

文章编号: 0253-2239(2005)02-207-5

# 利用频闪结构光测量旋转叶片的三维面形\*

张启灿 苏显渝 曹益平 李 勇 向立群 陈文静

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

**摘要:** 在对快速甚至高速运动物体进行研究时,需要对运动物体各个时刻的三维面形和形变量进行数字化描述。提出了一种利用频闪光作为结构照明光源,基于傅里叶变换轮廓术对旋转叶片每个时刻的三维面形和形变量进行动态测量的光学方法。使用自行设计的同步控制单元对风扇叶片旋转位置进行检测,用该检测信号同步驱动频闪结构光源的发光和图像采集系统“冻结”记录下旋转叶片表面变形条纹的瞬时图像,再运用傅里叶变换轮廓术计算出每一瞬间时刻旋转叶片的三维面形,分析这些三维面形数字化结果可以进一步得到旋转叶片的形变量。通过对家用电风扇的实验,验证了该方法的合理性和可行性。该方法可望在高速运动物体的面形和变形研究上有广泛运用。

**关键词:** 信息光学; 测量与计量; 三维面形测量; 傅里叶变换轮廓术; 频闪光; 动态三维可视化; 结构光照明; 相位展开

中图分类号: TN206 文献标识码: A

## Three-Dimensional Shape Measurement for Rotating Blade Using Stroboscopic Structured Illumination

Zhang Qican Su Xianyu Cao Yiping Li Yong Xiang Liqun Chen Wenjing

(Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract:** Three-dimensional digitized description of high-speed motion objects is very useful in study its motion and deformation. An optical method of rotating fan blade shape and deformation measurement is proposed, which was based on Fourier transform profilometry (FTP) and stroboscopic effect, and than is verified by experiment on a domestic electric fan. The results of authors' experiment proposed show that FTP can reconstruct the rotating fan blade shape efficiently and reveal the deformation clearly at different times by using stroboscopic light structured illumination. This method is suitable for wide use in studying rapid periodic motion.

**Key words:** information optics; measurement and metrology; three-dimensional shape measurement; Fourier transform profilometry; stroboscope; dynamic three-dimensional visualization; structured illumination; phase unwrapping

### 1 引 言

光学三维轮廓术是通过运用适当的光学和电子仪器获取客观存在物体的外部形貌的过程,其优点是非接触、测量速度快和精度高,易于实行自动化测量,已广泛用于机器视觉、实物仿形、工业制造与检测、生物医学等领域。在常用的方法中,由 Takeda 等人在 1982 年提出的傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FTP)<sup>[1~7]</sup>的运用尤为广泛。傅里叶变换轮廓术只需要一帧变形条纹图像就能恢复出被测

物体的三维形貌,这一优点使得光学非接触三维轮廓术运用到实时动态测量和数据处理成为可能。

频闪光是一秒钟内能开启和关断若干次的光源,它已经广泛用于高速摄影等领域。急速周期性运动的物体可以利用频闪光源获得降低运动速度的,甚至是静止的观测现象。当频闪光源的重复频率严格等于物体运动频率,或者是物体运动频率的整数倍时,运动的物体将呈现“静止”现象。本文的工作正是利用这种“频闪效应”来“冻结”高速旋转风

\* 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金(10376018)资助课题。

作者简介: 张启灿(1974~),男,云南陆良人,讲师,博士研究生,近年从事光学三维传感、条纹分析和相位展开工作。  
E-mail: zhqc@email.scu.edu.cn

收稿日期: 2004-04-29; 收到修改稿日期: 2004-06-10

扇叶片,并对其进行面形和变形量的测量。

本文研究了傅里叶变换轮廓术用于旋转风扇叶片的动态面形测量的原理、数据获取和处理的方法。实验中,对处于旋转过程中的叶片外形进行了动态测量,从风扇通电开始运转到旋转相对稳定整个过程共获得 100 帧图像,运用傅里叶变换方法分析和处理这些图像数据,实现了旋转叶片外形动态变化过程的数字化描述。本文的方法为风扇叶片设计和应力变形分析提供了一个新的手段,并能进一步运用到中高速周期性运动物体的测量研究工作中。

