

文章编号: 0253-2239(2010)11-3191-06

# 基于条纹对比度和背景光校准的 正交复合光三维测量方法

何宇航 曹益平 翟爱平

(四川大学光电科学技术系 四川 成都 610064)

**摘要** 提出了一种对条纹对比度和背景光进行校准的正交复合光三维测量方法。从参考平面的复合光栅像中解调获得各帧相移正弦条纹,通过频域滤波的方法获取条纹的零频和基频分量,计算出各帧相移正弦条纹相对第一帧正弦条纹的对比度和背景光比例系数,并以此系数对实物测量时解调出来的各帧变形条纹对比度和背景光进行校准,建立了新的三维测量数学模型。实验证明该方法能降低传统正交复合光三维测量方法中的解相误差,提高系统的测量精度。

**关键词** 测量;复合结构光;三维测量;正弦条纹;频谱混叠;相位算法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3191

## A 3-D Measurement Method with Orthogonal Composite Light Based on Fringe Contrast and Background Calibration

He Yuhang Cao Yiping Zhai Aiping

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

**Abstract** A three dimensional (3-D) measurement method with orthogonal composite grating based on fringe contrast and background calibration is presented. We get the phase-shifted sine fringes from the composite grating image captured on the reference plane, and the zeroth order spectrum and first order spectrum of the phase-shifting sinusoidal fringes can be obtained by filtering in spatial frequency domain, then the ratio coefficients of contrast and background between the sinusoidal fringes can be calculated out. When an object is measured, the contrast and background of the demodulated deformed fringes can be calibrated by these ratio coefficients, and new 3-D measurement mathematical model is set up. Experiments prove that the new method can effectively reduce phase error, and improve measurement accuracy.

**Key words** measurements; composite structured light; 3-D measurement; sine fringe; spectrum overlapping; phase algorithm

### 1 引言

随着计算机技术、光学成像技术以及数字投影技术的发展,光学三维传感由于其高精度、大面积以及高分辨率的测量特点在机器视觉、生物医学、工业

检测、影视特技等领域有着巨大的发展潜力和广阔的应用前景。采用结构光投影的三维测量方法<sup>[1~5]</sup>是所有光学三维传感方法中比较常用的一类。其中,相位测量轮廓术(PMP)<sup>[6,7]</sup>由于采用了多次投

收稿日期: 2010-01-18; 收到修改稿日期: 2010-03-11

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333), 国家科技重大专项(2009ZX02204-008)和四川省科技攻关项目(2006Z01-028)资助课题。

作者简介: 何宇航(1981—),男,博士研究生,主要从事三维传感和光电信息处理等方面的研究。

E-mail: hang\_yu\_he@163.com

导师简介: 曹益平(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事三维传感、光电信息处理及光机电一体化等方面的研究。E-mail: ypcao@scu.edu.cn

影和相移技术,能够达到很高的测量精度,但同时其测量速度较低。Guan 等提出了一种采用复合结构光投影的方法<sup>[8]</sup>:将相位测量轮廓术所需的多帧正弦光栅模式分别调制在不同载波频率上,将它们叠加在一起组成一帧复合光栅模式,对摄像机获取的复合条纹像进行滤波、解调处理可以解调出各帧相移变形条纹,然后采用传统的相位测量轮廓术即可重建物体的三维面形。通常,解调出来的变形条纹精度会受到频谱混叠的影响,大量实验发现频谱混叠使得各帧变形条纹的对比度和背景光发生了不同的改变,而相位测量轮廓术是建立在各帧变形条纹对比度和背景光必须一致的基础上,从而引入了解相误差。

本文提出了一种对变形条纹对比度和背景光进行校准的正交复合光三维测量方法。先从参考平面的复合光栅像中解调获得各帧相移正弦条纹,通过频域滤波的方法获取条纹的零频和基频分量,计算

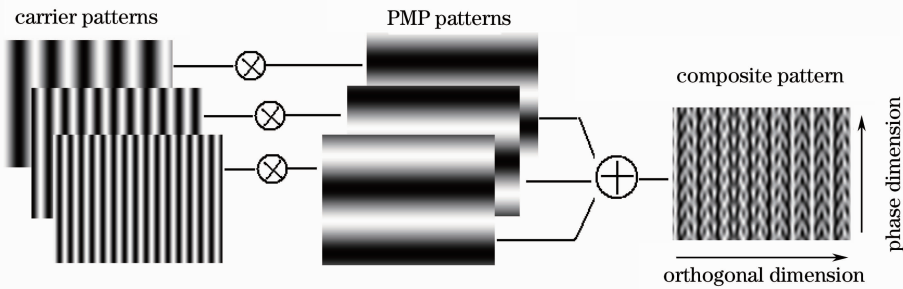


图 1 复合模式的形成示意图

Fig. 1 Forming procedure of composite pattern (CP)

