

基于波长分离的结构光采集系统

柳 迪 姚振宁 李海峰* 刘向东 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 彩色结构光系统利用彩色投影机与摄像机中的三个颜色通道,同时投影和采集三幅条纹图像,拍摄一次即可实现形貌测量,但其无法测量彩色物体,通道间的串扰也降低了精度。提出了一种新的系统,利用三个摄像机采集三个通道,并利用严格设计的分色棱镜和滤光片,消除了彩色结构光系统中常见的波长通道间的颜色串扰。基于三步位移法,分析了拍摄两次图像获得彩色物体形貌的过程,并针对该系统提出了校正方法。利用上述方法,拍摄两次即可得到彩色的物体形貌。

关键词 测量;相位测量轮廓术;结构光;彩色编码;颜色分离

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0612003

Structured Light Acquisition System Based on Waveband Separation

Liu Di Yao Zhenning Li Haifeng Liu Xiangdong Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract Color-coded structural light system can reconstruct the 3D contour of the object in one shot by the using of three different patterns embedded into three color channels of the projector and camera. However, it cannot reconstruct a color object, and the crosstalks between different channels lower the accuracy. A novel color-coded structural light system is presented. By using multiple cameras and well designed beam splitter prism and filter, color crosstalk between different color channels in color-coded structural light system is eliminated. A process of two-shot acquiring color object prefile based on three-step phase measurement profilometry is analysed. Color calibration method is discussed to improve the system's accuracy. After all the procedures, a colorful object can be reconstructed in two shots, which combines the speed and accuracy.

Key words measurement; phase measurement profilometry; structural light; color-coded; color separation

OCIS codes 120.5050; 280.4788; 100.4994

1 引 言

结构光投影(SLI)^[1,2]被广泛运用于三维传感和三维测量领域中,人们提出了各种各样的结构光编码与解码方法来获得高精度以及高速度的三维形貌^[3~7]。基于结构光的形貌测量,实际上是一个编码和解码的过程,不管是速度还是精度,都和一次采集中所能收集到的有效数据容量密切相关。为了提高数据容量,人们很自然地就会想到采用彩色投影和传感器进行采集,利用彩色系统的三个颜色通道,

扩展一次采集所能得到的数据容量^[8,9]。所采用的编码方法不尽相同,Pan等^[10,11]分别从格雷码的角度提出了彩色编码方法,Zhang等^[12,13]则分别利用正弦条纹和傅里叶变换获取高度信息,而利用颜色编码解决相位截断的问题。Huang等^[9]利用相位轮廓测量术中的三步位移法,将三幅位移图像加载到了三个颜色通道中,在一次测量中获得了物体的轮廓,但是其无法测量彩色物体,并且通道间的串扰也影响了测量精度。

收稿日期: 2011-12-16; 收到修改稿日期: 2012-02-12

基金项目: 国家 973 计划(2009CB320803)、国家自然科学基金(61177015)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 柳 迪(1988—),女,硕士研究生,主要从事三维显示与三维测量方面的研究。

E-mail: kancy_500@hotmail.com

导师简介: 刘向东(1963—),男,博士,教授,主要从事光学显示技术方面的研究。E-mail: xdliu@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn

对于利用彩色编码采集的系统来讲:1)被测物体的颜色变化会干扰投影机所投射的颜色,使得测量无法进行;2)红绿蓝三个通道间信号的串扰会影响测量的精度。针对第一个问题,普遍采用的做法是再拍摄另一幅均匀照明的图像来获取物体的反射率,从拍摄一幅变为拍摄两幅^[11]。而针对第二个问题,一个比较普遍采用的方法是从颜色矫正的角度,测定通道间的串扰,通过色彩变换消除串扰^[14]。本文主要针对第二个问题,利用两级分光系统和多个

摄像机,实现了无串扰的多通道采集,并基于三步位移法,对彩色物体实现了形貌采集。

2 基本原理

2.1 典型的相位测量轮廓术

图1是一种典型的基于相位测量轮廓术的结构光投影系统,投影机依次投出 N 幅正弦相移图像到待测物体上,其相移量为 $2\pi/N$,投影机投出的图像为

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p(x^p, y^p) + B^p(x^p, y^p) \cos\left(2\pi f_\phi y^p - \frac{2\pi n}{N}\right), \quad (1)$$

