

三维小视场成像系统

陈超¹, 於燕琴¹, 黄淑君¹, 刘晓利², 徐静³, 张宗华¹

- (1. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130;
2. 深圳大学 教育部广东省光电子器件与系统重点实验室, 广东 深圳 518060;
3. 清华大学 机械工程系, 北京 100084)

摘要: 研究了一套投影正弦光栅条纹, 测量表面有大梯度或非连续结构等复杂形貌微小物体的三维测量系统。针对所测量物体大小, 通过将体视显微镜、相机和投影仪组合, 研制了具有较小视场的条纹投影系统。软件产生具有最佳条纹个数的三组正弦条纹图, 每组包含四个彼此间有 90° 相位移动的条纹。根据所测量物体表面颜色和纹理特性, 选择投影系统的合适颜色通道投射软件所产生的正弦条纹序列到被测物表面。相机从另一角度获取经被测表面调制的变形条纹图。通过四步相移和最佳条纹选择方法分别计算得到折叠相位图和展开相位图。利用水平精密移动台定位一水平白板到几个已知位置, 建立绝对相位和深度之间的关系, 获得系统深度方向的数据。微小物体的三维形貌测量实验证明了所研制成像系统的可行性和准确性。

关键词: 条纹投影; 三维小视场形貌测量; 相位计算; 体视显微镜

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0824002

3D small-field imaging system

Chen Chao¹, Yu Yanqin¹, Huang Shujun¹, Liu Xiaoli², Xu Jing³, Zhang Zonghua¹

- (1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A 3D small-field imaging system was established by using the fringe projection technique to measure the small objects having large slopes and/or discontinuous surface. A stereo microscope was used to generate a small-field projecting field and to capture the deformed fringe patterns on the measured small objects. Three fringe sets having the optimum fringe numbers were coded into one major color channel to generate color fringe patterns having the maximum fringe contrast of the captured fringe images. Through one channel of the stereo microscope, a Digital Light Processing (DLP) projector projected these generated color fringe pattern images onto the measured objects surface. From another

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-01-14

基金项目: 国家自然科学基金委员会与英国皇家学会合作交流项目(61311130138); 国家自然科学基金(61171048);

河北省应用基础研究计划重点基础研究项目(15961701D); 河北省高等学校高层次人才科学研究项目(GCC2014049);

深圳大学省部重点实验室开放基金(GD201401); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1232)

作者简介: 陈超(1987-), 男, 博士生, 主要从事光学检测、条纹自动分析、三维成像及造型方面的研究。Email: 504277543@qq.com

导师简介: 张宗华(1974-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学检测、三维数字成像和造型、条纹自动分析和三维生物测定等方面的研究。

Email: zhzhang@hebut.edu.cn, zhzhangtju@hotmail.com

channel, the fringe patterns were deformed with regard to the object surface and captured by a color CCD camera. The absolute phase of each pixel could be calculated from the captured fringe patterns by using the optimum three-fringe numbers selection method. The relationship between the absolute phase and depth was established to move a white plate to several known positions by using an accurate linear translating stage, so the 3D shape data of the measured objects were obtained. Experimental results on measuring 3D shape of small objects show the accuracy and availability of the developed 3D imaging system.

Key words: fringe projection; 3D small-field measurement; phase calculation; stereo microscope

0 引言

基于光学方法的三维测量技术已被广泛应用于工业检测、逆向工程、医疗以及虚拟现实等各个行业。目前,光学三维测量主要朝着两个极端的方向发展:一个是面向宏观大尺寸物体的三维形貌测量^[1],另一个是面向微观小尺寸物体的三维形貌测量^[2-3]。由于微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)^[4]器件具有微型化、多功能、高集成度和适于大批量生产等优点而被广泛应用于航空航天、信息通信、生物化学、自动控制、消费电子以及军事等多个领域,因此对其进行高精度的三维形貌检测变得非常重要,尤其是在设计、研究和开发微机械系统时需要测量其三维形状。但是待测微机械器件的尺寸均很小,可能仅为微米量级甚至亚微米量级,因此传统的接触式三维形貌测量已经不能满足需求,故需要通过非接触^[5-6]无损的光学测量方法获取其三维数据。在光学测量方法中,基于条纹投影的测量方法因其具有非接触、全场、高精度等优点而被广泛应用。

