

点阵绝对相位彩色多频光栅傅里叶变换轮廓术

李崇纲 董泳江 张汝婷 林 斌 曹向群

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 国家光学仪器工程技术研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘要 提出一种将三角法测距与多频光栅相结合的方法, 充分利用数字投影的 RGB 通道, 将多频光栅与点阵同时投影在物体表面, 综合控制受高度调制的相位信息的提取, 最终获取物体的三维形貌。仿真结果显示, 在高度跳变使高频光栅位移达 10^2 量级个周期时, 可以准确还原原始形貌。通过实验验证, 本方法能够同时复原 169 mm 的陡峭高度跳变以及 3 mm 的微小细节, 提高了传统双频光栅的性能, 具有处理较大截面和保证细节部分的测量能力, 较好地改善了傅里叶变换轮廓术(FTP)的应用性能。

关键词 测量; 傅里叶变换轮廓术; 点阵和多频光栅结合; 大截面测量

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0712002

Fourier Transform Profilometry with Color Grating by Dot-Array Controlled Absolute Phase Multi-Frequency Grating

Li Chonggang Dong Yongjiang Zhang Ruting Lin Bin Cao Xiangqun

(CNERC for Optical Instruments, State Key Laboratory of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract A method combining the triangulation measurement with multi-frequency grating is proposed. By fully using the three RGB channels of digital projector, the multi-frequency grating and dot array are projected on the surface of the object simultaneously. The extraction of the phase information modulated by height information is controlled comprehensively, and the 3D shape is obtained. In the simulation, when the high-frequency grating's period shift caused by the step surface is up to 10^2 orders of magnitudes, the shape can be recovered. Experiments show that a 169 mm sharp height jump and 3 mm tiny details are recovered at the same time by using the method. The method improves the performance of traditional dual-frequency grating, and has the ability to handle larger step surface and maintain the high resolution, which greatly improves the Fourier transform profilometry (FTP) application performance.

Key words measurement; Fourier transform profilometry; multi-frequency grating with dot array; deep-step-surface measurement

OCIS codes 120.2830; 120.5050; 120.6650; 330.1710

1 引 言

傅里叶变换轮廓术(FTP)^[1]自提出以来,得到了广泛而深入的研究。国内常见的两种多频光栅 FTP,一种是首先通过低频光栅获得高度差较大的轮廓信息,然后以此为基础解出通过高频光栅获取的调制相位的真实值,进而获得物体高度^[2]。在处

理面型起伏较大的物体时,为了减小由于包裹相位造成的不连续以及由此引发的不准确信息,不得不降低低频光栅的频率,一方面导致在频域处理中基频分离的难度增大,并且恢复出来高度的误差较大;另一方面由于基频频率较低,高频光栅的频率也受到限制,难以获取物体更加精细的表面轮廓。另一

收稿日期: 2011-11-15; **收到修改稿日期**: 2012-03-12

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01Z325)、2011 浙江省大学生科技创新活动计划(新苗人才计划)(2011R401087)和台州市 2010 年科技项目“新型三维摄像机研制”资助课题。

作者简介: 李崇纲(1991—),男,本科生,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: lichonggang@gmail.com

导师简介: 林 斌(1964—),男,博士,教授,主要从事光电子器件、图像传感及处理、光电测量技术和仪器、生物医学光学技术和仪器等方面的研究。E-mail: wjlin@zju.edu.cn(通信联系人)

种常用的多频光栅 FTP 是基于 Gushov-Solodkin 方法^[3], 由于其建立在整数整除的基础之上, 一方面由于现实应用中处理的并不都是整数数据, 加大了数据处理的难度; 另一方面, 如果需要获得更加精细的轮廓信息, 则需要提高投影光栅的频率, 此时将引入较多的截断相位, 而通过两个光栅的包裹相位获取真实相位往往是采用枚举迭代的方法, 计算量大, 且由于误差的存在, 在许多点处会出现错误。田劲东等^[4~6]提出了一种通过离散点高度还原真实相位的方法, 提高了真实相位计算的准确性, 但应用范围较窄。

本文提出一种新颖的理念, 有效地解决了之前提到的问题, 同时, 提出一种全新的结构光栅设计思路, 扩大了应用范围。

2 基本原理

2.1 FTP 的基本原理

将一张光栅图通过投影仪投影到物体表面, 光栅可以表示为

$$g_T(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp(i2\pi n f_0 x), \quad (1)$$

