

文章编号: 0253-2239(2010)05-1368-06

基于点阵投影的彩色复合光栅傅里叶变换轮廓术

宋 雷 岳慧敏

(电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要 传统傅里叶变换轮廓术(FTP)采用单一频率条纹测量时存在着由于待测物体高度变化剧烈导致的相位展开困难。结合数字点阵和正弦条纹投影的复合编码三维数字成像方法能有效解决相位模糊和误差传播的问题,但在实际测量中需要分别采集点阵图像和正弦条纹图像,影响了测量的实时性。提出一种新型彩色复合光栅测量方法,实现了从一帧图像中分别得到点阵图像和正弦条纹图像,并以点阵图像为依据对正弦条纹图的截断相位进行展开。理论分析和实验结果表明,该方法适合于不连续物体的三维测量,同时抑制误差传播能力强,具有较高的测量效率。

关键词 信息光学;相位展开;彩色复合光栅;傅里叶变换轮廓术;色度

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1368

Fourier Transform Profilometry of Colorful Composite Grating Based on Point Array Projection

Song Lei Yue Huimin

(School of Opto-Electronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Difficulties of phase unwrapping caused by the intense height discontinuity of the tested object exist in the traditional Fourier transform profilometry (FTP) when the single frequency sinusoidal fringe pattern is projected. The hybrid encoding method based on digital point array and sinusoidal fringe pattern projection can solve the problem of the phase ambiguity and error propagation effectively. But a point array pattern and a sinusoidal fringe pattern are demanded to be projected respectively, and it can seriously reduce the measuring efficiency. A new method of colorful composite grating is proposed. It is possible to get a point array pattern and a sinusoidal fringe pattern from only one frame of image. The wrapped phase can be exactly unwrapped according to the point array pattern. Theoretical analysis and experimental results show that the proposed method can be used to solve the profilometry of objects surface with large height discontinuities. Besides that, the novel method has a strong capability of anti-error-propagation and high efficiency in the measurement.

Key words information optics; phase unwrapping; colorful composite grating; Fourier transform profilometry (FTP); chroma

1 引 言

随着计算机技术和光电子技术的快速发展,光学三维测量被广泛应用于机器视觉^[1,2]、工业检测^[3]、生物医学^[4]、文物保护和反求工程等领域。其中,傅里叶变换轮廓术(FTP)^[5~9]由于其全场性、非接触性、具有较高的测量精度和测量效率而得到了广泛的应用。不连续三维物体的相位展开是傅里叶变换轮廓术的关键点和难点之一,如何在对不连续三维物体测量时进行正确的相位展开以及防止误差

传播得到了大家的广泛关注^[10~18]。

对于不连续三维物体人们提出了许多测量方法,比如投影不同频率正弦条纹的时间相位展开法^[10~12]、双频光栅法^[13]和调制度测量轮廓术^[14,15]等。田劲东等^[17]提出了一种基于数字点阵投影和正弦条纹投影的复合编码三维数字成像方法,将数字点阵测量法能直接获得采样点处物体表面绝对高度的优点与傅里叶变换轮廓术测量精度较高的优点结合起来。由于数字点阵投影法^[18]的引入使得该

收稿日期: 2009-07-06; 收到修改稿日期: 2009-07-16

基金项目: 校青年基金(JX0739)资助课题。

作者简介: 宋 雷(1986—),男,硕士研究生,主要从事光电传感方面的研究。E-mail: songl836@yahoo.com.cn

导师简介: 岳慧敏(1979—),女,博士,副教授,主要从事光电传感方面的研究。E-mail: yuehuimin@uestc.edu.cn

方法能够对不连续物体进行测量,能有效抑制相位展开过程中的误差传播,解决了相位模糊的问题并且具有较高的精度。但由于需要向被测物体先后投影两幅不同的编码图像,因此降低了测量效率。

本文提出一种新颖的基于数字点阵投影的彩色复合光栅测量方法。利用不同的色彩通道分别记录数字点阵和正弦条纹信息,整个测量过程只需向被测物体投影一幅就可以得到解调所需要的全部信息。该方法适合于不连续三维物体的测量,并且具有很高的测量效率,能够实现高速测量。