式中  $I_n^p = A^p + B^p \cos(2\pi f_n^p y^p + 2\pi n/N)$ , 为所调制的正弦光栅模式。 $C^p$  和  $D^p$  为投影系数,  $f_n^p$  是载波频率。物体高度调制会造成相位在  $y^p$  方向发生改变,将  $y^p$  称为相位方向,将垂直于  $y^p$  的  $x^p$  方向称之为正交方向。

由于物体的反射,摄像机获得的复合光栅像可以表述为

$$I^s = c^s + d^s \sum_{n=1}^N I_n^s \cos(2\pi f_n^s x^s), \quad (2)$$

式中

$$I_n^s = ar(x, y) + br(x, y) \cos[2\pi f_n^s y^s + \varphi(x, y) + 2\pi n/N],$$

$r(x, y)$  为物体的反射率,  $a, b$  分别表示变形条纹  $I_n^s$  的背景光和对比度。对(2)式进行傅里叶变换后,在频域内正交方向设置滤波器,将各载波信号分离出来,对分离出来的载波信号进行傅里叶逆变换,在空域内进行幅度解调处理,可以获得各帧变形条纹  $I_n^s$ 。由这  $N$  帧

出各帧相移正弦条纹相对第一帧正弦条纹的对比度和背景光比例系数,然后在实物测量时对解调出来的各帧变形条纹对比度和背景光进行校准,建立了新的三维测量数学模型。该方法能有效抑制频谱混叠引入的解相误差,提高系统的测量精度。

## 2 传统的正交复合光三维测量原理

相位测量轮廓术具有点对点测量、对环境光不敏感的优点,因此具有很高的测量精度,但由于其需要多次投影,测量速度较低。Guan 等在 2003 年提出的投影复合结构光进行三维测量的方法<sup>[8]</sup> 将 PMP 所需的正弦光栅模式分别调制在各自不同的载波频率上,叠加后形成一帧复合光栅模式。图 1 显示了复合光栅的形成示意图。复合光栅模式可以表述为

$$I^p = C^p + D^p \sum_{n=1}^N I_n^p \cos(2\pi f_n^p x^p), \quad (1)$$

变形条纹,可以得到受物体面形调制的相位  $\varphi(x, y)$ <sup>[6,7]</sup>

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

(3)式获取的相位被截断在范围  $[-\pi, \pi]$  内,对其进行展开处理后获得连续的相位分布<sup>[9]</sup>,然后根据系统标定的相位-高度映射关系<sup>[10~13]</sup>,可以获得物体的高度数据。

## 3 基于条纹对比度和背景光校准的正交复合光三维测量原理

正交复合光三维测量的关键在于从复合条纹像中准确解调出各帧变形条纹。通常,变形条纹的精度会受到频谱混叠的影响,而滤波操作是无法完全消除混叠的频谱成分的。在测量系统中,非线性效应<sup>[14]</sup>、

光源的发散性以及图像的频谱泄露<sup>[15]</sup>都会产生频谱混叠现象。图 2 显示了使用三个载波通道时复合条纹像在正交方向的频谱分布,从中可以看到干扰的谐波分量以及相邻频带间出现了混叠。频谱混叠使得各帧变形条纹的对比度和背景光发生了不同的改变,破坏了传统正交复合光三维测量中变形条纹间的对比度和背景光必须一致的基础,会导致解相误差。

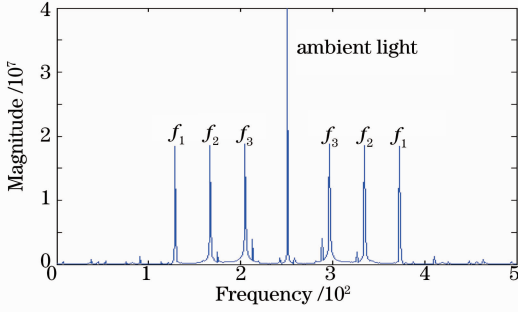


图 2 出现混叠现象的复合条纹像频谱

Fig. 2 Spectrum of the captured distorted composite fringe image

如果以参考平面为测量对象,将(1)式所示的正交复合光栅投影到参考平面上,从 CCD 采集的参考平面复合条纹像中可解调得到各帧相移正弦条纹,正弦条纹的光场分布可以表述为

$$I_1(x, y) = r(x, y)a_1 + r(x, y)b_1 \cos[2\pi f^s y + 2\pi/3 + \varphi(x, y)], \quad (9)$$

$$I_2(x, y) = r(x, y)a_2 + r(x, y)b_2 \cos[2\pi f^s y + 4\pi/3 + \varphi(x, y)], \quad (10)$$

$$I_3(x, y) = r(x, y)a_3 + r(x, y)b_3 \cos[2\pi f^s y + 6\pi/3 + \varphi(x, y)], \quad (11)$$

