

文章编号: 0253-2239(2003)10-1153-5

基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术*

陈文静 苏显渝 曹益平 向立群 张启灿

(四川大学光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 在实际傅里叶变换轮廓术测量中, 获取的条纹图扩展的零频分量对傅里叶变换轮廓术的测量精度和测量范围有很大影响, 甚至妨碍正确三维面形的恢复。 π 相移技术常被用来消除零频分量对测量的影响, 但需要在测量系统中安装精密相移装置, 并需要采集两帧具有 π 相位差的条纹图。传统傅里叶变换轮廓术中, 完成精密相移需要较长的时间, 影响了傅里叶变换轮廓术测量方法的实时性。提出了采用双色正弦光栅投影来实现从一帧条纹图中消除零频对傅里叶变换轮廓术测量的影响。该方法同传统的 π 相移方法相比, 不需要相移装置, 测量系统简单, 并且能真正实现高速测量。

关键词: 图像处理; 傅里叶变换; 双色条纹投影; 三维面形测量
中图分类号: TN206 文献标识码: A

1 引 言

基于条纹投影的傅里叶变换轮廓术(FTP)具有单帧获取、全场分析和高分辨率等优点, 因此自 Takeda 等^[1] 提出此测量方法以来, 受到人们的广泛关注。人们对如何提高其测量范围和测量精度的问题, 进行了深入研究^[2~8]。但是, 由于傅里叶变换轮廓术通过从频域滤出包含被测物体高度信息的基频分量, 进行逆傅里叶变换, 从而获得被测物体的高度分布, 因此频谱混叠对测量的影响不可忽视。采用正弦投影和 π 相移技术可以消除零频和高次谐波对傅里叶变换轮廓术测量结果的影响, 大大提高测量精度和测量范围^[3,4]。但是测量系统中需要安装精密相移装置来完成 π 相移, 增加了系统的复杂性。并且, 需要采集两帧具有相位差的条纹图, 影响了傅里叶变换轮廓术测量方法的实时性。本文提出在傅里叶变换轮廓术测量中采用投影一帧具有 π 相移的双色正弦光栅图在被测物体表面, 用彩色数码相机记录信息, 利用它们完成从一帧条纹图中消除零频对包含有用信息的基频的影响。与传统的采用 π 相移技术的傅里叶变换轮廓术测量方法相比较, 本文提出的方法不需要相移装置, 只需要采集一帧条纹图就可以非常好地消除零频分量。该技术的应用使

傅里叶变换轮廓术能真正实现动态和瞬态测量, 因而更具有实用意义。

2 傅里叶变换轮廓术基本原理

傅里叶变换轮廓术的典型测量光路如图 1 所示。图中, P_1 和 P_2 分别是投影装置的入瞳和出瞳, I_2 和 I_1 分别是摄像装置的入瞳和出瞳, d 是 P_2 与 I_2 间的距离, L_0 是 I_2 到参考平面 R 间的距离, A 和 C 是参考平面 R 上的两点, D 是物面上的点, 光栅垂直于图平面。通常由正弦光栅投影得到的变形结构光场表示为

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)], \quad (1)$$

其中 $a(x, y)$ 为背景光场, $b(x, y)$ 为条纹对比度, $\varphi(x, y)$ 为由物体高度分布 $h(x, y)$ 引起的相位调制, f_0 为投影光栅的基频。当第一项 $a(x, y)$ 通过 π 相移技术消除后, 对条纹进行傅里叶变换得到其频谱分布, 表示为

