

文章编号:1004-4213(2011)11-1697-5

利用强度调制消除零频的傅里叶变换轮廓测量

刘大海, 林斌

(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, 杭州 310027)

摘要:采用双色正弦条纹投影的傅里叶变换轮廓术中零频分量的扩展对有用基频分量有影响,为此提出一种新型的基于强度调制的零频消除方法提高测量准确度和范围.通过采集一帧变形彩色条纹图并分离颜色通道获得两幅相位差为 π 的条纹图,对变形条纹做强度调制校正,进而消除零频分量,实现高度解析.理论模拟和实验测试均验证了此方法的有效性.相比传统的相移消除零频分量的方法,此方法具有显著的速度优势,适合于三维物体的实时测量.

关键词:调制函数;零频消除;傅里叶变换;三维面形测量

中图分类号:O428.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114011.1697

0 引言

实时三维面形测量技术在虚拟现实、工业自动检测、人体测量、生物医学、文物复制和艺术雕塑等领域得到广泛的研究和应用^[1-2].基于结构光投影技术的傅里叶变换轮廓术是将空域条纹信号经傅里叶变换到频域,滤出由物体高度调制的基频部分,再经傅里叶逆变换、相位展开获得被测物体的高度信息.由于只需单帧变形条纹图就可解析出三维形貌,特别适合实时快速三维测量.采用双色正弦条纹投影可以消除高次谐波对傅里叶变换轮廓术测量结果的影响,但需要排除物体的颜色反射率差异,为此抑制或消除零频技术成为重要的研究内容.

常规采用 π 相移技术消除零频,通过精密的相移机械装置完成 π 相移,获取两幅相位差为 π 的条纹图实现去零频,但由于系统装置复杂且实时性差,该方法受到极大的限制;随着数字投影仪的出现,可采用时序投影方案实现两条纹图案的固定相位差以替代传统机械相移装置,但顺序投影方法仅适用于静态物体.随后引入了灰度图用来抑制零频的扩展^[3],但需要额外拍摄背景灰度图,同样不适合实时快速测量.为了克服此问题,由两个不同频率的载频分别调制与其方向垂直的两帧具有 π 相位差的条纹组成的复合光栅能实现实时测量^[4],但其测量准确度没有得到改善;而采用基于窗口傅里叶变换^[5]、小波变换^[6]和经验模态分解^[7]消除零频的方法有很好的鲁棒性,但是都需要大量的数据运算,其实时性取

决于硬件设备的性能.此外,陈文静等^[8]采用具有双色相位差为 π 正弦条纹的投影,在获取一帧变形条纹图基础上,采用背景对比度修正法校正提取的两组条纹的背景和对比度,即可消除零频分量,完成 π 相移操作,该方法提高了测量准确度,取得了良好的效果.

本文提出了一种基于强度调制的新型抑制零频的方法.采用双色正弦条纹投影技术,将分离出的两组条纹通过设计的调制函数对变形条纹进行强度校正,快速有效地消除变形条纹中的零频分量.该方法处理速度快,特别适合实时三维面形测量.

1 理论模型

1.1 双色正弦条纹投影傅里叶变换轮廓术原理

傅里叶变换轮廓术采用如图 1 所示的交叉光路图.

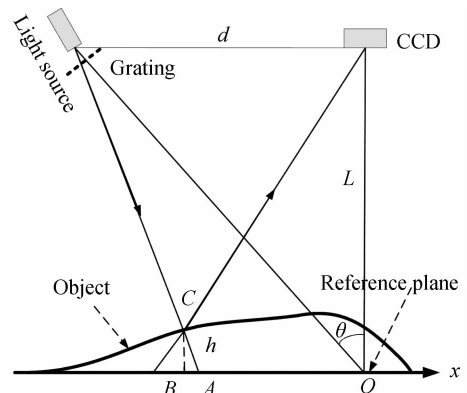


图 1 傅里叶变换轮廓术光路图

Fig. 1 Measurement geometry of FTP

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 2009AA01Z325)和台州市 2010 年科技计划“新型三维摄像机研制”项目资助

第一作者:刘大海(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为三维面形测量和计算机视觉. Email: 20930010@zju.edu.cn

