

时空二值编码结构光三维成像中的亚像素匹配方法

张海花 李 勇 卢世江 陈良锋

(浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004)

摘要 在时空二值编码结构光三维成像系统中,一个投影仪像素通常与摄像机图像坐标系的多个像素对应。为提高系统的测量精度及数据密度,提出了一种适用于时空二值编码结构光三维成像系统的摄像机与投影仪图像亚像素匹配方法。根据测量系统的二维传递函数的低通滤波特性和时空二值编码方案,对摄像机采集的图像采用时间正弦拟合的方法求解每个像素处的相位。由于该相位与投影仪图像坐标成正比关系,所以可以实现摄像机与投影仪图像的亚像素匹配。实验结果表明该方法可将系统的测量精度提高 1 个数量级。在相同实验条件下的测量精度与相位测量轮廓术的相当。

关键词 机器视觉;三维测量;时空二值编码;亚像素匹配

中图分类号 TN206 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.1008006

Subpixel Matching of Three-Dimensional Imaging System Using Binary Spatiotemporal Encoded Illumination

Zhang Haihua Li Yong Lu Shijiang Chen Liangfeng

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

Abstract Several camera pixels are usually corresponding to one projector pixel in three-dimensional (3D) imaging system using binary spatiotemporal encoded illumination. A novel method is proposed for subpixel image matching of camera and projector to increase the measurement precision and data density. The phase distribution of image captured by camera is obtained with sinusoid fitting on temporal direction, according to the binary spatiotemporal encoding strategy and the low pass filter characteristic of two-dimensional transfer function of measurement system. Because of the direct ratio of the phase distribution and projector pixel the corresponding point pairs between the image of projector and camera can be identified through the phase distribution with subpixel accuracy. The experimental results show that the measurement precision of the 3D imaging system is increased about one order of magnitude by using proposed method, and its measurement precision is similar with that of the phase measurement profilometry under the same experimental condition.

Key words machine vision; three-dimensional shape measurement; binary spatiotemporal encoding; subpixel matching

OCIS codes 150.6910; 110.6880; 120.4630

1 引 言

结构光三维成像技术有广泛的实际应用,如工业检测、产品质量控制、机器视觉、生物医学、影视技术和考古等^[1~3]。目前的结构光编码方案按照编码

参数不同可以分为正弦光栅相位编码和光强编码两种方案^[4~7]。相位编码方案主要有相位测量轮廓术(PMP)、傅里叶变换轮廓术^[8,9]和莫尔条纹纹法等方法。光强编码方案大致可分为时间编码、空间编码

收稿日期: 2011-05-18; 收到修改稿日期: 2011-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(60702078)资助课题。

作者简介: 张海花(1983—),女,硕士研究生,主要从事三维面形检测和传感技术等方面的研究。

E-mail: haihua@zjnu.cn

导师简介: 李 勇(1972—),男,博士,教授,主要从事光学三维传感和三维显示技术等方面的研究。

E-mail: liyong@zjnu.cn(通信联系人)

中国光学学会会员号: S040111158S

和直接编码三类。时间编码投射多幅图案,由光强在时间方向上的变化规律形成编码,测量精度较高,但测量时间较长。空间编码只投射一幅图案,由光强在空间上的变化规律形成编码,解码过程比较复杂,测量结果精度不高。直接编码则是利用每个像素的灰度或者颜色来定义编码,适用于测量非彩色物体或者浅色的物体。时空二值编码结构光照明三维成像技术^[10,11]是对现有方案的一种折衷方案,其测量速度介于时间编码和空间编码方案之间,可以测量彩色物体,有效数据密度与 PMP 加格雷码相当^[12,13]。该技术将投影仪坐标系中的每一行分成由若干个像素组成的区间。利用区间内像素的时间坐标和空间坐标对区间进行编码。在测量时,通过分析拍摄的图像序列,恢复区间的编码。在得到所有区间的编码后,将相邻的若干个区域编码组成代码子序列。然后在设计的代码序列中进行代码子序列匹配,得到场景表面、摄像机像面及投影仪坐标系三者之间的对应点匹配。最后,采用三角测量原理得到被测物体的面形。摄像机与投影仪图像之间的亚像素匹配是实现高精度三维测量的关键。

