

文章编号 1004-924X(2013)01-0007-06

基于双频彩色光栅投影测量不连续物体三维形貌

戴美玲, 杨福俊*, 何小元

(东南大学 江苏省工程力学分析重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要:为减少多频条纹相移法进行三维形貌测量时的投影条纹数量,提高测量速度,提出了采用双频四步相移彩色条纹投影技术来准确测量具有台阶状不连续或孤立物体表面三维形貌的方法。利用计算机将高低两种不同频率的正弦条纹分别输入彩色图像的红色和蓝色通道合成为彩色条纹,由数字视频投影仪将四步相移彩色条纹投影到被测物体,然后利用彩色 CCD 或 CMOS 相机采集 4 幅彩色条纹图并存储于计算机中。基于色彩分离技术得到 8 幅两种不同频率的四步相移条纹图并由图像灰度算法获得 1 幅反映背景的灰度图像;由低频条纹确定台阶状的物体边缘,高频条纹计算物体的形貌,并通过背景图像的二值化定位阴影和不连续区域。提出的方法仅用 4 幅彩色图像完成了台阶状不连续或孤立物体三维形貌的准确测量。与现有的多频 4 步相移条纹投影形貌测量技术需要 8~12 幅图像相比,该方法有效地减少了条纹投影与图像采集的数量。

关键词:三维形貌测量;彩色双频条纹投影;相位解包裹;台阶状不连续物体

中图分类号:TB92;O436.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0007

Three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities by dual-frequency color fringe projection

DAI Mei-ling, YANG Fu-jun*, HE Xiao-yuan

(*Jiangsu Key Laboratory of Engineering Mechanics, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yang-fj@seu.edu.cn*

Abstract: To reduce the projection fringes in three dimensional profile measurement by traditional phase shift method and to improve the measuring speed, a dual-frequency and 4-step phase-shifting color fringe profilometry is proposed to measure the 3-D shapes of objects with step-jumps and discontinuous shapes. Dual-frequency color fringe patterns with 4-steps phase-shifting are generated by computer encoding with four low-frequency and high-frequency sinusoidal fringe patterns. These color fringe patterns are projected onto the tested objects by a digital video projector, and the deformed fringe patterns are captured by a color CCD/CMOS camera and stored into a computer. Then, the recorded fringe patterns are separated into their RGB components and become 8 frames of fringe patterns. One image related to the background is also obtained by the sum of four dual-frequency color fringe patterns. The shapes of tested objects are acquired from high-frequency fringe patterns, and the ambiguous phase jumps caused by steps are eliminated by using low-frequency fringe patterns. To determine the shadow and dark background, the image related to the background is binarized and used

收稿日期:2012-05-02;修订日期:2012-07-03.

基金项目:江苏省高校优势学科建设工程资助项目;国家自然科学基金资助项目(No. 10972054,10972055)

for correcting the phase extraction. The experimental results verify that the proposed method can measure exactly the step-jumps and discontinuous shapes with only four images. Compared with existing methods, the presented method can effectively reduce the quantity of information of fringe projection and image acquisition.

Key words: 3D shape measurement; dual-frequency color fringe projection; phase unwrapping; object surface with steps or discontinuities

1 引言

光栅投影轮廓术被广泛应用于三维形貌测量,其原理是利用正弦条纹受物体高度调制引起的条纹相位变化,通过解调正弦条纹的相位获得物体的高度信息。相位求解方法主要包括相移法和傅里叶法^[1-12]。相移法需要投影多幅相移条纹图,是一种时间轴上的逐点运算,具有计算量少,灵敏度高,抗噪能力强等特点,是正弦光栅投影术中最可靠的一种方法;而傅里叶方法虽只需要一幅条纹图来求解相位,但是计算量大,对于投影条纹的质量要求比较苛刻,而且基频分量的提取须经过人工的反复试错滤波。因此,在不考虑测量速度或实时测量的情况下,相移法一直是优先考虑的相位求解法。

