring Profilometry, PMP)或者相移动测量轮廓术<sup>[8-9]</sup>(Phase Shifting Profilometry, PSP)、二进制编码重建<sup>[10]</sup>(Binary Code Reconstruction)、彩色编码条纹投影仪法<sup>[11]</sup>(Color-coded Fringe Projection, CFP)、傅里叶变换轮廓术<sup>[12]</sup>(Fourier Transform Profilometry, FTP)等。其中, PMP 的研究和应用最为广泛。

## 1 相位测量轮廓术(PMP)三维重建原理

相位测量轮廓术是投影仪向待测物体投影出一定相位移动的多幅光栅条纹图像,摄像机采集经过物体高度调制的光栅条纹图像,然后通过对光栅条纹图像的计算得到物体表面对应位置的相位信息,最后通过系统标定得到物体的三维信息,其三维重建过程大致可分为:结构光栅的产生和投影,相位提取与相位展开和相位-高度映射系统标定。

通常投影仪投影的是光强呈正弦变化的光栅图

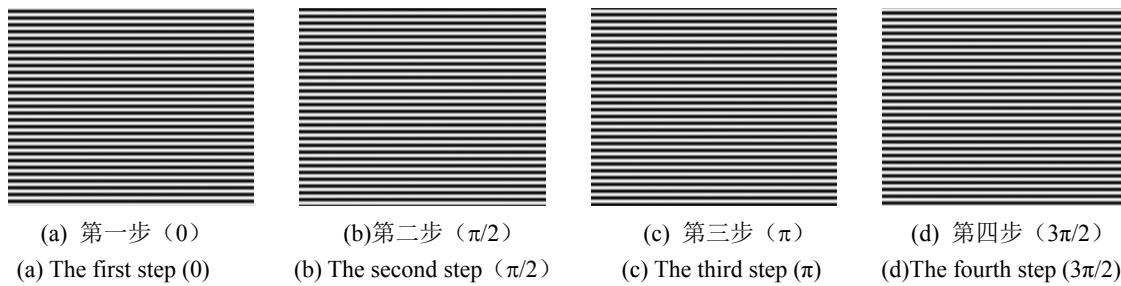


图1 四步相移光栅图

Fig.1 Grating Diagram of Four-Step Phase-Shift

像,物体表面光栅条纹的光强分布函数表达式<sup>[13]</sup>为:

$$I_n(x, y) = I_a(x, y) + I_b(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \frac{2\pi(n-1)}{N}] \quad (1)$$

式中:  $\{I_n: n=1, \dots, N\}$ ,  $N$  为相移步数;  $I_n(x, y)$  为第  $n$  幅光栅图像在  $(x, y)$  位置的光强;  $\varphi(x, y)$  为高度调制之后的相位值。在公式(1)中可知,  $I_a(x, y)$ 、 $I_b(x, y)$ 、 $\varphi(x, y)$  是未知数,为了求解出  $\varphi(x, y)$ ,至少需要 3 个相关的方程,及需要至少 3 幅光栅图像(三步相移)才能求解出  $\varphi(x, y)$ 。通过三角函数的相关计算<sup>[12]</sup>可以得到式(2)。

$$\tan \varphi(x, y) = -\frac{I'_c(x, y)}{I'_b(x, y)} = -\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin \frac{2\pi(n-1)}{N}}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos \frac{2\pi(n-1)}{N}} \quad (2)$$

在实际的应用中,当  $N=3$  时为三步相移法<sup>[14]</sup>;当  $N=4$  时为四步相法<sup>[15]</sup>。如图 1 所示,四步相移法是利用四幅相位相差  $\pi/2$  的正弦条纹图像求解变形条纹的相位。根据式(2)可求得对应的相位表达式:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right) \quad (3)$$

同理可得三步相移法的相位表达式为:

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_3 - I_1}\right) \quad (4)$$

