

基于不等占空比二元光栅的相位测量轮廓术

陈雨婷^{**}, 曹益平^{*}, 陈澄, 万莹莹, 付光凯, 王亚品, 王璐

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 提出了一种基于不等占空比二元光栅的相位测量轮廓术(PMP)。所用的光栅只有 0 和 255 两个灰度, 消除了投影仪的伽玛非线性对正弦光栅灰度的影响, 同时可将投影系统的刷新频率提高一个数量级。所提方法的测量精度高于罗奇光栅离焦投影傅里叶变换轮廓术的, 重复精度高于传统正弦光栅 PMP。

关键词 机器视觉; 三维测量; 二元光栅; 不等占空比; 滤波; 相位测量轮廓术

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0815021

Phase Measurement Profilometry Based on Binary Gratings with Unequal Duty Cycle

Chen Yuting^{**}, Cao Yiping^{*}, Chen Cheng,

Wan Yingying, Fu Guangkai, Wang Yapin, Wang Lu

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract The phase measurement profilometry (PMP) based on binary gratings with an unequal duty cycle is proposed. The adopted binary gratings have only two grayscales of 0 and 255, and the effect of the gamma nonlinearity on the grayscale of the sinusoidal grating is eliminated. At the same time, the refresh frequency of the projection system can be increased by an order of magnitude. The measurement accuracy of this proposed method is higher than that of the Roach grating defocus projection Fourier transform profilometry and the repeat accuracy is higher than that of the traditional PMP based on sinusoidal gratings.

Key words machine vision; three dimensional measurement; binary grating; unequal duty cycle; filter; phase measurement profilometry

OCIS codes 150.3045; 120.2830; 120.4570; 120.5060

1 引 言

光学三维测量技术具有非接触、高精度、快速及全场测量等优点, 被广泛应用于医学检测、产品质量检测、计算机视觉、影视特技等领域^[1-7]。其中, 傅里叶变换轮廓术(FTP)只需采集一帧变形条纹图像, 测量速度快, 可用于实时动态测量和数据处理。相位测量轮廓术(PMP)具有全场测量、点对点的计算特性, 测量精度高。商用数字投影仪投影正弦光栅时存在的非线性导致条纹的正弦性质量变差, 而投影光栅的正弦性质量是影响 PMP 测量精度的关键因素之一。另外, 目前常用的投影仪投影灰度正弦光栅时只能达到 120 frame/s 的速度, 不利于将

PMP 方法应用于高速测量领域中。利用数字微镜元件(DMD)的二元高速开关特性, 数字光处理(DLP)技术投影仪投影二元编码光栅时可以达到非常高的投影速度(10 frame/s)^[8], 同时不受投影仪非线性的影响, 可提高测量精度。

苏显渝等^[9]提出了一种离焦投影二元罗奇光栅的方法, 通过 DLP 投影二元罗奇光栅结合并离焦技术得到了正弦分布光场。该方法可以避免投影仪非线性因素的影响, 提高了投影速度及三维光学测量系统的应用灵活性。但罗奇光栅离焦后仍存在高次谐波, 会影响光栅的正弦性质量, 且投影仪的离焦量难以精确控制, 导致对比度下降^[10]。因此, 本文提出了一种投影不等占空比二元光栅的 PMP 方法,

收稿日期: 2018-03-22; **修回日期:** 2018-05-10; **录用日期:** 2018-05-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2007AA01Z333)、国家科技重大专项(2009ZX02204-008)

*** E-mail:** ypcao@scu.edu.cn; **** E-mail:** 2444706418@qq.com

该方法无需离焦投影,对采集的变形条纹图像在频域内进行低通滤波处理及逆傅里叶变换后,可得到高精度的正弦分布光场。该方法极大地提高了投影速度,避免了非线性和离焦投影的缺点。通过实验验证了所提方法的有效性和精确性。

2 PMP 原理

图 1 所示为 PMP 的光学原理图。测量系统主要由投影装置、采集装置和放置被测物体的参考平面组成。其中 DLP 投影仪的光轴 P_1P_2 与互补型金属氧化物半导体(CMOS)相机的光轴 I_1I_2 相交于参考平面上的 O 点, d 为 DLP 投影仪和 CMOS 相机之间的距离, L 为 CMOS 相机与参考平面之间的距离, h 为物体高度。