将  $a_2 = a_{21}a_1, b_2 = b_{21}b_1, a_3 = a_{31}a_1, b_3 = b_{31}b_1$  代入(10), (11), 联立(9), (10), (11)求解可以获得受到物体高度调制的相位

$$\varphi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{(b_{21} - a_{21})I_3 + (a_{31} + 2b_{31})I_2 - (2a_{21}b_{31} + b_{21}a_{31})I_1}{\sqrt{3}[(a_{21} + b_{21})I_3 - a_{31}I_2 - a_{31}b_{21}I_1]} \right\} - 2\pi f^s y, \quad (12)$$

式中  $2\pi f^s y$  为参考平面的相位,为一已知量。对从(12)式获得的  $\varphi(x, y)$  进行相位展开后,可根据系统标定的相位-高度映射关系,获得物体的高度数据。

## 4 实验及结果分析

为了验证新方法的有效性,将编制的算法应用在实际的测量系统中。系统所用的数字投影仪为 HITACHI HCP-70X, 摄像机为 Kodak DC3400。数字投影仪所投的图像大小为  $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$  个像素,三个载波周期分别为 6, 8.7 和 16 pixel,所调制的正弦光栅模式的周期为 12 个像素,正弦光栅模式的栅线方向沿着图像的行方向。摄像机获得的复合光栅像大小为  $1240 \text{ pixel} \times 940 \text{ pixel}$ ,三个载波

$$I^0(x, y) = R^0(x, y)a_n + R^0(x, y)b_n \times \cos(2\pi f^s y + 2\pi n/N), n = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

式中  $R^0(x, y)$  为参考平面的反射率。由于参考平面反射率均匀,零级分量和基频分量通过滤波方式能够较好地分离,从而可以获得  $R^0(x, y)a_n$  和  $R^0(x, y)b_n$  的分布<sup>[2]</sup>。

由于系统的测量精度与解调出来的变形条纹的灰度动态范围成正比,使用三个载波通道时变形条纹有最大的灰度动态范围,因此通常采用三个载波通道( $N=3$ )的复合光栅模式。引入比例系数如下

$$a_{21} = R^0(x, y)a_2/[R^0(x, y)a_1] = a_2/a_1, \quad (5)$$

$$a_{31} = R^0(x, y)a_3/[R^0(x, y)a_1] = a_3/a_1, \quad (6)$$

$$b_{21} = R^0(x, y)b_2/[R^0(x, y)b_1] = b_2/b_1, \quad (7)$$

$$b_{31} = R^0(x, y)b_3/[R^0(x, y)b_1] = b_3/b_1. \quad (8)$$

分析可知,  $a_{21}, a_{31}, b_{21}, b_{31}$  与被测件的反射率无关,当测量系统的结构参数不变时,具有时不变、空不变的特性,如果把这 4 个系数作为系统的结构参数存储下来,在实物测量时可以用来校准变形条纹的对比度和背景光。

对物体进行测量时,受物体反射率  $r(x, y)$  的影响,从复合条纹像中解调得到的三帧变形条纹的光场分布为

周期分别为 10.6, 15.3 和 28.3 pixel,解调获得的正弦条纹的周期为 21.3 pixel。

为了显示频谱混叠给解调出的正弦条纹带来的影响,采用传统的相位测量轮廓术获取了受参考平面调制的三帧相移正弦条纹,如图 3 所示。图 4 为采用正交复合光三维测量方法获取的三帧相移正弦条纹。对比图 3 和图 4 可以看到,图 4 在正交方向具有明显的纹波调制,而且每帧条纹受到的纹波调制程度也不一样。图 5 和图 6 显示了图 4 中第一帧和第二帧条纹背景光和对比度的比值分布,可以看到条纹间背景光和对比度的比值分布在正交方向上受到了周期性的调制。因此频谱混叠给每帧条纹带来了不同的影响,必须对条纹的背景光和对比度进行校准。



图 3 由 PMP 方法采集到的正弦条纹。(a)第一帧正弦条纹;(b)第二帧正弦条纹;(c)第三帧正弦条纹

Fig. 3 Sine fringes captured with PMP method. (a) the first sinusoidal fringe; (b) the second sinusoidal fringe; (c) the third sinusoidal fringe