式中 (x^p, y^p) 是投影平面上的坐标, A^p 和 B^p 是两个常数,分别代表投影正弦图像的平均值和对比度, f_ϕ 是正弦图案的频率, n 代表图像序号, $n=1, 2, \dots, N$ 。

投影机将图案投影到物体上后被反射,不考虑背景光的影响,CCD所采集到的图像为

$$I_n(x, y) = R(x, y) \left\{ A(x, y) + B(x, y) \cos\left[2\pi f_\phi y^p + \phi(x, y) - \frac{2\pi n}{N}\right] \right\}, \quad (2)$$

式中 (x, y) 为像面坐标, $R(x, y)$ 为与被测面的反射率有关的变量, $\phi(x, y)$ 为与被测面高度相关的相位函数。求解后所得的相位函数为

$$\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \right], \quad (3)$$

可见,反射率 $R(x, y)$ 已经被消去,最后结果只和采集到的图像有关。 $\phi(x, y)$ 为一个取值范围在 $-\pi$ 到 π 之间的反正切函数,对它进行相位展开和高度变换等操作,就可以得到物体的高度信息。当 $N=3$ 时,将其称为三步相移法。

2.2 基于波长分离的彩色相位测量轮廓术

图2是基于波长分离的彩色结构光采集系统示意图。该系统以投影机和摄像机的红绿蓝(RGB)三个颜色通道为基础,可以同时投影和采集三个通道的信息。利用三步相移法为图像编码方法,将三步相移法的三帧相移图像分别加载在投影机的RGB三个通道内,这样在一帧彩色图像里就包括了3幅相移图像,分别为

$$I_r^p(x^p, y^p) = A^p + B^p \cos\left(2\pi f_\phi y^p - \frac{2\pi}{3}\right), \quad (4)$$

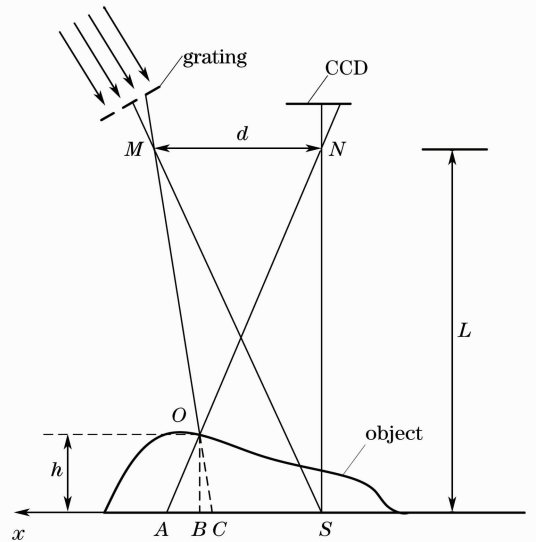


图1 典型相位测量轮廓术系统

Fig.1 Schematic diagram of a typical phase measurement profilometrical system

$$I_g^p(x^p, y^p) = A^p + B^p \cos\left(2\pi f_\phi y^p - \frac{4\pi}{3}\right), \quad (5)$$

$$I_b^p(x^p, y^p) = A^p + B^p \cos\left(2\pi f_\phi y^p - \frac{6\pi}{3}\right), \quad (6)$$

利用同样具有RGB三通道的彩色摄像机采集图像,得到彩色图像的RGB三通道图像分别为

$$I_r(x, y) = R_r(x, y) \left\{ A(x, y) + B(x, y) \cos\left[2\pi f_\phi y^p + \phi(x, y) - \frac{2\pi}{3}\right] \right\}, \quad (7)$$

$$I_g(x, y) = R_g(x, y) \left\{ A(x, y) + B(x, y) \cos \left[2\pi f_y y^p + \phi(x, y) - \frac{4\pi}{3} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$I_b(x, y) = R_b(x, y) \left\{ A(x, y) + B(x, y) \cos \left[2\pi f_y y^p + \phi(x, y) - \frac{6\pi}{3} \right] \right\}. \quad (9)$$