对式(3)或者式(4)进行相位展开就可以得到待测物体表面的相位分布图,现有的相位展开算法可分为:空间相位展开算法<sup>[16]</sup>(Spatial Phase Unwrapping Algorithm)和时间相位展开算法<sup>[8]</sup>(Temporal Phase Unwrapping Algorithm)。相位分布图必须根据相位与被测物体表面高度(深度)的映射关系来计算物体高度(深度)方向的具体尺寸信息。如图 2 所示,相位-高度的映射关系依赖于测量系统的几何参数(比如:投影仪(DLP)与摄像机(CCD)的水平距离  $I_1I_2$ ; DLP 到基准面  $R$  的高度  $L$ ; 以及 DLP 光轴与 CCD 光轴的夹角  $\theta_1$  等),参数的测量误差会影响相位与高度(深度)之间的映射关系,从而影响物体高度(深度)信息的获取,给最终的重建与检测精度带来不可忽视的影响。

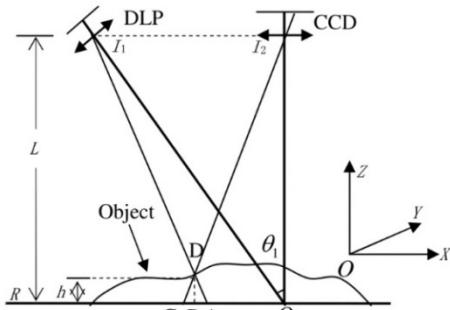


图2 测量系统结构简易图 Fig.2 System structure diagram

## 2 相位-高度映射系统标定技术的研究现状

相位测量轮廓术三维重建的精度很大程度上取决于相位测量轮廓术相位-高度映射系统标定的精度,所以相位-高度映射系统标定是一个很热门的研究课题。经过多年的研究发展,现有的相位-高度映射系统标定方法可分为:几何三角法(Geometric Triangulation Method)、逆向摄像机法(Inverse Camera Method)、伪摄像机法(Pseudo-camera Method)和多项式拟合法(Polynomial Method)。

### 2.1 几何三角法

在几何三角法<sup>[17]</sup>中,物体表面的高度信息是由摄像机与投影仪之间的几何关系来计算的,通过建立物体表面三维点的三维坐标与系统(摄像机和投影仪以及基准面组成的光学系统,如图2所示)固有参数之间的数学模型。由于传统的相位高度映射模型参数存储空间大,计算成本高,张旭<sup>[18]</sup>等人在此基础上提出一种显函数模型,只需要一个未知平面上9个非共线的像素数据就可以标定出该模型的15个参数。HU和HUANG等人<sup>[19]</sup>提出的标定方法只需要对9个参数进行标定,简化了数学模型。在文献[20]中提出的方法,成像系统光轴不需要正交于参考平面,并且只需要标定7个独立的系统参数。LI等人<sup>[13]</sup>在传统的标定过程中考虑光学系统的畸变。CHUNG等人<sup>[21]</sup>结合几何参数法与最小二乘法来标定和优化最后的参数。几何三角法的优点:不需要单独对投影仪进行标定。其缺点是:标定过程比较复杂、效率低;当简化数学模型时,精度会降低;整个系统的几何参数难以精确测量。

### 2.2 逆向摄像机法

逆向摄像机法<sup>[22]</sup>是把投影仪当做逆向摄像机,摄像机拍摄投影棋盘格,提取图片中的角点数据,然后通过已标定的摄像机建立投影仪图像与物体表面三维坐标点之间的对应关系,最后使用摄像机标定方法

对投影仪进行标定,最终实现整个系统的标定。

图3为逆向摄像机法结构示意图,其中(a)为投影仪投影出来的棋盘格图像,(b)为投影仪投影与摄像机拍摄投影棋盘格的示意图。Achraf等人<sup>[23]</sup>提出了一种改进方法,整个标定过程中不需要额外的定位设备。Gu等人<sup>[24]</sup>使用反向投影(back projection process,BPP)的方向对投影仪进行标定。为了提高标定中特征点的提取精度,Chen<sup>[25]</sup>和Wang<sup>[26]</sup>等人在特征点边缘轮廓提取的过程中引入亚像素提取算法。Zhou<sup>[12]</sup>和Song等人<sup>[27]</sup>在其中引入双目立体视觉原理。逆向摄像机法的优点:不需要精密的辅助标定设备,操作比较简单。其缺点:由于投影仪标定会依赖摄像机标定,造成摄像机标定误差的传递,影响最后整个系统的标定精度。

