

三维成像中相位级次自编码的相位测量方法

刘元坤 苏显渝 张启灿

(四川大学电子信息学院光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种相位级次自编码技术的相位测量方法。与传统的相位测量技术不同,该方法利用截断相位的微分值作为编码通道,完成对各条纹级次的编码。构造的代码序列总长度为投影条纹的周期数,每个周期作为一个码元,由相邻若干码元构成一个代码子序列。相位计算后,根据截断相位的微分信息,可以提取出各周期及其码元值,通过在设计的代码序列中进行代码子序列匹配,即可确定各周期的序号,从而引导相位展开,获得绝对相位分布。采用希尔伯特变换对因编码引起的局部相位误差进行了有效修正。该方法通过将编码信息加载于截断相位分布中,在计算截断相位的同时获得相位级次信息,不需要投影额外的编码图像,测量速度快,尤其适用于孤立物体的三维面形测量。

关键词 成像系统;自编码;相移;结构光照明;三维成像;机器视觉

中图分类号 TB11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1111002

A Novel Phase Order Self-Encoding Technique for Phase Measuring Profilometry

Liu Yuankun Su Xianyu Zhang Qican

(Department of Optoelectronic Science and Technology, College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract The phase measuring profilometry using a novel phase order self-encoding technique is presented, which is to use the differential of the wrapped phase as the encoded information to identify all periods of the grating. The length of the encoded sequence is the same as the number of periods. There is only one code value in one period, which can be identified by the information of the differential and phase jumps. For each period, the information of its several neighboring periods will form a subsequence, which is unique and can be used to find the order of each period. The absolute phase can be got after getting the order. To revise the phase errors at some phase-jump areas, Hilbert transform is employed. By embedding the encoded information in the wrapped phase, there is no extra grating needing projecting, and there is also no classical phase unwrapping process. It is promising in measuring the surface profile of the spatially isolated objects.

Key words imaging systems; self encoding; phase shift, structured-light illumination; three-dimensional imaging; machine vision

OCIS codes 110.6880; 120.5050; 100.5070

1 引言

基于结构照明的光学三维传感技术在工业检测、质量控制、机器视觉、影视特技和生物医学等领域有广泛的应用^[1]。其中基于正弦条纹投影的结构光三维传感技术具有可以实现全场同时测量、精度高和测量速度快等优点是研究的热点之一^[2~4],但是该技术在测量不连续物体时,相位展开^[5~8]是一

个难题。这个问题可以采用空间邻域编码或时间编码的方式来解决,其中时间编码方法有时间相位展开法^[9]或正弦条纹投影与格雷码方法^[10]相结合,但是这两种方法需要投影多幅图像。空间邻域编码方法通过对每个条纹周期进行编码,为每个周期设定唯一的序号,该序号由当前周期及其邻域周期确定。空间邻域编码方法又有基于灰度和颜色的编码方

收稿日期: 2011-04-06; **收到修改稿日期**: 2011-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 刘元坤(1975—),男,博士,讲师,主要从事光学三维传感方面的研究。E-mail: lyk@scu.edu.cn

(光学学会会员号: S040421132A)

式,前者需要投影额外的灰度编码图像^[11],由编码图像提供每个周期的序号信息,后者通过对每个周期赋以不同的颜色,由颜色序列来判断每个周期的序号^[12],但这类技术需要彩色投影与接收设备,且设备的色彩还原能力直接影响了三维数据质量。

本文提出一种相位级次自编码的条纹投影测量方法,实现对孤立物体的高精度三维面形测量。该方法是一种空间邻域编码方法,通过将编码信息加载于相位分布中,投影的条纹图帧数与传统相移技术所需帧数相同,不需要投影额外的编码图像,也不涉及颜色信息的处理,通过空间邻域来确定每个周期的序号,从而引导相位展开,获取绝对相位。实验证实了该方法的可行性。

2 原 理

2.1 编码原理

图 1 为条纹投影三维成像系统示意图。系统由投影仪和摄像机构成,投影仪投出正弦条纹,摄像机在另一位置拍摄被物体表面形貌调制的变形条纹,通过分析拍摄到的图像计算出相位分布,再根据相位与高度关系可以重建出待测物体三维面形分布。