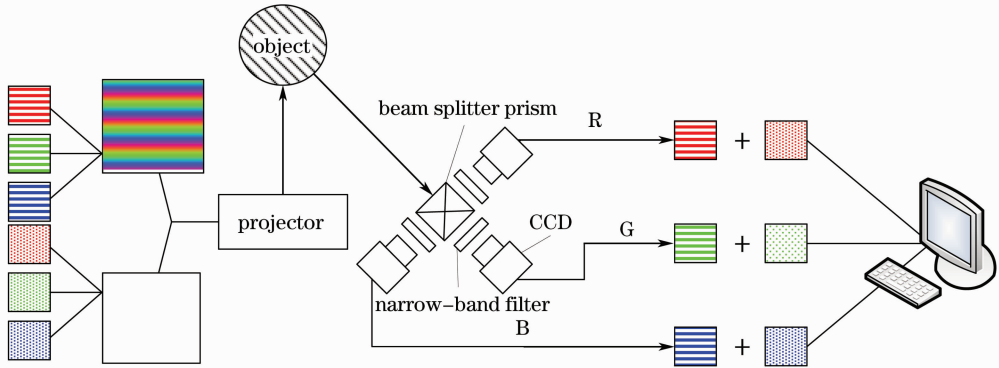


图2 基于波长分离的系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the system principle based on waveband separation

由于物体对于不同波长的光往往具有不同的反射率,因此上式里的反射率变成了三个不同的值,此时这个方程具有6个未知数,不可解。

在三维测量中,往往还要采集一幅具有物体纹理信息的灰度图作为三维模型的贴图,此时投影机投出的条纹为

$$I_{r0}^p(x^p, y^p) = A^p, \quad (10)$$

$$I_{g0}^p(x^p, y^p) = A^p, \quad (11)$$

$$I_{b0}^p(x^p, y^p) = A^p. \quad (12)$$

摄像机接收到的条纹为

$$I_{r0}(x, y) = R_r(x, y)A(x, y), \quad (13)$$

$$I_{g0}(x, y) = R_g(x, y)A(x, y), \quad (14)$$

$$I_{b0}(x, y) = R_b(x, y)A(x, y). \quad (15)$$

再利用这三幅图像,可以解得

$$\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{\sqrt{3} \left[\frac{I_r(x, y)}{I_{r0}(x, y)} - \frac{I_g(x, y)}{I_{g0}(x, y)} \right]}{2 \frac{I_b(x, y)}{I_{b0}(x, y)} - \frac{I_r(x, y)}{I_{r0}(x, y)} - \frac{I_g(x, y)}{I_{g0}(x, y)}} \right\}. \quad (16)$$

这样,仅需要拍摄两次图像,就可以同时实现对物体深度信息的采集,同时,(10)~(12)式所采集到的信息包含红绿蓝三个色彩通道的彩色纹理信息,可以方便地利用这一结果对重建后的三维物体进行纹理

贴图,从而得到更逼真的采集效果。

3 实验结果与分析

3.1 实验设备与通道分离

实验中采用普通商用投影机作为投影设备,具备24 bit的色彩空间和1024 pixel×768 pixel的分辨率。实验中采集了该投影机红绿蓝三个色彩通道的归一化光谱响应曲线,如图3(a)所示,三个颜色通道是有重叠的。要想分别采集到投影机RGB三个通道的信息,采用RGB彩色摄像机是最方便的,但是商用摄像机三个通道的光谱响应曲线也是互相重叠的,如果利用它采集,那么各个通道得到的信息之间必然会有串扰。实验中用串扰大小可表示为

$$C(x, y) = \frac{I_n(x, y)}{I_s(x, y)}, \quad (17)$$

式中 $I_n(x, y)$ 为只有该通道加载信息时,摄像机所接收到的信息,为有效信号。 $I_s(x, y)$ 为该通道不加载信息,而其他两个通道加载信号时,该通道所接收到的信息,为串扰信号。表1为对一台彩色工业摄像机的测试结果,可见各个通道中的串扰信号都很严重,即使可以通过校正提取出有效信号^[14],该通道的采集精度也会下降很多。