本文根据测量系统二维传递函数的特性及时空二值编码方案,提出一种亚像素匹配方法。实验表明该方法将时空二值编码结构光照明三维成像系统的测量精度提高了 1 个数量级,与 PMP 精度相当。

2 原 理

2.1 时空二值编码方案

时空二值编码方案的基本思想是对投影光场在时间和空间上进行调制。利用每个像素光强的时间和空间变化规律进行编码,实现投影仪和摄像机图像的对点匹配。该方案的基本要求是:在编码单元内每一个像素只在一个时刻是亮的,对应到投影模式即只在一个模式中是白色的;同一编码单元内不能有 2 个像素同时亮。图 1 为编码单元尺寸是 3 个像素的时空二值编码例子。由于采用竖直条纹,投影模式(图案)的每一行都相同。在此选每个模式中的一行来说明编码原理。图中将模式按投影的顺序从上到下排列。每个模式被划分成若干由 3 个像素组成的小区域。尺寸为 3 个像素的区域,根据编码要求在时间上有三个模式对应。从图 1 中可以看到:空间上,在一个模式中,每个单元内有且只有 1 个像素是白色的,其他都为黑色;时间上,在同一单元内,每个像素在且只在一个模式中是白色的,在其他模式中都为黑色。这样,像素空间坐标和时间坐

标的组合可以用来对区域进行编码。如图 1 中标记为“B”的区域,单元内第 1 个像素的时间空间坐标为(1,1),即第 1 个像素在单元内的时间序列位置为 1,空间位置(白色)为 1,第 2 个像素的时间空间坐标为(2,3),第 3 个像素的时间空间坐标为(3,2)。将这些坐标按顺序排列得到码字“112332”,这里用字母“B”来表示。同理可以得到其他码字。根据排列组合知识,可以得到 $3! = 6$ 个码字,分别用“A”~“F”表示。

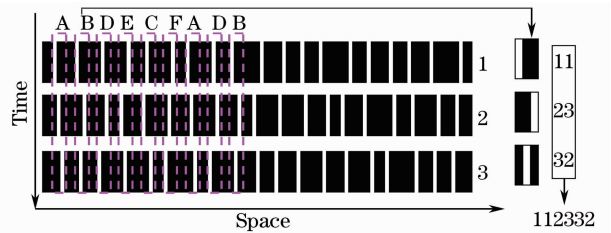


图 1 时空二值编码原理示意图

Fig. 1 Sketch of spatial-temporal codification

采用这种编码方法的另一个问题是编码单元的识别。可以采用时间坐标来区别,即再投影一个模式。在实际应用中为提高解码的可靠性,采用冗余编码方案^[14],即再投影 3 个编码相同但空间上与原来单元相邻的模式。这样既解决了编码单元识别问题,又提高了测量结果的可靠性。

2.2 摄像机与投影仪坐标的像素级匹配

在时空二值编码方案中,在解码后的图像中构造子序列,通过子序列匹配的方法得到子序列在总序列中的位置 k ,然后根据

$$x = (k + i) \times N + j \quad (1)$$

得到一个编码区域对应的摄影仪像素坐标,式中 N 为构造一个编码所用的投影仪像素数, i 为编码在子序列中的位置, j 为对应的投影仪像素在编码单元中的位置。以序列“ABDECFADBEFDBECDBAFECBDEFBDCEABCD AECFBDE”为例进行说明。该序列的窗口长度为 4,假设用 6 个投影仪像素组成一个编码。对于构造得到的子序列“DBEC”,通过子序列匹配得到该子序列在总序列中的位置 $k = 11$,则该子序列中编码“B”的第二个像素的坐标为 $x = 74$ 。通常一个投影仪像素与摄像机图像坐标系的多个像素对应,进行亚像素匹配是提高测量精度及数据密度的关键。

2.3 光强分布的时空分析

图 2 为测量过程中投影图案光强传递特性示意图。同样每幅图案只取一行,按投影顺序从上到下排列。左边是待投影图案光强分布,右边是成像到

摄像机图像传感器表面的光强分布。由于投影仪与摄像机的光电传递函数具有低通滤波特性^[15],原来二值变化的投影图案经过投影-拍摄这一传递过程后变成了光强平滑变化的灰度图像。下面考察摄像机上每个像素在测量过程中接收到的光强随时间的变化情况。从图 2 的竖直方向(即时间方向)看每一点的亮度变化,可以发现原来在时间上二值变化的