## 2 理论基础

### 2.1 用于动态测量的傅里叶变换轮廓术

用于动态测量的傅里叶变换轮廓术<sup>[8~11]</sup>所采用的光路与传统的静态物体面形测量光路相似。图 1 是傅里叶变换轮廓术的测量光路,G 为投影装置,S 为成像装置,一般采用 CCD 摄像机。 $E_p$ 、 $E'_p$  分别是投影系统的出瞳和入瞳, $E'_p E_p$  为其光轴。 $E'_c$ 、 $E_c$  分别是成像系统的出瞳和入瞳, $E'_c E_c$  为成像系统的光轴,两光轴相交于参考平面 R 上的点 O。光栅 G 的栅线垂直于  $E_p E_c O$  平面,参考平面与  $E'_c E_c$  垂直。

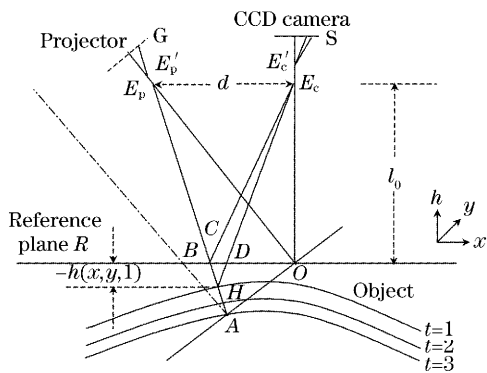


图 1 傅里叶变换轮廓术的光路示意图

Fig. 1 Optical geometry of Fourier transform profilometrical system

当一块正弦光栅或罗奇光栅被离焦投影<sup>[12]</sup>到参考平面上时,CCD 获取的成像条纹为

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n r_0(x, y) \times \exp\{j[2n\pi f_0 x + n\phi_0(x, y)]\}, \quad (1)$$

其中  $x$  轴与栅线垂直, $y$  轴与栅线平行, $r_0(x, y)$  代表参考面上的反射率分布函数, $f_0$  为光栅像的空间基频( $f_0 = 1/p_0$ ,  $p_0$  为光栅像的空间周期), $\phi_0(x, y)$  是参考平面上的相位分布。在相同结构参量的条件下,将该光栅像投影到待测的漫反射动态物体表面

上,成像系统得到的变形条纹分布为

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

其中  $t = 1, 2, \dots, s$ ,  $s$  为整个动态过程的历经时间, $r(x, y, t)$  是各个时刻物体表面反射率分布函数, $\phi(x, y, t)$  是各个时刻由于物体表面高度变化而引起的相位调制。

为了讨论和数据处理的方便,我们将成像系统拍摄获得的参考平面的条纹定义为  $t = 0$  时刻获得的零时刻无形变的变形条纹,可以将(1)式改写为

$$g_0(x, y) = g(x, y, t = 0) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n r(x, y, 0) \times \exp\{j[2n\pi f_0 x + n\phi(x, y, 0)]\}, \quad (3)$$

这样一来,(1)式和(2)式就可统一写成

$$g(x, y, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n r(x, y, t) \times \exp\{j[2n\pi f_0 x + n\phi(x, y, t)]\}. \quad (4)$$

$t = 0, 1, 2, \dots, s$

对(4)式进行傅里叶变换,得到的频谱分布中,基频包含了所需的相位信息。通过一个合适的带通滤波器,将其中一支基频分量过滤出来,然后对滤出的基频分量进行逆傅里叶变换,得到的复分布为

$$\hat{g}(x, y, t) = A_1 r(x, y, t) \times \exp\{j[2n\pi f_0 x + n\phi(x, y, t)]\}. \quad (5)$$

$t = 0, 1, 2, \dots, s$

从投影光路的几何关系可以看出,物体的高度信息被编码在三维相位分布  $\phi(x, y, t)$  中,而  $\Delta\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t) - \phi(x, y, 0)$  对应着待测物体的真实高度分布  $h(x, y, t)$ ,因此只需要求出  $\Delta\phi(x, y, t)$  后再利用相位和高度的对应关系式

$$h(x, y, t) = \frac{l_0 \Delta\phi(x, y, t)}{\Delta\phi(x, y, t) - 2\pi f_0 d} \approx -\frac{l_0 \Delta\phi(x, y, t)}{2\pi f_0 d}, \quad (6)$$

即可恢复出物体的三维物体表面面形高度分布。上式中  $l_0$  为摄像系统到参考平面的距离; $d$  为摄像系统与投影系统之间的距离。

### 2.2 三维相位的计算

三维相位场的计算可以通过不同的计算方法获得,可以直接将某一时刻  $t$  的复分布场  $\hat{g}(x, y, t)$  和  $t = 0$  时刻(即参考平面)的共轭复分布  $\hat{g}^*(x, y, 0)$  相乘,从乘积中求出  $t$  时刻的变形条纹相对于参考

