

一种快速获取物体三维形貌和纹理信息的算法

孙士杰¹ 翟爱平¹ 曹益平²

¹太原理工大学物理与光电工程学院(含测控研究所), 山西 太原 030024

²四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064

摘要 提出了一种新的快速获取物体三维形貌和纹理信息的方法。利用数字投影仪将2幅彩色编码的正弦相移光栅图投影到被测物体表面,彩色相机捕捉经物体调制后的变形条纹图。提取RGB三基色,可获得包含物体高度信息及纹理信息的条纹图和背景光。对包含物体高度信息的条纹图用改进的2+1相移算法重构物体的三维形貌。物体纹理信息则通过对背景光进行彩色编码获得,利用纹理映射技术恢复物体纹理。计算机模拟和实验结果验证了该方法的有效性和可行性。

关键词 测量; 图像处理; 2+1相移算法; 纹理映射技术; 相位轮廓术; 纹理信息

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0312001

A Fast Algorithm for Obtaining 3D Shape and Texture Information of Objects

Sun Shijie¹ Zhai Aiping¹ Cao Yiping²

¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology (Including Institute of Measurement and Control), Taiyuan, Shanxi 030024, China

²Department of Opto-Electronic Science & Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract A new method for obtaining 3D shape and texture information of objects is proposed. A digital projector is used to project the two encoding color phase-shifted grating projection onto the object surface. Extracting R, G, B three primary colors, fringe patterns and background light containing object height and texture information are obtained. The three-dimensional morphology of the object is reconstructed by using the improved 2+1 phase-shift algorithm for fringe patterns containing the object height information. Object texture information is obtained by colour coding using the background light. Texture mapping technique is used to restore the texture of the object. Computer simulation and experimental results show the validity and feasibility of the proposed method.

Key words measurement; image processing; 2+1 phase-shift algorithm; texture mapping technique; phase profile; texture information

OCIS codes 120.6085; 100.2960; 100.3010; 200.3050; 200.4560; 200.4740

1 引言

近年来,三维测量技术被广泛应用在工业测量、文物数字化保护、自然灾害调查、城乡规划等诸多领域。由于具有非接触、测量速度快、精度高等特点,基于光学投影的三维测量技术成为目前研究的热点^[1-3]。这方面的方法主要有傅里叶变换轮廓术(FTP)^[4]、相位测量轮廓术(PMP)^[5-9]和激光扫描术(LS)等。FTP只需对1帧变形条纹做正反傅里叶变换即可获得被测物体的三维形貌,测量速度快,但由于在滤波过程中忽略了高频成分,所以测量精度相对较低。PMP中,由于采用了点对点的测量技术,其精度要比FTP高得多,且对比一维或二维的激光扫描,测量装置相对简单。但传统的PMP至少需要采集3帧具有一定相移的条纹图,这就

收稿日期: 2015-09-14; 收到修改稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(11404237)、山西省青年基金(2013021016-4)

作者简介: 孙士杰(1988-),男,硕士研究生,主要从事光信息处理方面的研究。E-mail: 1291648518@qq.com

导师简介: 翟爱平(1982-),女,博士,讲师,主要从事光学三维传感、光信息处理等方面的研究。

E-mail: aipz@foxmail.com(通信联系人)

增加了测量的时间,限制了PMP在实时测量和动态测量方面的应用^[10]。

本文提出一种新的快速获取物体三维形貌和纹理信息的相位轮廓术,将彩色编码的复合相移光栅替代传统的相移光栅对物体进行投影。2幅编码的彩色图,其中一幅的R通道对应1帧正弦条纹,其余2个通道分别是绿色和蓝色背景光;另外一幅的B通道对应1帧正弦条纹,其余2个通道分别是红色和绿色背景光,且R通道正弦条纹与B通道正弦条纹之间的相移为 $\pi/2$ 。利用彩色CCD来获取经物体调制的变形条纹图,对变形条纹图进行RGB三基色提取,获得包含物体高度信息及纹理信息的6幅图,其中2幅图为变形光栅图,另外4幅图为背景光。对提取的2帧变形条纹图和对应的2帧背景光,利用改进的2+1相移算法重构物体的三维形貌。另外,选取3幅包含物体纹理信息的背景光通过彩色编码来恢复物体的纹理^[11-16]。