在传统的相位测量轮廓术中,由计算机产生的待投影标准正弦条纹图,其强度分布可以表示为

$$I(x) = a + b\cos\left(\frac{2\pi}{p}x + \frac{n}{N}2\pi\right), \quad (1)$$

式中 a 为直流分量, b 为调制度, p 为条纹周期, N 为

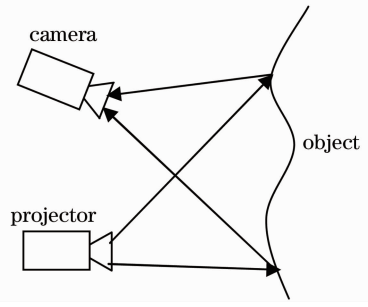


图 1 条纹投影三维成像系统示意图

Fig. 1 Sketch of the fringe projection system

相移帧数, $n = 0, 1, \dots, N-1$ 表示第 n 帧条纹图。 x 为投影仪像素坐标,即如图 2 所示的横坐标,为单调递增分布,若令 $\varphi = 2\pi x/p$,那么 φ 和 x 一样均为单调连续分布。实际上,由于相移技术采用反三角函数计算相位,使得相位分布介于 $[-\pi, \pi]$,表示为 φ_w 。因此,可以采用截断相位分布 φ_w 替代连续相位 φ ,此时待投影标准正弦条纹图的强度分布为

$$I(x) = a + b\cos\left(\varphi_w + \frac{n}{N}2\pi\right). \quad (2)$$

通常在传统相移技术中,构造的标准正弦条纹有两种类型,即截断相位 φ_w 是单调递增或单调递减(除了相位跳变点),相位展开时则通过寻找相位跳变点来引导相位展开,获得连续相位,如图 2 所示。这两种类型的区别在于其微分符号不同,这里将微分值为正的类型设定为 1,微分值为负的类型设定为 0,即图 2(a)所示的截断相位为 1111,图 2(b)所示的截断相位为 0000。

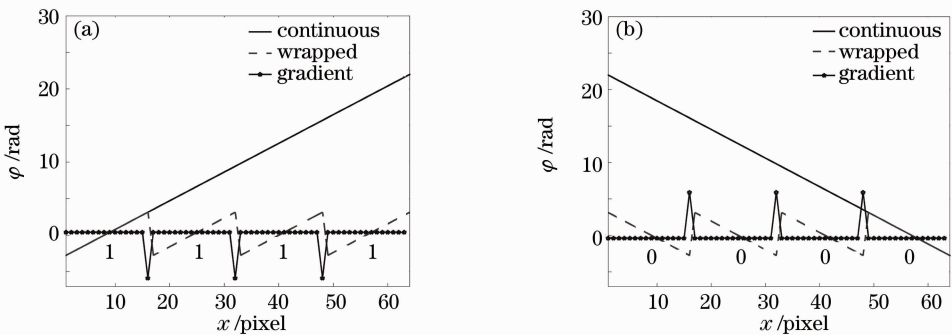


图 2 相位梯度与截断相位、连续相位的关系。(a)相位梯度为正;(b)相位梯度为负

Fig. 2 Relation among phase gradient, wrapped phase and continuous phase. (a) Positive phase gradient; (b) negative phase gradient

实际上可以将这两种类型组合起来,充分利用截断相位的微分值信息,将之作为编码通道,根据微分值的不同完成对相应条纹周期的空间标记编码。用这种微分值已经包含了编码信息的截断相位反过来产生对应的标准正弦条纹,经三维测量系统投影到被测物体表面,拍摄后再做相应的解调,获取待测

物体的绝对相位,从而完成三维形貌测量。

为了叙述的方便,以三步相移为例来说明该方法的编码思想,如图 3 所示。按照(2)式,根据预先设计好的编码截断相位,可以得到如图 3(a)~(c)所示的 3 帧待投影相移条纹图。在构造编码截断相位时,每个条纹周期作为一个编码单元,编码值为 1

或 0, 根据一定要求生成一个代码序列, 代码序列总长度为待投影正弦条纹的周期数, 图 3 中的代码序列为“1111000010011010”。在测量待测物体时, 首先按顺序投影 3 帧相移条纹图, 在拍摄下由物体引起的变形条纹图后, 就可以根据相移算法从 3 帧变形条纹图中计算出对应的截断相位分布, 由截断相位微分值的正负判断各周期的码值, 再由当前周期及其若干相邻周期码值构成子代码序列, 确定各周期的级次, 进而得到待测物体的绝对相位。图 3(d) 和(e)描述了由待投影的 3 帧相移正弦条纹计算出的截断相位分布, 各周期码值如图 3(e)所示, 与图 3(f)所示的截断相位 φ_w 微分正或负相对应。