平面的相位差：

$$\Delta\phi(x, y, t) = \phi(x, y, t) - \phi(x, y, 0) = \arctan \frac{\text{Im}[\hat{g}(x, y, t)\hat{g}^*(x, y, 0)]}{\text{Re}[\hat{g}(x, y, t)\hat{g}^*(x, y, 0)]}, \quad (7)$$

Im 和 Re 分别代表 $[\hat{g}(x, y, t)\hat{g}^*(x, y, 0)]$ 的虚部和实部；也可以基于相邻两帧之间的相位差获得每一帧的截断相位分布，即依次对相邻的两个时刻的变形条纹求出二者之间的相位差

$$\Delta\phi_i(x, y) = \phi(x, y, t) - \phi(x, y, t-1) = \arctan \frac{\text{Im}[\hat{g}(x, y, t)\hat{g}^*(x, y, t-1)]}{\text{Re}[\hat{g}(x, y, t)\hat{g}^*(x, y, t-1)]}, \quad (8)$$

这样， $t$ 时刻变形条纹相对于参考平面的相位差为

$$\sum_{n=1}^t \Delta\phi_n(x, y) = \Delta\phi_1(x, y) + \Delta\phi_{t-1}(x, y) + \dots + \Delta\phi_t(x, y) = \Delta\phi(x, y, t). \quad (9)$$

### 2.3 三维相位展开

截断相位的展开(Phase unwrapping)是三维面形测量中非常关键的一个步骤，目前针对二维截断相位进行展开，已开展了不少的工作和提出了不少的方法<sup>[13~16]</sup>。测量处于动态过程的物体时，我们获得的截断相位场是三维的。三维相位的展开不仅需要在 $x, y$ 二维方向上进行，而且还应在 $t$ 方向上也进行展开，以保证获得相邻时刻的相位场之间的正确关系。三维截断相位场的展开比二维相位场展开增加了时间维相位展开，这就需要采用新的相位展开方法和展开路径<sup>[8~10]</sup>。

对应三维截断相位场的计算方法，三维截断相位的展开可以首先对一帧较易展开的相位图作二维展开，最后依照这帧上展开后的各点相位值沿 $t$ 方向上进行三维展开；也可以首先选取一点沿 $t$ 方向上对每帧相应像素点进行一维展开，再依据该点的相位值对每帧进行二维展开，最终获得一个连续的三维相位场；另外，动态过程是用快速摄像方式获得变形条纹，只要拍摄的帧速足够快，在 $t$ 方向上的时间间隔 $\Delta t$ 很小，使得两帧之间的相位差远小于 $\pi$ ，便可以基于相邻帧的相位差异来进行相位展开。首先二维展开一帧物体变化不大的相位图，再用该帧展开后的相位 $\phi_{uv1}(x, y, 1)$ 加上两帧之间的所有相位差异 $\Delta\phi_i(x, y)$ 便能获得欲展开帧的连续三维相位场。对三维相位场中任意一帧的展开过程可以描述成

$$\phi_{uvk}(x, y, k) = \phi_{uv1}(x, y, 1) + \sum_{i=1}^{k-1} \Delta\phi_i(x, y), \quad (10)$$

式中 $\phi_{uvk}$ 为 $t = k$ 帧的展开连续相位， $\Delta\phi_i(x, y)$ 是第 $i$ 帧和第 $i-1$ 帧之间的相位差异。

### 3 频闪光源和图像采集的同步驱动控制

在高速动态摄影研究领域，频闪光源大多采用氙灯灯管，因为氙灯闪光强度高、均匀性好。但是，充电时间长、响应速度慢的缺点使得单一氙灯无法获得高频频闪光，当一次摄影过程中需要多次闪光曝光时，往往需要多个氙灯组合起来按时序依次放电闪光。在对旋转叶片三维面形测量实验中，我们选用发光二极管(LED)作为发光源，因为作为可见光冷光源的发光二极管比许多传统短持续时间闸门方法具有更多的优越性：高响应速度(纳秒量级)、低电压驱动、低耗费功率、低发热而无需任何散热装置、简单的驱动电路、微缩的外型尺寸、极度柔韧性的安装和低廉的成本价格。