由于大部分基于相位测量的三维轮廓术都运用反正切算法,得到的相位分布被截断在其主值范围内,所以需要运用解包裹算法获得连续的相位分布。相位解包裹一直是条纹分析中的研究难题,一般分为空域解包裹法和时域解包裹法^[4-12]。传统的空域相位解包裹法中,每一个像素点的求解都依赖于邻域点;所以对于表面不连续或高度变化比较剧烈的物体来说,相邻点的相位差如果超过 2π ,就会由于阴影导致条纹缺级而不能得到正确的连续相位。而双(或多)频时域解包裹算法通过低频条纹相位确定高频条纹的级次,条纹相位解包裹时无需考虑临近像素点的相位,因此可用于不连续陡峭物体测量时的相位解包裹。但多频时域解包裹算法须投影并采集多幅条纹图,如果采用高、中、低三频相移正弦条纹投影,对于 4 步相移技术来说需要投影和采集 12 幅图像^[3],这会影响测量的效率与速度。

文献[11-12]提出的双频相位轮廓术提高了测量效率,但是由于采用单一条纹图(即一幅条纹

图只有 1 个条纹)作为低频条纹图的分辨率太低,必然影响测量精度,特别是对于物体本身表面起伏剧烈尤其是多台阶状面型的物体来说,条纹也会出现断裂不连续的情况,导致相位的不正常跳跃从而引起误差;所以,适当提高低频条纹的频率有利于降低测量误差。另一方面,对于存在阴影的物体来说,这种方法仍会产生误差和毛刺,因此作者提出通过背景二值化处理定位阴影和表面不连续处的方法^[13],并得到了理想的相位结果。

为了提高测量的精度和效率,本文结合以上两种方法的优势,即利用双频技术解决物体本身高度变化引起的不连续;背景二值化处理解决阴影和大的不连续,提出了一种彩色双频四步相移法。该方法将优化选择好的低频和高频四步相移条纹分别输入红色和蓝色通道,考虑到彩色相机三色之间的“串音”而将绿色分量设为 0,合成的 4 幅彩色条纹图由数字液晶投影仪投到物体表面。然后,利用分离后的两组四步相移图分别得到两幅截断相位图,对低频截断相位进行解包裹得到连续的参考相位从而辅助高频相位解相,最后由背景二值化处理定位阴影和不连续处,从而实现台阶状不连续多个孤立物体的三维形貌测量。

2 测量原理

2.1 四步相移算法求解截断相位原理

相移算法是一种时间轴上的逐点运算,精度高、抗干扰能力强、计算速度快,被认为是光栅投影轮廓术中最可靠的、也是应用最广泛的一种方法。目前,相移算法主要有等间距 N 步相移法和任意步长相移算法。本研究采用等间距相移法计算光栅图像的相位主值,即投影光栅每次沿垂直于条纹的方向移动其周期的 $1/N$,相应的条纹图的相位被移动 $2\pi/N$,产生一个新的条纹强度分布图,CCD 采集获得 N 幅变形条纹图。考虑

到数字投影仪的 Gama 问题,并结合模拟计算及实际测量结果可知,四步相移技术的测量误差最小,因此,本文采用四步相移技术进行截断相位的计算,4步相移量分别为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$, 对应的单频条纹强度分布表达式为:

$$I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \sin[\varphi(x, y)], \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \sin[\varphi(x, y) + \pi/2], \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \sin[\varphi(x, y) + \pi], \quad (3)$$

$$I_4(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \sin[\varphi(x, y) + 3\pi/2], \quad (4)$$

$$\varphi(x, y) = 2\pi fx + \phi(x, y), \quad (5)$$

式(1)~(4)中: $a(x, y)$ 为背景, $b(x, y)$ 与被测物面反射率有关, $\varphi(x, y)$ 为被截断在 $(-\pi, \pi]$ 的相

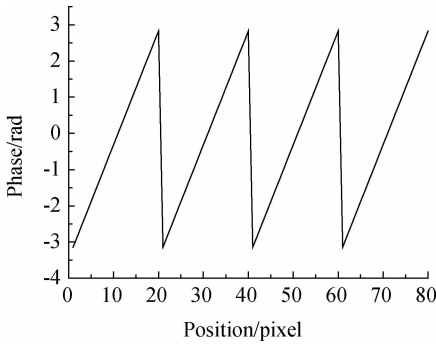
位主值。式(5)中: f 为投影条纹的空间频率, $\phi(x, y)$ 与物体表面高度信息有关。截断相位和背景灰度分别由式(6)、(7)获得:

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{I_2(x, y) - I_4(x, y)}, \quad (6)$$