基于条纹投影技术获取物体三维形貌的方法首先将一组光栅投射到被测物体表面,使用图像获取设备从另一角度获取含有被测物体表面高度信息的变形条纹。然后,由获取的变形条纹图计算出被测物体的折叠相位和展开相位。最后,对测量系统进行标定建立相位和深度间的对应关系,最终获得被测物体的三维形貌。

针对小尺寸物体测量,国内外学术界已经提出了多种基于条纹投影的小视场测量方法。C.Quan 等人^[7]提出了一种利用投影仪和长工作距离物镜进行相位测量的方法。该方法为在投射条纹的出射端,利用一个显微物镜将条纹缩小投射出去;在采集端,显微物镜将图像放大送回相机中,很好地获得了微小

器件的三维形貌。S.Petitgrand 等人^[8]利用物体照明光以及光纤传输光,研制了一套基于傅里叶变换的测量系统,成功地获取了针尖的三维形貌。刘笑等人^[9]提出用双目立体测量的线性细分查找表获得微小物体三维数据。线性细分查找表法首先在两个相机的公共视场范围内标定好一个空间立体网格;然后把待测物体放在标定好的空间内,根据待测点在两张图像上的像素坐标确定其对应的两条空间直线;最后获得物体的三维数据信息。但线性细分查找表的测量范围固定,只能在标定好的区域内求解物点的三维信息,不能有效地获取全部图像信息。尽管学术界提出了一系列基于条纹投影技术的小视场测量方法,但是这些方法均具有某些不足。比如,由于条纹对比度较低导致测量精度不高、不能够测量大梯度非连续的物体等。

综上所述,光学式小视场三维形貌测量术有着巨大的潜力,并且在推动人类文明发展方面有着不可限量的作用,但是目前仍处于探索和研究阶段,所以进行基于条纹投影的小视场测量系统研究有着重要的意义。为此,文中研究了一种通过投影正弦光栅条纹测量表面有大梯度或非连续表面等复杂形貌微小物体的新方法。针对所测量物体大小,通过将体视显微镜、相机和投影仪进行组合,研制了基于条纹投影的三维小视场成像系统。该系统主要利用长工作距离的体视显微物镜将计算机生成的特定类型的条纹图投影到微小被测物体表面,通过相位计算和系统标定得到微小被测物体表面高精度的三维形貌数据。

1 原理

体视显微镜的内部结构示意图如图 1 所示,主要由目镜、透镜组和物镜组成。其内部有两条单独的光路且互不影响,这两条光路共用一个初级物镜,对

被测物体成像后光路中的光线会被中间的物镜分为两束,并形成一定的角度(体式角)。正是由于左右两条光路成一定的夹角,体视显微镜才能形成具有立体感的图像。如果将体视显微镜的两个光路选作所研制三维测量系统的成像和投影光路,则二者之间形成一定的夹角,满足测量系统要求的三角化测量原理要求。

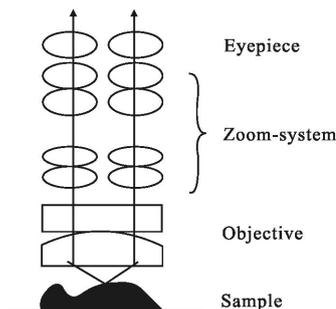


图 1 体视显微镜基本原理

Fig.1 Basic principle of stereo microscope

基于体视显微镜,文中研制出一套测量微小物体三维形貌的小视场测量系统,如图 2 所示。

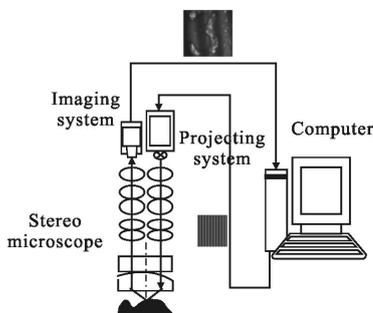


图 2 小视场三维测量系统基本组成

Fig.2 Basic layout of 3D small-field measurement system

系统主要由一个投影系统、一个采集系统、一台体视显微镜和一台计算机组成。由计算机产生的正弦条纹图经投影系统投射至体视显微镜其中的一组光学透镜(包括目镜、透镜组和与采集光路共用的初级物镜),该正弦条纹图经被测物体表面调制后变形,其中包含被测物体的高度信息,然后反射至体视显微镜的另一条光路(包括目镜、透镜组和与投影光路共用的初级物镜),最后该变形条纹图由成像系统采集并传至计算机中进行下一步的分析处理。