### 2.3 伪摄像机法

伪摄像机法<sup>[26]</sup>是借助摄像机图像在投影仪成像平面中的虚拟图像,建立投影仪虚拟图像与摄像机图像之间的单应性矩阵,用摄像机标定方法对投影仪进行标定,最终实现整个系统的标定。在很多传统的伪相机简化模型中忽略了镜头畸变,导致标定精度低。为了提高精度,Moreno等人<sup>[28]</sup>在模型中加入镜头的径向和切向畸变,通过估计投影仪图像平面中3D点的图像坐标,利用未标定的摄像机和局部单应性来达到亚像素精度。Orghidan等人<sup>[29]</sup>设计了一种标定方法,他们不需要高精度的棋盘格或者带有圆形标记点的标定板,只需要一个白色的平面板。HUANG等人<sup>[30]</sup>在绝对相位与特征点的匹配以及与世界坐标系的关系中引用多项式拟合的方法。Portalés<sup>[31]</sup>和HUANG等人<sup>[32]</sup>在特征点的提取上引入亚像素和最小二乘法曲线拟合来提高特征圆的提取精度。Lu等人<sup>[9]</sup>在系统模型中引入最小范数的方法和基于最大似然准则的非线性优化方法,使得标定过程更加灵活,精度更高。伪相机法的优点:摄像机和投影仪的标定是分开独立的,摄像机标定误差不会产生二次传播。其缺点:该方法只适用于连续的光栅条纹,并且特征点的匹配精度有限。

### 2.4 多项式拟合法

多项式拟合法是借助外界高精度的移动装置来获取绝对相位值和对应的深度(深度)值,然后通过多项式拟合的方法得到相位与高度(深度)之间的拟合参数(如式(5)),最后实现三维重建系统的标定。