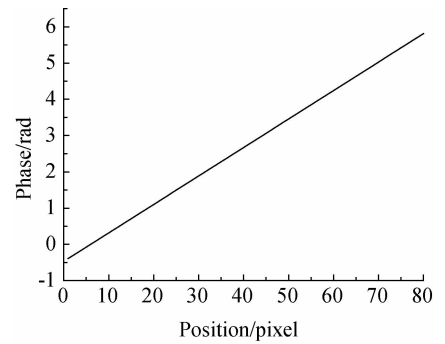
$$a(x, y) = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)/4. \quad (7)$$

2.2 双频相位解包裹方法

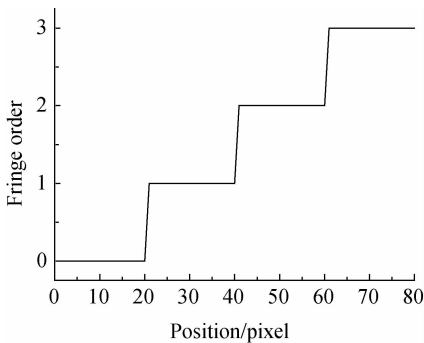
本文提出将优化选择好的四步相移低频条纹和低频条纹分别输入红色和蓝色通道,考虑到彩色图像中绿色对红色通道和蓝色通道的干扰,将绿色通道的灰度值设为0;而后将合成的彩色条纹图由数字液晶投影仪投到物体表面,并由彩色 CCD 记录彩色变形条纹图并保存在电脑内。利用色彩分离技术将4幅彩色条纹图分离得到两组不同频率的相移条纹图。然后,利用四步相移法



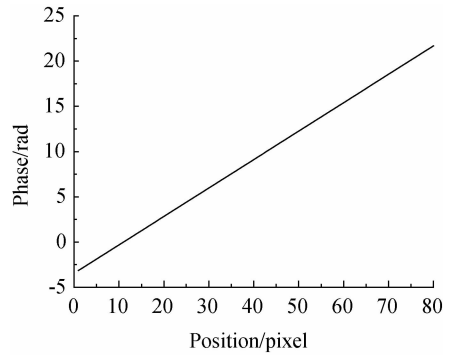
(a) 高频截断相位 $\varphi_H(x)$
(a) High-frequency wrapped phase $\varphi_H(x)$



(b) 低频连续相位 $\psi_L(x)$
(b) Low-frequency unwrapped phase $\psi_L(x)$



(c) 条纹级数 $O(x)$
(c) High-frequency fringe order $O(x)$



(d) 连续相位 $\psi_H(x)$
(d) Unwrapped phase $\psi_H(x)$

图1 相位解包裹

Fig. 1 Phase unwrapping

解出低频和高频条纹的截断相位 $\varphi_L(x, y)$ 和 $\varphi_H(x, y)$ 。图1所示为一维图像处理结果。再根据低频条纹的截断相位 $\varphi_L(x, y)$ 准确解调出连续

相位 $\Psi_L(x, y)$, 如图1(b)所示, 并以此为参考相位按式(8)对高频截断相位进行解相。

$$\Psi_H(x, y) = \varphi_H(x, y) + 2\pi * O(x, y), \quad (8)$$

其中:

$$O(x, y) = \text{int} \left[\frac{k\Psi_L(x, y) - \varphi_H(x, y)}{2\pi} \right], \quad (9)$$

表示条纹级数,如图 1(c)所示。式中, int 表示取最接近的整数; k 为高低频率比,为了抑制噪声的影响 k 值一般不要太大: $k \leq 5^{[3]}$ 。最后得到连续相位 $\Psi_H(x, y)$,如图 1(d)所示。

2.3 消除阴影及不连续影响的方法

采用相移法获得的相位主值被截断在 $(-\pi, \pi]$,因此需要解包裹这个过程。如果物体表面起伏剧烈、不连续或者有阴影,就会使相位出现不正常跃变、毛刺等问题,得不到正确的连续相位。为了解决这些问题,本文采用双频技术并结合作者提出的背景二值化定位阴影和不连续处的方法进行复杂面型的形貌测量^[13]。本文的“背景”是通过 4 幅相移图相加后除以 4 得到的平均灰度图,具体过程是:以背景的二值图像为参考,在被测物体的相位图中,对应于二值化图中被测物体区域的相位保留;而对应于二值化图中阴影或不连续的暗背景区域的相位,用标准参考平面中相对应的区域相位进行替换,从而有效地消除阴影和不连续区域对相位计算的影响,准确地实现物体的三维面形重建。

