

doi: 10.3788/gzxb20164501.0112003

三维形貌及颜色纹理的快速获取方法

李海艳¹, 李勇^{1,2}, 王辉^{1,2}

(1 浙江师范大学 信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

(2 浙江师范大学 浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004)

摘要:为了在黑白摄像机中快速获取场景的三维形貌与颜色纹理,提出了绝对相位测量结合主动彩色照明的方法.首先向物体投影并拍摄两幅相移为 $1/3$ 周期的条纹和一幅周期有微小差别的条纹图;然后分别向物体投射光强为给定强度的白、红及绿照明光,并拍摄图像.用改进的相移法求解第四幅图像与第一、第二幅变形条纹图中的相位;用改进的傅里叶变换法求解第四幅图像及第三幅变形条纹图中的相位;然后得出绝对相位值.最后利用第四幅图像与第五和第六幅图像求出场景反射的蓝色分量,并根据色度学原理恢复出场景的颜色纹理.实验表明,该方法在保证三维测量准确度的同时获得了高质量的颜色纹理,实现了 30fps 的三维数据及颜色纹理采集速度.

关键词: 机器视觉; 光学测量; 条纹投影; 颜色纹理; 绝对相位

中图分类号: TP247 ; TN206

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0112003-5

Method for Fast Acquiring Three-dimensional Shape and Color Texture

LI Hai-yan¹, LI Yong^{1,2}, WANG Hui^{1,2}

(1 Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

(2 Key Laboratory of Optical Information Detection and Display Technology Research in Zhejiang Province, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: A method for fast capturing three-dimensional shape and color texture with the black and white camera was proposed based on the absolute phase measuring and active color lighting. First, two stripes with $1/3$ period phase shift and one stripe whose period is slightly different with the two stripes are projected. The deformed stripes are captured simultaneously. Then, patterns with the specific color of white, red and green are projected on the objects respectively and the images are captured. Second, by using the fourth image, the first and the second deformed stripes, phase distribution of the stripe is obtained with improved phase shifting method. The phase distribution of the other stripe is obtained with improved Fourier transform method by using the fourth image and the third deformed stripe. Then, the absolute phase distribution is obtained. Finally, by using the fourth image, the fifth and sixth image, the reflected green component of scene is obtained. According to the principle of the colorimetry, the color texture of scene is retrieved. The experimental results show that the high quality color texture and the high measurement accuracy for three-dimensional shape can be achieved simultaneously with the proposed method. The recording speed of the three-dimensional data and the color texture can reach to 30 fps.

Key words: Machine vision; Optical measurement; Stripe projection; Color texture; Absolute phase

OCIS Codes: 120.4630; 110.6880; 120.5050; 150.0155

0 引言

条纹投影三维测量系统^[1]具有测量速度快^[2]、非

接触、自动化程度高等优点,在产品质量检测、文物保护^[3]、医学诊断及影视娱乐等方面有广泛应用^[4-5].在实际应用中,不仅需要获取物体三维信息,而且更希望

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11374267)资助

第一作者:李海艳(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学三维测量. Email:746449406@qq.com

导师(通讯作者):李勇(1972-),男,教授,博士,主要研究方向为数字全息、光学三维测量及三维显示. Email:liyong@zjnu.edu.cn

收稿日期:2015-08-10;录用日期:2015-10-29

得到物体表面的颜色纹理信息^[6-7]. 目前大部分光学三维测量系统采用独立于系统之外的相机来获取颜色纹理^[8], 使用时需要标定相机与三维测量系统之间的空间位置关系, 通过坐标变换才能实现纹理与三维坐标之间的匹配, 这种方案增加了系统成本及复杂性. 另外一部分光学三维测量系统使用单片式彩色相机进行三维测量及颜色纹理获取^[10-11], 由于其采用插值的方法获得颜色信息, 使三维测量准确度降低. 与采用彩色相机与黑白相机的方案相比, 在同等条件下, 三维数据信噪比较低. 也有采用黑白相机, 通过切换滤色片实现三维信息及颜色纹理获取的^[9], 但由于采用机械方式切换, 不利于提高测量速度.