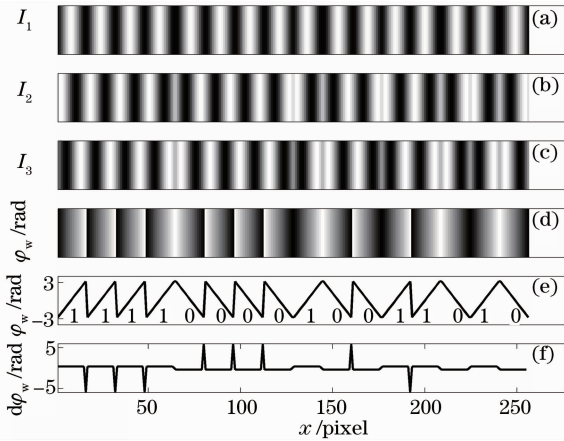


图 3 编码值与条纹强度、截断相位、截断相位微分的关系。(a)第一帧条纹;(b)第二帧条纹;(c)第三帧条纹;(d)截断相位;(e)截断相位剖面与编码值;(f)截断相位微分

Fig. 3 Relation among fringe intensity, encoded phase, wrapped phase and wrapped phase differential. (a) The first fringe; (b) the second fringe; (c) the third fringe; (d) wrapped phase; (e) a profile of the wrapped phase and code value; (f) the differential of the wrapped phase

为了确定每个周期的序号, 需要利用每个周期和其之后的若干周期信息构造一个子代码序列, 该序列必须具有唯一性, 即任何一个子代码序列在整个代码序列中只出现一次, 因此通过与整个代码序列进行匹配, 即可确定该周期的级次。以图 3 中的代码序列为例, 若子代码序列长度为 4, 那么如果已知某一个条纹周期的子代码序列为“1111”, 通过在整个代码序列进行匹配查找, 可知该条纹周期为第一个周期, “1110”对应第二个条纹周期, “1100”对应第三个条纹周期等。

子代码序列长度与整个代码序列长度的关系可以表示为

$$2^k \geq M, \quad (3)$$

式中 k 为子代码序列长度, M 为整个代码序列长度。如果正弦条纹图共有 64 个条纹周期, 则子代码序列长度要大于等于 6, 当条纹图有 32 个条纹周期时, 子代码序列长度需大于等于 5。

本方法的截断相位的计算过程与 N 帧相移技术相同:

$$\varphi_w(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \right]. \quad (4)$$

对计算得到的截断相位做微分, 从微分值中获取每个子代码序列后, 就能确定每个条纹周期的序号 m , 这时还需进行相位展开才能得到绝对相位分布 φ_c , 相位展开的算法为

$$\begin{cases} \varphi_c(x, y) = \varphi_w(x, y) + 2m\pi & \text{for code 1} \\ \varphi_c(x, y) = -\varphi_w(x, y) + 2m\pi & \text{for code 0} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 φ_c 为连续的绝对相位分布。

2.2 局部相位修正

由于编码相位技术结合了截断相位分布的两种类型, 根据码值的不同, 将有 4 种组合, 即 11, 10, 01, 00, 其中 10 和 01 改变了原截断相位的单调性, 致使相位分布在 $-\pi$ 或者 π 处出现拐点, 由于相移条纹图像中某些帧图像在这些区域的质量降低, 最终将会出现局部相位误差。图 4 所示的一组实测数据为三步相移技术中的三幅条纹图, 可以看出, 第一帧条纹图与传统三步相移的第一帧条纹图相同, 第二、3 帧条纹与传统三步相移的对应条纹有根本差别。其中第二、3 帧图像在编码为 10 和 01 的位置条纹质量发生了降低, 从而使得该处的相位测量结果存在较大误差, 如图 4(b)所示。造成这种现象的主要原因是采样不足和光学系统的低通滤波本质。为此引入希尔伯特变换^[13]对该位置的局部相位进行修正。

在相移技术中, 由公式 $\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)$ 和 $\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)$ 可以计算出直流成分很少的余弦和正弦条纹分量, 如图 5(a) 和(c)所示。根据已知的编码信息以及相移顺序可知, 图 5(a)中的余弦条纹分量较少受编码引起的条纹失真影响。另外, 相对于传统的三步相移, 相位编码中的正弦条纹分量在码元 10 转换拐点