2 基本原理

2.1 傅里叶变换轮廓术基本原理

傅里叶变换轮廓术光路图如图 1 所示,其中 EO 和 BO 分别为投影仪和电荷耦合器件(CCD)相机的光轴,夹角为 θ 。投影仪到参考平面的距离是 L_0 , d 是投影仪与相机之间的间距。由 CCD 相机获得的正弦条纹变形光场可表示为

$$g(x, y) = R(x, y)[a + b \cos \phi(x, y)], \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为物体表面反射率, a 为背景光强度, b/a 表示条纹对比度, $\phi(x, y)$ 为经物体表面调制的相位。对(1)式进行傅里叶变换得到的频谱分布可表示为

$$G(f, y) = A(f, y) + Q(f - f_0, y) + Q^*(f + f_0, y), \quad (2)$$

式中 $Q(f - f_0, y)$ 为 $1/2B(x, y) \exp[i\phi_0(x, y)]$ 的傅

里叶变换, $*$ 表示复共轭。选择合适的窗口进行滤波可得到其基频分量,再进行傅里叶逆变换可以计算得到光场的相位分布。由于在计算过程中运用了反正切函数,使得相位值在 $-\pi$ 和 π 之间发生了截断,还需要对截断相位进行展开才能得到绝对相位分布。

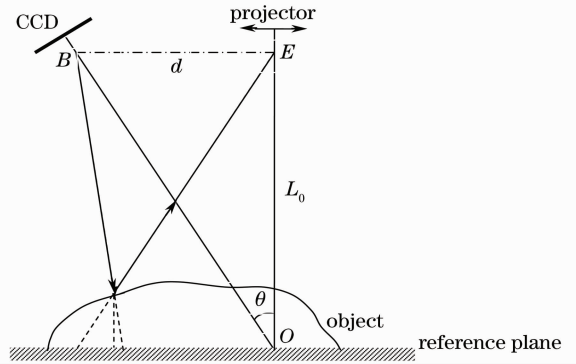


图 1 傅里叶变换轮廓术光路图

Fig. 1 Optical geometry of FTP

2.2 数字点阵彩色复合光栅相位解调原理

2.2.1 彩色复合光栅的构成

彩色复合光栅由 R, G, B 三通道共同组成。其中, R 通道用于投影点阵图像; G 通道用于投影正弦条纹图像, B 通道用于投影背景光图像, 如图 2 所示。一幅彩色复合光栅图像分布可表示为

$$I(x, y)_{rgb} = a_r + b_r \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M \delta(x, y) + a_g + b_g \cos(2\pi f_0 x) + a_b, \quad (3)$$

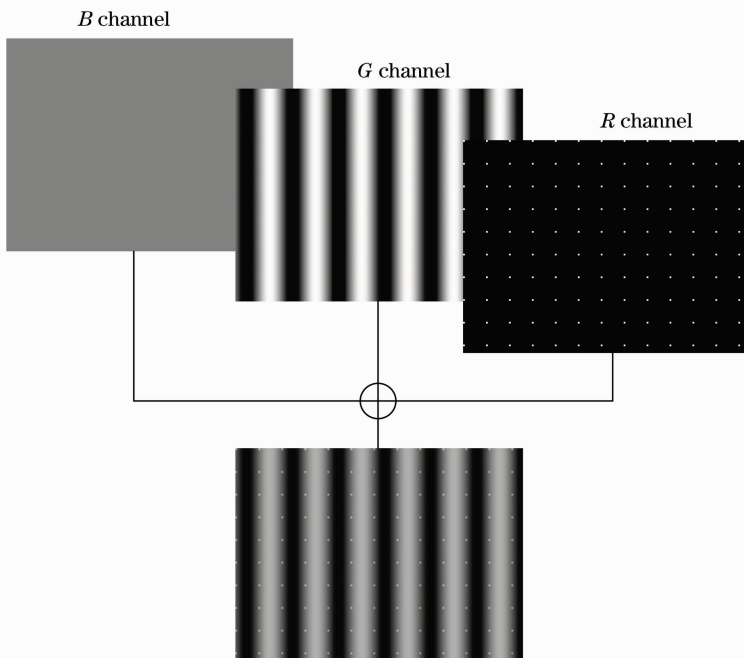


图 2 彩色复合光栅构成原理图

Fig. 2 Schematic diagram of colorful composite grating

式中 a_r, a_g, a_b 分别为 R, G, B 分量的背景光强, $b_r/a_r, b_g/a_g$ 为图像对比度。利用投影仪将叠加后的彩色图像一次性投射到待测物体表面,获得的变形图像光场分布表示为

$$g(x, y)_{\text{rgb}} = R(x, y)_r \left[a_r + b_r \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M \delta(x + \Delta x_p, y + \Delta y_p) \right] + R(x, y)_g \{ a_g + b_g \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \} + R(x, y)_b a_b, \quad (4)$$