导师(通讯作者):林斌(1964-),男,教授,主要研究方向为图像传感及处理、光电测量技术和仪器. Email: wjlin@zju.edu.cn

收稿日期:2011-05-09;修回日期:2011-07-05

其中 d 为投影仪与 CCD 相机之间的距离, L 为 CCD 到参考平面的垂直距离, θ 为投影仪和 CCD 光轴的夹角. 在傅里叶变换轮廓术中, 由于采用正弦条纹投影, 则经傅里叶变换后的频谱仅存在零频和基频分量, 利用 π 相移技术消去零频信息, 则测量范围增大 3 倍^[9-10], 从 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial(x)} \leq \frac{L}{3d}$ 扩大到 $\frac{\partial h(x,y)}{\partial(x)} \leq \frac{L}{d}$.

双色正弦条纹投影可采用由 RGB 三基色中任意两种颜色且相互具有 π 相位差组成的复合光栅.

以红蓝两色构成的双色条纹为例, 其条纹强度分布可表示为

$$I(x,y) = \alpha_r(x,y) + \beta_r(x,y) \cos(2\pi f_0 x) + \alpha_b(x,y) + \beta_b(x,y) \cos(2\pi f_0 x + \pi) \quad (1)$$

式中 $\alpha_r(x,y)$ 和 $\alpha_b(x,y)$ 分别为红色分量和蓝色分量的背景光强度, $\beta_r(x,y)/\alpha_r(x,y)$ 和 $\beta_b(x,y)/\alpha_b(x,y)$ 分别为红色分量和蓝色分量的条纹对比度. 当此条纹投影到物体表面上, 由 CCD 获取的变形条纹图可表示为

$$I'(x,y) = R_r(x,y)\alpha_r(x,y) + R_r(x,y)\beta_r(x,y) \cdot \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x,y)) + R_b(x,y)\alpha_b(x,y) + R_b(x,y)\beta_b(x,y) \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x,y) + \pi) \quad (2)$$

式中 $R_r(x,y)$ 和 $R_b(x,y)$ 分别为物体对红、蓝颜色反射率分布; $\varphi(x,y)$ 是物体高度对条纹的相位调制. 从式(2)中分离出变形条纹的红蓝分量, 得到两幅相移相差 π 的条纹图, 其表达式为

$$I'_r(x,y) = R_r(x,y)\alpha_r(x,y) + R_r(x,y)\beta_r(x,y) \cdot \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x,y)) \quad (3)$$

$$I'_b(x,y) = R_b(x,y)\alpha_b(x,y) + R_b(x,y)\beta_b(x,y) \cdot \cos(2\pi f_0 x + \varphi(x,y) + \pi) \quad (4)$$

由于 $R_r(x,y)\alpha_r(x,y) \neq R_b(x,y)\alpha_b(x,y)$, 故不能通过直接相减达到消除零频的目的, 需要通过

对两条纹的强度分布进行校正以实现 π 相移操作.

1.2 调制函数校正

不同颜色的正弦条纹投影到同一物体表面, 由于物体的颜色反射率的差异, 则采用 CCD 探测器获取的变形条纹强度将不一致, 但是各自通过傅里叶变换轮廓术处理后其重建的深度信息将趋于一致. 故可将双色条纹每行的强度经过调制函数法处理后调整到同一阈值范围之内, 本文将此过程称之为强度调制处理.

通过 CCD 探测器获取的变形条纹图其灰度值均小于 2^n , 其中 n 为 CCD 灰度值的比特数值, 从而可以将每行条纹强度归一化到 0 到 $(2^n - 1)$ 区间范围, 然后再调整到标准正弦条纹, 其调制函数可表示为