本文根据条纹投影高速三维测量^[12-13]中采用的数字投影仪的特点, 提出了基于绝对相位测量^[14]及主动颜色投影^[15]的高速三维信息及表面颜色获取方法. 该方法在保证三维测量准确度的同时获得了高质量的颜色纹理, 实现了视频速度的三维数据及颜色纹理采集.

1 原理

条纹投影三维测量系统如图 1. 测量时投影仪将正弦条纹投影到被测物体上, 同时相机拍摄被测物体表面形貌调制的变形条纹图像; 然后利用相位解调方法, 从拍摄到的变形条纹图中解调出相位; 最后由相位及对应的像素坐标恢复出物体表面三维形貌.

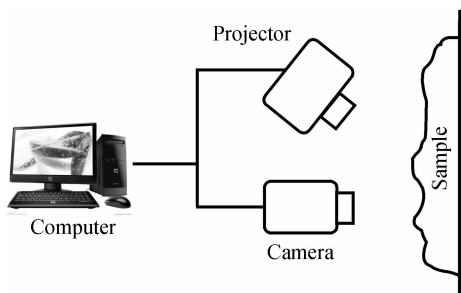


图 1 三维测量系统

Fig. 1 Three-dimensional measurement system

1.1 改进的三步相移法

设拍摄的第一幅变形条纹光场分布为

$$I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi_1(x, y) \quad (1)$$

式中, $A(x, y)$ 是背景光强分布, $B(x, y)$ 是条纹对比度, $\varphi_1(x, y)$ 是被物体形貌调制的相位分布.

第二幅变形条纹光场分布为

$$I_2(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cdot \cos [\varphi_1(x, y) + 2\pi/3] \quad (2)$$

由式(2)可以看出, 只要获取背景光强分布 $A(x, y)$, 就可以求解相位及对比度. 因此, 投影一幅与条纹背景对应的白色图案, 拍摄到的图像光场分布为

$$I_4(x, y) = A(x, y) = B(x, y) + A_0(x, y) \quad (3)$$

式中 $A_0(x, y)$ 为环境光照分量. 那么, 相位可以由式

(4)求解, 对比度可以由式(5)求解, 即

$$\varphi_1(x, y) = \arctan \left[\frac{(I_1 - I_4) \cos 2\pi/3 - I_2 + I_4}{(I_1 - I_4) \sin 2\pi/3} \right] \quad (4)$$

$$B(x, y) = \sqrt{\left(\frac{(I_1 - I_4) \cos 2\pi/3 - I_2 + I_4}{\sin 2\pi/3} \right)^2 + (I_1 - I_4)^2} \quad (5)$$

1.2 改进的傅里叶变换法

设拍摄的第二套条纹光场分布为

$$I_3(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \varphi_2(x, y) \quad (6)$$

式中 $\varphi_2(x, y)$ 是被物体形貌调制的相位分布. 传统的傅里叶变换法只需将式(6)进行傅里叶变换, 滤波再逆变换, 最后求出相位. 然而, 由于背景光强的影响, 滤波器的下限频率无法设置到 0, 其测量范围受到限制^[16-17]. 因此, 为扩展测量范围, 将式(6)减去式(3)得

$$I'_3(x, y) = B(x, y) [\cos \varphi_2(x, y)] \quad (7)$$

这样, 消除了背景光强. 对式(7)进行一维傅里叶变换, 取频谱的右半部分再逆傅里叶变换, 计算辐角就可以得到相位分布 $\varphi_2(x, y)$.