本文方法测量时只需对物体进行2次投影,所以测量实时性要高于传统的相位测量轮廓术。此外,目前许多方法只注重三维面型重建,却忽略了物体本身的纹理信息,这在文物修复、3D虚拟场景及三维高保真建模等方面是不完善的。因此,通过建立二维平面与三维空间的一一对应关系,使用彩色编码获取物体纹理信息,对重构的三维曲面进行一对一的纹理映射,进而恢复物体的纹理。

2 基本原理

2.1 相位测量轮廓技术原理

相位测量轮廓术是将 N 帧具有一定相移量的条纹图投影到被测三维物体表面,受到物体高度的调制,投影条纹的振幅和相位发生变化,形成了 N 幅包含物体高度信息的变形条纹图。再通过反正切、相位展开以及高度映射等一系列运算对变形条纹图进行处理,重构物体的三维形貌^[13,12-13]。条纹投影三维测量系统结构示意图如图1所示。

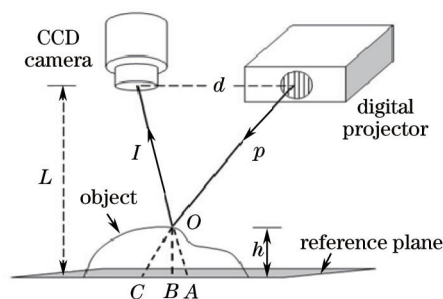


图1 条纹投影三维测量系统结构示意图

Fig.1 Structure sketch map of three-dimensional measurement system with fringe projection

传统2+1相移算法^[17]是用1帧均匀光强的背景光替代三步相移法中的其中1幅正弦条纹图,另外2幅正弦条纹图的相位差为 $\pi/2$ 。改进的方法是通过改变编码的方式来获取包含物体高度信息的正弦条纹图。由于环境光强对物体三维信息恢复会产生误差影响,本文采用对应的背景光强进行补偿,有效减少了环境光对物体三维信息恢复的影响。改进的2+1相移算法表示如下:

$$I_{1r}(x,y) = A_r(x,y) + B_r(x,y)\sin\varphi, \quad (1)$$

$$I_{1g}(x,y) = A_g(x,y), \quad (2)$$

$$I_{1b}(x,y) = A_b(x,y), \quad (3)$$

$$I_{2r}(x,y) = A_r(x,y), \quad (4)$$

$$I_{2g}(x,y) = A_g(x,y), \quad (5)$$

$$I_{2b}(x,y) = A_b(x,y) + B_b(x,y)\cos\varphi. \quad (6)$$

编码方式遵循这样的原则:(1)~(3)式为一组,(4)~(6)式为一组,分别编码形成2幅彩色复合光栅;对编码的光栅进行投影、CCD采集、RGB三基色提取,获得包含物体高度信息和纹理信息的条纹图和背景光,由(1)、(3)、(4)、(6)式可得到物体的相位

$$\varphi = \arctan \frac{(I_{1r} - I_{2r})B_b}{(I_{2b} - I_{1b})B_r}. \quad (7)$$

然后根据相位-高度映射关系,可获得物体的高度数据信息^[18]。 B_b/B_r 是一个比例系数,不同相机因制造工艺不同其值可能不同,但同一个相机的 B_b/B_r 为固定值。通过将(6)式中的 $\cos \varphi$ 换算成 $\sin \varphi$,再结合(1)、(3)、(4)式可得:

$$\frac{B_b}{B_r} = \frac{I_{2b} - I_{1b}}{I_{1r} - I_{2r}}, \quad (8)$$

由(3)~(5)式得到物体纹理信息:

$$I(x, y) = I_{2r}(x, y) + I_{2g}(x, y) + I_{1b}(x, y). \quad (9)$$

2.2 纹理映射原理

纹理映射是指将纹理空间中的纹理像素映射到屏幕空间中的像素的过程。纹理像素的生成过程实质上是所定义的纹理映射为反映某种三维物体表面的属性。纹理映射的实现是通过建立纹理空间与景物空间及景物空间与屏幕空间之间的映射关系,交互确定纹理属性。三维空间映射关系如图2所示。