单色灰度值 $I_{\text{new}}(x,y)$ 表示为

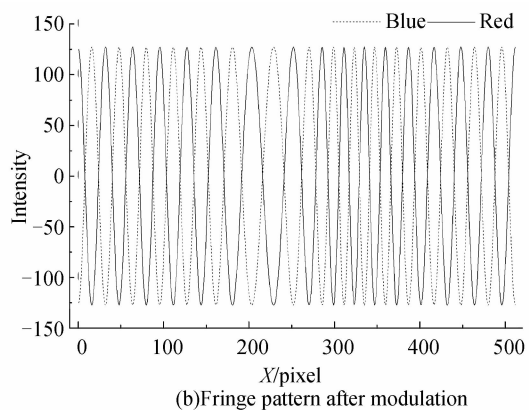
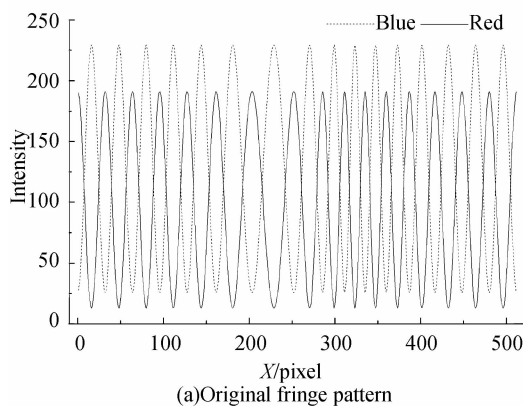
$$I_{\text{new}}(x,y) = \frac{I(x,y) - I_{\min}(x,y)}{I_{\max}(x,y) - I_{\min}(x,y)} \times (2^n - 1) \quad (5)$$

最终灰度值 $I'_{\text{new}}(x,y)$ 为

$$I'_{\text{new}}(x,y) = I_{\text{new}}(x,y) - I_{\text{mean}} \quad (6)$$

式中, $I_{\max}(x,y) = \max(I(x,y))$, $I_{\min}(x,y) = \min(I(x,y))$, $I'_{\text{new}}(x,y)$ 为经调制传递函数处理后的条纹强度分布函数, I_{mean} 为调制后 $I_{\text{new}}(x,y)$ 的灰度平均值.

通过对式(3)和(4)设置不同的参量值获得其红蓝灰度强度曲线如图 2(a), 显然其背景光强度和对比度大小不相等; 经过调制传递函数式(5)和式(6)修正后的结果如图 2(b), 条纹的均值和对比度相同, 且两者相位存在 π 相移差; 两组条纹相减之后的结果见图 2(c), 经傅里叶变换得其频谱曲线如图 2(d), 可以看出零频分量为零, 说明该调制函数能有效消除零频, 实现测量准确度的提高.



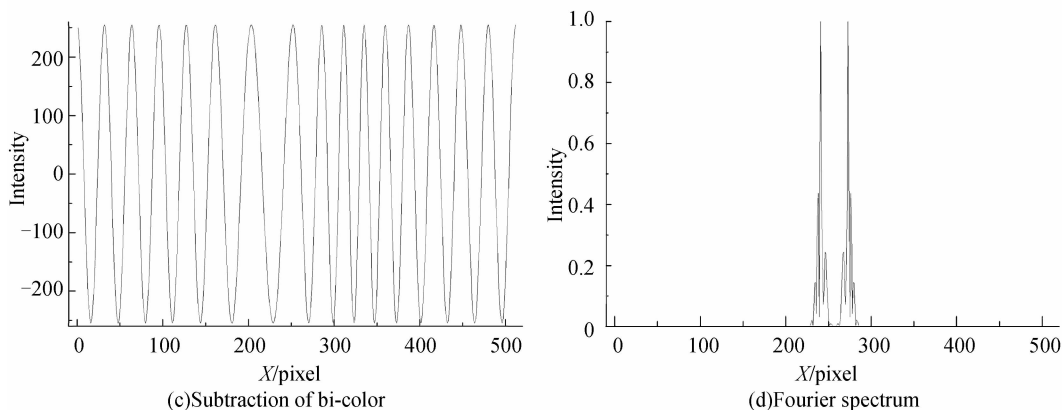


图 2 调制函数法零频消除原理

Fig. 2 Zero frequency elimination principle based on modulation function method

2 计算机模拟

在数值模拟中,设计球面一部分的三维模型表示条纹被物体高度调制时的相位,其函数表达式为

$$\varphi(x,y)=0.05[200^2-(x-256)^2-(y-256)^2]^{1/2} \quad (56 \leq x \leq 456, 56 \leq y \leq 456) \quad (7)$$

则变形后的双色条纹强度表达式为

$$I'_r(x,y)=255\{0.5+0.4\cos[2\pi f_0x+\varphi(x,y)]\} \quad (8)$$

$$I'_b(x,y)=255\{0.4+0.3\cos[2\pi f_0x+\varphi(x,y)+\pi]\} \quad (9)$$

模拟选定的图像大小为 512×512 pixel, 条纹频率 f_0 取 $1/16$, 根据式(8)和(9)得到红色和蓝色变形条纹图如图 3(a)和图 3(b), 经过调制函数校正后消除零频的傅里叶频谱如图 3(c), 重构出的三维面形如图 3(d).