表1 信号串扰对照表

Table 1 Comparison of the signal crosstalk

| Sensor | Average crosstalk | | |
|---------------|-------------------|-----------|-----------|
| | Channel R | Channel G | Channel B |
| 0.474 | 0.232 | 0.260 | |
| Custom camera | 0.013 | 0.033 | 0.005 |

为了避免这种现象,实验中采用了如图 2 所示的结构。根据已经测定了的投影机光谱响应曲线,在其中找到了三个无串扰的区域。根据这三个无串扰的区域,使用分色棱镜(X-cube)和定制的滤光片,设计了分光系统。光束首先通过一个分色棱镜分成 RGB 三个通道,分别向三个方向投射。分色棱镜的三个通道间仍然有重叠,经过它的信号之间仍然存在串扰。为此,实验中再让这三束(RGB)光再分别经过一片滤光片,滤光片的设计原则如下:红蓝通道采用截止滤光片,其截止波长均远离投影机绿通道的波长范围。绿色通道采用窄带滤光片,其中心波

长正好在投影机的红蓝通道之间,又与投影机的红蓝通道无重叠。滤光片与分色棱镜组合后三个通道的透射率曲线如图 3(b)所示,每个通道的透射率曲线,只能让投影机中相对应通道的光透过,保证了各个通道信息的独立性。再用三台黑白摄像机(HUAQI DLC130)分别接收三个通道的信号,即可得到相互之间无串扰的图像,图 3(c)为投影机通过系统后,被摄像机接收到的信号的归一化光谱响应曲线。表 1 为该系统的串扰测试结果,从表中可以看出其串扰信号已经非常微小。

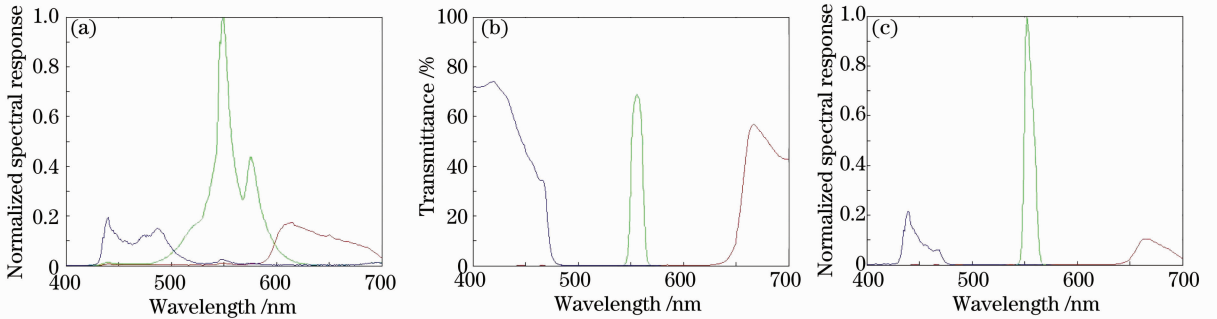


图 3 (a) 投影机的光谱响应;(b)分光系统的光谱透射率;(c)系统的光谱响应

Fig. 3 (a) Spectral response of the projector; (b) transmittance of the spectroscopic system; (c) spectral response of the system

3.2 投影机的非线性校正

利用上述方法测量物体形貌,是以假设投影与接收系统是一个线性系统为前提的。在实验中,专业的摄像机可以保证良好的线性度,而本实验所使用的大多数投影机,其输入信号与输出光强之间都是呈非线性关系的,响应与输入之间呈指数关系。这会导致相位和物体反射率的计算错误,因此必须对其进行校正,使投影机的输入与输出为线性关系。测量了实验中所使用投影机的三个通道的响应曲线,并利用指数公式对曲线进行拟合,拟合后的结果如图 4 所示。可见红绿蓝三个通道的响应曲线并不一致,各个通道的响应曲线表示为