条纹投影法测量物体三维形貌的原理如图 3 所

示。点 P 和 E 分别为投影系统出瞳和成像系统入瞳的中心; L_0 为入瞳到参考平面的距离; L 为出瞳中心和入瞳中心之间的长度; θ 为投影光轴和成像光轴之间的夹角。

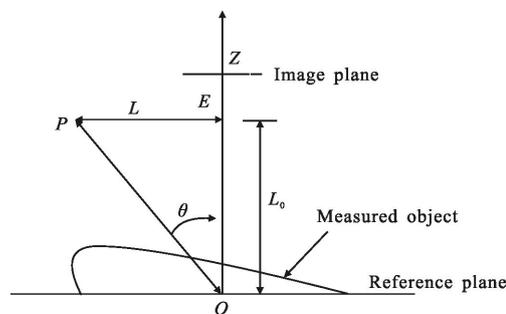


图 3 测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of measurement

在基于条纹投影的测量方法中,相移法由于其精度高、抗干扰能力强而广泛应用于三维形貌测量系统。其中四步相移法与三步相移法相比能消除高次谐波,与五步及以上相移法相比采集时间短因而被大量采用,因此文中选用四步相移法获取折叠相位。四幅彼此间有 $\pi/2$ 相位移动的条纹图的光强表达式依次为:

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\
 I_2(x, y) &= I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \\
 I_3(x, y) &= I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \\
 I_4(x, y) &= I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2]
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $I'(x, y)$ 为背景光强; $I''(x, y)$ 为条纹的对比度; $\phi(x, y)$ 为待计算的相位值,其对应所测量物体的高度信息。 $I'(x, y), I''(x, y), \phi(x, y)$ 为三个未知量。联立上式得到:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (2)$$

通过相移算法计算出的相位主值 $\phi(x, y)$ 在一个相位周期内具有唯一值。但由于在整个测量场中包含多个光栅条纹, $\phi(x, y)$ 呈锯齿状周期性分布。为了计算其所对应的高度值,必须对空间像素点的相位主值进行展开得到连续的绝对相位值。由于所测量物体表面有大梯度或表面不连续的复杂结构,文中利用最佳三条纹选择方法独立计算各个像素点的绝对相位,实现相位展开。为此,该系统选用最佳条纹个数为 56、63、64 的三组正弦条纹图^[10]。

由于成像和投影系统处于非平行轴状态,当投影系统产生均匀条纹时,投影在参考平面上变为不均匀的条纹,如图 3 所示。因为条纹左侧更接近投影系统,投影在参考平面上的条纹图在左侧有较小的条纹间距,而在右侧则产生较大间距。因此,相位和深度之间是非线性的关系且与像素位置相关,可用公式表示为^[11]:

$$z = \frac{L_0}{\frac{2\pi L_0^2 L \cos \theta}{P_0 \Delta \phi(x, y) (L_0 + x \cos \theta \sin \theta)^2} - \frac{L \cos \theta \sin \theta}{L_0 + x \cos \theta \sin \theta} + 1} \quad (3)$$