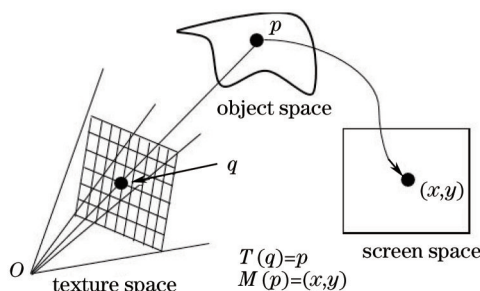


图2 空间映射关系

Fig.2 Spatial mapping relationship

3 2+1 相位轮廓术的计算机模拟

利用计算机模拟验证所提出的改进算法在恢复物体三维形貌方面的可行性,用计算机模拟获得调制光栅周期为 16 pixel 的正弦分布彩色条纹图^[19]。通过对彩色条纹图进行 Peaks 函数调制,可得到相应的变形条纹图,如图3(a)所示。图3(b)~(d)是对图3(a)进行 RGB 三基色提取后获得的部分正弦条纹图和背景光。图4与图5分别为利用改进的 2+1 相移算法恢复出的 Peaks 面重构图和 Peaks 面恢复误差,恢复后的形貌使用本文改进算法,因此不受环境光照等影响,使得恢复的形貌与原 peaks 面均方差为 3.8664×10^{-11} mm,偏差非常小,可以忽略不计。

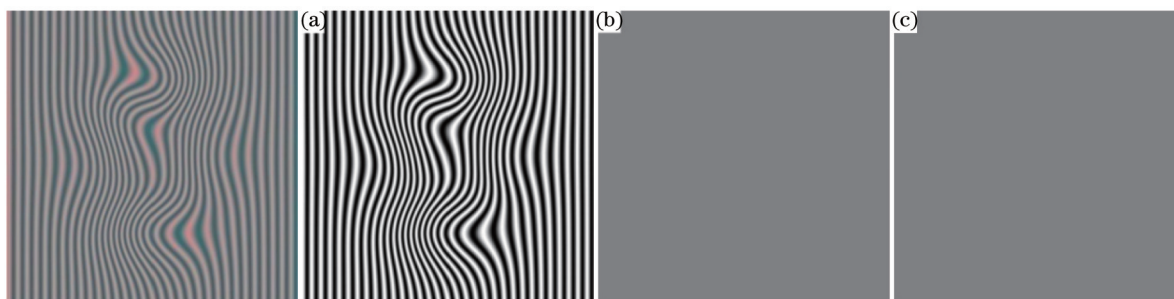


图3 (a) Peaks 函数调制后的变形条纹图; (b) R 基色提取后的正弦条纹图; (c) G 基色提取后的背景光; (d) B 基色提取后的背景光

Fig.3 (a) Deformed fringe pattern modulated by Peaks function; (b) sine fringe pattern extracted by R color; (c) background light pattern extracted by G color; (d) background light pattern extracted by B color

4 实验结果与分析

4.1 基于彩色相移光栅投影的三维重构实验

利用数字光投影仪分别将 2 幅彩色编码的相移光栅投影到三维物体表面,受到物体高度调制的变形条纹图由彩色 CCD 采集。图 6(a)为对 R 通道编码并受物体高度调制的变形条纹图,对其进行 RGB 三基色提取,