1.3 绝对相位获取原理

设两套条纹的周期分别为 p_1 和 p_2 ($p_1 < p_2$), 关系为

$$\varphi_1(u, v) = 2\pi \frac{1}{p_1} u \quad (8)$$

$$\varphi_2(u, v) = 2\pi \frac{1}{p_2} u \quad (9)$$

式中 u, v 为投影仪像素坐标. 式(8)减去式(9)得

$$\Delta\varphi(u, v) = \varphi_1(u, v) - \varphi_2(u, v) = 2\pi \left(\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) u = 2\pi \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1 p_2} \right) u \quad (10)$$

则合成的虚拟条纹周期为 $p = p_1 p_2 / (p_2 - p_1)$. 通过选择合适的周期 p_1, p_2 , 使测量视场内只有一个周期的合成条纹, 这样合成条纹就不需要进行相位展开. 以该条纹的相位来确定短周期条纹的级次 N_1, N_2 , 从而实现绝对相位测量. 在初相位相同时, 同一位置不同周期条纹的相位与周期成反比关系, 则条纹级次可以表示为

$$N_1 = \text{round} \left(\frac{p_2 \Delta\varphi(x, y) - \varphi_1(x, y)}{2\pi} \right) \quad (11)$$

$$N_2 = \text{round} \left(\frac{p_1 \Delta\varphi(x, y) - \varphi_2(x, y)}{2\pi} \right) \quad (12)$$

式中 $\text{round}(\cdot)$ 表示四舍五入取整, 则绝对相位 $\varphi_{1u}(x, y), \varphi_{2u}(x, y)$ 分别为

$$\varphi_{1u}(x, y) = \varphi_1(x, y) + 2\pi N_1 \quad (13)$$

$$\varphi_{2u}(x, y) = \varphi_2(x, y) + 2\pi N_2 \quad (14)$$

1.4 颜色纹理恢复原理

设红色及绿色图案照明下拍摄的图像分别为

$$I_r(x, y) = I_5(x, y) = A_r(x, y) + A_0(x, y) \quad (15)$$

$$I_g(x, y) = I_6(x, y) = A_g(x, y) + A_0(x, y) \quad (16)$$

由于图像传感器上获得的光强为各颜色光强的叠

加, 因此在设计投影条纹时设定条纹的背景光强与对比度相等, 则由于环境光照造成的拍摄图像背景光强可以表示为

$$A_0(x, y) = I_1(x, y) - B(x, y) \quad (17)$$

物体表面反射的红、绿、蓝三色分量分别为

$$I'_r(x, y) = I_5(x, y) - A_0(x, y) \quad (18)$$

$$I'_g(x, y) = I_6(x, y) - A_0(x, y) \quad (19)$$

$$I'_b(x, y) = 2I_4(x, y) - I_5(x, y) - I_6(x, y) \quad (20)$$

则经过白平衡校正后, 物体的颜色纹理红、绿、蓝三分量分别表示为

$$R(x, y) = K_r I'_r(x, y) \quad (21)$$

$$G(x, y) = K_g I'_g(x, y) \quad (22)$$

$$B(x, y) = K_b I'_b(x, y) \quad (23)$$

式中 K_r, K_g, K_b 分别为红、绿、蓝三分量的增益系数, 保证拍摄标准白色物体时正确恢复白色. 其获取方法与彩色摄像机白平衡校正方法相同, 即拍摄标准白色图像, 以其中一个颜色分量(如蓝色)为基准计算比例, 表示为

$$K_r = \frac{b}{r} \quad (24)$$

$$K_g = \frac{b}{g} \quad (25)$$

$$K_b = 1 \quad (26)$$

式中 r, g, b 分别为图像中标准白色区域红、绿、蓝三分量的光强.

2 实验及结果分析

2.1 实验系统

根据图 1 的系统结构, 设计并搭建了高速三维测量系统. 其中投影仪采用 Lightcrafter 4500, 投影速度为 180 fps, 摄像机分辨率为 640×480 像素, 拍摄速度为 180 fps; 摄像机与投影仪同步工作, 投影条纹周期 $p_1 = 30$ 像素, $p_2 = 31$ 像素, 投影图案数为 6 幅, 三维数据及彩色纹理的记录速度为 30 帧/秒, 图 2 为实验系统工作实物图.