图 4 从参考平面的复合条纹像中解调出来的正弦条纹。(a)第一帧解调的正弦条纹;(b)第二帧解调的正弦条纹;(c)第三帧解调的正弦条纹

Fig. 4 Sine fringes demodulated from a composite grating image captured on the reference plane. (a) the first modulated sinusoidal fringe; (b) the second modulated sinusoidal fringe; (c) the third modulated sinusoidal fringe

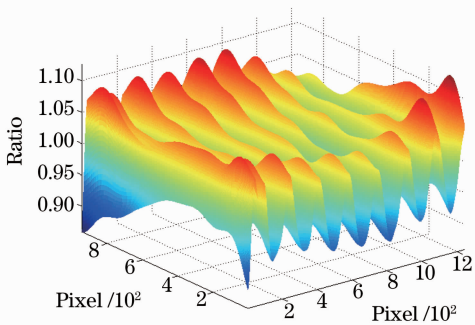


图 5  $a_{21}$  分布

Fig. 5  $a_{21}$  distribution

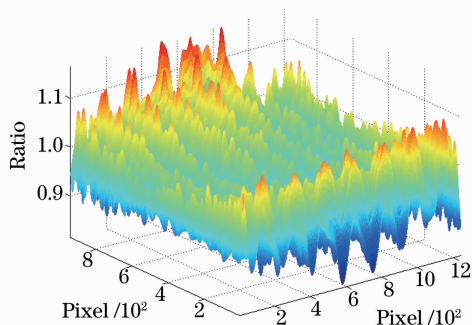


图 6  $b_{21}$  分布

Fig. 6  $b_{21}$  distribution

为了验证所提出的校准方法的时不变特性,在不同时间获取了 10 frame 复合条纹像,用参数  $\max(\sigma/E)$  来衡量正弦条纹间背景光和对对比度比值关系的稳定性,  $\sigma$  为从 10 frame 不同复合条纹像解调获得的正弦条纹间背景光或对对比度比值的方差,  $E$  为平均值。由于  $\max(\sigma/E)$  表征了条纹间背景光或对对比度比值在时间方向的最大变化率范围,因此可以用来衡量校准方法的平稳特性。通过计算,背景和对比度的比值随时间的变化不超过 3%,可以认为是时不变的常量。

为了比较精度,首先对一个 18 mm 的平面进行了测量。图 7 为采用 Guan 的方法重建的三维面形,图 8 为采用本文方法重建的三维面形。可以看到,图 7 中平面上具有大量的纹波成分,而图 8 中的纹波幅度已经大大减小。通过计算,Guan 方法重建平面的均方差为 0.527 mm,而本文方法的均方差为 0.251 mm,测量精度提高了 1 倍以上。

为了进一步验证本文方法的实用性,还对一个如图 9 所示的纸质盘子进行了测量,图 10 为采集到的复合条纹像。图 11 为采用 Guan 的方法重建的三维图像,图 12 为采用本文方法重建的三维图像。可以看到,图 11 的中心部分具有很强的纹波成分,