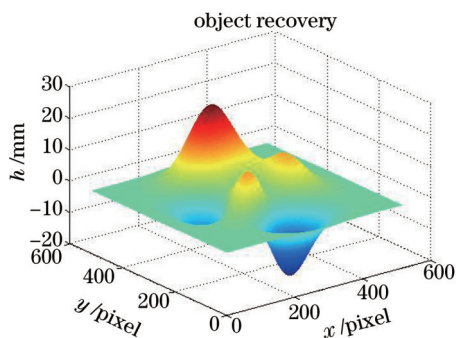


图4 Peaks面重构图

Fig.4 Reconstructed graph of Peaks surface

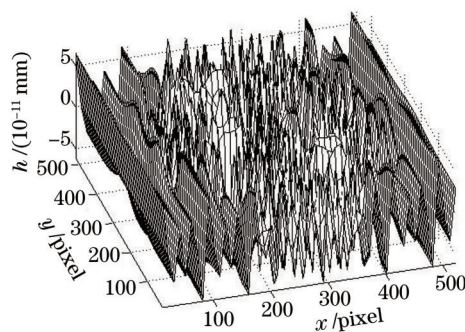


图5 Peaks面恢复误差

Fig.5 Recovery error of Peaks surface

得到2幅正弦变形条纹图和4幅背景光,对其中2幅正弦变形光栅图进行彩色补偿,即对应的(1)式和(6)式,经(4)式对(1)式、(3)式对(6)式补偿。(1)式接受(4)式补偿后的效果如图6(d)所示,可以看到利用改进2+1算法对提取的变形条纹进行补偿,获得的变形条纹对环境光的敏感度明显降低,几乎不受环境光影响。因此,该方法能够很好地恢复出物体的三维高度信息,提高物体三维信息恢复的精度。图7为利用改进算法重构的物体三维形貌。

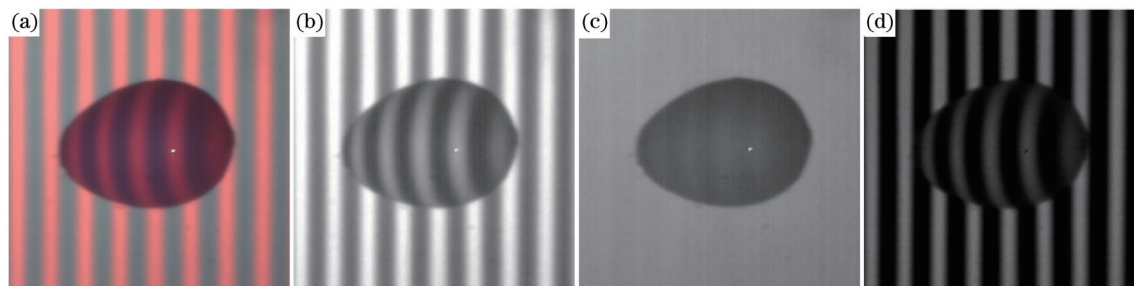


图6 (a) R通道编码且经物体高度调制的变形条纹图; (b) R基色提取后的正弦条纹图;
(c) R基色提取后的背景光; (d) 补偿后的条纹图

Fig.6 (a) Deformed fringe pattern modulated by height and coded by R channel; (b) sine fringe pattern extracted by R color;
(c) background light pattern extracted by R color; (d) fringe pattern after compensation

众所周知,光学三维传感中,五步满周期相移算法具有相对较高的测量精度。所以,将本文算法获得物体面型数据与传统的五步相移算法作比较。图8是传统的五步相移法恢复的物体形貌与改进算法恢复的物体形貌的均方差图,其值为0.0668 mm。因此,本文算法对三维物体面型的恢复具有较高的测量精度。

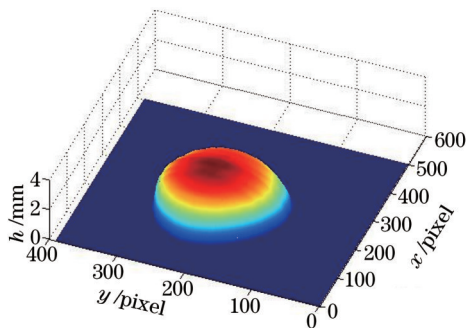


图7 物体三维重构图

Fig.7 Three-dimensional reconstruction graph of object

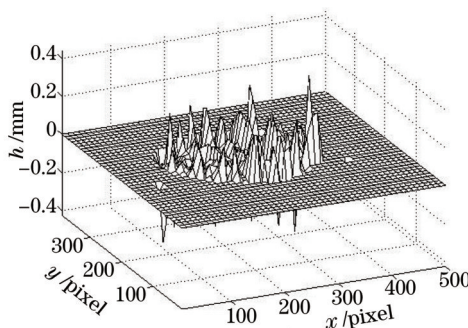


图8 恢复误差

Fig.8 Recovery error

4.2 物体纹理信息获取与纹理映射

物体纹理信息获取方法是,利用纹理映射技术建立二维平面与三维空间的一一对应关系,以包含物体纹理信息的二维平面图形作为物体纹理信息,将其映射到重建后的三维曲面上,从而获得具有纹理信息的