式中: $\Delta \phi$ 为参考面和被测物体表面上对应像素点之间的相位差。 P_0 为投影在垂直投影光轴的平面上条纹模式的间距。直接标定这些结构参数的过程复杂且难以实现。公式(3)可表示为^[12-13]:

$$z(x, y) = \sum_{n=0}^N a_n(x, y) \Delta \phi(x, y)^n \quad (4)$$

式中:系数 a_n, a_{n-1}, a_1, a_0 包含了系统的结构参数。求解这些系数即可建立绝对相位和深度之间的对应关系。

为了得到合适的条纹对比度,根据所测量物体表面的颜色和纹理,选用恰当的颜色通道投射所产生的正弦直条纹图。

2 实验及结果

根据所测量物体大小,研制测量场为 5 mm×5 mm 的小视场三维成像系统。该系统主要包括以下几部分:投影系统、成像系统和个人计算机,实物如图 4 所示。投影系统选用美国德州仪器公司生产的 DLP LightCrafter。该投影仪基于同一公司生产的 DLP 0.3 WVGA 芯片设计完成,其物理分辨率为 608 pixel×684 pixel。因其支持高速、可靠的空间光调制器,DLP LightCrafter 主要用于投影。体视显微镜选用上海光学精密仪器有限公司生产的型号为 SX-5 的体视显微镜。由于文中是针对小物体的测量,通常被测物体的尺寸在毫米量级。要求所投射的条纹数要尽量多,视场尽量小,因此选用了可以缩小视场的体视显微镜。该体视显微镜具有景深大、成正立像、具有较高的分辨率、工作距离长、成像清晰且具有三维立体感等优点。文中所用的成像系统是 SVS 公司生产的超紧凑工业相机,型号为 eco424 CVGE,分辨率为 640 pixel×480 pixel。选择此款相机的原因是它具有很高的传输速率和极高的信噪比以及机械形状

精致灵巧、便于安装等特点。相机内部的处理模块支持外触发模式和内触发模式。

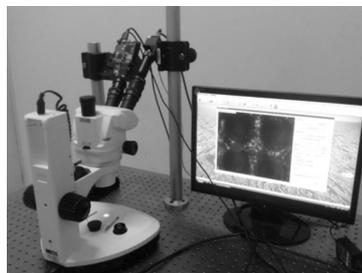


图 4 硬件系统实物图

Fig.4 Actual photo of the hardware system

测量过程中,首先由软件产生满足最佳三条纹个数为 56、63、64 的三组正弦条纹图,每组中的四幅条纹图相位差为 90°。根据所测量物体表面的颜色和纹理选择绿颜色通道,通过投影系统将产生的条纹图依次投射到被测物体的表面。相机从另一个角度采集经被物体表面调制的变形条纹图并存入计算机进行后续处理。通过减少投影到被测物体表面条纹图的光强以避免所采集的变形条纹图过度饱和,该系统中通过在投影仪和体视显微镜之间加入滤光片来降低光强。

通过软件调节来实现物体的三维形貌测量。首先依据背景光强和系统需求设置相机的各项技术参数。然后调节投影仪相关参数,比如投射的条纹数量、背景光强以及调制度等参数,选择参数的原则是使得条纹的对比度越大越好。最后通过查看展开相位图是否平滑、连续来验证参数调节是否合理。利用水平精密移动台定位一水平白板到几个已知位置,建立绝对相位和深度之间的关系,完成测量系统在深度方向的标定。

为了验证所研制小视场三维成像系统的测量精度,利用四个已知位置对标定的系统进行定量评价。具体的实施方法是:(1) 将一块白色平板固定在精度为 1 μm 的竖直移动台上,控制白色平板精确定位四个已知位置作为真实值,如表 1 第二列所示;(2) 在每个位置,通过 LightCrafter 投影 12 幅具有最佳条纹选择个数的条纹图到白色平板表面,CCD 相机从另一个角度采集平板表面的变形条纹图;(3) 计算每个位置处平板上所有像素点的展开相位,利用标定的参数得到每个像素点的深度值。由于在四个位置

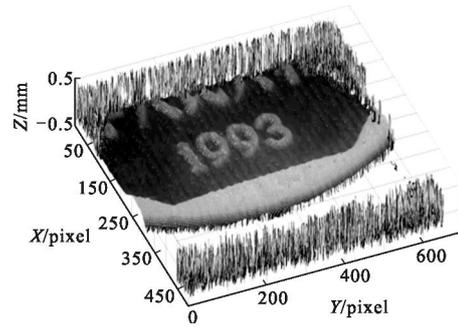
时平板上各点有相同的移动距离,计算每个位置处所有点的平均值作为该位置的测量值,结果如表 1 第三列所示。从表中可以看出,最大误差为 0.013 mm,说明该系统可以精确得到微小物体的三维形貌数据。