通过相机获得的实际的形变光栅为

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\}, \quad (2)$$

对(1)式和(2)式进行傅里叶变换, 添加适当的滤波窗得到基频信号, 再进行逆傅里叶变换, 得到 $\hat{g}(x, y)$ 和 $\hat{g}_0(x, y)$, $\hat{g}_0^*(x, y)$ 为 $\hat{g}_0(x, y)$ 的复共轭。由于

$$\lg[\hat{g}(x, y)\hat{g}_0^*(x, y)] = \lg[|A_1|^2 r(x, y)] + i\phi_0(x, y), \quad (3)$$

故计算 $\lg[\hat{g}(x, y)\hat{g}_0^*(x, y)]$ 后取虚部, 由于计算机计算得到的相位范围在 $-\pi \sim +\pi$ 之间, 即可得到包裹相位 ϕ_0 。

2.2 离散点处相位的获取

将一张点阵图投影到物体表面, 光路图的几何关系如图 1 所示, E_p 和 E_c 分别代表投影仪和相机的出瞳位置。当 A 处物体的高度为 h 时, D 为 A 点在参考面上投影的位置, B 与 F 分别为投影仪和相机在参考平面上的投影位置, E 为投射在 A 点的光在未加物体时投射在参考平面的位置, C 为 A 点通过相机观察时对应参考平面上的位置。在参考平面垂直条纹方向上任取一点作为原点, 将 B ~ F 代表该点的坐标值, 其中, A 投影到平面上的坐标与 D 坐标相同。由几何关系可知

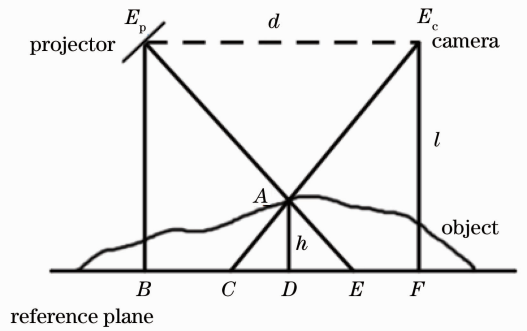


图 1 光路布置图

Fig. 1 Schematic of light path

$$D = \frac{EF - BC}{E - B + F - C}. \quad (4)$$

当投影装置的出瞳与相机的入瞳连线与参考平面平行且与条纹方向垂直, 并且二者的光轴位于同一平面时, A 点的实际高度 h 为

$$h = l \frac{E - D}{E - B}, \quad (5)$$

由此, 可推得 D 点处的绝对相位值

$$\phi = \frac{2\pi h f_0 d}{h - l}. \quad (6)$$

如果投影装置与相机的摆放未能满足上述条件时, 具体的相位推导详见参考文献[7]。至此可以获得物体上所有被离散点照射处的绝对相位值。

2.3 物体真实相位的还原

(6)式中得到的离散点处绝对相位值将被用于下文中解包裹算法中, 以获得物体各处相位的真实值, 同时结合双频光栅的优越性, 设计了一种多个因素共同控制相位展开的方法。

通过傅里叶变换的方法, 由低频光栅解出整个物面处的包裹相位值。其中, 包裹相位 ϕ_0 和真实相位 ϕ 之间的关系为

$$\phi = \phi_0 + 2k\pi, \quad (7)$$

建立一张和原图像同样大小的表格, 以记录各个像素点所对应的 k 值。首先, 按照(7)式, 结合计算出来的 ϕ_0 和 ϕ , 得出各个离散点处的 k 值, 并记录在表中。

通过(7)式获取行方向点之间连线上的点的绝对相位值。对相邻离散点行方向的连线进行检测, 找出连线上相邻点之间存在相位跳变的所有点, 并对跳变点的类型进行区分。在实际中, 引起相位不连续有两种可能, 1) 由于物体的高度在相位不连续处发生了跳变进而引起了相位的跳变; 2) 由于相位包裹在 $-\pi \sim +\pi$ 之间, 当真实相位超出此范围时, 就会产生不连续, 此种跳变产生的相邻点相位差接

