

基于正交双频光栅投影的在线三维检测

武迎春 曹益平 史顺平 陈德良

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 提出一种用于在线三维检测的正交双频光栅。光栅在原单频条纹正交方向引入一高频条纹,用于提取调制度信息,完成检测过程中的像素匹配。解决了测量中像素匹配和相位计算对光栅频率要求不同的问题。同时高频条纹的引入不影响低频条纹求解相位,在相位求解过程中无需滤除高频条纹,避免了频谱滤波对相位精度的影响。模拟和实验均验证了所提方法的有效性。

关键词 测量;在线检测;相位测量轮廓术;正交双频光栅;像素匹配;相位计算

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0508003

On-Line Three-Dimensional Inspection Based on Orthogonal Two-Frequency Grating Projection

Wu Yingchun Cao Yiping Shi Shunping Chen Deliang

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract An orthogonal two-frequency grating designed for the on-line inspection is proposed. The higher frequency fringes are introduced in the orthogonal direction of the original single frequency fringes, which are used to extract modulation and complete pixel matching in the inspection. The proposed grating can resolve the problem of pixel matching and phase calculation requiring different frequencies. In addition, the higher frequency fringes don't influence the low frequency fringes used for the phase calculation, and the higher frequency fringes don't need to be filtered. So the influence of filtering in phase calculation can be eliminated. Both numerical simulations and experiments prove the feasibility and validity of the proposed method.

Key words measurement; on-line inspection; phase measuring profilometry; orthogonal two-frequency grating; pixel matching; phase calculation

OCIS codes 100.2650; 100.5088; 120.2830; 120.6650

1 引言

相位测量轮廓术(PMP)作为条纹投影轮廓术中精度较高的一种方法,在工业制造、医学研究、计算机科学、国防安全、娱乐等诸多领域存在着巨大的应用潜质,光学、光电子等学科理论的不完善,数字技术和计算机技术的飞速发展,使人们对测量有了更高的要求,精确、实时的测量已成为关注的热点^[1]。Zhang 等^[2]提出了基于 2+1 相移算法的高

速三维面形测量系统。Yoneyama 等^[3]提出无需相移装置的相位测量方法,用于测量运动物体。何定高等^[4,5]提出优化复合光栅的方法,提高相位测量轮廓术在实时测量中的精度。喻睿智等^[6~10]提出基于 PMP 的工业在线三维检测方法。该方法在测量过程中由于物体相对于 CCD 运动导致拍摄到的每帧变形条纹中物体的位置发生变化,所以必须进行像素匹配,使得每帧变形条纹图中物体具有相同

收稿日期: 2012-01-04; **收到修改稿日期**: 2012-02-28

基金项目: 国家 863 计划(2007AA01Z333)、国家重大专项(2009ZX02204-008)和四川省学术和技术带头人培养基金(07GRC-01)资助课题。

作者简介: 武迎春(1984—),女,博士研究生,主要从事光学三维传感、光信息处理等方面的研究。

E-mail: ycwu.scu@qq.com

导师简介: 曹益平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学三维传感、光信息处理和光机电一体化等方面的研究。

E-mail: caoyiping@mail.sc.cninfo.net(通信联系人,中国光学学会会员号:6100106)

的像素坐标。在工件台放置有明显特征的标记来计算物体的位移,这种方法虽然可以解决像素匹配问题,但不具有普适性。李坤等^[11]提出通过提取变形条纹中物体的调制度信息作为标记实现像素匹配,大大提高了像素匹配的灵活性和适用性。但由于发散照明下物体运动时阴影区域会发生变化,导致调制度信息发生改变,影响了像素匹配精度。郑旭等^[12,13]对物体调制度信息进行层析和二值化处理,提取了物体上可靠性较高的调制度信息,有效抑制了阴影对调制度信息的影响,提高了像素匹配精度。

利用条纹的调制度信息实现像素匹配给在线三维检测带来很大的便利,但单帧条纹图的调制度只能通过傅里叶变换的方法提取,傅里叶频谱混叠直接影响调制度的提取结果,进而影响匹配精度。从理论上讲,光栅频率越高,频谱混叠越不严重,调制度的提取精度较高,像素匹配精度也较高。但高频率限制了待测物体的面形变化率(测量范围),对于面形突变大的物体,会导致相位展开出错。由此本文提出一种用于在线三维检测的正交双频光栅,光栅中频率较高的条纹用于调制度提取,实现像素匹配;频率较低的条纹用于物体相位计算,获得物体高度信息。

2 基于正交双频光栅投影的 PMP 在线检测原理

基于相移技术的 PMP 在线三维检测原理图如图 1 所示。待测工件随传送带沿 x 方向运动,计算机编码生成 N 帧相移正弦光栅,经数字光投影仪(DLP)以一定切换速度投影到待测物体表面,光栅栅线方向为 x ,与 DLP 和 CCD 光轴所在平面垂直。同步控制 CCD 采集不同时刻的变形条纹图来计算物体的相位进而计算高度。待测工件相对 CCD 的