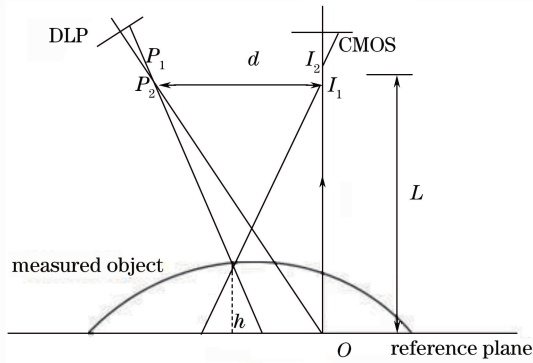


图 1 PMP 光学原理图

Fig. 1 Optical diagram of PMP

根据 $N(N \geq 3)$ 步 PMP 相移算法,由 DLP 投影仪将正弦光栅图像投射到被测物体上,CMOS 相机采集到的相应第 n 帧变形条纹图像^[11-12]可表示为

$$I(x, y) = R(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + 2n\pi/N] \}, n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为物体表面不均匀的反射率, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为条纹对比度, $\varphi(x, y)$ 为受物体高度调制的相位分布, x, y 为坐标。

由 N 步相移算法可计算出相位值 $\varphi(x, y)$ ^[13] 为

$$\varphi(x, y) = \arctan \frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(\frac{2n\pi}{N})}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(\frac{2n\pi}{N})}。 \quad (2)$$

相位 $\varphi(x, y)$ 被截断在反三角函数主值区间 $(-\pi, \pi)$ 内且不是连续的,需要进行相位展开^[14-17],连续相位分布记为 $\psi(x, y)$ 。由物体的相位分布可得到物体的三维形貌,通过相位与高度之间的映射关系^[18-19],得到物体的高度分布 $h(x, y)$ 为

$$h(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\varphi(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\varphi^2(x, y)}, \quad (3)$$

式中 $a(x, y)$ 、 $b(x, y)$ 和 $c(x, y)$ 三个参数可通过对至少三个已知高度的平面进行标定获得,用于标定的平面越多,测量精度越高。

3 基于不等占空比二元光栅的 PMP

灰度编码的 N 帧不等占空比二元光栅可表示为矩形窗函数(rect)与梳状函数(comb)的卷积,其中第 n 帧的光栅强度分布函数为

$$g_n(x, y) = 255 \cdot \text{rect}(x/q) * \text{comb}[(x - nq)/T], n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (4)$$

式中 T 为不等占空比二元光栅的周期, q 为光栅非零的宽度, $*$ 表示卷积。占空比可表示为

$$P_{dc} = q/T。 \quad (5)$$

在传统的基于离焦投影罗奇光栅的 FTP 中,占空比为 $1/2$,相应的正弦条纹图像可通过适当离焦投影得到^[20-22]。在所提方法中,生成了占空比为 $1/5$ 的二元光栅,图 2(a)所示为利用该方法生成的一帧光栅,图 2(b)所示为其灰度分布剖面图。

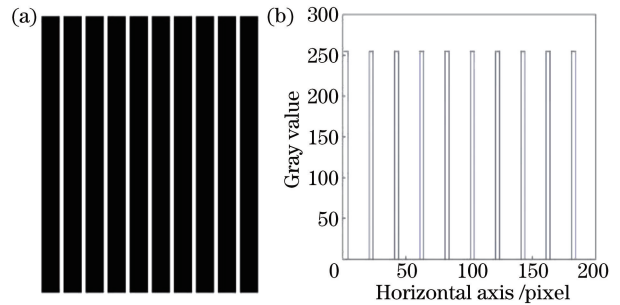


图 2 二元光栅与灰度分布。(a)二元光栅;(b)剖面灰度分布

Fig. 2 Binary grating and grayscale distribution.