$$I = aI_m^\gamma + b, \quad (18)$$

式中 a, b, γ 是与投影机的各个通道相关的参数。

从输入的角度进行校正是一种比较便捷的方法,设 I_i 是实际输入的数据, $f(x)$ 是它的校正函数,那么经过校正的输入值要保证经过(17)式的非线性变换后,得到的输出结果与 I_i 呈线性关系,即

$$af_\gamma(I_i) + b = kI_i + c, \quad (19)$$

式中 k 与 c 的值是以图 4 中的直线(即红色通道的校正曲线)来确定的。由图 4 可知三个通道的对比

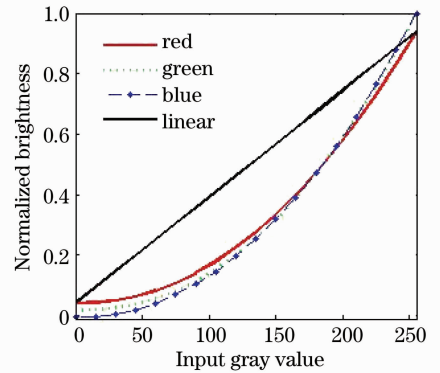


图 4 投影机的非线性效应

Fig. 4 Nonlinear effect of the projector

度不同,而实验中希望校正后三个通道的响应曲线尽量相同,以便于后期的数据处理,因此选用了对比度最小的红色通道为校正依据。可以确定 $f(x)$ 的表达式为

$$f(I_i) = \left(\frac{kI_i + c - b}{a} \right)^{2/\gamma}, \quad (20)$$

实验中生成的图案,在送进投影机进行显示前,先利用(20)式分别对各个通道进行数据变换,再送入投影机进行显示,即可保证输入与摄像机接收到的信号间为线性关系。需要注意的是对于三个通道,由

于 a, b, γ 不同,那么校正公式也不同,同时利用上式校正,会导致各个通道的数据容量有一定的下降。

3.3 实验步骤及结果

利用上述装置测量一个带彩色条纹的半圆柱模型。图 5(a)是将实难中生成的条纹投影到物体上之后的图像,图 5(b)是红色(R)通道接收到的条纹

图像,图 5(c)是 R 通道接收到的灰度图像,图 5(d)是利用灰度图矫正过的条纹图像。其他两个通道的结果与 R 通道效果一致。图 5(e)是利用三个通道的信息得到的恢复相位,图 5(f)是在 OpenGL 环境中贴图后所得到的物体形貌图像,可见该方法对于具有丰富颜色的物体仍然可以取得良好的采集效果。