图 2 实验测量系统

Fig. 2 Experimental measurement system

2.2 实验结果及分析

将印有彩色棋盘格的纸贴在平板上进行测量. 图 3(a)、(b)为具有 $1/3$ 周期相移的两幅短周期变形条纹图, (c)为长周期变形条纹图, (d)、(e)及(f)分别为被测物在白光、红光及绿光照明下拍摄的图像. 利用拍摄的图像, 根据式(4)求解短周期变形条纹相位, 如图 4(a); 根据改进的傅里叶变换法求出的长周期变形条纹相位如图 4(b); 由式(10)合成的虚拟条纹相位如图 4(c); 由式(13)求出的绝对相位如图 4(d); 由式(20)求出的蓝色光强分量如图 4(e); 恢复的颜色纹理如图 4(f). 从图 4(f)中可以看出, 颜色纹理得到了很好地恢复. 在实验中发现, 在对比度低的地方条纹级次错误较多, 且这些错误为孤立的小区域. 因此, 设计程序对绝对相位图

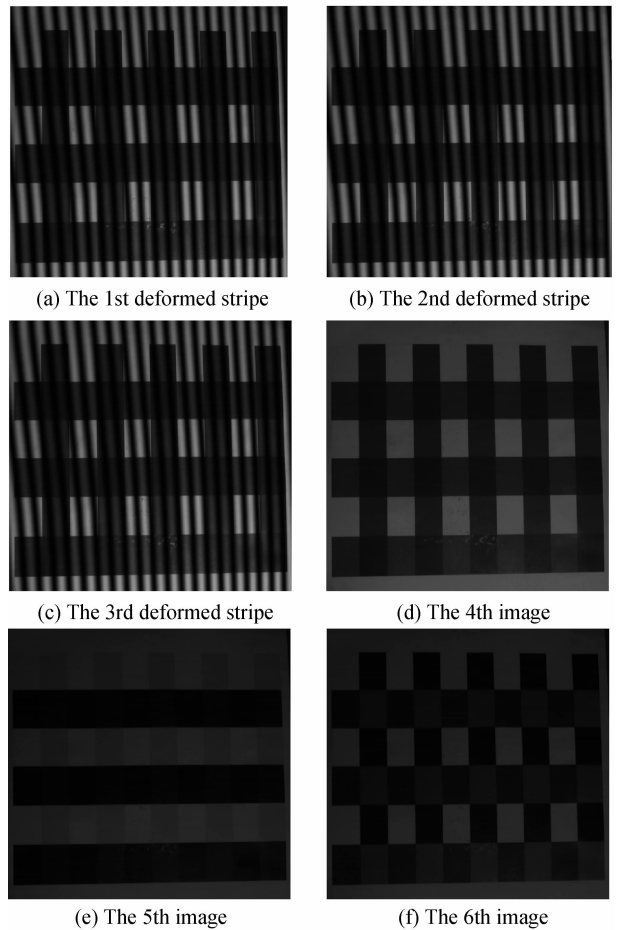
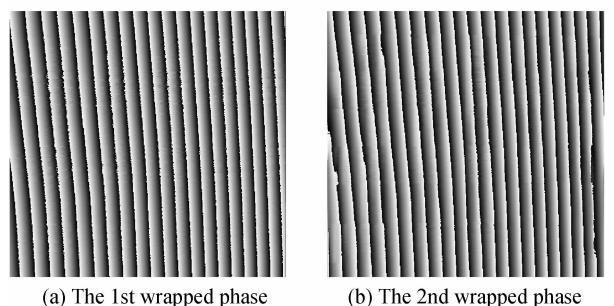