本文不用单一条纹图(作为低频条纹图)进行全场相位计算,低频条纹频率的选择只需考虑物体表面高度变化引起的条纹不连续性。获得理想的相位展开要求测得的相位必须满足抽样定理,即任何两个相邻抽样点之间的非截断相位变化小于 π ,直观地讲就是物体表面高度变化最剧烈处条纹的扭曲程度不能超过半个周期。所以,低频条纹频率的选择可以以此为参考进行优化。高频条纹的频率一般为低频频率的整数倍,具有较高的条纹分辨率,但是如果频率太高很容易受到噪声的干扰产生

误差,所以高频频率不宜太高,一般高低频率比不超过 5^[3]。

3 实验与结果

实验中采用的低频条纹周期为 64 像素/条,高频条纹周期为 16 像素/条。首先,对标准平面投影四步相移的高频正弦条纹图,相移的步长为 90° ,由 CCD 采集并保存到计算机中,再运用四步相移算法得到标准平板的连续相位。然后用物体取代平板,利用计算机产生四步相移彩色双频条纹图,并由数字液晶投影仪投到物体表面。将彩色 CCD 采集到的 4 幅彩色变形条纹分离得到高低频四步相移条纹图共 8 幅。图 2(a)为其中一幅彩色双频条纹图,图 2(b)、(c)分别为图 2(a)经颜色分离得到的低频和高频条纹图(彩图见期刊电子版)。

图 3(a)为低频四步相移得到的截断相位图,图 3(b)为高频四步相移得到的截断相位图。对比这两幅图可以发现,本实验采用的低频条纹可以很好地适应高度的突变,即使在高度变化比较剧烈的区域如方框所标注的区域,相位图仍然没有出现因条纹断裂引起的不正常跃变,因而可以得到理想的解包裹相位;而对应的高频相位红色区域的条纹出现了级次错位将导致解包裹时无法对条纹级数作出正确判定。图 4(c)为通过本文提出的解包裹算法得到的与物体形貌信息有关的连续相位(背景除外)。

图 4(a)为由四步相移技术得到的作为参考平面平板的连续相位;图 4(b)为物体及背景的二值化图,它作为相位的最后修正引导图;图 4(c)为利用图 4(b)定位阴影和不连续区域得到的最终相位图;图 4(d)为减去参考平面后与物体高度有关的绝对相位的三维显示。

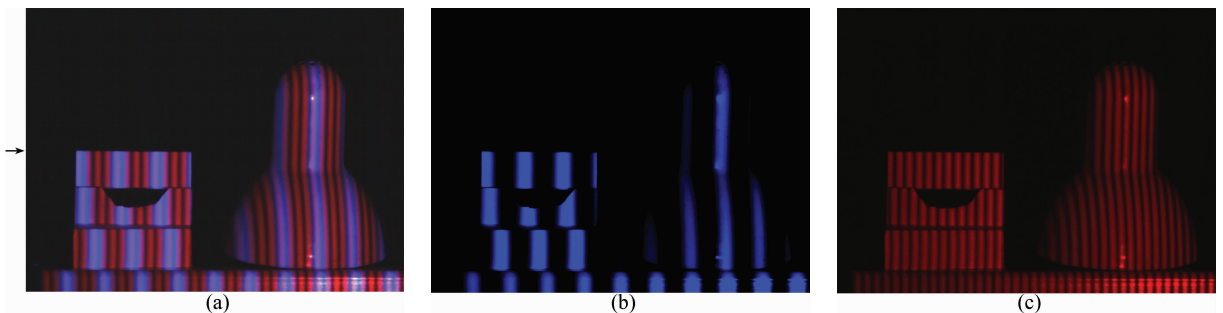


图 2 (a)彩色双频投影条纹图及(b)其分离后的低频(蓝色通道)和(c)高频条纹图(红色通道)

Fig. 2 (a) Color dual-frequency fringe pattern (b) low- and (c) high-frequency fringe patterns separated from Fig. 2(a)