式中 $\Delta x_p, \Delta y_p$ 分别为点阵图像对应点在像平面上的位移大小, $R(x, y)_r, R(x, y)_g, R(x, y)_b$ 是 R, G, B 分量的反射率。将 CCD 相机接收到的图像利用 RGB 色彩分离技术进行分离重新得到各通道相互独立的图像^[19,20]。

考虑到实际测量中系统噪声以及三个通道之间相互干扰的问题,必须对得到的三幅图像进行滤波等预处理^[21,22]。根据具体情况,本文采用滤波窗口大小为 5×5 的均值滤波处理,对三个通道均收到了

较好的效果。

2.2.2 基于点阵图像的相位展开原理

相位展开流程图如图 3 所示。对 R 通道点阵图像进行滤波等预处理之后,即可建立参考面和经物体表面点阵图像上采样点之间的一一对应关系。根据文献^[17,18]知,点阵图像上采样点在像平面上位移大小和物体表面采样点处高度值之间有以下关系:

$$z_b = \frac{L'(x_0 \cos \theta - LC + Cx_0 \sin \theta)}{C(x_0 \sin \theta + L' \cos \theta) + x_0 \cos \theta - L' \sin \theta}, \quad (5)$$

$$C = \frac{\Delta x_p}{F} + \frac{x_0 \cos \theta}{L - x_0 \sin \theta}, \quad (6)$$

式中 L 为 CCD 相机入瞳到投影中心的距离, L' 为投影仪出瞳到投影中心的距离, F 为 CCD 相机焦距, x_0 是参考面上采样点的坐标值。采样点处绝对相位可通过下式进行计算^[17]:

$$h(x, y) = \frac{L\phi(x, y)}{\phi(x, y) - d \cdot 2\pi f_0}, \quad (7)$$

式中 h 为物体的高度。

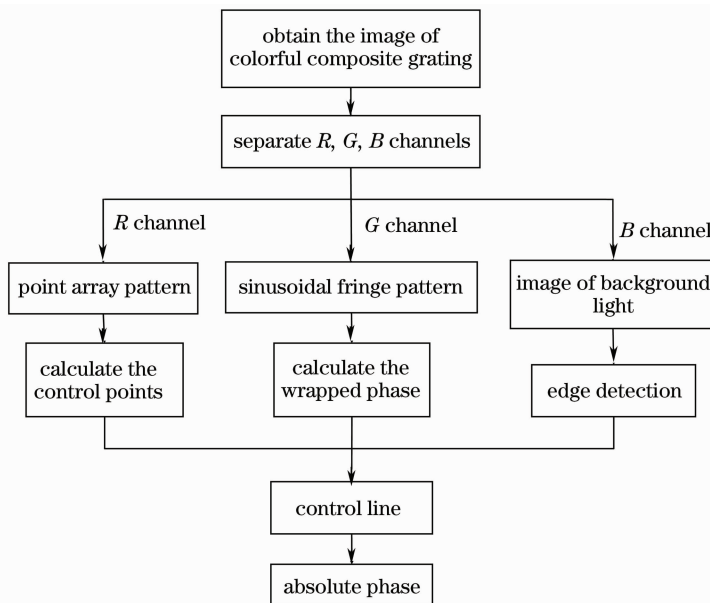


图 3 基于点阵图像的相位展开流程图

Fig. 3 Flow diagram of phase unwrapping based on point array pattern

将采样点处的绝对相位作为控制点,控制正弦条纹截断相位的展开^[17]。按照行方向比较相邻控制点之间的相位差,通过加减 2π 的整数倍将截断相位展开成控制线。按类似方法,将控制线上的点按列方向展开成绝对相位面。