光场分布,经过测量传递后也变成了平滑分布。图 3 为测量过程中光场的时空变化特性。摄像机接收到的光强变化过程可以看成是有一定空间分布的光带扫过物体表面时测量得到的光强变化。摄像机像素与投影仪像素的不同位置对应时,光强随时间的变化情况不同。这一特性为投影仪和摄像机图像亚像素匹配提供了可能。

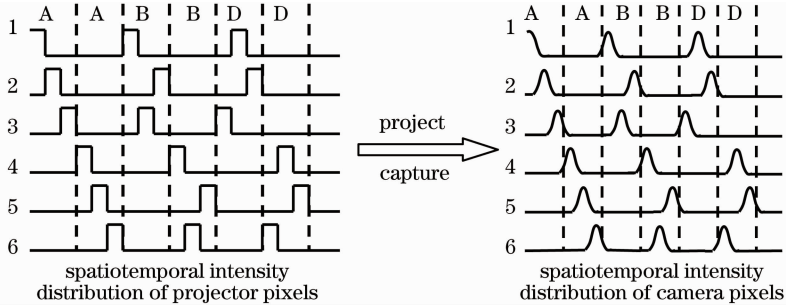


图 2 测量过程中光强传递特性

Fig. 2 Light intensity transfer features in measuring process

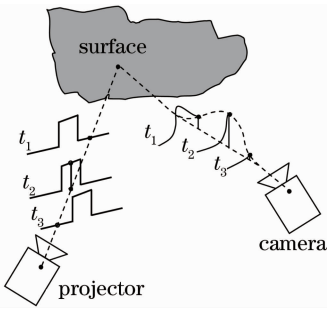


图 3 像素亮度变化

Fig. 3 Intensity variation of pixels

2.4 图像亚像素匹配方法

根据编码方法,实际中亮带并非以一定方向(如从左到右或从右到左)扫过物体表面,而是以随机的方式扫过物体。要实现亚像素匹配,必须对摄像机每个像素接收到的光强在时间上重新排列,使之与亮带以指定方向扫过物体时接收的光强相对应。如果将投影图像中的每个像素在时间上进行重新排列后,可以得到若干幅周期相同但每幅之间有一定位移的二值光栅,即罗奇光栅。下面从成像系统频率特性来讨论罗奇光栅经过投影、成像拍摄后的频谱变化情况。由于矩形波可表示为

$$X(t) = \frac{4}{\pi} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin[(2k-1)2\pi ft]}{2k-1} \right\} = \frac{4}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \frac{\sin 7\omega t}{7} + \dots \right), \quad (2)$$

式中 $\omega = 2\pi f$, 矩形波可看作频率为基频的正弦波与奇数次高次谐波的叠加。由于结构光照明的三维成

像系统为低通滤波系统,大部分高次谐波将被滤除。因此,可以借用 PMP 中的移相法来实现亚像素检测。对有位移的条纹成像,得到的图像灰度在时间上的变化规律如图 3 所示。根据 PMP 原理可知,图像灰度在时间上变化了一个正弦周期。因此在时间坐标上采用正弦拟合可以实现对投影仪坐标的亚像素检测,从而实现投影仪和摄像机图像坐标的亚像素匹配。

时间正弦拟合方法中对拍摄图像像素在时间坐标方向的重新排序过程如图 4 所示。由于投影竖条纹,分别取投影图像和拍摄图像中的一行来说明。图 4 左边是投影图像中一行像素的光强在时间和空间上的分布;右边是对拍摄图像进行时间方向重排后结果图像中一行像素的光强在时间和空间上的分布及摄像机-投影仪像素的对应关系示意图。以 3 个投影仪像素为一个周期进行重排,由图 4 可见,6 幅二值图像经投影、拍摄、解码并重排后,得到 3 幅光强分布接近正弦条纹的图像。正弦条纹的相位与投影仪像素坐标成正比关系。因此,求解出其相位就可以得到拍摄图像中的每个像素与投影仪坐标系中的亚像素对应关系。时间正弦拟合方法基本思路为:根据解码结果及编码规律按投影仪像素从左到右(或从右到左)扫过物体顺序对拍摄到的图像像素在时间上进行排列,得到有一定相移的新图像;最后用移相法求解该像素的相位。以图 4 中左边第 1 个编码为“B”的区域为例说明时间正弦拟合法。此区域中包含了 3 个子区域,每个子区域对应投影仪所