表 1 四个验证位置深度数据评价表(单位:mm)

Tab.1 Depth data evaluation table of four validation location(Unit:mm)

Position	Actual value	Measured value	Absolute error
1	0.750	0.738	0.011
2	0.300	0.290	0.009
3	-0.300	-0.291	0.008
4	-0.750	-0.750	0.013

利用所研制的三维小视场测量系统,对具有大梯度以及不连续表面的小物体三维形貌进行了实际的测量实验。其中一个测量物是 1 角硬币上的年份,另外一个 BGA(Ball Grid Array,球栅阵列封装)芯片表面上的微小焊点形貌特征,分别如图 5 和图 6



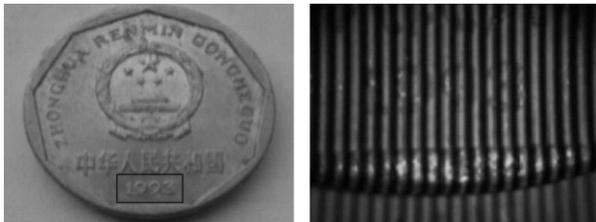
(e) 所测量数据的三维显示图

(e) 3D display picture of the measured data

图 5 硬币实验结果图

Fig.5 Experimental results of a Chinese coin

所示。通过比较红、绿、蓝三颜色通道中条纹剖面图,发现绿色通道中的条纹给出最好的条纹对比度。所以在后续的测量中,通过投射绿色条纹测量这两个物体表面的三维特征。图 5(a)和 6(a)为被测物体的实物图,图中矩形区域表示测量范围。图 5(b)和图 6(b)为 CCD 相机获取的投射到被测物体表面上的条纹图。利用所研究的方法对采集的条纹图进行处理,得到图 5(c)和图 6(c)所示的折叠相位图,将折叠相位图展开得到图 5(d)和图 6(d)所示的展开相位图。利用所标定相位和深度间的关系,最终得到物体的三维形貌图,如图 5(e)和图 6(e)所示。

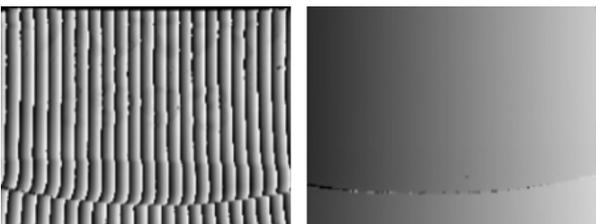


(a) 硬币实物图(黑色区域标识所测量的范围)

(b) 投射到被测物体上的变形条纹图

(a) Photo of the coin (the measured region is marked by a black rectangle)