近 $\pm 2\pi$ 。区分出连线上的跳变点后,就可以对这两种点分别进行处理。在某些特殊的情况下,当物体的截断高度恰好导致光栅平移 n 个周期时,高度的跳变并不会引起低频光栅的跳变,如图2中下方的方块突起,由于变形光栅的位移为周期的整数倍,按照点控单频相位展开后,高度的跳变并非出现在真实高度的跳变处,而是在离散点之后才跳变,导致对截断面处理的错误。当高频光栅所选周期与低频光栅的周期互为质数时,高度跳变至少会引起高低频相位之一的不连续,因此在行方向扫描时,当任意一个频率的相位出现不连续的时候,就对其类型进行判断。

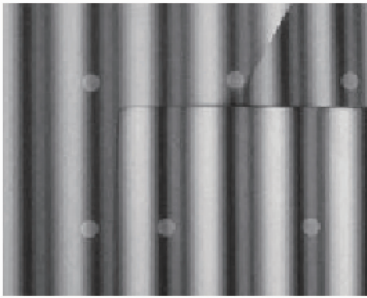


图2 截断处示意图

Fig.2 Picture of the step surface

从起始点到相位跳变点之间,所有点的 k 值沿用之前的离散点处的 k 值。如果相位跳变是由于包裹相位引起的,则进行简单的 $+2\pi$ 或 -2π 处理,使得相位连续,并记录调整之后的 k 值。如果跳变是由于高度不连续造成的,则跳变点之后的 k 将通过另一个离散点来获取。利用相同的方法从另一个离散点开始向跳变点处进行相同的处理,在遇到跳变点前继承该离散点的 k 值,然后排除由于包裹相位造成的 k 的不连续,直到处理至由于高度造成的相位跳变点处。至此,连线上跳变点前后的 k 值均已求出。对所有的连线进行相同的处理,则在存在离散点的行方向,所有点的相位值已被还原成了真实值。

按照上述的处理思想,对夹在相邻两行之间的列进行相同的处理,则可以获得整个物面的全部点处的真实相位值。至此,已可以对物体的高度进行还原。

由于通过高频光栅可以得到更加精确的轮廓高度,因此,最终的高度还原是通过高频光栅的相位值计算得到的。通过之前计算得到的高度差较大的物体高度 h 计算出高频光栅图中每点处的绝对相位,进而计算出每点处包裹相位对应的 k 值,对高频光栅的每一点相位进行加减 $2k\pi$ 处理,得到由高频光

栅获得的整个物体对应相位的准确值。

2.4 物体高度的计算

得到物体每一个点对应的绝对相位值后,按照公式

$$h = \frac{l\phi}{\phi - 2\pi fd}, \quad (8)$$

即可计算得到整个物体在各个点处精确的高度值。

3 点阵的设计

点阵测量的基本原理是根据投影在物体上的点相对于原始投影在参考面上点的位移来判断高度的。因此,对于点阵投影有两个基本要求。1)为保证能够正确地检测到所有的点,需要使投影到物体的点阵中所有点位于摄影机的可视范围,否则,如果部分点由于受突起物体遮挡而无法被摄影机检测到,将会导致信息缺失而无法准确地判断。2)由于引入点阵的目的是为了检测高差较大截断面,因此,必须保证沿光栅垂直栅线方向,截断面边缘的两侧均有离散点的分布。

为了满足上述的两个条件,可采取以下三种方法设计投影的点阵图。

1) 均匀点阵。投影出的原始点阵沿 x, y 方向均匀分布,此种方法的优点是点阵的设计简单,只需控制点与点之间的间距,使点的疏密程度适当即可;但是时常需要调整物体的摆放来满足上述的要求,给测量应用带来不便。

2) 手动布置点阵。将计算机屏幕上的内容直接通过数字投影仪投影到物体的表面,移动鼠标,并观察在摄像机视野中鼠标的位置,至恰当位置时,通过程序采集鼠标的位置并记录下来,当记录完成所有点的位置之后,根据记录的位置制作成点阵投影到物体表面,此时在计算机屏幕中的原先鼠标所在的位置即为原始点的位置,而在摄像机视野中离散点所处的位置即为位移之后的位置。

3) 自动排列法。实验开始时,先使用光源 45° 斜照射物体,使物体的不同面呈现出不同的明亮程度,之后通过摄像机采集图像,并通过软件进行边缘检测,自动在边缘的两侧分布离散点构成点阵。此种方法的优点在于能够进行快捷的检测,并且可以自动地适应不同的物体。