投射的 1 个像素。组成该区域的坐标为 7,8 和 9 的 3 个投影仪像素与坐标为 10~13 的 4 个摄像机像素对应。这里以 3 个投影仪像素为一个周期,则坐标为 7 的投影仪像素为一个周期的开始。该像素在第 1 幅中为亮态,因此将第 1 幅拍摄图像中与其对应的坐标为 10~13 的像素值填充到排列后的第 1 幅结果图像对应位置。坐标为 8 的投影仪像素在第 3 幅中为亮态,按从左到右扫描原则,将第 3 幅拍摄图像中坐标为 10~13 的像素值填充到排列后的第 2 幅结果图像的对应位置。类似地,将第 2 幅拍摄

图像中坐标为 10~13 的像素值填充到排列后的第 3 幅结果图像的对应位置。对于第 2 个编码为“B”的区域,将拍摄的第 4~6 幅图像按上述方法填充到第 1~3 幅结果图像中。其他区域的处理方法类似。最后得到如图 4 右边所示的结果。采用三步移相法求解结果图像中的条纹相位。实际中,投影了 6 幅图像,最多可以重新排列得到 6 幅结果图像(以 6 个投影仪像素为周期时)。实验中以 5 个投影仪像素为周期,得到 5 幅结果图像,利用五步移相法求解出相位 φ 的分布。

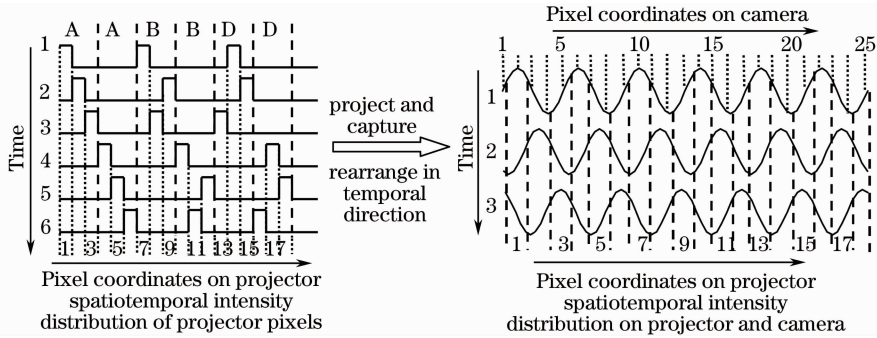


图 4 时间正弦拟合法示意图

Fig. 4 Sketch of time domain sinusoidal fitting

3 实验及结果分析

为验证本文方法的有效性,采用数字处理投影仪和 JAI 摄像机搭建了测量系统。实验采用的字符序列为“ABDECFADBEFDBECDABFECBDEFBDCEABCD AECFBDEABFCABDFAECBADEFCAEDCFEBDFECABFDEAFCEADBCADFBACDEACBDACEBDCABECAFECD BEADCEBAFDEBFADECADEBCAEBDAEBCDEBADCB AFEBACE DFABDCFAEBFDCAEFDCBEACDBAECDC”,窗口长度为 4。首先对测量系统进行了标定以确定测量精度^[16]。然后倾斜放置一个标准平面,采用五步移相法 PMP 和时空二值编码方法进行测量,将整像素匹配和亚像素匹配的测量结果与 PMP 测量结果进行比较。实际测量时,采用竖直条纹模式进行测量,其中每一行光强分布都相同。图 5 是投影仪投射的编码图案片段。依次投影 6 幅编码图案到标准平面,摄像机获取受物体表面形貌调制后的变形图案。依次检测各像素所对应的投影顺序图(POI),区域代码图(RCI),对获取的图片各区域在时间上采用正弦拟合,从而实现投影仪坐标的亚像素检测。