(a) Binary grating; (b) grayscale distribution profile

为了分析正弦特性条纹图像的提取原理,对不等占空比二元光栅进行了详细分析。不等占空比二元光栅 $g_n(x, y)$ 的傅里叶频谱 $G_n(f_x, f_y)$ 可表示为

$$G_n(f_x, f_y) = 255 P_{dc} T \sum_{j=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(P_{dc} T f_x) \cdot \delta(f_x - nq - j f_0), \quad (6)$$

式中 j 为阶数; $f_0 = 1/T$ 为光栅周期的倒数,即不等占空比光栅的基频; f_x, f_y 为频谱坐标; $\delta(\cdot)$ 为脉冲函数。在频域上选用适当的低通滤波器函数对该光栅频谱进行滤波,滤取出零频和正负一级基频频谱分量,即当 $j = -1, 0, 1$ 时,有

$$G'_n(f_x, f_y) = 255P_{dc}T \{ \delta(f_x - nq) + \text{sinc}(P_{dc}) \times [\delta(f_x - nq + f_0) + \delta(f_x - nq - f_0)] \}. \quad (7)$$

对(7)式进行逆傅里叶变换,得到光强分布为

$$g'_n(x, y) = 255P_{dc}T + 510P_{dc}T \times \text{sinc}(P_{dc}) \cos\left(\frac{2\pi}{T}x - \frac{2n\pi}{N}\right). \quad (8)$$

从(7)、(8)式可以看出,不等占空比二元光栅的占空比不等于 1/2,但其傅里叶频谱 $G'_n(f_x, f_y)$ 仍包含正弦条纹信息, $g'_n(x, y)$ 显示了正弦条纹特性。

利用所提不等占空比二元光栅编码方法生成了一帧占空比为 1/N 的二元光栅条纹图像,对其进行

正弦特性条纹图像提取的完整操作过程如图 3 所示,其中 FFT 表示傅里叶变换,IFFT 表示逆傅里叶变换。由投影仪将该不等占空比二元光栅 ($N=5$) 投影到参考平面上,CMOS 相机采集相应条纹图像。对所采集图像进行傅里叶变换得到其频谱信息,从其频谱分布图中可以看出存在多阶高次谐波,通过选择适当滤波器去除高次谐波成分,提取出完整的正弦信息成分,即得到只包含零频和正负一级频谱成分的频谱分布图。对滤波后的频谱进行逆傅里叶变换,得到具有正弦分布特性的条纹图像。