使用后两种方法时,只要将2.3中行方向的相位分析改为沿相邻两点连线方向,列方向分析的部分改为两条连线之间,仍然可以实现2.3中的步骤。

4 图样及仿真

为了可以做到实时的测量,数据处理所需要的三幅图像通过一次拍摄同时获取。将离散点图和两幅光栅图分别放在投影的 RGB 通道,获取变形图后,分离三个通道即可获得三幅形变图。为便于清晰地展示轮廓的还原过程,仿真中选取的点阵为均

匀点阵。模拟的物体,最大的高度跳变能使高频光栅的位移达 103 个周期。图 3 为仿真中使用的彩色光栅以及红、绿、蓝通道单独的图像。图 4 为仿真使用的物体以及投影到物体上得到的变形光栅。图 5 为分离采集到的变形光栅图红、绿、蓝通道得到的图像。图 6 展示了高度重建的过程。

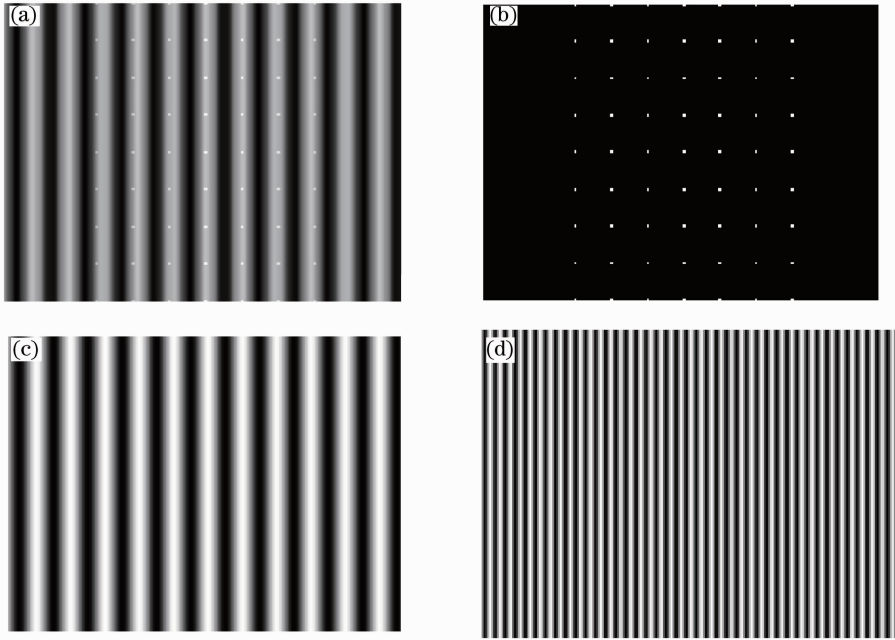


图 3 (a)通过 Matlab 软件生成一幅合成光栅图;(b)红通道;(c)绿通道;(d)蓝通道

Fig. 3 (a) Combined grating image created by software Matlab; (b) R channel; (c) G channel; (d) B channel

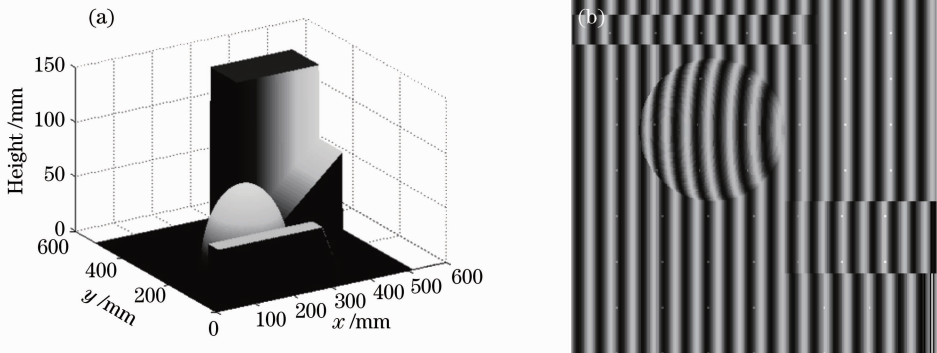


图 4 (a)仿真的物体;(b)投影物体后得到的形变光栅

Fig. 4 (a) Simulated object; (b) deformed projecting grating

5 实 验

在试验中,构造一个高度为 143 mm 的断面,同时在断面顶部的平面上制作一个 3 mm 深的小孔,用以测试系统同时对大型台阶面和微小细节的测量能力。在试验中,投影仪和相机到参考平面的距离为 954 mm,投影仪与相机之间的间距为 169 mm,离散点的间距为 43.5 mm,低频光栅使用的周期为