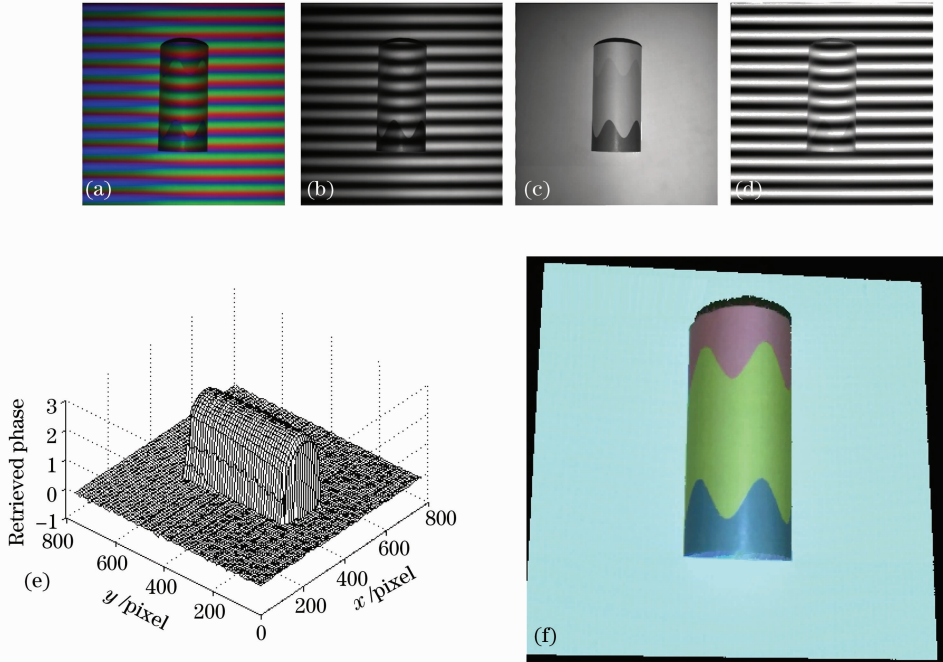


图 5 (a)三个通道拍摄到的变形条纹图案;(b)红色通道拍摄到的条纹图像;(c)红色通道拍摄到的纹理图像;(d)校正后的条纹图像;(e)恢复后的相位;(f)带有彩色贴图的恢复相位

Fig. 5 (a) Deformed fringe pattern taken by all the channel; (b) fringe pattern taken by channel red; (c) texture image taken by channel R; (d) adjusted fringe pattern of channel R; (e) retrieved phase; (f) retrieved phase with color texture

4 结 论

基于波长分离的结构光采集系统,利用多个波长通道同时采集相位图像,拍摄两次即可实现彩色的物体形貌采集,平衡了速度与质量。消除了通道间的串扰,提高了通道的利用率和测量精度。该系统采集一次物体轮廓需要拍摄两帧图像,相对于传统的相位测量轮廓术至少需要拍摄三幅图像而言显著地提高了采集速度。同时相对于以往的多通道采集系统,该系统对于物体表面颜色的变化有着较强的适应性,同时由于消除了串扰,各个测量通道的利用率也有了显著的提高。但是在实验中也发现对于颜色鲜艳度较高的物体仍然效果不好。本文所提出的多通道采集不仅限于可见光波段,可以将其扩展到红外的多个波段上,减少对物体颜色的依赖性,同时也可扩展一次采集的数据容量。

参 考 文 献

- 1 Zhang Song. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 149~158
- 2 Jason Geng. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2011, **3**(2): 128~160
- 3 Ye Hongna, Cao Yiping. Phase measuring profilometry based on triangular pattern grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1108001
叶虹呐, 曹益平. 基于三角形分布光栅的相位测量轮廓术 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1108001
- 4 Wei Zhengliang, Zhong Yuexian, Yuan Chaolong. Matching technique of self-adaptation correlation in dynamic three-dimensional measurement by color grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 949~954
韦争亮, 钟约先, 袁朝龙. 彩色栅线动态三维测量中自适应相关匹配技术 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 949~954
- 5 Liu Kai, Wang Yongchang, Daniel L. Lau *et al.*. Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3-D shape measurement [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(5): 5229~5244
- 6 Xu Wei, Chen Xiaobo, Xi Juntong. A method of phase error compensation for structural light measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312008

- 许 伟, 陈晓波, 习俊通. 结构光测量相位波动误差补偿方法研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0312008
- 7 Li Zhongwei, Shi Yusheng, Zhong Kai *et al.*. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3061~3065
- 李中伟, 史玉升, 钟 凯 等. 结构光测量技术中的投影仪标定算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3061~3065
- 8 Z. Jason Geng. Rainbow three-dimensional camera; new concept of high-speed three-dimensional vision systems [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(2): 376~383
- 9 Peisen S. Huang, Qingying Hu, Feng Jin *et al.*. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1065~1071
- 10 Pan Jiahui, Peisen S. Huang, Chiang Fupen. Color-coded binary fringe projection technique for 3-D shape measurement [J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(2): 023606
- 11 D. Caspi, N. Kiryati, J. Shamir. Range imaging with adaptive color structured light [C]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(5): 470~480
- 12 Zhang Qican, Ma Ke. 3D shape measurement based on color-encoded sinusoidal fringe projection [C]. *SPIE*, 2011, **8082**: 808217
- 13 Su Weihung. Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(20): 13167~13181
- 14 Zhang Xu, Zhu Limin. Robust calibration of a color structured light system using color correction [C]. *The 2nd International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 2009, **5928**: 936~946

栏目编辑: 何卓铭