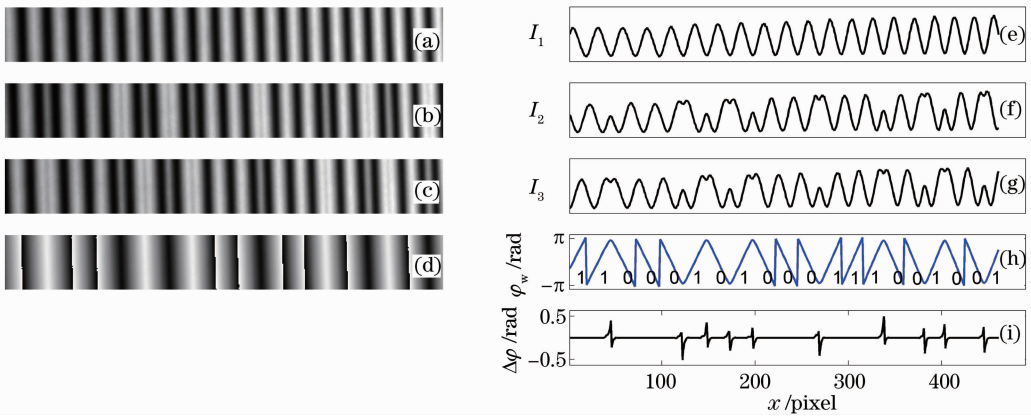


图 4 局部相位测量误差示意图。(a)~(d)3 帧条纹图及截断相位；(e)~(h)条纹图和截断相位剖面及条纹编码值；(i)展开相位与传统相移结果差

Fig. 4 Demonstration of phase errors. (a)~(d) Fringes and wrapped phase; (e)~(h) profiles and the code value of each period; (i) difference of the unwrapped phase between the proposed method and the classical method

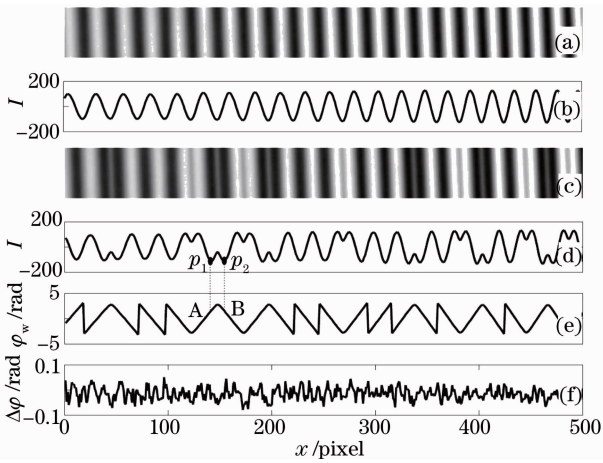


图 5 局部相位修正示意图。(a)余弦条纹；(b)余弦条纹剖面；(c)正弦条纹；(d)正弦条纹剖面；(e)截断相位分布；(f)希尔伯特变换修正后相位与传统三步相移结果之差

Fig. 5 Schematic of the local phase revision. (a) Cosine fringe; (b) a profile of cosine fringe; (c) sine fringe; (d) profile of sine fringe; (e) wrapped phase; (f) difference between the revised unwrapped phase and the results of the classical three-step phase-shift technique

两边的采样点 p_1 和 p_2 处改变了相移方向,因此在 p_1 和 p_2 之间出现条纹局部失真。如果将余弦条纹分量作为标准,选择图 5(d)所示的 p_1 和 p_2 所在周

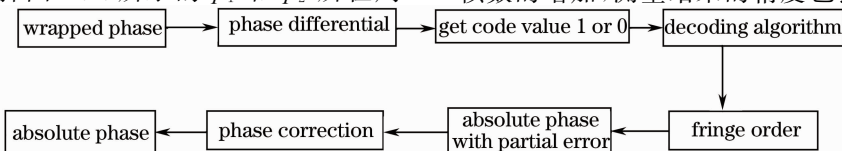


图 6 本方法的测量流程

Fig. 6 Flow chart of the phase measurement by the proposed method

期 A 和 B,采用希尔伯特变换计算出新的正弦条纹分量,再由反三角函数可以计算出新的相位分布,局部替代 p_1 和 p_2 之间的初始相位,修正结果与传统相移结果的误差分布如图 5(f)所示。可以看出经过相位修正后,由于相位编码引起的相位误差[图 4(i)]已被很好地消除了,最终保证了三维面形测量数据的质量。

综上所述,绝对相位的计算过程可以表示为图 6 所示。

3 实验及结果分析

为验证本方法的可行性,用液晶显示器(LCD)投影仪和摄像机搭建了测量系统。LCD 的分辨力为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,摄像机分辨力为 $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,实验中,投影条纹的周期为 16 pixel ,因此投影条纹包含 64 个周期,子代码序列长度为 6,采用的代码序列为