在测量旋转风扇的叶片时，我们用红外对管跟踪检测风扇的转动频率，并将该频率信号实时同步地交给发光二极管频闪控制单元和图像采集单元，使得风扇旋转、发光二极管发光和摄像系统三个环节严格同步起来，最终真正“冻结”对应瞬间的叶片图像。为了很好地实现这个设想，我们专门设计开发了一个同步驱动控制电路单元。这个控制单元能完成发光二极管的任意闪烁频率驱动，也能自动跟踪和提取被测运动物体的频率，同步驱动发光二极管发光。

图2是同步驱动控制电路板的功能框图，当对管监测到旋转叶片的转动频率信号时，打开后端设备的触发器触发单支发光二极管或阵列发光二极管发光，同时也同步触发图像采集系统记录下闪光时旋转叶片的瞬间状态。

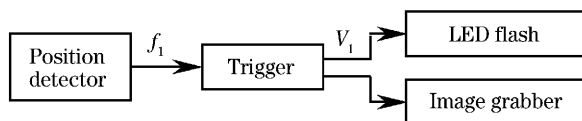


图2 同步驱动控制电路板的功能框图

Fig. 2 Block diagram of sync control unit

图3是旋转风扇叶片瞬时三维面形测量系统装置示意图。该测量系统要求图像采集卡具有外部触发采集功能，CCD摄像机具有外同步复位功能。由红外对管探测到的风扇叶片旋转频率信号 $S_{test}$ 传输给同步驱动控制电路板，该电路板同时发出两个信号：一个是对发光二极管的驱动电压信号 $V_{tri}$ ，该信号点亮了发光二极管并将光栅的像经过投影系统投影到被测的旋转风扇叶片上；另一个是反馈输给图像采集卡和成像系统(摄像器件CCD)的触发信号 $S_{tri}$ ，该信号又一分二，一路触发CCD记录下发光

二极管发光时的叶片图像,另一路同时触发图像采集卡采集当前时刻 CCD 获得的图像信息。携带了处于旋转状态中风扇叶片变形信息的图像数据被摄像系统接受后暂存在图像采集卡预先开辟的内存中,待全部拍摄完毕后转存到计算机主机的硬盘中等待处理。

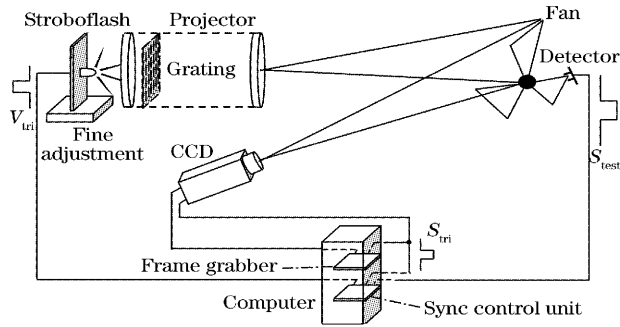


图 3 风扇叶片旋转形变测量系统装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sync control measurement system for blade

在用结构照明光场对动态物体进行三维面形测量研究中,受物体表面调制的变形条纹在很短时间以内以很快的速度移动,如果在闪一次光的这一小段时间过程中有任何一条变形条纹在运动,成像系统将得到一帧模糊的图像。因此,闪光的持续时间必须短到足够冻结这些变形条纹并且在同一时间内在成像系统中有充分的光强曝光。

## 4 实验结果

在图 3 所示的实验装置中,投影系统到风扇叶片的距离  $l_0 = 625$  mm,投影系统与成像系统之间距离  $d = 635$  mm,采用  $2$  Lp/mm 的正弦光栅投影结构光场,摄像器件采用接有  $16$  mm 标准镜头的 PULNiX-6AS CCD 摄像机,经过图像板数字化后的图像分辨率为  $576$  pixel  $\times$   $768$  pixel,在后期数据处理时裁剪成  $512$  pixel  $\times$   $512$  pixel。

实验中所用的风扇是普通家用的 Eagle 牌电风扇,它有三个塑料压模成型的叶片、三档风力调节按钮。我们先贴近叶片在它的前面放置一个平板作为参考平面,拍摄下未变形的条纹图像,然后在按下风扇电源开关启动风扇运转的同时开始同步触发拍摄变形条纹。从风扇开始旋转到相对稳定的旋转这个过程中,我们一共拍摄了  $100$  帧变形条纹图像。图 4(a)给出了其中的一帧。所有的数据均先保存在图像采集卡的缓存中,拍摄完成以后再转存到硬盘中。风扇的旋转相对稳定时转速为  $1080$  r/min