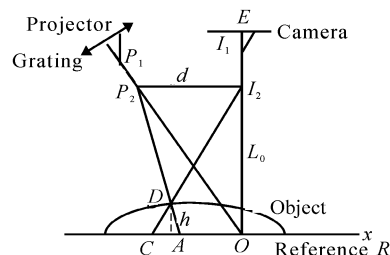


Fig. 1 Optical geometry

* 国家自然科学基金(60177001)、四川省应用基础研究(01GY051-07)资助课题。

E-mail: xysu@emial.scu.edu.cn

收稿日期: 2002-08-09; 收到修改稿日期: 2002-10-08

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

其中 $Q(f, y)$ 表示 $\frac{1}{2}b(x, y)\exp[i\varphi(x, y)]$ 的傅里叶变换。通过从频域中滤出基频分量并进行逆傅里叶变换, 可以计算出相位分布, 表示为 $2\pi f_0 x + \varphi(x, y)$ 。移去载频分量 $2\pi f_0 x$, 即得到由被测物体高度变化引起的相位。在远心投影光路条件下, 考虑到实际测量中 $L_0 \gg h(x, y)$, 被测物体的高度分布和调制相位的关系为^[1]

$$\varphi(x, y) \approx \Delta\varphi(x, y) = -\frac{2\pi f_0 d}{L_0} h(x, y). \quad (3)$$

在傅里叶变换轮廓术测量方法中, 涉及到滤波处理, 必须避免携带有用信息的基频分量同其它频谱分量的混叠, 其测量范围受到较大限制。采用 π 相移技术消除零频分量后, 测量范围提高到原来的^[1] 3 倍, 傅里叶变换轮廓术的测量范围表示如下^[3,4]:

$$\left| \frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right| < \frac{L_0}{d}. \quad (4)$$

$$g(x, y)_{\text{rg}} = R(x, y)_r \{a_r + b_r \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)]\} + R(x, y)_g \{a_g + b_g \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \pi]\}, \quad (6)$$

$R(x, y)_r, R(x, y)_g$ 分别为物体对不同颜色投影光的反射率分布。从(6)式中提取出投影条纹的红绿两个分量, 就可以得到具有 π 相移的两帧条纹图:

$$g(x, y)_r = R(x, y)_r a_r + R(x, y)_r b_r \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y)], \quad (7)$$

$$g(x, y)_g = R(x, y)_g a_g + R(x, y)_g b_g \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x, y) + \pi], \quad (8)$$

只要将提取出来的两组条纹的背景和对比度进行校正, 使他们相等, 就能消除了零频分量, 完成 π 相移操作。

3.1 平均值校正

就整幅图而言, 其中包含了很多的条纹周期, 如果环境光没有发生变化, 其灰度平均值可以看成常量。从彩色条纹图中提取出的两帧具有 π 相移条纹图的灰度平均分别为 m_r 和 m_g , 可以通过下式将他们的灰度平均值调整得相等(例如, 将绿色分量的平均值校正得和红色分量相同):

$$g(x, y)'_g = g(x, y)_g + m_r - m_g, \quad (9)$$

$g(x, y)'_g$ 为调整后绿色分量的灰度值。

3.2 对比度的校正

对于通过平均值校正后的条纹对比度的差异, 我们通过计算他们的均方差来进行修正。 $R(x, y)_r b_r$ 和 $R(x, y)_g b_g$ 反映的是条纹围绕均值变化的振幅的大小, 显然 $R(x, y)_r b_r$ 和 $R(x, y)_g b_g$ 中, 振幅越大的条纹, 其方差越大。分别计算出他们的方差 d_r 和 d_g ,

3 双色正弦条纹投影傅里叶变换轮廓术基本原理

为了从一帧条纹图中获取足够的信息, 以消除零频扩展对傅里叶变换轮廓术测量的影响, 我们采用由 RGB 三基色中的两种颜色组成的, 相互间具有 π 相移的双色正弦光栅投影。此光栅的透过率函数表示为(以红绿两种颜色构成的双色光栅为例)

$$f(x, y) = a_r + b_r \cos(2\pi f_0 x) + a_g + b_g \cos(2\pi f_0 x + \pi), \quad (5)$$

a_r 和 a_g 分别为双色光栅的红绿直流分量, b_r 和 b_g 为对比度。

当条纹图投影在被测物体表面上时, 在与投影光轴成一定夹角的方向上, 用彩色数码相机获取一帧图像:

然后通过下式将他们的对比度调整得相等:

$$g(x, y)''_g = [g(x, y)'_g - m'_g] \frac{d_r}{d_g} + m'_g. \quad (10)$$

下面通过对彩色数码相机获取的彩色条纹图进行处理, 证明上述研究的正确性。图 2(a) 是彩色数码相机获取的红绿双色条纹图(用灰度显示)。图 2(b) 是提取出的红绿分量的剖面图, 其中图 2(b1) 表示红色分量的强度, 图 2(b2) 表示绿色分量的强度。图 2(c) 在同一图中画出了调整前后的红绿分量在同一个剖面上的分布, 图 2(c1) 代表红绿分量的分布(为了清楚起见, 只画了十几个周期), 实线代表红色分量, 虚线代表绿色分量, 可见它们的平均值和对比度都是不等的, 但两组条纹具有 π 相移; 图 2(c2) 是通过平均值校正和对比度校正的结果, 条纹的均值和对比度几乎相同。修正后的两组条纹的差如图 2(d) 所示, 由于获取的两组条纹具有相同的外界条件, 它们相减消除了系统固有的一些噪声, 我们得到的是非常好的没有零频分量的正弦条纹图。

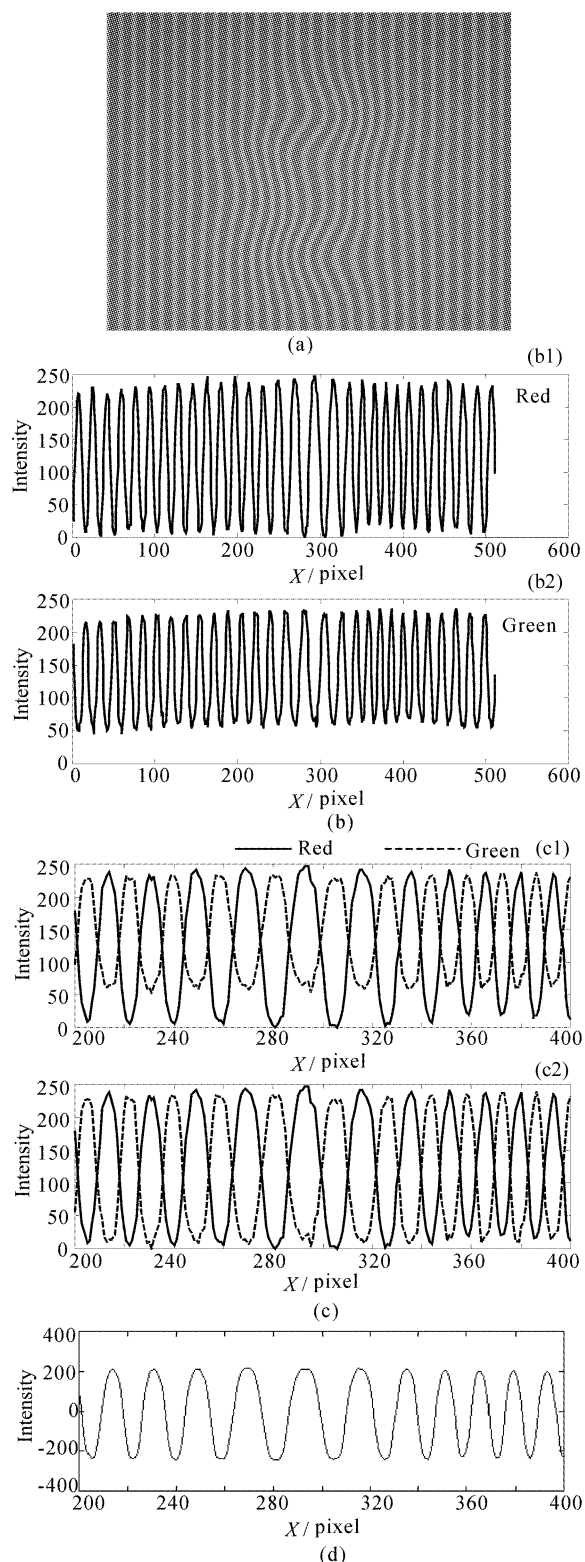


Fig. 2 (a) A fringe pattern captured by color digital camera; (b) Sections of red and green intensity distribution; (c) A enlarged red and green intensity distribution before and after modified; (d) The result of subtracting red intensity distribution form green intensity