图 3 彩色棋盘格实验图像

Fig. 3 Images of color chess board measurement



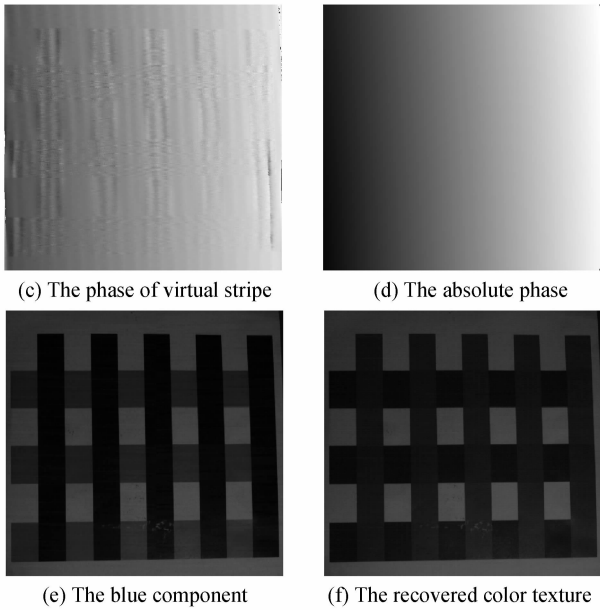


图 4 彩色棋盘格实验结果

Fig. 4 Experimental results of color chess board

进行分割,并统计这些孤立区域的尺寸,通过设置阈值的方法识别条纹级次错误区域,并进行校正.由图 4 (d)可以看出,条纹级次错误得到了很好的校正.

在与黑白摄像机相同的条件下采用单片式彩色摄像机进行了对比实验.图 5(a)为采用单片式彩色摄像机拍摄的彩色棋盘格局部放大图,图 5(b)为采用黑白摄像机拍摄的彩色棋盘格相同位置放大图.从图像上可以看出(a)的噪音较大,边缘较模糊,并且存在由于彩色像素排列结构造成的马赛克现象;(b)的噪音小,边缘较清晰.又分别计算了两幅图像的信噪比,采用彩色摄像机的为 39dB,采用黑白摄像机的为 45dB,其信噪比为彩色摄像机的 2 倍.可以看出,本文方法获得了更好的结果.

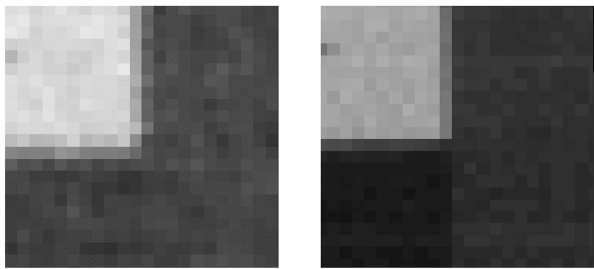


图 5 彩色棋盘格实验结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental results of color chessboard

实验中用模特人头进行了对比.图 6(a)为彩色摄像机拍摄的图像,(b)为黑白摄像机恢复出的图像,(c)为(a)的局部放大图,(d)为(b)的局部放大图.可以看出,本文方法获得了更清晰的细节.