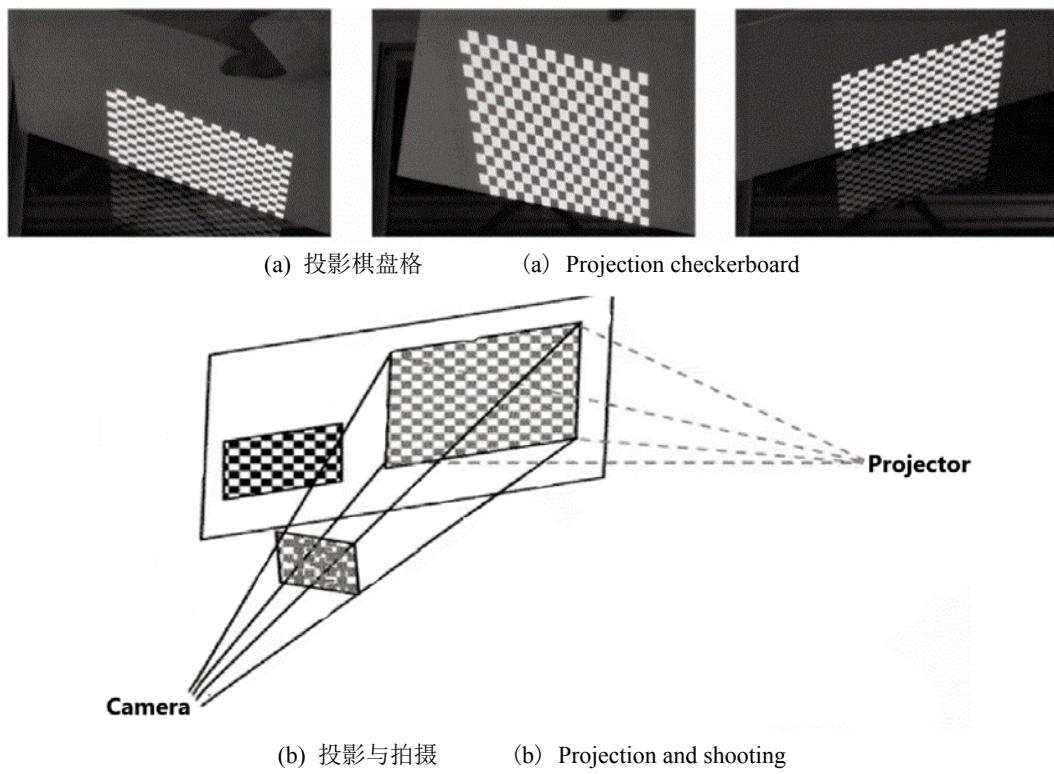


图3 逆向相机法示意图

Fig.3 Inverse camera method schematic diagram

$$H(x, y) = a_n \Delta\phi^n(x, y) + a_{n-1} \Delta\phi^{n-1}(x, y) + \cdots + a_1 \Delta\phi(x, y) + a_0 \quad (5)$$

式中:  $n$  为拟合阶次;  $H(x, y)$  为  $(x, y)$  位置的拟合高度值;  $\Delta\phi(x, y)$  为  $(x, y)$  位置的相位差;  $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$  为多项式拟合的拟合系数。

传统的多项式拟合标定方法不考虑摄像机和投影仪的镜头畸变, 李勇等人<sup>[33]</sup>在此基础上进一步研究畸变量与相位之间的关系, 提出考虑镜头畸变的相位-高度映射关系的多项式拟合标定方法。Vargas 等人<sup>[34]</sup>利用张正友摄像机标定方法对基准面进行二维摄像机标定, 提高了二维平面的精度。三角台阶和标准三角量具可以在实验室里很好地获取绝对相位值与高度(深度)信息, 但是, 该方法在实际应用中使用不便, 针对此情况, ZHANG 等人<sup>[35]</sup>使用棋盘格和带有固定距离的圆形标记点的白板完成多项式拟合的标定。Merner 等人<sup>[36]</sup>使用二进制散焦技术解决了在移动标定平面中投影仪产生的离焦问题。Léandry 等人<sup>[37]</sup>对多项式拟合阶次对标定精度的影响进行研究, 并得出系统标定的随机误差在拟合阶次低于或等于4的时候最小。当光栅倾斜投影的时候会使光栅周期发生变化, 针对此问题, Siegmann 等人<sup>[38]</sup>所提出的方法考虑投影仪投影条纹和摄像机非零视场的发散, 使用二维数字图像校正的方法进行数据图像矫正。多项式拟合

法的优点: 避免投影仪参数的标定, 对于光学系统结构没有特殊的要求, 标定精度高。其缺点: 标定效率低; 标定中往往需要额外的高精度移动装置, 增加标定成本, 并且移动装置的移动精度会影响标定精度。

### 3 结论

相位测量轮廓术三维重建在工业产品检测、医疗诊断、虚拟现实、文物修复、人体形体测量等领域展现出巨大的应用潜力。然而, 相位测量轮廓术三维重建中的相位-高度映射系统标定的精度与效率对三维重建的精度与速度起到决定性的作用, 因此相位-高度映射系统标定也成为研究的热点。目前, 大量的学者主要围绕标定精度、标定效率和标定成本进行研究, 并产生大量的系统标定方法, 大致可分为: 几何三角法、逆向摄像机法、伪摄像机法和多项式拟合法。通过本文的整理和分析, 各种方法都有自己的优缺点, 在使用的时候根据具体的情况进行选择, 比如: 多项式拟合法适合于三维重建精度要求很高, 但是效率和成本没有特定要求的场合; 逆向摄像机法适用于精度要求不高, 但是要求标定过程简单高效的场合等。高精度、高效率和低成本一直是相位-高度映射系统标定研究的目标。