4 计算机模拟及实验

为了证明本文所提方法的有效性,我们作了计算机模拟。模拟的系统结构参量为 $d/L=1$ 。模拟物体的函数表达式为

$$z(x, y) = 4\{3(1-x)^2 \exp[-x^2 - (y+1)^2] - 10(x/5 - x^3 - y^5) \exp(-x^2 - y^2) - 1/3 \exp[-(x+1)^2 - y^2]\}, \quad (11)$$

结果如图 3 所示。为了使模拟更接近实际,我们把计算机模拟的红绿双色参考正弦条纹和变形条纹投影到白色屏幕上,并用彩色数码相机分别对其进行采集[变形条纹如图 2(a)],从采集的彩色条纹中提取出红绿分量强度分布,可以得到具有 π 相移的两帧条纹图,如图 4 所示。

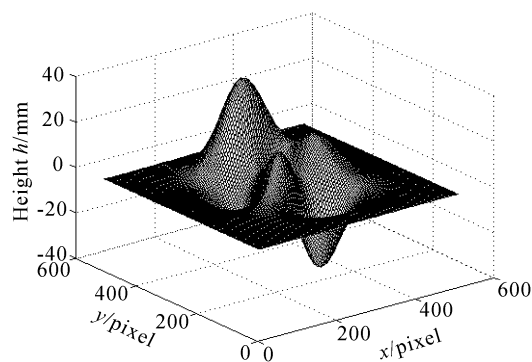


Fig. 3 Simulation object

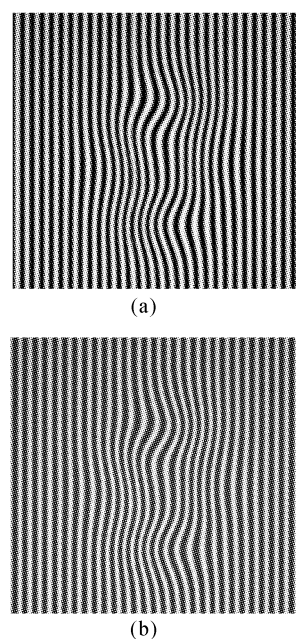


Fig. 4 (a) Red intensity of deformed fringe pattern in gray display; (b) Green intensity of deformed fringe pattern in gray display

采用上述方法对它们进行灰度和对比度校正,计算其差的频谱如图 5(a)所示,在 x, y 方向过零频的一维剖面分布如图 5(b),可见零频分量已被消除,即采用所提出的方法,利用采集的一帧双色条纹图实现了 π 相移。恢复的三维面形如图 5(c)所示。