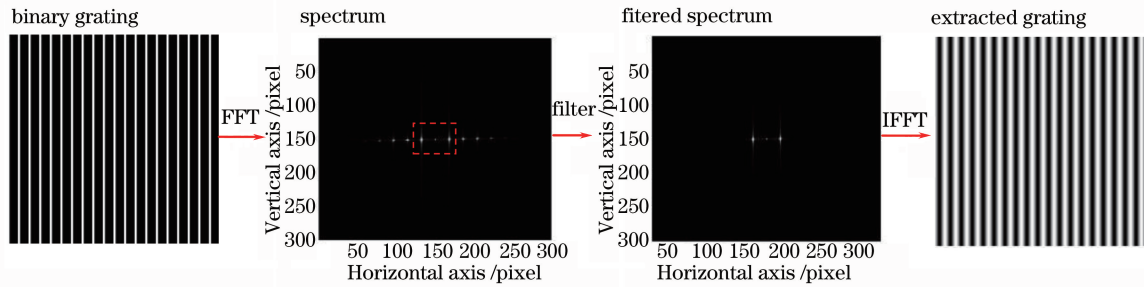


图 3 正弦分布条纹的完整提取过程

Fig. 3 Complete extraction process of sinusoidal distribution pattern

为了实现 N 步相移算法,按照图 3 所示过程,可从 N 帧相邻相移量为 $1/N$ 个周期的不等占空比二元光栅条纹图像中提取出相移量为 $1/N$ 个周期的正弦分布特性条纹图像。图 4(a)所示为采用该不等占空比二元编码方法生成的两帧相邻二值光栅 I1 和 I2,其周期为 15,占空比为 1/5,相移量为 3。图 4(b)所示为从该两帧光栅提取的一行剖面灰度分布图。利用图 3 所示过程对 I1 和 I2 提取出具有正弦分布特性的光栅 S1 和 S2,如图 4(c)所示,从其提取的一行剖面灰度分布如图 4(d)所示。可以看出,S1 和 S2 的灰度分布具有正弦条纹特性信息,其相移量为 $2\pi/5$ 。该 N 帧相邻不等占空比二元光栅条纹图像之间的相移区域没有重叠,而是又完全连接、完整地覆盖了一个周期,为相位计算提供了完整的信息,所提取出的 N 帧正弦特性条纹图像仍保持了相邻相移量为 $2\pi/N$ 的特性。采用 N 步 PMP 相移算法对由低通滤波处理得到的正弦特性变形条纹图像进行计算,从而得到相位分布,再根据相位-高度映射关系重建出被测物体的三维高度信息。

4 实验与结果分析

为了验证所提测量方法的可行性和有效性,利用该方法对实际物体进行了测量,实验装置系统如

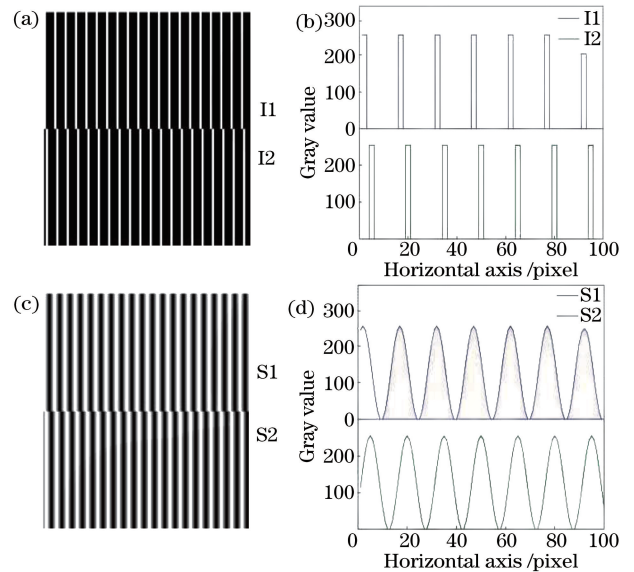


图 4 光栅相移量。(a)二元光栅 I1、I2; (b) I1、I2 的剖面灰度分布; (c)正弦光栅 S1、S2; (d) S1、S2 的剖面灰度分布
Fig. 4 Phase shift of gratings. (a) Binary gratings I1 and I2; (b) grayscale distribution profiles of I1 and I2; (c) sinusoidal gratings S1 and S2; (d) grayscale distribution profiles of S1 and S2

图 5 所示。通过计算机编码生成了周期为 15 pixel、占空比为 1/5、尺寸为 912 pixel×1140 pixel 的不等占空比二元光栅图像,采用五步 PMP 相移算法。

投影仪投影 8 位灰度光栅图像时刷新频率仅为 120 Hz, 投影二元光栅图像时刷新频率为 4225 Hz。

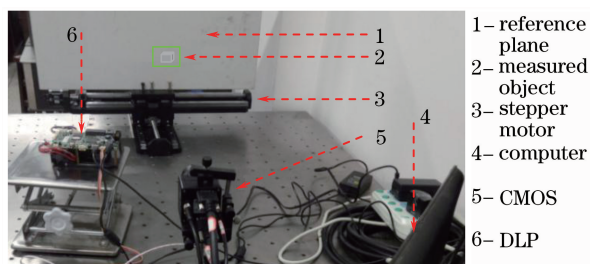


图 5 实验装置系统图

Fig. 5 Schematic of experimental setup

首先, 利用投影的不等占空比二元光栅对图 6 所示的心形模型物体进行了测量, 采集对应变形图像以进行三维面形重建, 其详细过程如图 7 所示。与对参考平面变形条纹图像进行正弦条纹特性图像提取的过程相同, 图 7(a) 所示为 CMOS 相机采集到的一帧变形条纹图像 I , 图 7(b) 所示为 I 的频谱成分分布图。可以看出, 变形条纹图像中各级频谱分量清晰可见, 1 级和 2 级频谱混叠程度较低, 选择特