## 参考文献:

- [1] 张国雄. 三坐标测量机的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2000, **11**(1-2): 222-226.
- ZHANG Guoxiong. The development trend of coordinate measuring machine[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, **11**(1-2): 222-226.
- [2] 张佰春. 条纹投影三维测量的若干关键技术的研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2017.
- ZHANG Baichun. Research on Some Key Techniques of fringe projection 3D measurement[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2017.
- [3] Peter Ekberg, Bita Daemi, Lars Mattsson. 3D precision measurements of meter sized surfaces using low cost illumination and camera techniques[J]. *Measurement Science & Technology*, 2017, **28**(4). DOI: 10.1088/1361-6501/aa5ae6.
- [4] Cristina Portalés, Sergio Casas, Inmaculada Coma, et al. A Multi-Projector Calibration Method for Virtual Reality Simulators with Analytically Defined Screens[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2017, **3**(2):19. DOI: 10.3390/jimaging3020019.
- [5] 谢梓威, 范冲, 张云生. 一种结合纹理择优算法的影像三维重建方法[J]. 测绘科学, 2017, **42**(1): 101-106.
- XIE Ziwei, FAN Chong, ZHANG Yunsheng. Automated texture mapping algorithm and application in image-based 3D reconstruction[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, **42**(1): 101-106.
- [6] XU Jing, GAO Bingtuan, LIU Chuande, et al. An omnidirectional 3D sensor with line laser scanning[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **84**: 96-104.
- [7] PENG Kuang, CAO Yiping, LI Kun, et al. A new pixel matching method using the entire modulation of the measured object in online PMP[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, **125**(1): 137-140.
- [8] ZUO Chao, HUANG Lei, ZHANG Minliang, et al. Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: a comparative review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **85**: 84-103.
- [9] LU Jin, MO Rong, SUN Huibin, et al. Flexible calibration of phase-to-height conversion in fringe projection profilometry[J]. *Appl. Opt.*, 2016, **55**(23): 6381-6388.
- [10] 石爱军, 白瑞林, 田青华. Gray 码结合线移的结构光三维测量[J]. 光工程, 2016(11): 26-32.
- SHI Aijun, BAI Ruilin, TIAN Qinghua. 3D Measurement Based on Structured Light Using a Combination of Gray Code and Line-shift Patterns[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016(11): 26-32.
- [11] 李宝顺, 顾春霞, 包亚萍, 等. 一种基于图像单应性矩阵的投影仪标定方法[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2016, **40**(1): 30-36.
- LI Baoshun, GU Chunxia, BAO Yaping, et al. A calibration method of projector based on the homography between the images[J]. *Journal of Anhui University: Natural Science Edition*, 2016, **40**(1): 30-32.
- [12] SONG Kechen, HU Shaopeng, WEN Xin, et al. Fast 3D shape measurement using Fourier transform profilometry without phase unwrapping[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **84**:74-81.
- [13] LI Xueming, ZHANG Zhijiang, YANG Chen. Reconstruction method for fringe projection profilometry based on light beams[J]. *Appl. Opt.*, 2016, **55**(34): 9895-9906.
- [14] XU Yuanyuan, WANG Yawei, JI Ying, et al. Three-frame generalized phase-shifting interferometry by a Euclidean matrix norm algorithm[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, **84**: 89-95.
- [15] 符红. 结构光投影三维轮廓测量系统的标定[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- FU Hong. The Calibration of Structured-light 3-D Measurement System[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [16] 喻士领. 基于光栅条纹投影的三维测量系统标定方法的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- YU Shiling. Research on Calibration Method of 3D Measurement System Based on Grating Fringe Projection[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [17] Paulo J. Tavares, Ma'rio A. Vaz. Linear calibration procedure for the phase-to-height relationship in phase measurement profilometry[J]. *Optics Communications*, 2007, **274**(2): 307-314.
- [18] 张旭, 李祥, 屠大维. 相位高度的显函数模型及其标定[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(8): 2384-2392.
- ZHANG Xu, LI Xiang, TU Dawei. Explicit phase height model and its calibration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(8): 2384-2392.
- [19] HU Q, HUANG P S. Calibration of a three-dimensional shape measurement system[J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(2): 487-493.
- [20] XIAO Yanshan, CAO Yiping, WU Yingchun. Improved algorithm for phase-to-height mapping in phase measuring profilometry[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(8): 1149-1155.
- [21] Chung Byeong-Mook, Park Yoon-Chang, Do Jin-Yeong. Phase-height relationship by plane analysis in 3D shape measurement using fringe pattern projector[J]. *Sensors Applications Symposium*, 2014: 272-277.
- [22] RAO Li, DA Feipeng, KONG Weiqi, et al. Flexible calibration method for telecentric fringe projection profilometry systems[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(2): 1222-1237.
- [23] Achraf Ben-Hamadou, Charles Soussen, Christian Daul, et al. Flexible calibration of structured-light systems projecting point patterns[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, **117**(10): 1468-1481.
- [24] GU F, ZHAO H, MA Y, et al. Camera calibration based on the back projection process[J]. *Measurement Science & Technology*, 2015, **26**(12): 0957-0233.
- [25] CHEN Rui, XU Jing, CHEN Heping, et al. Accurate calibration method for camera and projector in fringe patterns measurement system[J]. *Appl*