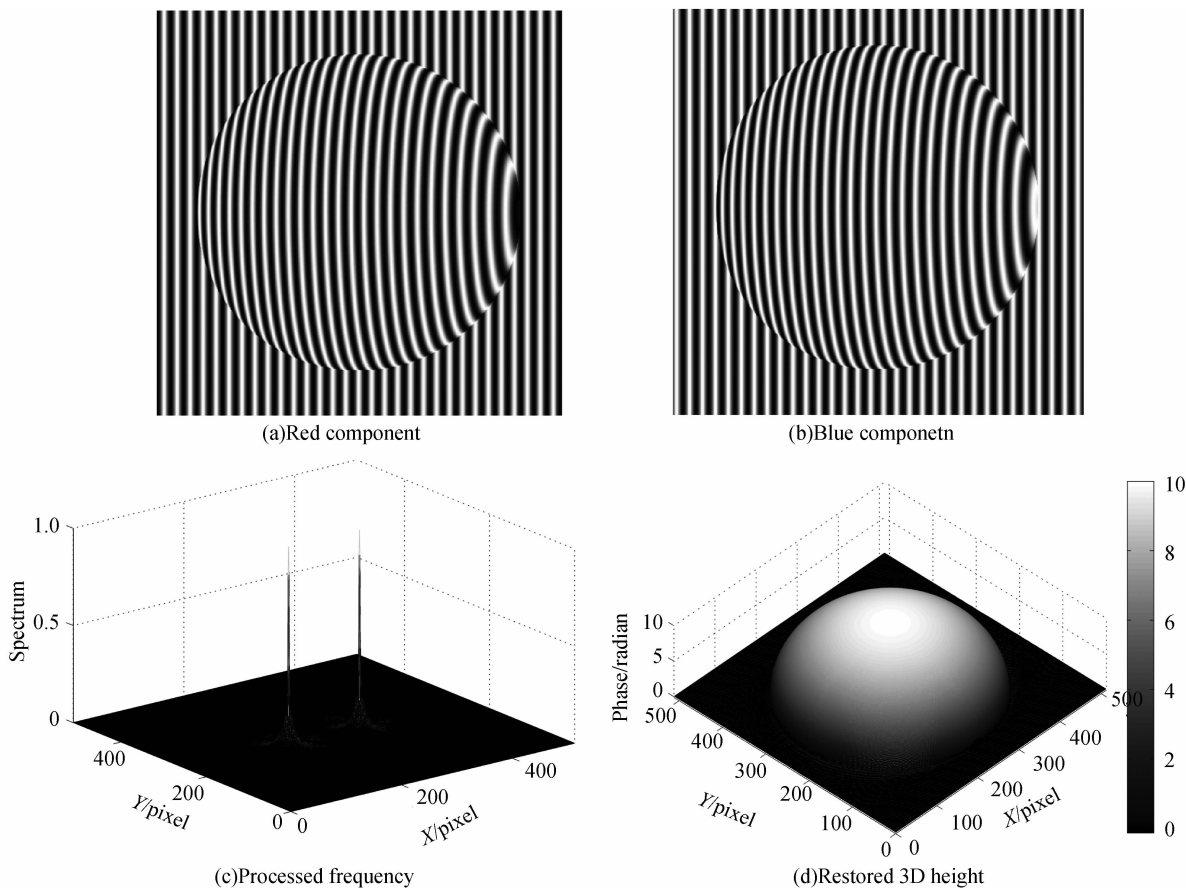


图 3 模拟分析图

Fig. 3 Simulation results

为了更进一步验证此方法,将此方法与文献[8]所述背景对比度修正法进行对比. 所采用的相位函数为 Matlab 自带的 Peaks 函数, 分别设置两种不同的反射比参量, 运行的环境为 CPU: Intel Celeron

E1500 2.20 GHz, RAM: 2 G.