11111100000010000110 00101000111001001011001
101001111010101110110。

采用该系统分别进行了 2 个实验。实验 1 通过测量一个标准平面来评价本方法与传统相移测量技术,实验结果如图 7 所示。在相移技术中,随着相移帧数的增加,测量结果的精度也会提高,为此分别采

用 3~7 帧满周期相移,针对每一种相移又做了相位编码测量和传统相移测量两种方法的结果对比。图 7(a)所示的是不同相移帧数的相位编码技术测量结果之间的比较,从上到下依次给出了 3~6 次相移的相位编码技术测量结果与 7 次相移的测量结果之间的差值分布;图 7(b)所示的是不同相移帧数的传统相位测量结果之间的比较,从上到下依次给出

了 3~6 次相移的传统相位测量结果与 7 次相移的测量结果之间的差值分布;图 7(c)从上到下分别对应 3~7 次相移情况下,本方法与传统相移方法测量结果的差异分布。可以看出与传统相移技术相比,基于相位编码的相移测量方法与同帧数的传统相移测量方法的测量精度相当,并且随着相移帧数的增加,相位测量精度相应提高。

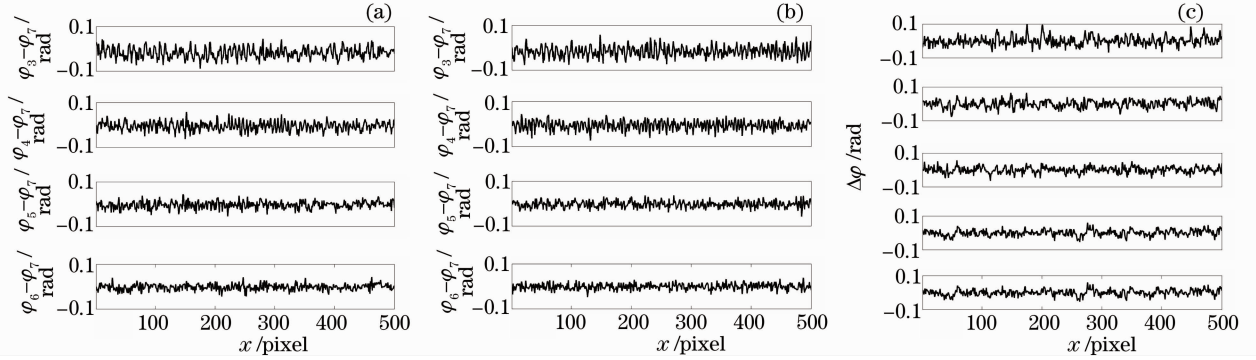


图 7 对比相位编码测量方法与传统相移方法。(a)相位编码技术;(b)传统相移测量;(c)传统相移技术与相位编码技术的比较

Fig. 7 Comparison between the phase encoded technique and classical phase-shift technique. (a) Proposed method; (b) classical phase-shift technique; (c) comparison between the proposed method and the classical phase-shift technique

实验 2 的测量对象为一个孤立物体——风扇叶片。这样的孤立物体如果采用传统的相移技术进行重建,必须对单独投影标记图案,标记孤立区域之间的相对关系,才能正确重建。实验中采用基于相位编码的三步相移测量方法,只投影和获取了 3 帧相移图像。获取的图像及截断相位分布如图 8 所示。图 9 为绝对相位分布,可以看出仅投影 3 帧基于相位级次自编码的正弦条纹图,就能够确定待测孤立