24.1 mm,高频光栅使用的周期为 2.3 mm。通过摄像机采集到的图像如图 7 所示,箭头所指处为小孔所在位置。重复上述处理的过程,复原出的三维图形如图 8 所示,图 9 为小孔处的局部放大图,图 10 为小孔的截面图。由此可见,台阶面与微小细节均得到了良好的复原。

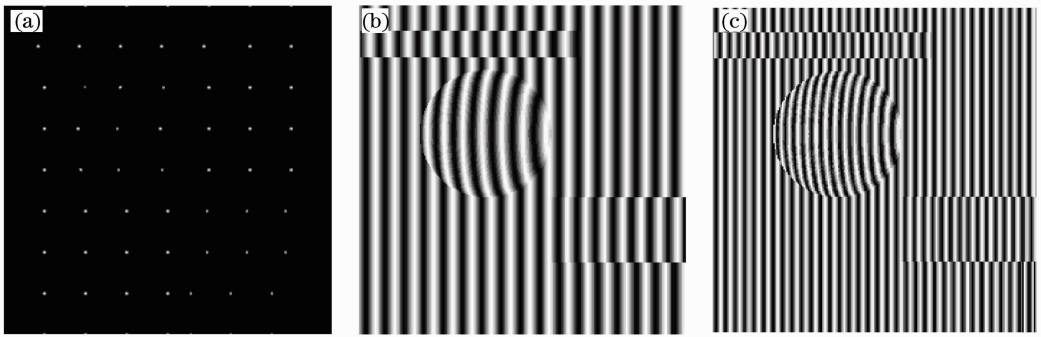


图 5 分离出的红绿蓝通道。(a)红通道;(b)绿通道;(c)蓝通道

Fig. 5 Separated color channels. (a) R channel; (b) G channel; (c) B channel

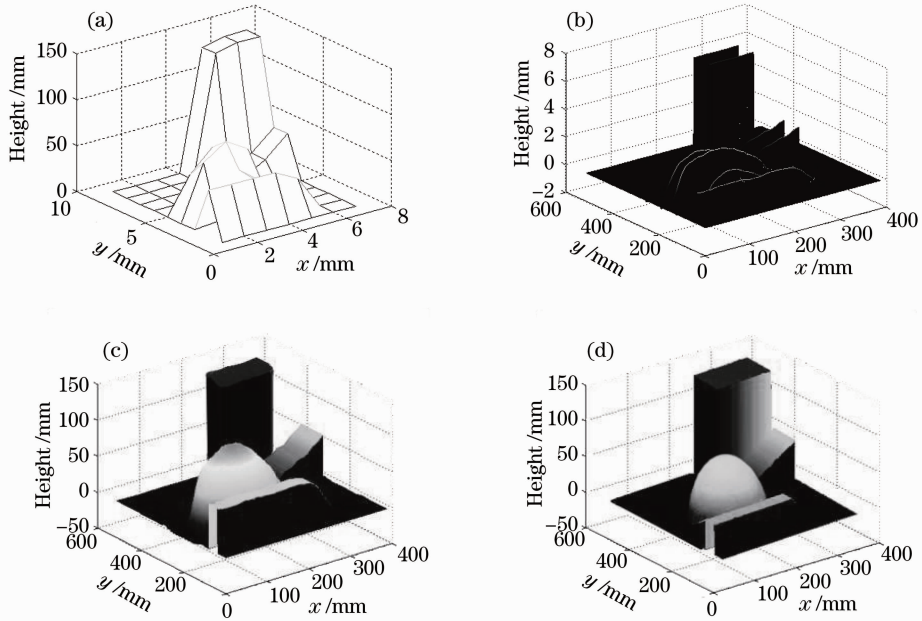


图 6 高度重建过程。(a)离散点处的高度值;(b)行方向相位;(c)低频光栅获得的高度;(d)高频光栅获得的高度

Fig. 6 Height recovering process. (a) Height at dot array; (b) phase at line direction; (c) height from low-frequency grating; (d) height from high-frequency grating