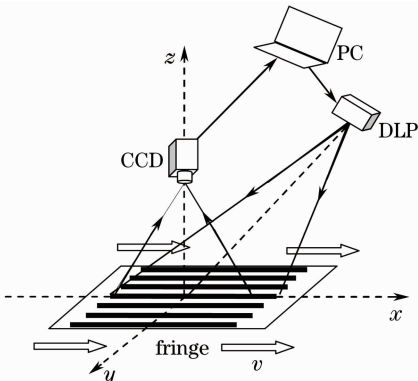


图 1 在线三维检测系统

Fig. 1 Online 3-D inspection system

运动导致 CCD 采集到的不同变形条纹图中对应像素点的光强值并不对应同一物点,即物体的像在每帧变形条纹中的位置不一致,必须对 N 帧变形条纹做像素匹配^[7]后才能用于相位计算。但是单频条纹的投影方式不能满足测量中像素匹配和相位计算对光栅频率的不同要求,本文提出采用正交双频光栅投影的方法。该光栅由两帧频率不同、方向垂直的正弦条纹复合而成,其中高频条纹的频率在能够被投影仪、CCD 分辨的情况下尽量高,以保证调制度的准确提取;低频条纹的频率应在满足测量范围(受物体高度调制的变形条纹不发生错级)的情况下尽量高,以保证测量精度。该投影光栅的透射率函数可表示为

$$T_n(x^p, y^p) = a + b \cos(2\pi f_1^p x^p) + c \cos[2\pi f_2^p y^p + (n-1)(2\pi/N)],$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中 (x^p, y^p) 为投影系统坐标系; a, b, c 为权重因子; f_1^p, f_2^p 为光栅频率,且 $f_1^p > f_2^p$; $(2\pi/N)$ 为相移步长。此光栅经投影仪投影到待测工件表面,由于低频光栅栅线方向与传送带运动方向 x 相同,受到物体高度的调制发生变形,而与之垂直的高频条纹不发生变形。由 CCD 采集到的 N 帧变形光栅像的强度可表示为

$$I_n(x, y) = R_n(x, y) \{ A(x, y) + B(x, y) \cos(2\pi f_1 x) + C(x, y) \cos[2\pi f_2 y + \varphi_n(x, y) + (n-1)(2\pi/N)] \}, n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

式中 (x, y) 为采集系统坐标系, $R_n(x, y)$ 为反射率; $A(x, y)$ 为背景光强; $B(x, y)$ 为高频条纹的对比度; $C(x, y)$ 为低频条纹的对比度; $\varphi_n(x, y)$ 为物体高度引起的相位变化。由于物体运动,导致 CCD 采集到的每帧变形条纹图中物体的像的位置不同,反射率分布 R 和相位分布 φ 用下标 n 区别。

2.1 调制度提取

对(2)式两边作傅里叶变换,其频谱可表示为

$$F_n(\xi, \eta) = G_n(\xi, \eta) + P_n(\xi + f_1, \eta) + P_n(\xi - f_1, \eta) + Q_n(\xi, \eta + f_2) + Q_n^*(\xi, \eta - f_2), \quad (3)$$

式中 $F_n(\xi, \eta), G_n(\xi, \eta), P_n(\xi, \eta), Q_n(\xi, \eta)$ 分别表示 $I_n(x, y), R_n(x, y)A(x, y), R_n(x, y)B(x, y)/2, R_n(x, y)C(x, y) \exp[\varphi_n(x, y) + (n-1)(2\pi/N)]/2$ 的二维傅里叶频谱。

滤出(3)式中高频条纹的正一级谱 $P_n(\xi - f_1, \eta)$ 并作逆傅里叶变换得

$$g_n(x, y) = \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} P_n(\xi - f_1, \eta) \exp[i2\pi(\xi x + \eta y)] d\xi d\eta = \frac{1}{2} R_n(x, y) B(x, y) \exp(i2\pi f_1 x). \quad (4)$$

$n = 1, 2, 3, \dots, N$

调制度定义为 $g_n(x, y)$ 的模, 即

$$M_n(x, y) = \text{abs}[g_n(x, y)] = \frac{1}{2} R_n(x, y) B(x, y), \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

此处滤波窗形状的选择直接影响到解调调制度图及二值化层析调制度图的效果, 为了提高调制度图提取的精度, 可以选择组合滤波窗口进行滤波^[5]。

选择合适的阈值 T_{n1} 与 T_{n2} , 对(5)式进行层析二值化处理^[12, 13], 得到能够反映物体特征的二值化层析调制度图:

$$S_n(x, y) = \begin{cases} 1, & T_1 \leq M_n(x, y) \leq T_2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

以二值化层析调制度图为依据计算不同变形条纹图中物体的相对位移, 指导(2)式中各帧变形条纹进行像素匹配。

2.2 相位计算及高度映射

经像素匹配后, 各帧变形条纹的光强分布可表示为

$$I'_n(x, y) = R'(x, y) \{ A'(x, y) + B'(x, y) \cos(2\pi f_1 x) + C'(x, y) \cos[2\pi f_2 y + \varphi'(x, y) + (n-1)(2\pi/N)] \}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (7)$$