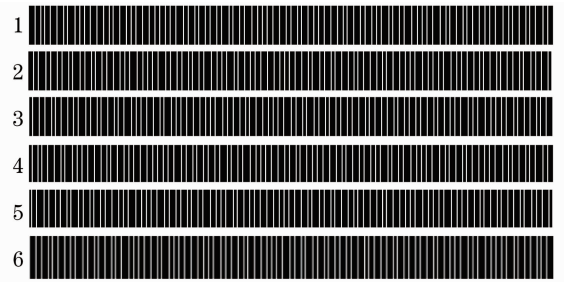


图 5 用于编码的模式片段

Fig. 5 Partial encoding segment

图 6 所示,图 6(a)~(c)为平面上同一行数据的拟合误差分布,图 6(d)~(f)为整个标准平面上拟合误差分布直方图。由图中可以看到未进行亚像素匹配时,平面的拟合误差较大且分布概率较均匀。采用亚像素匹配后,拟合误差明显减小并且误差集中在 0 附近,误差小的分布概率大,误差大的分布概率小。误差分布概率与 PMP 测量结果接近。图 7 是平面的拟合结果。最后计算了这三种方法所得测量结果的平面拟合标准偏差。得到如下结果:未进行亚像素匹配时,平面拟合的标准偏差为 0.2692 mm;进行亚像素匹配后,平面拟合的标准偏差为 0.0266 mm;相同实验条件下采用 PMP 测量的结果,拟合标准偏差为 0.0262 mm。由实验结果可知,采用亚像素匹配

对测量结果进行了平面拟合,拟合误差分布如

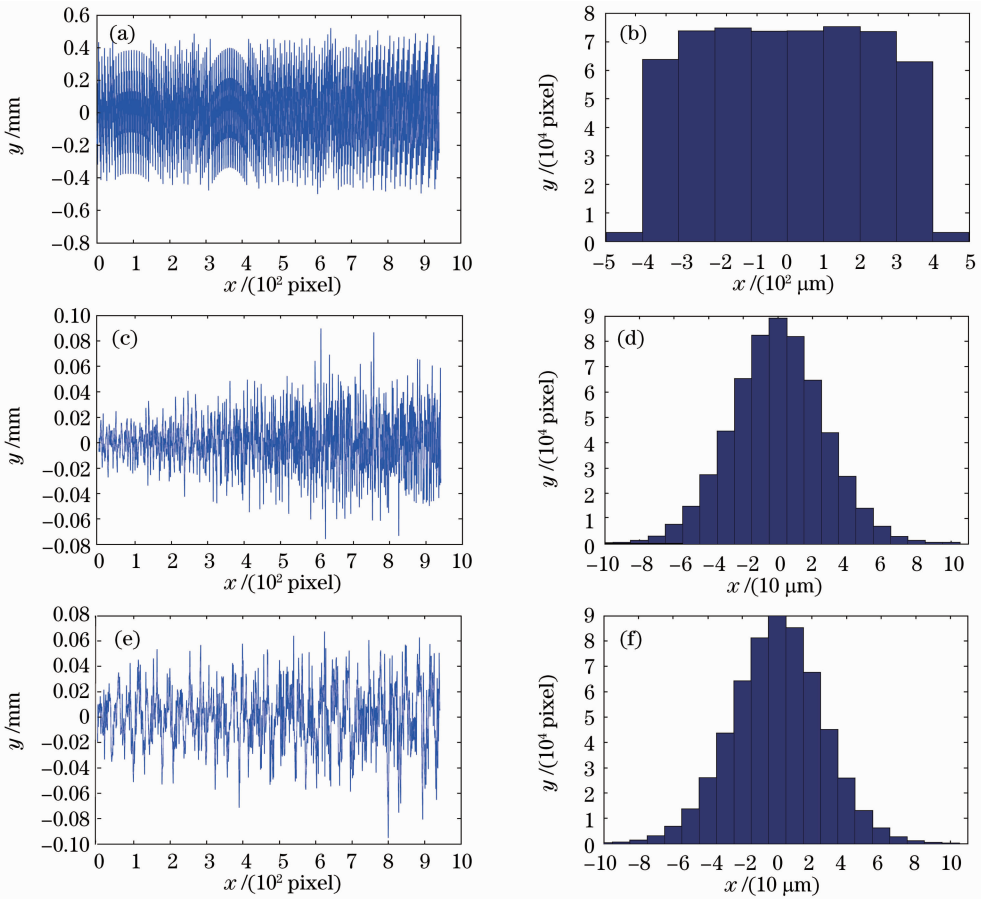


图 6 亚像素检测前的(a)单行误差分布和(b)测量误差直方图;亚像素检测后的(c)单行误差分布和(d)测量误差直方图; PMP 测量时的(e)单行误差分布和(f)测量误差直方图