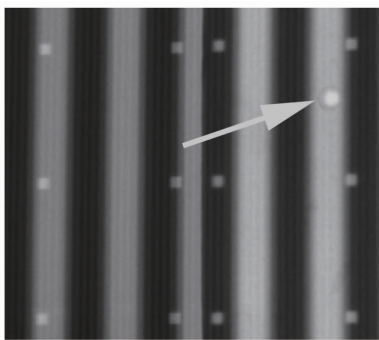


图 7 摄像机采集到的图像

Fig. 7 Image obtained by camera

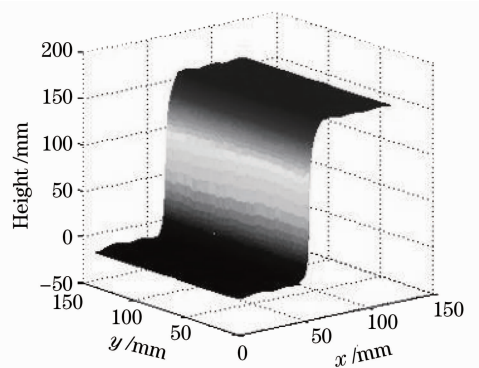


图 8 高度的复原图像

Fig. 8 Recovered height of object

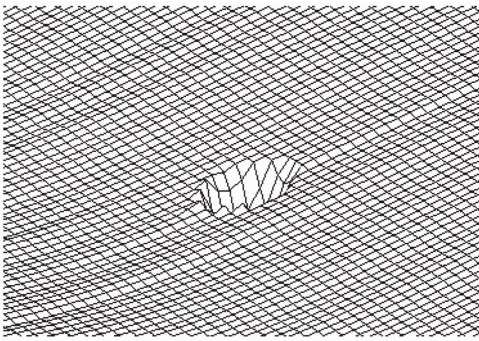


图 9 局部放大图

Fig. 9 Detailed local surface

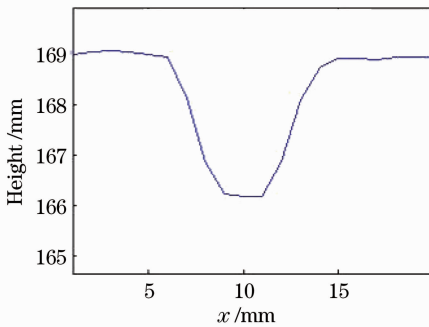


图 10 小孔处截面图

Fig. 10 Sectional view of the hole

6 结 论

从理论、仿真以及实验的角度展示了一种新的点阵控制多频彩色光栅 FTP 方法,将点阵与多频光栅相结合,并且利用彩色数字投影仪的不同颜色通道进行投影。通过处理点阵信息获得在离散点处的物体高度信息,并且辅助多频光栅的相位展开,进而获得精确的轮廓信息。由于多频光栅和点阵的结合一方面将相位的绝对值引入了相位的展开过程,另一方面保留了多频光栅在细节部分的处理能力,消

除累积误差,使得本方法能够在保留高测量精度的同时避免相位的错误。使用该方法,在高度跳变使得高频光栅位移达 103 个周期时仍旧可以准确无误地还原高度,并且未对测量精度产生影响。本方法在测量 3 mm 细节的同时具备了分辨 169 mm 高度跳变的能力。

参 考 文 献

- 1 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 2 Zou Haihua, Zhao Hong, Zhou Xiang. Triple-frequency color-encoded fringe projection profilometry based on empirical mode decomposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812009
邹海华, 赵宏, 周翔. 基于经验模式分解的三频彩色条纹投影轮廓术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812009
- 3 M. Takeda, Q. Gu, M. Kinoshita *et al.*. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: a single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolation [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(22): 5347~5354
- 4 Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional digital imaging via position-shift point array projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1319~1323
田劲东, 彭翔. 位错点阵投影的三维数字成像[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1319~1323
- 5 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
- 6 Ding Yabin, Peng Xiang, Tian Jindong *et al.*. Calibration method for 3-D vision system using point array encoding [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11): 1774~1779
丁雅斌, 彭翔, 田劲东等. 基于点阵编码的三维主动视觉标定[J]. *光子学报*, 2006, **35**(11): 1774~1779
- 7 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. 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

栏目编辑: 何卓铭