边缘部分也具有较多的毛刺,而图 12 的中心部分和边缘部分都要光滑很多。从这些实验结果可以看到,所提出的方法确实降低了测量误差。

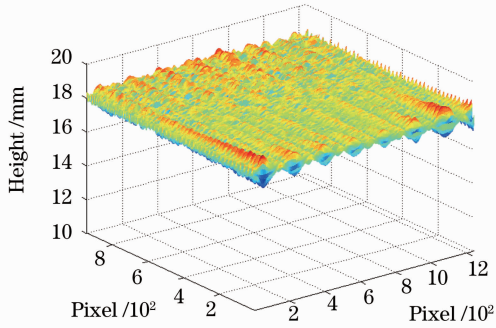


图 7 采用 Guan 的方法重建的平面  
Fig. 7 Reconstructed plane by Guan's method

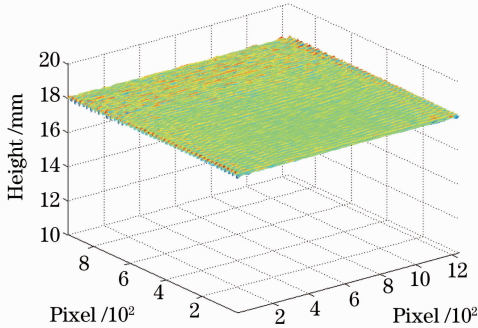


图 8 采用本文方法重建的平面  
Fig. 8 Reconstructed plane by the proposed method



图 9 测试的纸质盘子  
Fig. 9 A tested papery plate

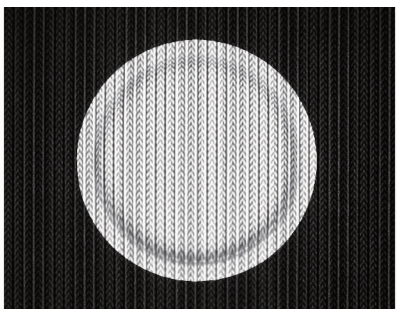


图 10 纸质盘子的复合条纹像  
Fig. 10 Composite fringe image of a papery plate

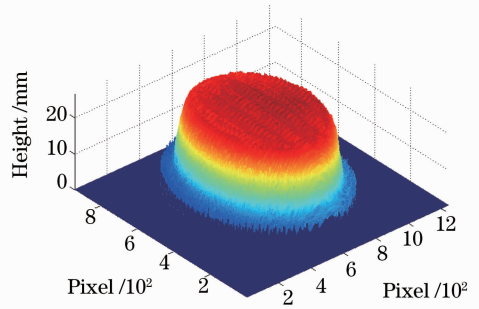


图 11 采用 Guan 方法重建的盘子  
Fig. 11 Reconstructed plate by Guan's method

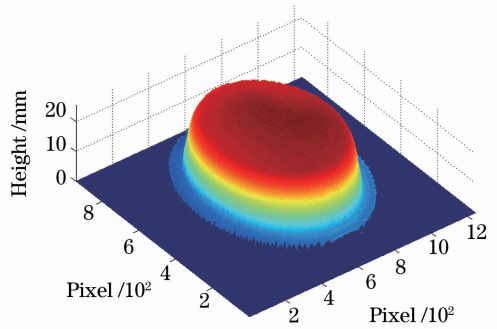


图 12 采用本文方法重建的盘子  
Fig. 12 Reconstructed plate by the proposed method

### 5 结 论

由于频谱混叠的影响,从复合条纹像中解调出来的各帧变形条纹的对比度和背景光发生了不同的改变,破坏了传统复合光三维测量方法中变形条纹间对比度和背景光必须一致的基础。本文提出了一种对变形条纹对比度和背景光进行校准的复合光三维测量方法。从参考平面的复合光栅像中解调获得各帧正弦条纹,通过频域滤波的方法获取条纹的零频和基频分量,计算出各帧相移正弦条纹相对第一帧正弦条纹的对比度和背景光比例系数,然后在实物测量时,对解调出来的各帧变形条纹对比度和背景光进行校准,建立了新的三维测量的数学模型。实验证明该方法有效抑制了频谱混叠引入的解相误差,提高了系统的测量精度。

### 参 考 文 献

- 1 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 2 Qican Zhang, Xianyu Su, Yiping Cao *et al.*. Optical 3-D shape and deformation measurement of rotating blades using stroboscopic structured illumination [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(11): 113601
- 3 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  
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
- 4 Z. J. Geng. Rainbow 3-D camera: new concept of high-speed three vision system[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(2): 376~383
- 5 P. S. Huang, Q. Hu, F. Jin *et al.*. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring[J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(6): 1065~1071
- 6 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18): 3105~3108
- 7 V. Srinivasan, H. C. Liu, Maurice Halioua. Automated phase-measuring profilometry; a phase mapping approach[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 185~188
- 8 C. Guan, L. G. Hassebrook, D. L. Lau. Composite structured light pattern for three-dimensional video [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 406~417
- 9 Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new fast phase unwrapping method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 259~267  
盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的快速解相位方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 259~267
- 10 Song Wanzhong, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. A new method of three-dimensional coordinates calibration in phase measuring profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 272~277  
宋万忠, 苏显渝, 曹益平等. 相位测量轮廓术中三维坐标校准新方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 272~277
- 11 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166  
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- 12 Wu Shuangqing, Zhang Yin, Zhang Sanyuan *et al.*. Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2780~2785  
吴双卿, 张 引, 张三元等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2780~2785
- 13 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86  
徐巧玉, 叶 东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- 14 Hongwei Guo, Haitao He, Mingyi Chen. Gamma correction for digital fringe projection profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 2906~2914
- 15 Chen Wenjing, Su Xianyu, Tan Songxin. Discussion on phase errors caused by frequency leakage in FTP [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1429~1434  
陈文静, 苏显渝, 谭松新. 傅里叶变换轮廓术中频谱泄漏的讨论[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10): 1429~1434