(对应风扇第二档),频闪照明光源的闪光持续时间为  $424$   $\mu$ s,占空比约为  $1\%$ 。

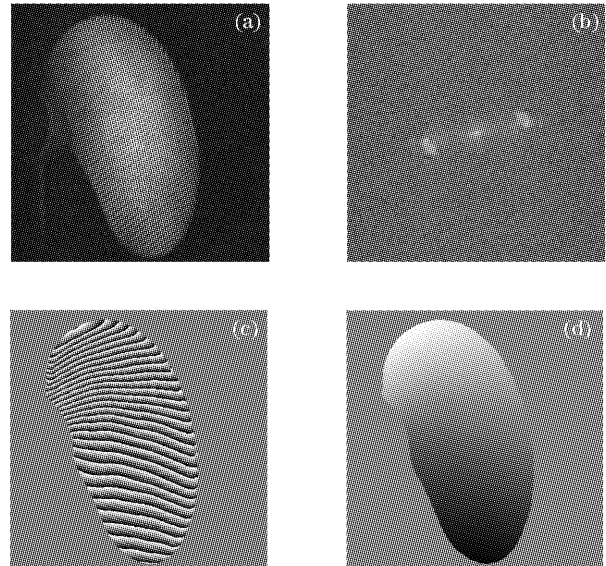


图 4 基于傅里叶变换轮廓术的叶片重建处理过程。(a) 一帧变形条纹,(b)傅里叶频谱,(c)截断相位分布,(d)展开后的连续相位

Fig. 4 Fan blade shape processing stages by Fourier transform profilometry. (a) One frame of deformed fringe, (b) the spectra of (a), (c) wrapped phase, (d) unwrapped phase of (c)

图 4 给出了旋转风扇叶片面形测量整个过程的四个步骤,图 4(a)是一帧变形条纹图;图 4(b)给出了图 4(a)的傅里叶频谱分布;图 4(c)是滤出图 4(b)的一级频谱后逆傅里叶变换得到的截断相位分布;图 4(d)是展开图 4(c)所示的截断相位后的连续相位分布。

图 5 绘出了恢复重建后的叶片旋转到第 24 转时的三维面形网格图。

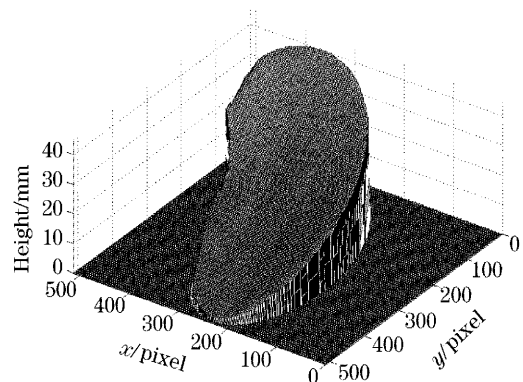


图 5 恢复重建的一帧叶片三维网格图

Fig. 5 One frame of reconstructed shape of fan blade

图 6 分别给出了旋转叶片在如左下角插入子图所示的两条线上、在转数为 1, 3, 10, 18, 26, 34, 42, 50, 58, 66, 74, 82, 90, 98 转时分别相对于第 1 转时的变形