(b) Deformed fringe patterns projected on the measured object

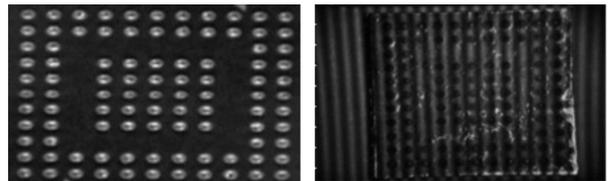


(c) 折叠相位图

(d) 展开相位图

(c) Wrapped phase map

(d) Unwrapped phase map

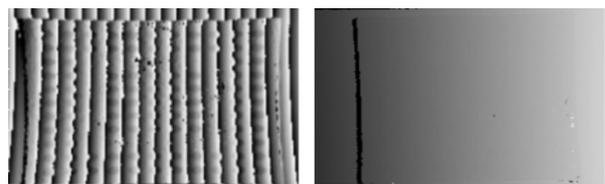


(a) BGA 实物图

(b) 投射到被测物体上的变形条纹图

(a) Photo of the BGA

(b) Deformed fringe patterns projected on the measured object

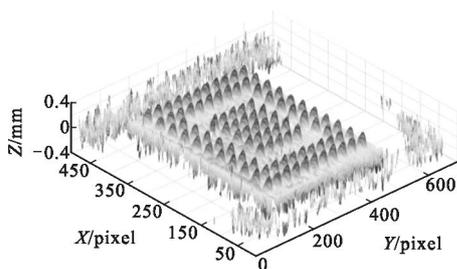


(c) 折叠相位图

(d) 展开相位图

(c) Wrapped phase map

(d) Unwrapped phase map



(e) 所测量数据的三维显示图

(e) 3D representation display of the measured data

图 6 BGA 实验结果图

Fig.6 Experimental results of a BGA

3 结论

基于条纹投影技术研制了视场大小为 5 mm×5 mm 的三维测量系统,用以获取微小物体的三维形貌数据。根据所测量物体表面颜色和纹理特性,选择适当的颜色通道投影具有最佳条纹个数的三组正弦直条纹,实现对具有大梯度、非连续表面等复杂形状微小物体的高精度三维测量。利用所研发的三维小视场成像系统测量了硬币上的年份和 BGA 上的焊点等微小特征,实验结果证明了所研制的三维成像系统能够精确获取微小物体的三维形貌数据。

参考文献:

[1] Zhou Na, An Zhiyong, Li Yonghao. Large-sized three-dimensional profile measurement technology based on laser radar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(20): 2465–2468. (in Chinese)
周娜, 安志永, 李咏豪. 采用激光雷达的大尺寸三维形貌测量技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(20): 2465–2468.

[2] Hu Hao, Liang Jin, Tang Zhengzong, et al. Calibration of stereo microscope measurement systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 1985–1994. (in Chinese)
胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 1985–1994.

[3] Yin Yanhe, Qiao Yanfeng, Cai Sheng, et al. Application of cylindrical lenses in small angle measurement [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 832–839. (in Chinese)
殷延鹤, 乔彦峰, 蔡盛, 等. 柱透镜组在小角度测量中的应用[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 832–839.

[4] Ming Anjie, Tan Zhenxin, Wu Jian, et al. Automatic testing

system for multi-channel MEMS accelerometers based on virtual instrument technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1955–1959. (in Chinese)
明安杰, 谭振新, 吴健, 等. 基于虚拟仪器的多通道 MEMS 加速度计自动化测试系统 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1955–1959.

[5] Wang Yang, Yan Changxiang, Hu Chunhui, et al. Non-contact rotation angle measurement system for scanning mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 850–855. (in Chinese)
王洋, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 非接触式扫描反射镜转角测量系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 850–855.

[6] An Dong, Chen Li, Ding Yifei, et al. Optical system model and calibration of grating projection phase method [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 248–254. (in Chinese)
安东, 陈李, 丁一飞, 等. 光栅投影相位法系统模型及标定方法[J]. 中国光学, 2015, 8(2): 248–254.

[7] Quan C, He X Y, Wang C F, et al. Shape measurement of small objects using LCD fringe projection with phase shifting [J]. *Optics Communications*, 2001, 189(9): 21–29.

[8] Petitgrand S. 3D measurement of micromechanical devices vibration mode shapes with a stroboscopic interferometry microscope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, 36: 77–101.

[9] Liu Xiao, Zhong Sidong, Sui Libin, et al. The research of 3D stereo measurement methods in small field[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2005, 26(2): 132–136. (in Chinese)
刘笑, 仲思东, 隋莉斌, 等. 小视场环境下三维立体测量技术[J]. 工程图学学报, 2005, 26(2): 132–136.

[10] Zhang Z H, Towers C E, Towers D P. Time efficient color fringe projection system for 3-D shape and color using optimum 3-frequency interferometry [J]. *Optics Express*, 2006, 14(14): 6444–6455.

[11] Zhang Z H, Zhang D P, Peng X, et al. Performance analysis of a 3-D full-field sensor based on fringe projection [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 42(3): 341–353.

[12] Zhang Z H, Huang S J, Meng S S, 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.

[13] Zhang Z H, Ma H Y, Guo T, et al. Simple, flexible calibration of phase calculation-based three-dimensional imaging system[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1257–1259.