- Opt.*, 2016, **55**(16): 4293-4300.
- [26] WANG Zhangying, LIU Miao, YANG Shourui, et al. Precise full-field distortion rectification and evaluation method for a digital projector[J]. *Optical Review*, 2016, **23**(5): 1-7. DOI: 10.1007/s10043-016-0255-1.
- [27] ZHOU Ping, YU Yunlei, CAI Guochao, et al. Projector recalibration of three-dimensional profilometry system[J]. *Appl. Opt.*, 2016, **55**(9): 2294-2300.
- [28] Moreno D, Taubin G. Simple, Accurate, and Robust Projector-Camera Calibration[C]//Second International Conference on 3d Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission, IEEE, 2012: 464-471.
- [29] Orghidan R, Salvi J, Gordan M, et al. Structured light self-calibration with vanishing points[J]. *Machine Vision & Applications*, 2014, **25**(2): 489-500.
- [30] HUANG Jinhui, WU Qingyang. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, **52**(1): 115-122.
- [31] Cristina Portalés, Emilio Ribes-Gómez, Begona Pastor. Calibration of a camera-projector monochromatic system[J]. *The Photogrammetric Record*, 2015, **30**(149): 82-99.
- [32] HUANG Lei, Patrick S. K. Chua, A. Asundi. Least-squares calibration method for fringe projection profilometry considering camera lens distortion[J]. *Appl Opt*, 2010, **49**(9): 1539-1548.
- [33] 李勇, 苏显渝, 吴庆阳. PMP 系统中一种新的相位—高度映射算法[J]. 光电工程, 2007, **34**(2): 79-83.
- LI Yong, SU Xianyu, WU Qiongyang. New phase-height mapping algorithm in PMP system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(2): 79-83.
- [34] Vargas, Quiroga, Terrón-López. Flexible calibration procedure for fringe projection profilometry[J]. *Optical Engineering*, 2007, **46**(2): 23601 (1-6).
- [35] ZHANG Zonghua, HUANG Shujun, MENG Shasha, et al. A simple, flexible and automatic 3D calibration method for a phase calculation-based fringe projection imaging system[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(10): 12218-12227.
- [36] Leah Merner, WANG Yajun, ZHANG Song. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, **51**(5): 514-519.
- [37] I Le'andry, Breque C, Valle V. Calibration of a structured-light projection system: development to large dimension objects[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(3): 373-379.
- [38] Philip Siegmann, Luis Felipe-Sese, Francisco Diaz-Garrido. Improved 3D displacement measurements method and calibration of a combined fringe projection and 2D-DIC system[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2017, **88**: 255-264.