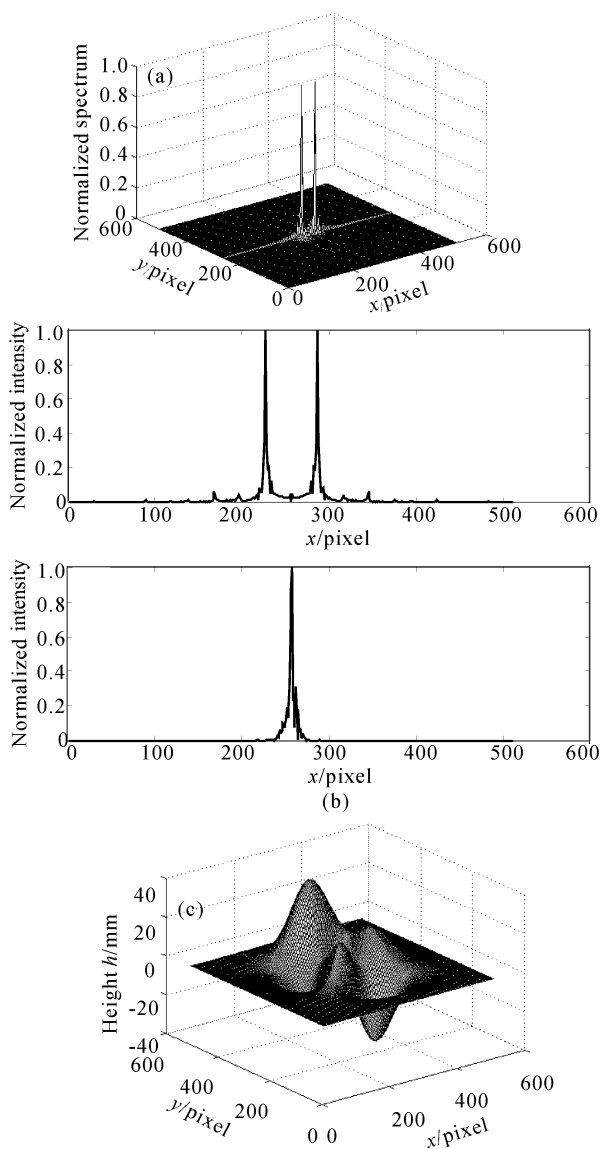


Fig. 5 (a) Subtracting normalized spectra of Fig. 4(a) from that of Fig. 4(b); (b) A section of Fig. 5(a); (c) The restored height distribution

为了进一步验证提出的方法,对一个“模型猫面具”进行测量。采用数字光投影仪(PLUSU3-880)投影红绿双色条纹图在模型猫面具上,在与投影仪成一定夹角的方向上,用彩色数码相机(Kodak DC3400)获取条纹。在实际测量时,考虑到数字光投影仪投影的特点,将数字光投影仪固定在彩色数码相机的下方,相机的光轴垂直于参考平面,数字光

投影仪斜向投影,实验框图如图 6 所示。测量系统的结构参量 $L_0=600$ mm, $d=300$ mm。图 7(a)是彩色数码相机获取的条纹图,图 7(b)和图 7(c)是从中提取出的红绿分量的分布(显示为灰度形式),为了清楚显示处理后 π 相移效果,放大的校正后的红绿分量的差的频谱的等高线分布如图 8(a),可见零频分量已被消除,恢复的三维面形如图 8(b)所示。

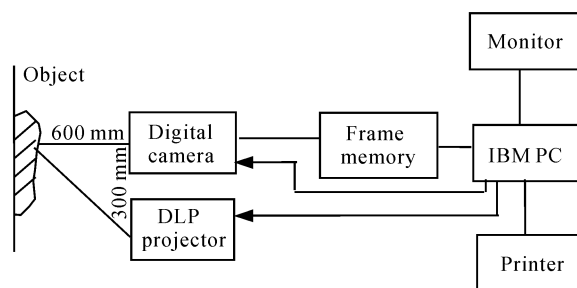


Fig. 6 Schematic diagram of setup

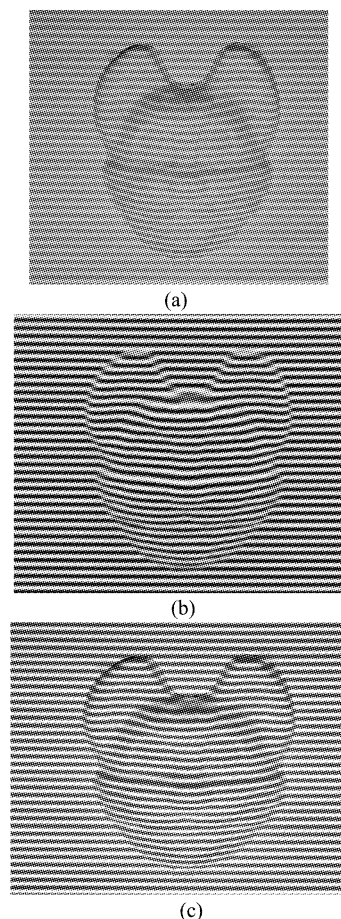


Fig. 7 Experience of bi-color projection FTP. (a) Model cat's deformed color fringe pattern captured by color digital camera; (b) Red intensity of deformed fringe pattern in gray display; (c) Green intensity of deformed fringe pattern in gray display