物体的相互关联。

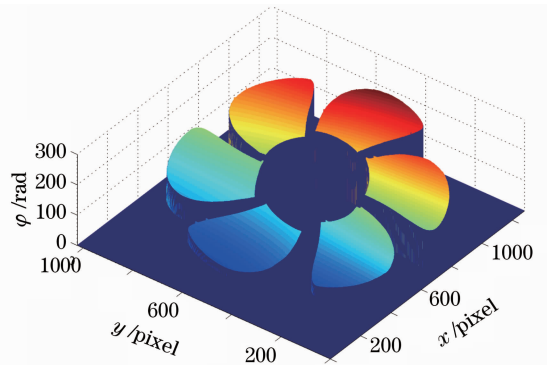


图 9 计算得到的绝对相位分布

Fig. 9 Absolute phase distribution of the fan's blades obtained by calculation

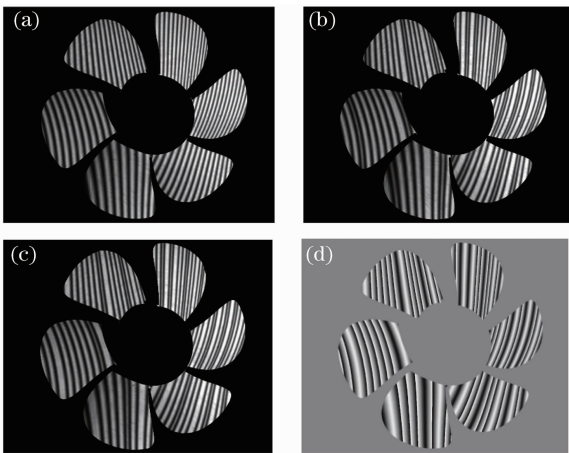


图 8 获取的 3 帧变形条纹以及计算出的截断相位。

(a)~(c)3 帧条纹图;(d)截断相位

Fig. 8 Captured three deformed fringe images and wrapped phase calculated. (a) ~ (c) Three frames of fringes; (d) wrapped phase

4 结 论

提出一种基于相位级次自编码技术的相位测量方法,与传统的相位测量技术不同,该方法利用截断相位的微分值作为编码载体,将与投影条纹空间周期相对应的标记编码序列反过来嵌入到截断相位的微分值中,最终依据这样的截断相位分布生成对应的多帧相移条纹用于系统投影。后期数据处理时,在计算得到截断相位后,根据截断相位微分的正负,判断各周期的码值,由各周期及其相邻周期的码值组成一个子代码序列,再通过查找该子代码序列在

预先设计的整个代码序列中的位置,就可以确定条纹周期级次,得到待测孤立物体的相互关联及绝对相位分布。该方法不需要投影额外的编码图像,也不涉及彩色器件,只需要投影和记录一套相移图像就能完成测量,测量速度快,数据量小。和其他相位测量轮廓术一样,该方法也会受到噪声的影响,可以通过增加相移帧数的方法减小噪声的影响。本文所提的方法为空间孤立物体的三维面形测量提供了一种新的方法,也为三维场景的快速数字化提供了一种新的手段,拓宽了基于相移结构光投影的光学三维传感技术应用领域。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 J. Salvi, S. Fernandez, T. Pribanic *et al.*. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry [J]. *Pattern Recognit.*, 2010, **43**(8): 2666~2680
- 3 S. Yoneyama, Y. Morimoto, M. Fujigaki *et al.*. Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2003, **40**(3): 153~161
- 4 S. Zhang. Flexible 3D shape measurement using projector defocusing: extended measurement range [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(7): 934~936
- 5 X. Su, W. Chen. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2004, **42**(3): 245~261
- 6 T. R. Judge, P. J. Bryanston-Cross. Review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 1994, **21**(4): 199~239
- 7 Li Sikun, Chen Wenjing, Su Xianyu. Phase unwrapping guided by amplitude of wavelet ridge coefficients in wavelet transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 715~821
李思坤, 陈文静, 苏显渝. 小波变换轮廓术中用小波脊系数幅值引导相位展开的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 715~821
- 8 W. Nadeborn, P. Andra, W. Osten. A robust procedure for absolute phase measurement [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 1996, **24**(2-3): 245~260
- 9 H. O. Saldner, J. M. Huntley. Temporal phase unwrapping: application to surface profiling of discontinuous objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2770~2775
- 10 Sun Xuezheng, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Phase unwrapping based on complementary structured light binary code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1947~1951
孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1947~1951
- 11 Y. Li, C. F. Zhao, Y. X. Qian *et al.*. High-speed and dense three-dimensional surface acquisition using defocused binary patterns for spatially isolated objects [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 21635~21642
- 12 Wang Na, Zhang Qican, Ma Ke. 3D shape measurement for isolated objects based on color encoded fringe projection [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(8): 1227~1231
王娜, 张启灿, 麻珂. 基于彩色编码条纹投影的孤立物体三维测量 [J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(8): 1227~1231
- 13 Lü Jie, Wang Ming, Huan Hai *et al.*. Fringe analysis with Hilbert transform and its application in the measurement of aspheric mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6): 781~785
吕捷, 王鸣, 宦海等. 希尔伯特变换条纹分析法及其在非球面镜测量上的应用 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(6): 781~785

栏目编辑:何卓铭