情况, 从这个结果可以清晰地看出随着旋转的加快, 叶片离转轴中心越远, 变形量越大; 当风扇转动频率越接近相对稳定时, 变形量也逐渐趋于稳定值。

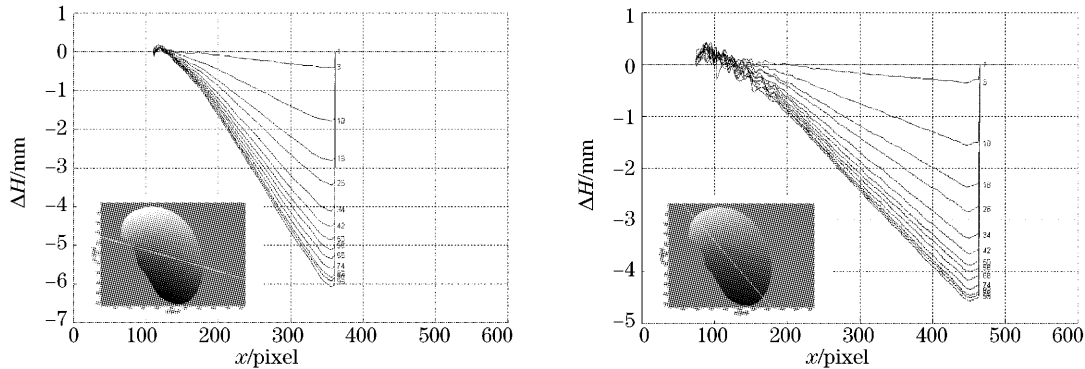


图 6 如左下角子图所示的线上各帧变形量

Fig. 6 The deformations along the line in inset

## 5 总结和讨论

本文提出了一种运用频闪光源投影结构光场, 基于傅里叶变换轮廓术的动态面形测量方法, 并通过对旋转风扇叶片的实验验证表明该方法在实时获取和测量周期性运动物体的三维面形信息上有着明显的优势和相当的精确度。它不仅能恢复重建出动态物体各个时刻的面形分布, 而且能够精确地提供风扇叶片不同时刻的变形量等信息。

当闪光频率信号以对管自动跟踪监测方式获得时, 本文提及的方案可以运用到处于具有明显重复频率特征的运动(如旋转、振动等周期性运动)中物体的三维面形的测量; 当闪光频率信号是以用户预先指定的方式产生时, 本文提及的方案也可以变通运用到不具有明显重复特征的运动(如膨胀、收缩和弹道飞行等运动)中物体的面形测量。另外, 如果将前端的频率信号监测提取单元改成其他传感器件, 还可以进一步拓宽该方法的运用领域, 比如改成声控装置后, 可以测量一些伴有明显爆炸声响的爆裂过程。

### 参 考 文 献

- 1 M. Takeda, K. Motoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 2 Xian-Yu Su, Jian Li, Lu-Rong Guo. An improved Fourier transform profilometry[C]. *Proc. SPIE*, 1988, **954**: 241~244
- 3 Jian Li, Xian-Yu Su, Lu-Rong Guo. An improved Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3-D object shapes[J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(12): 1439~1444
- 4 Xianyu Su, Wenjing Chen. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2001, **35**(5): 263~284
- 5 Xian-Yu Su, Song-Xin Tan, Ni-Qun Xian *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233 (in Chinese)
- 6 苏显渝, 谭松新, 向立群等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 7 Yang Hu, Chen Wenjing, Lu Chengqiang *et al.*. Influence of sampling on Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 929~934 (in Chinese)
- 8 杨虎, 陈文静, 陆成强等. 抽样对傅里叶变换轮廓术的影响[J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 929~934
- 9 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 (in Chinese)
- 10 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
- 11 Wu Chun-Cai, Su Xian-Yu. Dynamic 3D shape measurement[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 1996, **7**(5): 273~278 (in Chinese)
- 12 吴春才, 苏显渝. 动态过程的三维面形测量[J]. *光电子·激光*, 1996, **7**(5): 273~278
- 13 Zhang Qican, Su Xianyu. Dynamic Liquid Surface Measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(12): 1506~1508 (in Chinese)
- 14 张启灿, 苏显渝. 动态液面面形测量[J]. *光学学报*, 2001, **21**(12): 1506~1508
- 15 Qi-Can Zhang, Xian-Yu Su. An optical measurement of vortex shape at a free surface[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2002, **34**(2): 107~113
- 16 Su Xianyu, Chen Wenjing, Zhang Qichan *et al.*. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 2001, **36**(1): 49~64
- 17 Xian-Yu Su, Wen-Sen Zhou, G. von Bally *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating[J]. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6): 561~573
- 18 T. R. Judge, P. J. Bryanston-Cross. A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis [J]. *Opt. & Lasers Engng.*, 1994, **21**: 199~239
- 19 Xian-Yu Su. Phase unwrapping techniques for 3-D shape measurement [C]. *Proc. SPIE*, 1996, **2866**: 460~465
- 20 Jie-Lin Li, Xian-Yu Su, Ji-Tao Li. Phase Unwrapping algorithm-based on reliability and edge-detection [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1685~1690
- 21 A. Asundi, Wen-Sen Zhou. Fast phase-unwrapping algorithm based on a gray-scale mask and flood fill [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(23): 5416~5420