定低通滤波器, 可完整地滤取出零频和正负一级基频分量。在频域内采用滤波器, 可定量精确地选择频谱。图 7(c) 所示为滤波后进行逆傅里叶变换得到的具有正弦分布特性的变形条纹图像。采用 N 步 PMP 相移算法即可计算出相位分布, 如图 7(d) 所示, 再由相位-高度映射关系即可重建出被测物体的三维高度信息。



图 6 被测心形物体

Fig. 6 Measured heart-shaped object

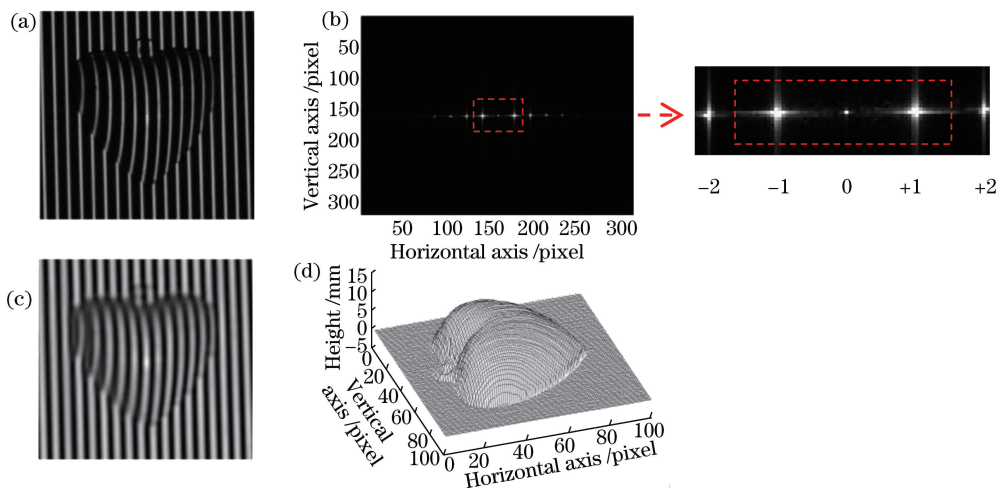


图 7 物体三维面形重建过程。(a) 二值变形条纹图像 I ; (b) I 的频谱分布;

(c) 提取得到的正弦变形条纹图像; (d) 重建三维面形

Fig. 7 Reconstruction of 3D shape of object. (a) Binary deformed image of I ; (b) spectral distribution of I ;

(c) sinusoidal deformed image obtained by extraction; (d) reconstruction of 3D shape

为了进一步对所提方法的测量精度进行分析, 分别采用所提方法、传统 PMP 相移算法与 FTP 算法进行了测量验证实验, 三维面形重建的结果分别如图 8(a)、(b)、(c) 所示。图 8(d)、(e)、(f) 所示分别为其对应的第 280 行剖面分布图。FTP 只采集一帧变形条纹图像且滤波后只有单一基频信息, 从图 8(f) 可以看出, FTP 恢复出心形物体的“耳朵”细节部分丢失、面形被平滑。所提方法与传统 PMP 相移算法恢复出的面形中较好地保留了这一细节部

分, 所提方法恢复出心形物体的面形轮廓分明、“耳朵”细节信息完整。从所采集的 N 帧不等占空比二元光栅变形条纹图像中可以看出, 提取的变形条纹图像包含完整的正弦特性条纹信息, 因此其重建结果精度较高, 接近传统 PMP 相移算法的。

对已知高度分别为 5, 12, 17 mm 的平面进行了测量, 通过恢复其具体高度来验证所提方法的准确性和重复性。表 1 列出了已知平面的真实高度 h , 分别由所提方法(Pro)、传统 PMP 相移算法和 FTP

算法恢复出的平面的平均高度 h_{avg} 、平均绝对误差 (MAE)和均方根误差(RMS)。可以看出,所提方法的测量精度高于 FTP 方法的,而重复精度高于传统