对表情变化的人脸进行了实验,结果见图 7,图 7 为序列图像中的一套数据,其中图 7(a)、(b)为具有 1/3

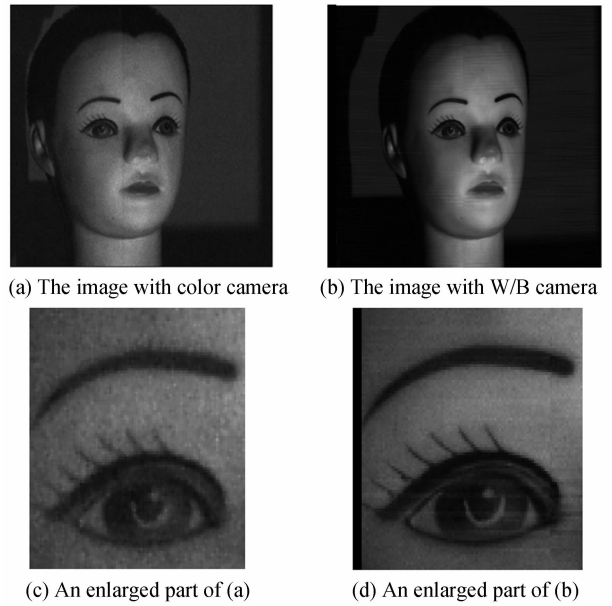


图 6 模特人头对比实验

Fig. 6 Comparison of experimental results of model head

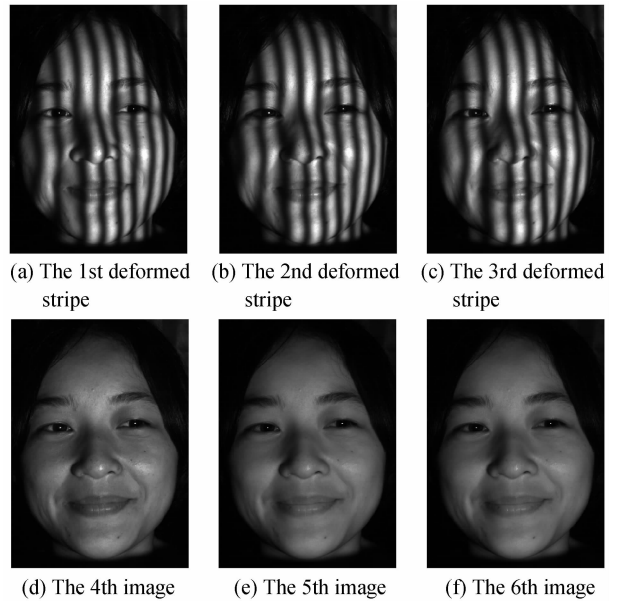
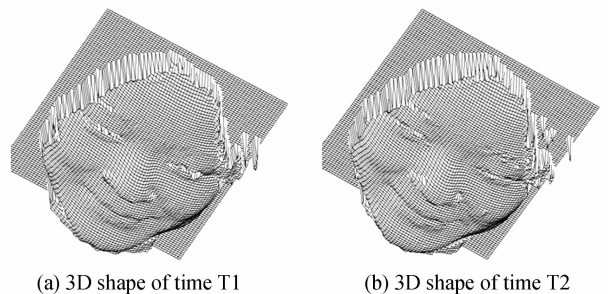


图 7 动态人脸测量图像序列中的一套数据

Fig. 7 A set images of dynamic face measurement sequence 周期相移的两幅短周期变形条纹图,(c)为长周期变形条纹,(d)、(e)及(f)分别为白光、红光及绿光照明下拍摄的图像.对采集的数据进行处理,得到了动态三维数据及颜色纹理序列.图 8 为三维序列中的 4 幅数据,图 9