三维物体。对彩色相机捕捉得到的2幅彩色编码投影图进行RGB三基色提取,获得了包含物体纹理信息的3幅背景光,如图9所示。通过对3幅背景光进行二次编码,获得物体纹理信息,如图10所示。

大多数的彩色 CCD 和投影设备为了避免盲区的出现而将红、绿、蓝颜色通道设计成相互重叠。基色重叠造成了恢复的物体纹理信息受到之前对通道进行正弦编码的影响,出现了恢复的纹理包含条纹信息^[20]。实验中因彩色 CCD 三基色重叠而使得提取的背景光受编码的影响,(9)式中用 $I_{1g}(x,y)$ 恢复的纹理和用 $I_{2g}(x,y)$ 恢复的纹理与1幅没有编码的图像获取的纹理分别作对比分析,发现 $I_{1g}(x,y)$ 受编码的影响较大,只能恢复物体 76.62% 的纹理信息,而 $I_{2g}(x,y)$ 可以恢复物体 87.63% 的纹理信息,故用 $I_{2g}(x,y)$ 替换 $I_{1g}(x,y)$ 来减少背景光中包含的正弦成分,从而提高纹理恢复的精度。如果设备不存在三基色重叠现象,则提取的背景光就不包含正弦成分,从而能够获取物体全部的纹理信息。图11为包含纹理信息的三维物体重构图。

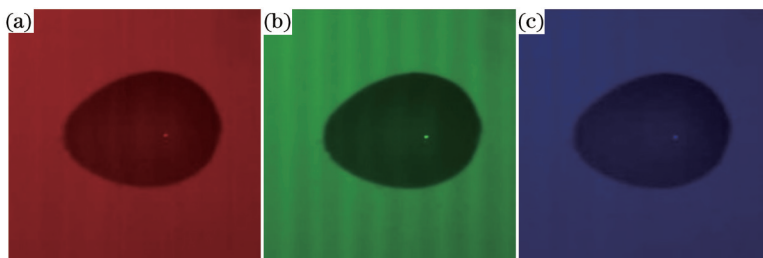


图9 编码图提取基色获得的背景光图。(a)提取R基色;(b)提取G基色;(c)提取B基色

Fig.9 Background light color map obtained encoding map extraction. (a) R color extraction; (b) G color extraction; (c) B color extraction



图10 由图9恢复出的物体纹理图

Fig.10 Object texture restored from Fig.9

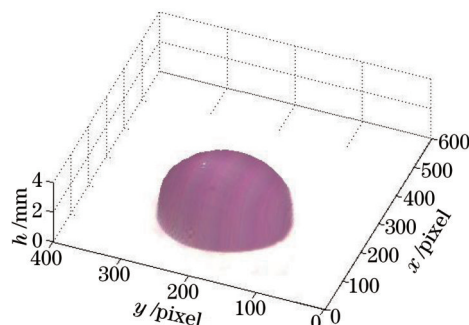


图11 包含纹理信息的三维重构图

Fig.11 Three-dimensional reconstruction graph that contains texture information

5 结 论

传统相位轮廓术三维重构方法需要的测量时间长、实验相对复杂,而且一般都忽略了对物体纹理信息的获取。为此提出了基于相位测量轮廓术的快速获取物体三维形貌和纹理信息的方法,将2帧彩色复合光栅投影到被测三维物体上,利用彩色 CCD 获取变形条纹图,再对变形条纹图进行三基色提取,最后利用该算法来获取物体三维形貌和纹理信息。计算机仿真与实验结果表明,该方法不但缩短了三维重建的时间,且获取了物体的纹理信息。但由于投影和采集设备存在三基色重叠现象,导致恢复物体的纹理出现了条纹。所以,可以通过改进投影和采集设备等方法来减少通道重叠对纹理信息获取所带来的影响。

参 考 文 献

- 1 Wang Huanhuan, Yang Ling, Liu Bo, *et al.*. Application of digital image processing technology in 3D topography measurement[J]. Information Technology, 2007, 31(2): 40-42.
王缓缓, 杨 玲, 刘 泊, 等. 数字图像处理在三维轮廓形貌测量中的应用[J]. 信息技术, 2007, 31(2): 40-42.
- 2 Wang Jun, Bao Haiming, Wei Zhonghui, *et al.*. Optical 3D information measurement technology[J]. Ome Information, 2005, (2): 32-36.
王 军, 鲍海明, 魏仲慧, 等. 光学三维轮廓测量技术综述[J]. 光机电信息, 2005, (2): 32-36.