PMP 方法的,这是由于二元光栅有效消除了投影仪伽玛非线性对正弦光栅灰度的影响。所提方法结合了传统 PMP 方法与 FTP 方法的优点。

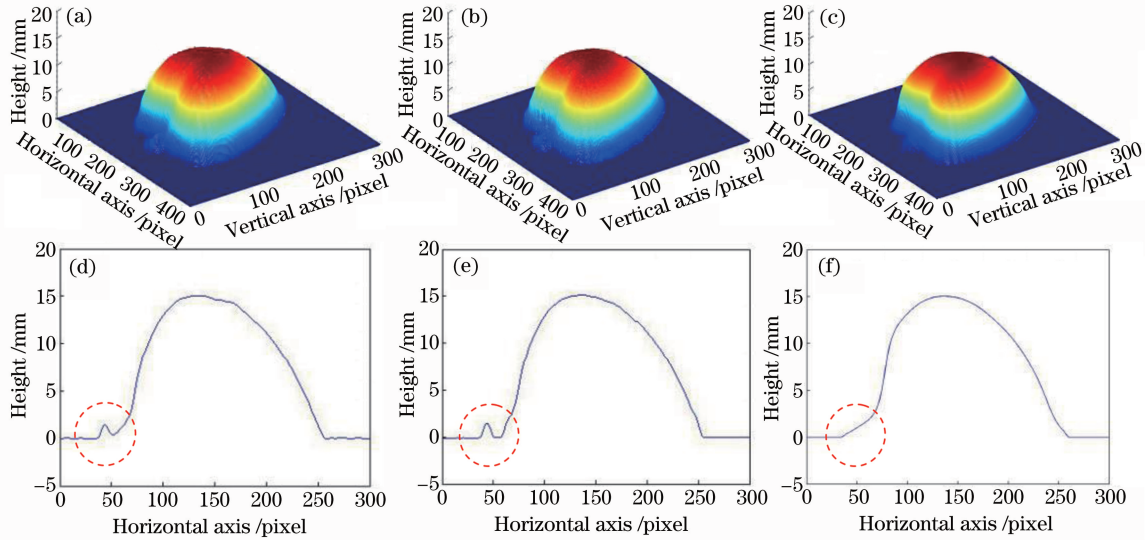


图 8 重建结果。(a)所提方法;(b)传统 PMP 方法;(c) FTP 方法;
(d)图 8(a)剖面分布;(e)图 8(b)剖面分布;(f)图 8(c)剖面分布

Fig. 8 Reconstruction results. (a) Proposed method; (b) traditional PMP method; (c) FTP method;
(d) distribution profile of Fig. 8(a); (e) distribution profile of Fig. 8(b); (f) distribution profile of Fig. 8(c)

表 1 已知高度平面的测量结果

Table 1 Measurement results of known height planes

h	h_{avg}			MAE			RMS		
	PMP	Pro	FTP	PMP	Pro	FTP	PMP	Pro	FTP
5	5.01	4.98	5.03	0.05	0.07	0.10	0.09	0.06	0.05
12	12.01	12.01	12.05	0.09	0.08	0.14	0.11	0.08	0.06
17	16.98	17.03	16.96	0.07	0.08	0.12	0.11	0.07	0.05

5 结 论

提出了一种新的不等占空比二元光栅的 PMP 方法。投影不等占空比二元光栅时不要求投影系统离焦,其傅里叶频谱包含完整的正弦条纹信息,避免了实际数字投影系统的伽玛非线性响应影响,有效提高了投影系统的刷新频率,相机获得的光场均匀性更好。对所提方法和传统 PMP 方法以及罗奇光栅离焦投影 FTP 方法恢复相同物体的结果进行了比较,发现所提方法结合了传统 PMP 方法与 FTP 方法的优点,其测量精度高于 FTP 方法的,重复精度高于传统 PMP 方法的。通过恢复心形物体的面形验证了该方法的有效性,实验测量了多个已知高度的平面,验证了所提方法的准确性和可重复性。若使用彩色编码方式生成不等占空比二元光栅,则生成光栅不存在颜色混叠,可减小颜色串扰对采集图像的影响。利用该方法测量时约束性减小,可用

于实时的三维面形测量,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

[1] Xu X F, Cao Y P, Peng K, *et al.* On-line three-dimensional measurement based on phase prediction[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(6): 0612005.
许幸芬, 曹益平, 彭旷, 等. 基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法[J]. 光学学报, 2016, 36(6): 0612005.