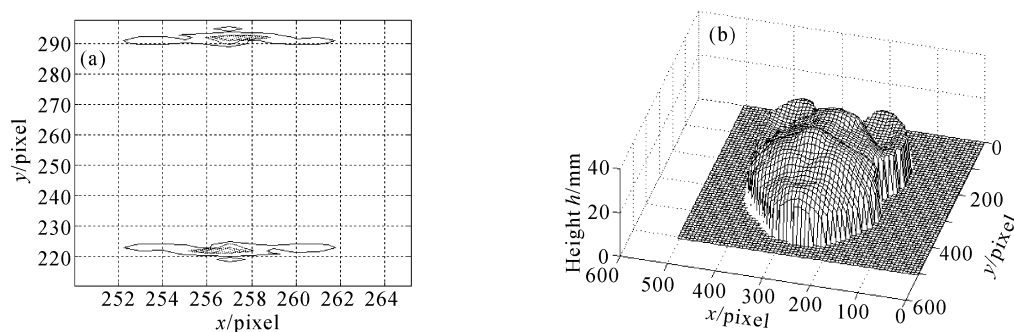


Fig. 8 (a) Enlarged frequency spectrum contour distribution; (b) The restored model cat shape

结论 本文就如何用一帧条纹图记录足够的信息, 并利用它们在傅里叶变换轮廓术中完成相移操作进行讨论。提出采用双色正弦光栅投影来实现从一帧条纹图中消除零频对傅里叶变换轮廓术测量的影响。我们对该方法进行了理论分析, 并就从彩色数码相机中提取出来的分量的背景和调制度的校正问题进行了讨论, 以获取好的 π 相移效果。该方法同传统的 π 相移方法相比, 不需要相移装置, 测量系统简单, 使傅里叶变换轮廓术真正实现高速测量。

参 考 文 献

- 1 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977~3982
- 2 Lin Jianfeng, Su Xianyu. Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes. *Opt. Engng.*, 1995, **34**

- (12):3297~3301
- 3 Su Xianyu, Li Jian, Guo Lurong. Improved Fourier transform profilometry. *Proc. SPIE*, 1988, **954**:32~35
- 4 Li Jian, Su Xianyu, Guo Lurong. Improved Fourier transform profilometry of the automatic measurement of three-dimensional object shapes. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(12):1439~1444
- 5 Chen Wenjing, Su Xianyu, Tan Songxin. Basic requirement for measurement system in FTP. *J. Optoelectronics Laser* (光电子·激光), 1999, **10**(6):535~539 (in Chinese)
- 6 Chen Wenjing, Su Xianyu. Improvement for measuring accuracy of Fourier transform profilometry with gray image. *Opto-Electronic Engng.* (光电工程), 2000, **27**(3):55~59 (in Chinese)
- 7 Chen Wenjing, Su Xianyu. Error caused by sampling in Fourier transform profilometry. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6):1029~1034
- 8 Yang Hu, Chen Wenjing, Su Xuanyu. Influence of sampling on Fourier transform profilometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(7):929~934

Improved FTP Based on Bi-Color Fringe Projection

Chen Wenjing Su Xianyu Cao Yiping Xiang Liqun Zhang Qican

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

(Received 9 August 2002; revised 8 October 2002)

Abstract: In Fourier transform profilometry (FTP), when zero component extends to fundamental component, it will influence measuring range and measuring precision, even makes the correct three-dimensional surface impossible. π phase shifting technique is usually used to eliminate the zero component. But this needs adding phase shifting device in measurement system and capturing two fringe patterns with π phase difference each other. Now a novel method is proposed, in which a bi-color fringe pattern is projected onto the object and the deformed color fringe pattern is captured by color digital camera. Two separate fringe patterns with π phase difference are extracted and used to eliminate the zero component. The method not only can eliminate zero frequency overlapping fundamental component using only one fringe pattern, but also simplify the experimental setup because of no need of phase-shift device.

Key words: image processing; Fourier transform; bi-color fringe projecting; three-dimensional shape measurement