- 3 An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512004.
安冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512004.
- 4 Yue Huimin, Su Xianyu, Li Zeren. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 767-771.
岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2005, 25(6): 767-771.
- 5 Dai Meiling, Yang Fujun, Dai Xiangjun, *et al.*. Anequi-phase coordinate calibration method based on two reference planes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512006.
戴美玲, 杨福俊, 代祥俊, 等. 一种基于双参考平面的等相位坐标标定方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512006.
- 6 Liu Yufeng, Cao Yiping, He Yuhang. An improved algorithm to three-unequal step length for PMP[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(1): 83-86.
刘玉凤, 曹益平, 何宇航. 新改进型三步非等步相位测量轮廓术算法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(1): 83-86.
- 7 V Srinivasan, H C Liu, M Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3D diffuse objects[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- 8 Zhao Wenchuan, Su Xianyu. Analysis of nonlinearity errors in phase measuring profilometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(10): 1560-1564.
赵文川, 苏显渝. 相位测量轮廓术(PMP)中光场非线性误差分析[J]. *光子学报*, 2006, 35(10): 1560-1564.
- 9 Cui Shilin. Study on the Techniques for Phase Retrieval in Fringe Projection Profilometry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013: 26-56.
崔世林. 投影测量相位提取技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 26-56.
- 10 He Yuhang, Cao Yiping, Zhai Aiping. A 3D measurement method with orthogonal composite light based on fringe contrast and background calibration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3191-3196.
何宇航, 曹益平, 翟爱平. 基于条纹对比度和背景光校准的正交复合光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3191-3196.
- 11 Li Yong, Su Xianyu. Can get the color texture of PMP 3D measurement system[J]. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2006, 29(1): 37-41.
李勇, 苏显渝. 可获取彩色纹理的PMP三维测量系统[J]. *浙江师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 29(1): 37-41.
- 12 Wang Zhaohui. The Research of 3D Shape and Texture Acquisition Technology of Palmprint and Hand[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013: 11-54.
王召慧. 掌纹和手形三维形貌及纹理获取技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013: 11-54.
- 13 Wang Wenyun. Study on 3D Profile Measurement Methods Based on RGB Color Model[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2009: 37-66.
王文韞. 基于RGB彩色模型的三维轮廓测量方法研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2009: 37-66.
- 14 Cui Yanjun, Zhang Wenfeng, Li Jianxin, *et al.*. A method of Gamma correction in fringe projection measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112002.
崔艳军, 张文峰, 李建欣, 等. 条纹投影三维测量的Gamma畸变校正方法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112002.
- 15 Hu Luyao, Da Feipeng, Wang Luyang. A novel color fringe projection method for 3D measurement of colorful objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0212002.
胡路遥, 达飞鹏, 王露阳. 一种针对彩色物体的光栅投影三维测量方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0212002.
- 16 Che Jianqiang, Dai Ning, Cui Haihua, *et al.*. A novel encoding method for binocular three-dimensional measurement of color objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1115001.
车建强, 戴宁, 崔海华, 等. 面向彩色物体的双目三维测量编码新方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1115001.
- 17 S Zhang, S T Yau. High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. *Opt Eng*, 2007, 46(11): 113603.
- 18 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping, *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 272-277.
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.
- 19 Nie Zhihong. Analysis and Study on Computer Simulation for 3D Shape Phase Measurement and its Spectrum Properties[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007: 10-27.
聂志红. 三维轮廓相位测量的计算机模拟及频谱特性分析研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007: 10-27.
- 20 P S Huang, Q Hu, F Jin. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring[J]. *Opt Eng*, 1999, 38(6): 1065-1071.