[2] Zhang E, Laufer J, Beard P. Backward-mode multiwavelength photoacoustic scanner using a planar Fabry-Perot polymer film ultrasound sensor for high-resolution three-dimensional imaging of biological tissues[J]. Applied Optics, 2008, 47(4): 561-577.

[3] Chen L C, Chang Y W. High accuracy confocal full-field 3-D surface profilometry for micro lenses using a digital fringe projection strategy[J]. Key Engineering Materials, 2008, 364/365/366: 113-116.

- [4] Zhang S, Yau S T. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method[J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 2644-2649.
- [5] Gorpas D, Politopoulos K, Yova D. A binocular machine vision system for three-dimensional surface measurement of small objects[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2007, 31(8): 625-637.
- [6] Peng K, Cao Y P, Wu Y C, *et al.* On-line three-dimensional measurement method based on low modulation feature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0708006.
彭旷, 曹益平, 武迎春, 等. 基于低调制度特征的在线三维测量方法 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0708006.
- [7] Saxena M, Eluru G, Gorthi S S. Structured illumination microscopy[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 241-275.
- [8] Gong Y, Zhang S. Ultrafast 3-D shape measurement with an off-the-shelf DLP projector[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 19743-19754.
- [9] Su X Y, Zhou W S. Phase-measuring profilometry using defocused projection of the Ronchi grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1993, 20(4): 8-16.
苏显渝, 周文胜. 采用罗奇光栅离焦投影的位相测量轮廓术[J]. *光电工程*, 1993, 20(4): 8-16.
- [10] Tian Z X, Chen W J, Su X Y. Method for improving accuracy and measurement speed of PMP using error diffusion binary encoded sinusoidal grating [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 121201.
田紫霞, 陈文静, 苏显渝. 采用二元编码的正弦光栅提高PMP测量速度和精度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 121201.
- [11] Li Y, Cao Y P, Huang Z F, *et al.* A three dimensional on-line measurement method based on five unequal steps phase shifting[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(21/22): 4285-4289.
- [12] Sun S J, Zhai A P, Cao Y P. A fast algorithm for obtaining 3D shape and texture information of objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(3): 0312001.
孙士杰, 翟爱平, 曹益平. 一种快速获取物体三维形貌和纹理信息的算法[J]. *光学学报*, 2016, 36(3): 0312001.
- [13] Liu H C, Halioua M, Srinivasan V. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(18): 3105.
- [14] Judge T R, Bryanston-Cross P J. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1994, 21(4): 199-239.
- [15] Su X Y. Phase unwrapping techniques for 3D shape measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2886: 460-465.
- [16] Zhang H Q, Guo R H, Jiang C, *et al.* Improved path-independent phase unwrapping algorithm based on total-variation minimum denoising [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 121202.
张辉钦, 郭仁慧, 蒋超, 等. 改进的基于全变分最小去噪的路径无关相位解包算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121202.
- [17] Zhao W C, Lu Y G, Zhang T. Phase gradient correlation based quality map for two dimensional phase unwrapping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s2): 149-154.
赵万成, 路元刚, 张婷. 用于二维相位展开的相位梯度相关质量图[J]. *光学学报*, 2009, 29(s2): 149-154.
- [18] Li W S, Su L K, Su X Y. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(6): 792-796.
李万松, 苏礼坤, 苏显渝. 相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2000, 20(6): 792-796.
- [19] Zhou W S, Su X Y. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. *Optica Acta International of Optics*, 1994, 41(1): 89-94.
- [20] Zhang S. High-resolution 3D profilometry with binary phase-shifting methods[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(12): 1753-1757.
- [21] Ayubi G A, Ayubi J A, Di M J, *et al.* Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(21): 3682-3684.
- [22] Zhao L W, Da F P, Zheng D L. Method for binary grating generation using defocused projection for three-dimensional measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(8): 0812005.
赵立伟, 达飞鹏, 郑东亮. 离焦投影三维测量的二值光栅生成方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(8): 0812005.