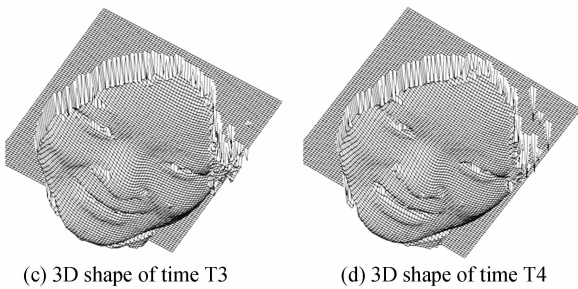


图8 重建的三维序列中的部分数据

Fig. 8 Selected data of reconstructed 3D sequence



图9 恢复的一幅人脸颜色纹理

Fig. 9 One recovered color texture of face

为恢复的颜色纹理序列中的一幅。采用本文所提的方法及设计的实验系统,实现了动态三维数据及颜色纹理的连续采集,采集速度达到 30 fps。

3 结论

在条纹投影高速三维测量中,为在不降低三维信息采集准确度及速度的情况下采集颜色纹理,考虑数字投影仪的特点,提出采用主动颜色投影及绝对相位测量的方法进行动态三维信息及颜色纹理采集。通过投影一幅白色图案,对三步相移及傅里叶变换法进行了改进。该方法不增加相移法的投影图案数,同时又扩展了傅里叶变换法的测量范围。进一步,该图案又用于颜色纹理的恢复,只需再投影 2 幅颜色图案就能获取被测物体颜色,减少了获取颜色纹理所需的投影图案数。该方法采用黑白相机进行三维及颜色信息采集,保证了三维测量准确度,并且在相同像素下,具有比单片式彩色相机更高的颜色纹理分辨率。

参考文献

- [1] GENG J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, **3**(2): 128-160.
- [2] LI B, WANG Y, DAI J, *et al.* Some recent advances on superfast 3D shape measurement with digital binary defocusing techniques[J]. *Optics and Lasers Engineering*, 2014, **54**: 236-246.
- [3] LI A-meng, PENG Xiang, YIN Yong-kai, *et al.* Optical 3D digitizer for photorealistic imaging of moveable cultural heritage[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(12): 1421-1429.
李阿蒙, 彭翔, 殷永凯, 等. 用于可移动文物真实感成像的光

- 学三维数字仪[J]. *光子学报*, 2013, **42**(12): 1421-1429.
- [4] GAO Peng, LI Yong, TU Yan-shuai, *et al.* On binarization methods of sinusoidal grating in 3D measurement base on defocused fringe projection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512006.
高鹏, 李勇, 涂颜帅, 等. 离焦条纹投影三维测量中正弦光栅的二值化方法研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 0512006.
- [5] LOHRY W, ZHANG S. Genetic method to optimize binary dithering technique for high-quality fringe generation[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(4): 540-542.
- [6] LI Yong, LI Hai-yan, SHI Yi-le, *et al.* Practical method for computer-generated hologram of real-existing scene with large viewing angle [C]. // *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging*. Optical Society of America, 2015, Paper # DW2A.23.
- [7] 王辉. 数字化全息三维显示与检测[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [8] PAN Ou, LI Bei-wen, WANG Ya-jun, *et al.* Flexible realtime natural 2D color and 3D shape measurement[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(14): 16726-16741.
- [9] Non-contact 3D digitizer vivid 910Ni-910 [M/OL]. 2001-2006, <http://www.konicaminolta.com/instruments/download/instruction-manual/3d/ppf/vivid-9/0-vi-910-insflumention-eng.pdf>.
- [10] LI Yong, LU Shi-jiang, SONG Fang, *et al.* Three-dimensional capture and display of real scene with video speed [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(11): 1706-1710.
李勇, 卢世江, 宋芳, 等. 真实场景的三维视频采集及显示[J]. *光子学报*, 2011, **40**(11): 1706-1710.
- [11] ZHANG Zong-hua, PENG Xiang, HU Xiao-tang. A new color 3-D optical imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 994-998.
张宗华, 彭翔, 胡小唐. 一种新型彩色三维光学成像系统[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 994-998.
- [12] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can, CHEN Wen-jing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, **41**(2): 0209001.
- [13] LI Yong, ZHAO Cui-fang, QIAN Yi-xian, *et al.* High-speed and dense three-dimensional surface acquisition using defocused binary patterns for spatially isolated objects[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(21): 21635-21642.
- [14] HAO Yu-dong, ZHAO Yang, LI Da-cheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518-1522.
郝煜栋, 赵洋, 李达成. 非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1518-1522.
- [15] LI Yong, SU Xian-yu. A 3-D sensing system with color texture based on phase measuring profilometry[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.
- [16] MAO Xian-fu, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu. Improved Fourier-transform profilometry[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(5): 664-668.
- [17] SU Xian-yu, CHEN Wen-jing. Fourier transform profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**(5): 263-284.