(I) $\alpha_r=0.5, \beta_r=0.4, \alpha_b=0.4, \beta_b=0.3$; (II): $\alpha_r=0.5, \beta_r=0.4, \alpha_b=0.3, \beta_b=0.2$. 比较结果如表 1. 从表中可以看出, 在两种不同反射比情况下, 其重

构的数据其最大误差值和标准差值是一样的,验证了调制函数法的正确性,同时此方法在运算速度上明显优于背景对比度修正法,在实时快速面形测量中具有实用价值.

表 1 强度调制法与背景对比度修正法的比较

Table 1 Comparison of modulation and chen's methods

	Modulation method	Chen's method
Maximum error(I)	0.041 0	0.041 0
Maximum error(II)	0.041 0	0.041 0
RMS(I)	0.010 9	0.010 9
RMS(II)	0.010 9	0.010 9
Times(I)	0.093 8	0.187 5
Times(II)	0.093 8	0.187 5

3 实验结果及讨论

搭建如图 4 所示实验装置,使用型号为 HD-720P LAPTOPMATE 的 LCoS 微型投影仪,分辨率为 $1\ 024\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$. 采用数码彩色相机 Canon IXUS 80IS. 其中投影仪与参考平面距离 $L=1\ 000.0\ \text{mm}$,相机与投影仪两光轴之间距离 d 为 $364.0\ \text{mm}$. 测量时投影的双色正弦条纹周期为 $16\ \text{pixel}$,由 CCD 相机采集的 RGB 彩色图像大小为

$800\ \text{pixel} \times 600\ \text{pixel}$,每个通道灰度级为 8 比特.

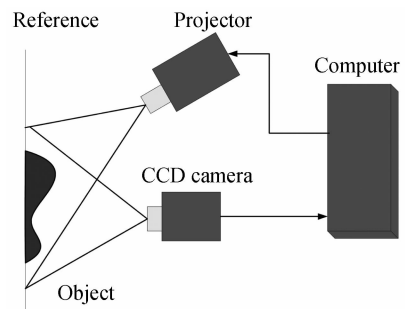


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental setup

为了验证上述方法抑制零频的效果,在实验中制作等腰三角形物体模型,其斜边斜率为 1.2,大于实验装置参量 $L/3d=0.916$. 获取双色变形条纹图像,如图 5(a),提取彩色图像中的第 300 行红色和蓝色分量分布如图 5(b). 首先对图像进行均值滤波以消除噪点的影响. 经过调制函数校正后消除了零频分量的频谱和解包裹相位分别如图 5(c)和(d). 图 5(e)是物体的三维重建结果,与实际物体轮廓分布相同.