Fig. 6 (a) Single-line error distribution and (b) test error histogram before subpixel detection; (c) single-line error distribution and (d) test error histogram after subpixel detection; (e) single-line error distribution and (f) test error histogram in PMP system

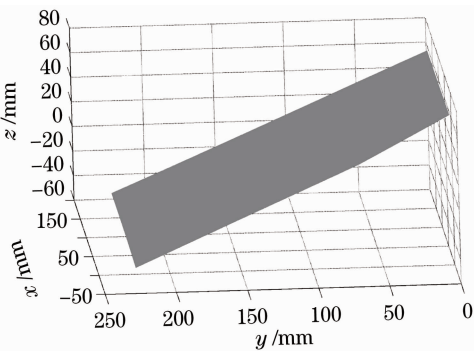


图 7 标准平面测量结果

Fig. 7 Measurement result of standard plane

后,时空二值编码的测量精度提高了 1 个数量级,与 PMP 测量精度相当。

4 结 论

摄像机与投影仪坐标的亚像素匹配是提高三维测量精度的关键。针对时空二值编码结构照明三维

成像系统的特点,根据测量系统的光强传输特性,提出了一种适用于该系统的摄像机和投影仪坐标亚像素匹配方法。将拍摄到的图像对应像素在时间上进行重排,获得近似正弦分布的序列,然后在时间方向上采用正弦拟合,实现亚像素匹配。实验结果表明该方法是可行的,可将系统的测量精度提高 1 个数量级,与 PMP 的测量精度相当。

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 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1518~1522
- 3 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
- 3 F. Blais. Review of 20 years of range sensor development[J]. *J. Elect. Imag.*, 2004, **13**(1): 231~240
- 4 J. Salvi, J. Pages, J. Battle. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. *Pattern Recognition*, 2004, **37**(4):

827~849

- 5 X.-Y. Su, G. von Bally, D. Vukicevic. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation[J]. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1): 141~150
- 6 W.-H. Su. Projected fringe profilometry using the area-encoded algorithm for spatially isolated and dynamic objects[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2590~2596
- 7 Wei Yongchao, Su Xianyu. 3D object recognition based on vector angle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1862~1866
魏永超, 苏显渝. 基于矢量夹角的三维物体识别[J]. *光子学报*, 2009, **38**(7): 1862~1866
- 8 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 99~104
毛先富, 陈文静, 苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 99~104
- 9 Wen Yongfu, Su Xianyu, Zhang Qican. Universal calculation formula and system calibration method in Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2094~2098
文永富, 苏显渝, 张启灿. 傅里叶变换轮廓术中一种普适的计算公式和系统标定方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2094~2098
- 10 Li Yong, Chen Yunfu, Jin Hongzhen *et al.*. Binary spatio-temporal encoded illumination for 3D imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 670~675
李 勇, 陈云富, 金洪震 等. 三维成像中的二值时空编码照明方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 670~675
- 11 Y. Li, H. Jin, H. Wang. Three-dimensional shape measurement using binary spatio-temporal encoded illumination [J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2009, **11**(7): 075502
- 12 Ma Ke, Zhang Qican. A new color structured light coding method for three-dimensional measurement of isolated objects[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2918~2924
麻 珂, 张启灿. 分离物体三维测量的彩色结构光编码新方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2918~2924
- 13 Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional imaging based on hybrid encoding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 161~165
田劲东, 彭 翔. 一种复合编码的三维数字成像方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 161~165
- 14 Xue Kang, Li Yong. Redundancy encoding method for three-dimensional shape measurement based on binary spatio temporal encoded illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2163~2167
薛 康, 李 勇. 二值时空编码照明三维测量中的冗余编码方法[J]. *光子学报*, 2010, **39**(12): 2163~2167
- 15 Li Yong, Su Xianyu, Ye Maoqun. Measurement error of PMP caused by pixel size of detector [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(3): 61~63
李 勇, 苏显渝, 叶茂群. 探测器像素尺寸对 PMP 测量精度的影响研究[J]. *光学与光电技术*, 2008, **6**(3): 61~63
- 16 Zhang Haihua, Li Yong, Zhang Haiyan *et al.*. Calibration of PMP system using virtual planes[J]. *Laser Technology*, 2010, **34**(5): 600~602
张海花, 李 勇, 张海燕 等. 采用虚拟标准平面标定相位测量轮廓术系统[J]. *激光技术*, 2010, **34**(5): 600~602