3 实验结果与讨论

实验中采用的是数字微反射镜器件(DMD)的数字投影仪,型号为 EPSON EMP-S1,分辨率 $800 \text{ pixel} \times$

600 pixel 。CCD 相机采用的是 Sony H2,实验中选用的分辨率为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。利用 Matlab 软件在计算机上产生彩色复合光栅,其中 R 通道投影的是 64×64 点阵图像,大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$; G 通道投影的正弦条纹频率为 0.05 line/pixel ; B 通道投影背景光。实验装置如图 4 所示,其中投影仪与 CCD 相机间距 $d = 350.0 \text{ mm}$,投影仪与参考平面间距 $L_0 = 1080.0 \text{ mm}$ 。

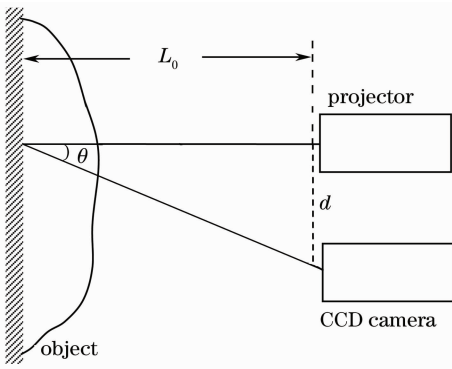


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

图 5 所示待测物体是一个组合石膏体模型,上半部分为剖开的半个圆台,下半部分为一个立方体。

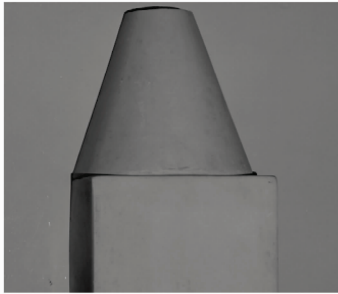


图 5 待测组合石膏体模型

Fig. 5 Plaster model of combined objects under test

圆台表面圆弧拱形比较平滑,中间部分变化相对缓慢,是典型的缓变区域。下半部分立方体表面可简单看作平面,而立方体和圆台的边缘均有很大的跃变存在。因此整个待测组合石膏体是极具代表性的。

对组合石膏体投影一帧彩色复合光栅图像,如图 6(a)所示。利用色彩分离技术将其分解为三个通道的独立图像分别如图 6(b)~(d)所示。根据实际情况,对三个通道图像分别进行滤波窗口为 5×5 的均值滤波。通过傅里叶变换技术由 G 通道得到截断相位分布,由 R 通道计算出采样点处绝对相位值分布,结果分别如图 7(a),7(b)所示。

以采样点处绝对相位值为依据将截断相位展开。图 8 是最终三维重建结果,通过彩色复合光栅投影法得到了完整的三维面形。图 5 所示待测石膏体模型中,测得台面高度为 72.4 mm。如图 9 所示,由于物体边缘跃变超过了条纹的等效波长,如果直接对截断相位进行展开不能得到正确的重建结果。而且,在边缘处很可能出现误差传播的现象。采用彩色复合光栅测量法获得的三维面形重建结果表明,在圆台和立方体边缘跃变剧烈处没有出现单频光栅中误差传播的情况,这种方法对误差传播具有很强的抑制能力。