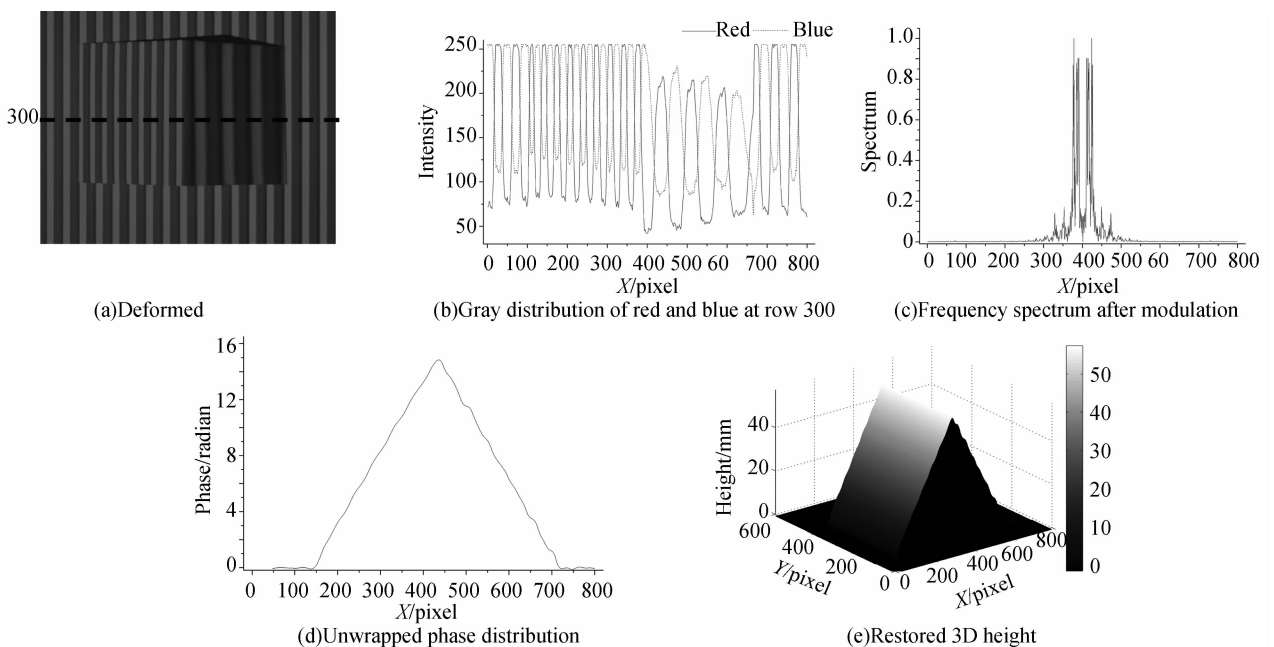


图 5 实验结果图

Fig. 5 Experimental results

4 结论

提出了一种新型的消除零频方法,通过双色正弦条纹投影获取复合变形条纹图,采用颜色分离技术得到双色的灰度变形图,引入调制函数法对变形条纹进行校正处理,消除零频分量,可有效扩大傅里叶轮廓术的测量范围. 计算机模拟结果表明,最大误

差和标准误差与其他方法重构结果相同,验证了此方法的正确性. 同时,调制函数法的运算效率明显高于其他方法,特别适用于实时三维物体的测量. 实验测试结果表明该方法能够重构出三维物体的面形,并有效提高其高度变化的测量范围.

参考文献

- [1] SU Xian-yu, ZHANG Qi-can. Dynamic 3-D shape measurement method: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010.

- 48(2):191-204.
- [2] SONG Zhang. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(2):149-158.
- [3] CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, SU Li-kun. Improvement for measuring accuracy of fourier transform profilometry whit gray image [J]. *Opto-Electronic Eng*, 2000, **27**(3):55-59
陈文静, 苏显渝, 苏礼坤. 利用灰度图提高 Fourier 变换轮廓术的测量精度 [J]. *光电工程*, 2000, **27**(03):55-59.
- [4] YUE Hui-min, SU Xian-yu, LI Ze-ren. Improved fast fourier transform profilometry based on composite grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):767-771.
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.
- [5] CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, *et al.* Method for eliminating zero spectrum in Fourier transform profilometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(11):1267-1276.
- [6] GDEISAT M A, BURTONA D B, LALORA M J. Eliminating the zero spectrum in Fourier transform profilometry using a two-dimensional continuous wavelet transform [J]. *Optics Communications*, 2006, **266**(2):482-489.
- [7] LI Si-kun, SU Xian-yu, CHEN Wen-jing *et al.* Eliminating the zero spectrum in Fourier transform profilometry using empirical mode decomposition [J]. *JOSA A*, 2009, **26**(5):1195-1201.
- [8] CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, CAO Yi-ping. 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.
- [9] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(24):3977-3982.
- [10] LI Jian, SU Xian-yu, GUO Lu-rong. Improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Optical Engineering*, 1990, **29**(12):1439-1444.

Fourier Transform Profilometry Using Zero Frequency Elimination Based on Gray Modulation

LIU Da-hai, LIN Bin

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

Abstract: The bi-color sinusoidal fringe patterns are used to depress the effect of zero frequency extension on fundamental frequency component in Fourier transform profilometry. A novel intensity-modulated method is proposed to eliminate the zero frequency component, which can improve the measuring precision and range. Two compounding monochrome fringe patterns with phase difference of π can be obtained by separating color channel of one color image. After calibration of intensity modulation and zero component elimination, the shape is obtained. The feasibility of the algorithm is validated by both theoretical simulation and experiment performance. Compared to the traditional phase shift method to eliminate the zero frequency component, this method has a significant advantage at speed and is suitable for real-time measurement of three-dimensional objects.

Key words: Modulation function; Zero frequency elimination; Fourier transform; 3D profilometry