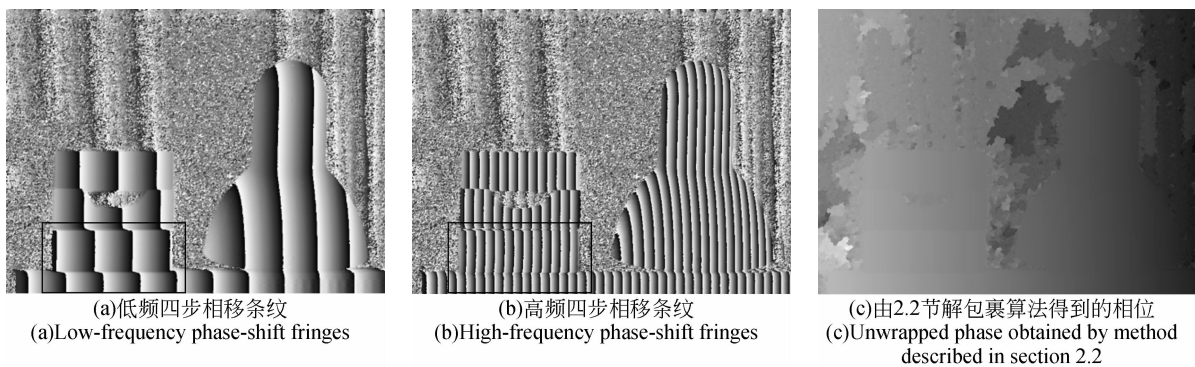


图 3 截断相位及连续相位图

Fig. 3 Wapped and unwrapped phase maps

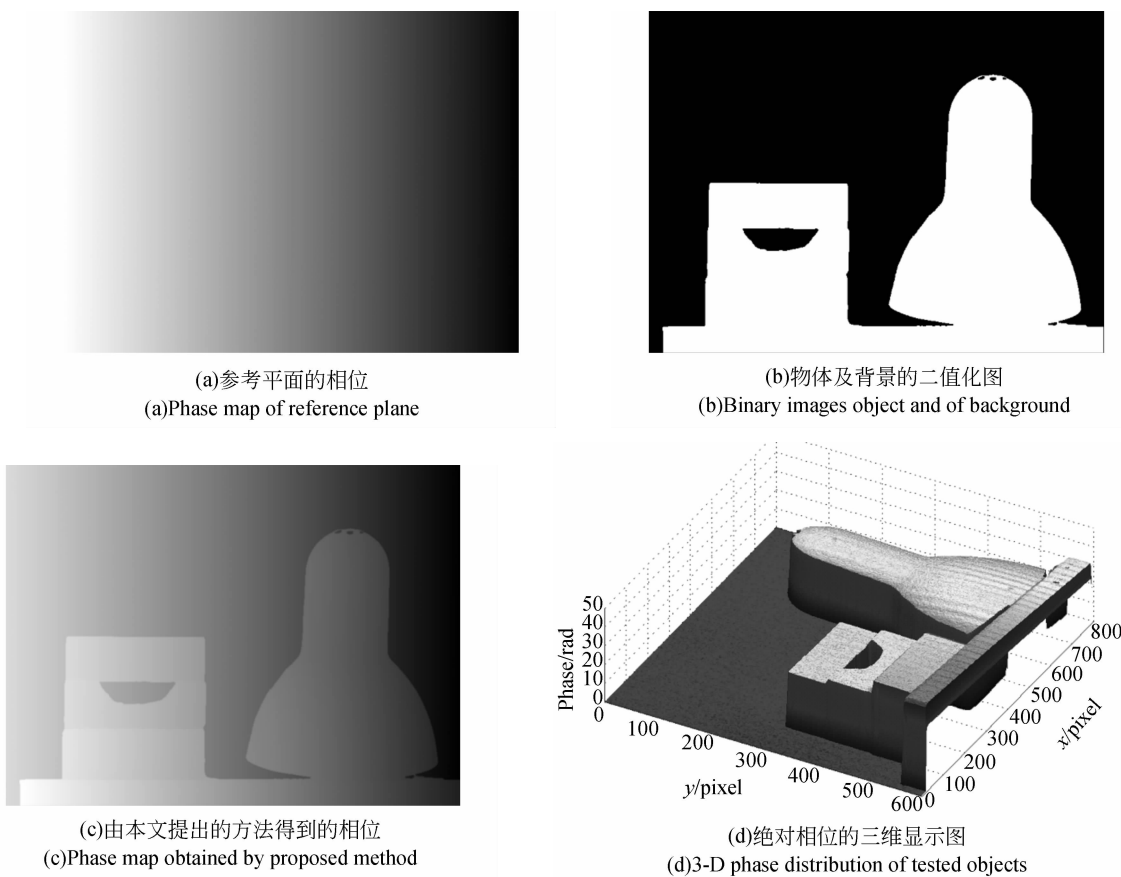


图 4 实验结果

Fig. 4 Testing results

4 结 论

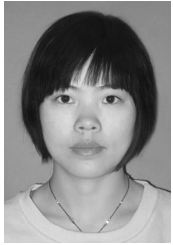
本文提出了一种基于四步相移技术的彩色双频条纹投影复杂面型的三维形貌测量方法。双频技术结合了低频和高频条纹测量的优势成功解决了高度引起的条纹断裂问题,背景二值化处理定位阴影和不连续处的方法有效克服了阴影和不连续

的问题,同时也放宽了低频条纹的频率选择范围,进而提高了测量精度。该方法利用彩色通道将两种频率的条纹合成一幅彩色条纹,大大减少了条纹投影及图像采集数量。与现有的基于多频4步相移条纹投影法三维形貌测量技术需要8~12幅图像相比,节省了测量时间。该方法简单、精度高,在不要求高速或实时测量的情况下适合台阶状和不连续多个孤立物体的三维形貌测量。

参考文献:

- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1): 10-22.
- [2] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Applied Optics*, 1983, 22: 3977-3982.
- [3] WANG Z Y, NGUYEN D A, BARNES J C. Some practical considerations in fringe projection profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 218-225.
- [4] LI S, CHEN W, SU X. Reliability-guided phase unwrapping in wavelet-transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(18): 3369-3377.
- [5] HUNTLEY J M, SALDNER H O. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(17): 3047-3052.
- [6] HUNTLEY J M, SALDNER H O. Shape measurement by temporal phase unwrapping: comparison of unwrapping algorithms [J]. *Measurement Science Technology*, 1997, 8(9): 986-992.
- [7] KIM E-H, HAHN J, KIM H, *et al.*. Profilometry without phase unwrapping using multi-frequency and four-step phase-shift sinusoidal fringe projection [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7818-7830.

作者简介:



戴美玲(1985—),女,江苏泰兴人,博士研究生,2009年于安徽理工大学获得学士学位,2012年6月起为新加坡技术与设计大学机械系 Research Assistant,主要从事光测力学与图像处理的研究。E-mail:220090809@seu.edu.cn



杨福俊(1968—),男,江苏淮安人,教授、博士生导师,2001年于大连理工大学获得博士学位,2002年~2003年、2011年~2012年分别为新加坡国立大学机械系的 Research Engineer 及美国匹兹堡大学骨科系访问学者,主要从事应用光学方法及新型材料与结构及细胞力学性能的研究。E-mail:yang-fj@seu.edu.cn

- [8] 蒋明,张曙,何小元. 鲤鱼尾鳍瞬时三维形态测量 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2165-2169.
- JIANG M, ZHANG SH, HE X Y. Instantaneous three-dimensional profile measurement of tail fin of carp [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2165-2169. (in Chinese)
- [9] 贾倩倩,王伯雄,罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 390-396.
- JIA Q Q, WANG B X, LUO X ZH. Extraction of the central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light-sectioning method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 390-396. (in Chinese)
- [10] BURTON D R, LALOR M J. Multichannel Fourier fringe analysis as an aid to automatic phase unwrapping [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(14): 2939-2949.
- [11] ZHAO H, CHEN W Y, TAN Y SH. Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4497-4500.
- [12] LI J L, SU H J, SU X Y. Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 277-280.
- [13] DAI M L, YANG F J, HE X Y. Single-shot color fringe projection for three-dimensional shape measurement of objects with discontinuities [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2062-2069.



何小元(1956—),男,江苏泰兴人,教授,博士生导师,1994年于西南交通大学获得博士学位,在美国韦恩大学、新加坡国立大学、香港城市大学及美国奥克兰大学等从事多项合作研究,主要研究领域为固体实验力学。E-mail:mm-hxy@seu.edu.cn