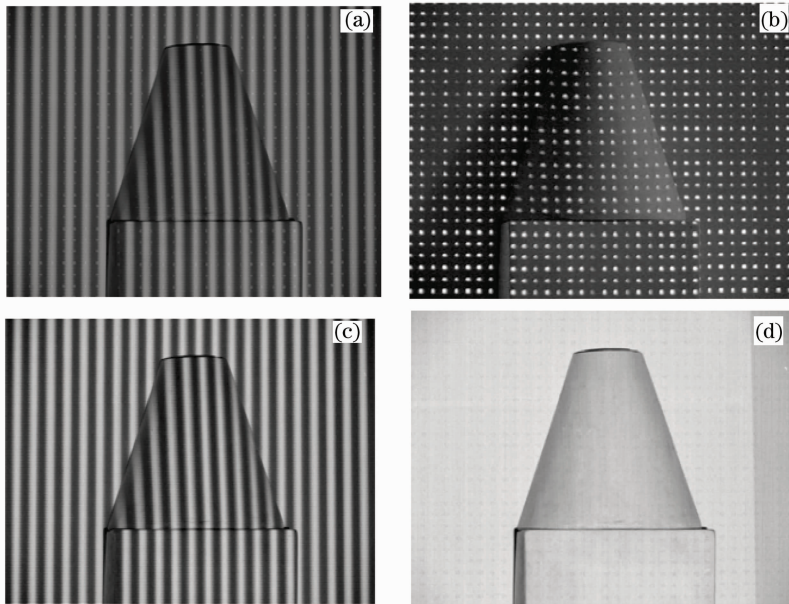


图 6 变形彩色复合光栅条纹图(a),R 通道变形点阵图(b),G 通道变形条纹图(c)和 B 通道背景光图像(d)

Fig. 6 Deformed fringe pattern of colorful composite grating (a), deformed point array pattern (b) of R channel, deformed fringe pattern (c) of G channel, image (d) of background light of B channel

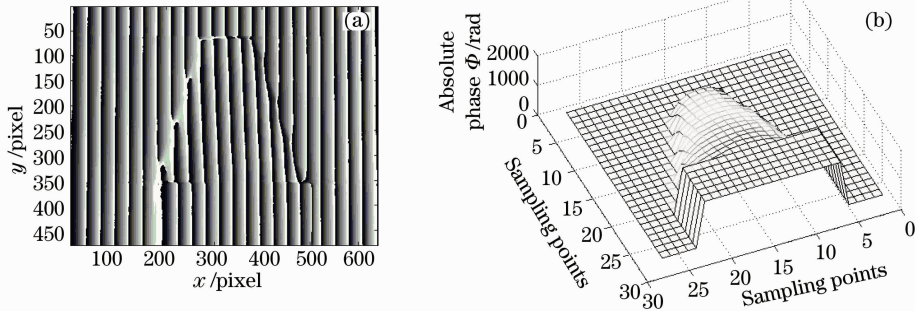


图 7 G 通道正弦条纹截断相位分布(a)及 R 通道点阵图像采样点处绝对相位分布(b)

Fig. 7 Wrapped phase distribution of sinusoidal fringe pattern of G channel (a) and absolute phase of sampling points of R channel (b)

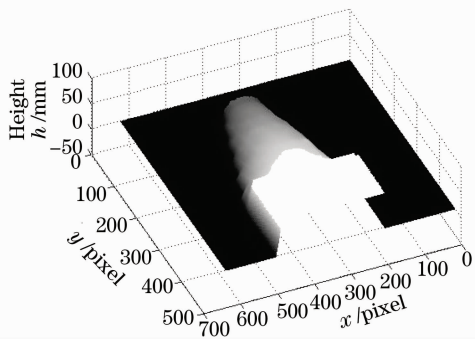


图 8 采用彩色复合光栅得到的物体三维面形重建结果

Fig. 8 3-D shape of the restored object using colorful composite grating

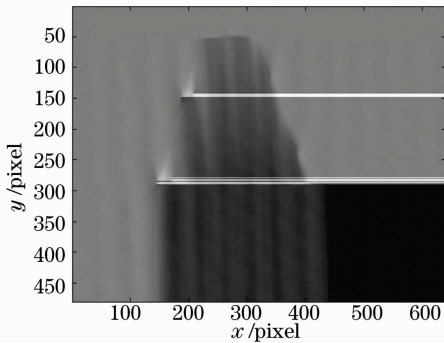


图 9 采用通常算法得到的单频正弦条纹相位展开结果

Fig. 9 Result of conventional phase unwrapping based on sinusoidal fringe pattern

由实验结果发现,此方法对不同三维面形具有较好的普适性。另外,由于实验过程中仅投影了一帧图像,与普通复合编码数字成像方法相比该方法具有更高的测量效率,适合于高速测量。

4 结 论

提出了一种新型彩色复合光栅三维面形测量方法,该方法利用色度学原理将数字点阵和正弦光栅复合成一帧图像投影到待测物体上,通过色彩分离

技术可分别得到变形点阵图像和正弦条纹图像。利用点阵图像测得的采样点处绝对相位值来控制正弦条纹截断相位的正确展开。理论分析和实验结果表明,该方法抑制误差传播能力强,能够有效克服相位展开困难,适合于不连续三维物体的高速实时测量。

参 考 文 献

- 1 Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa. 955-fps Real-time shape measurement of a moving/deforming object using high-speed vision for numerous-point analysis[C]. IEEE Internat. Conf. Robotics and Automation, 2007. 3192~3197
- 2 Masatoshi Ishikawa. High-speed VLSI vision chip and its application[C]. SPIE, 2001, **4183**: 1~8
- 3 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Opt. Engng., 2000, **39**(1): 10~22
- 4 Jason Geng, Ping Zhuang, Patrick May *et al.*. 3D FaceCam™-a fast and accurate 3D facial imaging device for biometrics applications[C]. SPIE, 2004, **5404**: 316~327
- 5 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. Appl. Opt., 1983, **22**(24): 3977~3982
- 6 Su Xianyu, Li Jian, Guo Lurong. Improved Fourier transform profilometry[C]. SPIE, 1988, **954**: 32~35
- 7 Yue Huimin, Su Xianyu, Li Zeren. Improved fast Fourier transform profilometry based on composite grating [J]. Acta Optica Sinica, 2005, **25**(6): 767~771
- 8 岳慧敏, 苏显渝, 李泽仁. 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2005, **25**(6): 767~771
- 9 Mao Xianfu, Su Xianyu, Chen Wenjing *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2008, **28**(7): 1291~1295
- 10 毛先富, 苏显渝, 陈文静 等. 改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1291~1295
- 11 Yang Chuping, Weng Jiawen. Fourier transform profilometry by original grating reconstruction from deformed grating pattern[J]. Acta Optica Sinica, 2008, **28**(7): 1287~1290
- 12 杨初平, 翁嘉文. 基准光栅重构傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1287~1290
- 13 J. M. Huntley, H. O. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. Appl. Opt., 1993, **32**(17): 3047~3052
- 14 Yue Huimin, Su Xianyu. Temporal phase unwrapping progress [J]. Laser Journal, 2004, **25**(3): 9~12

- 岳慧敏, 苏显渝. 时间相位展开方法研究进展[J]. 激光杂志, 2004, **25**(3): 9~12
- 12 Yue Huimin. Research on three-dimensional profilometry based on temporal phase unwrapping [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. 16~29
- 岳慧敏. 基于时间相位的三维轮廓研究[D]. 成都: 四川大学, 2005. 16~29
- 13 Jielin Li, Hongjun Su, Xianyu Su. Two-frequency grating used in phase-measuring profilometry[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 277~280
- 14 Huang Hongyun, Zhang Yafeng. Study on the 3-D measurement based on modulation [J]. *Optical Instruments*, 2008, **30**(3): 18~21
- 黄红云, 张亚锋. 基于调制度的光学三维测量的研究[J]. 光学仪器, 2008, **30**(3): 18~21
- 15 Shao Shuangyun, Su Xianyu. New depth recovery algorithm in modulation measurement profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9): 43~54
- 邵双运, 苏显渝. 调制度测量轮廓术高度信息获取新算法[J]. 光电工程, 2005, **32**(9): 43~54
- 16 Sun Xuezhen, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1947~1951
- 孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开[J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1947~1951
- 17 Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimension 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
- 18 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
- 19 Bu Peng, Chen Wenjing, Su Xianyu. Study on Fourier transform profilometry by bicolor sinusoidal fringe pattern projection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(1): 55~58
- 步鹏, 陈文静, 苏显渝. 双色正弦投影傅里叶变换轮廓术方法研究[J]. 光电工程, 2005, **32**(1): 55~58
- 20 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Improved FTP based on bi-color fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1153~1157
- 陈文静, 苏显渝, 曹益平等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1153~1157
- 21 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1407~1411
- 张南洋生, 杨坤涛. 双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1407~1411
- 22 Shi Zhan, Zhao Hong, Zhang Lu. Phase-unwrapping method based on dual-frequency colorful fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 461~465
- 施展, 赵宏, 张璐. 基于双频彩色条纹投影的相位测量去包裹方法[J]. 光学学报, 2007, **27**(3): 461~465