由于低频条纹携带物体的高度信息, 常规处理方法是在傅里叶频谱中滤除(7)式中高频条纹对应

的频谱成分后, 计算低频变形条纹相位分布。但滤波过程会丢失部分频谱信息, 特别是物体边沿或突变区域所对应的高频成分, 这样会降低测量精度。

正交双频光栅的优势在于无需滤除高频条纹, 可避免滤波过程中的信息丢失, 保证测量精度。物面变形条纹的相位分布为

$$\varphi'_w(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{n=1}^N I'_n(x, y) \sin(2\pi n/N)}{\sum_{n=1}^N I'_n(x, y) \cos(2\pi n/N)} \right]. \quad (8)$$

将(8)式得到的截断相位进行相位展开, 获得连续相位分布 $\varphi'_u(x, y)$ ^[14]。用同样的方法可以获得参考面的相位 $\varphi'_{u0}(x, y)$, 物面相对于参考面的相位 $\Delta\varphi'(x, y) = \varphi'_u(x, y) - \varphi'_{u0}(x, y)$ 即物体高度引起的相位变化。由于高频条纹与低频条纹方向垂直, 不受物体的高度调制, 因此在物面和参考面上高频条纹相位不发生变化, 不会影响 $\Delta\varphi'(x, y)$ 的求解。 $\Delta\varphi'(x, y)$ 与物体的高度分布函数 $h(x, y)$ 存在关系^[15]为

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + b(x, y) \frac{1}{\Delta\varphi'(x, y)} + c(x, y) \frac{1}{\Delta\varphi'^2(x, y)}, \quad (9)$$

式中参数 $a(x, y)$, $b(x, y)$, $c(x, y)$ 通过系统标定获得。

3 计算机模拟和实验

为了验证所提光栅的有效性, 进行了计算机模拟, 待测物为一底部含台阶“圆锥”, 其峰值为 49.5 mm, 台阶高度 12 mm。其高度和对应的反射率分布如图 2 所示。

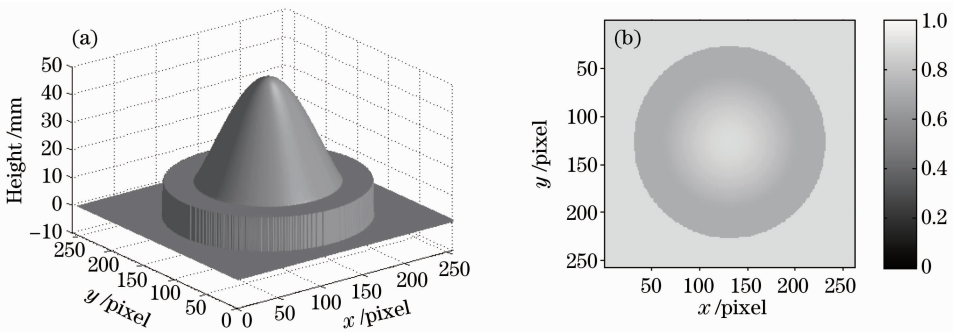


图 2 被测物体。(a)高度分布;(b)反射率分布

Fig. 2 Measured object. (a) Height distribution; (b) reflectance variation

分别用频率为 $1/(8 \text{ pixel})$ 和 $1/(30 \text{ pixel})$ 的单频光栅和低频为 $1/(30 \text{ pixel})$ 、高频为 $1/(8 \text{ pixel})$ 的正交双频光栅对其进行了测量。在测量过程中, 选择

$N=5$, 物体在 5 帧变形条纹中的位置依次移动了 7 pixel。图 3(a)、(b)、(c) 分别为高频、低频、正交光栅对应的 1 帧变形条纹图, 图像大小为 $320 \text{ pixel} \times$

260 pixel;图 3(d)、(e)、(f)为对应的二维傅里叶频谱分布;图 3(g)、(h)、(i)为对应的调制度图和二值化层析调制度图;图 3(j)、(k)、(l)为对应的高度重构结果。从图 3(d)可以看出,高频条纹的频谱分布清晰,有利于基频提取,使得计算得到的调制度图及二值化层析调制度图能较好地反映物体的外形特征,像素匹配精度很高。但由于光栅频率过高,导致测量过程中条纹截断,相位展开时出现了严重的错误,使图 3(j)三维重构结果出现错误。图 3(e)低频

光栅的频谱分布中基频和零频发生混叠,给滤波带来一定难度。提取出的调制度图模糊,使二值化层析调制度图提取发生错误,严重影响了匹配精度,导致图 3(k)中的重构物体表面出现了明显的波纹。在图 3(f)正交光栅的傅里叶频谱分布中, f_x 方向表示高频条纹频谱分布, f_y 方向表示低频条纹频谱分布。高频条纹的基频与零频距离较远,其基频可以很好地被滤出,因此对应调制度图的二值化层析调制度图能很好地反映物体的轮廓,能较好地实现像

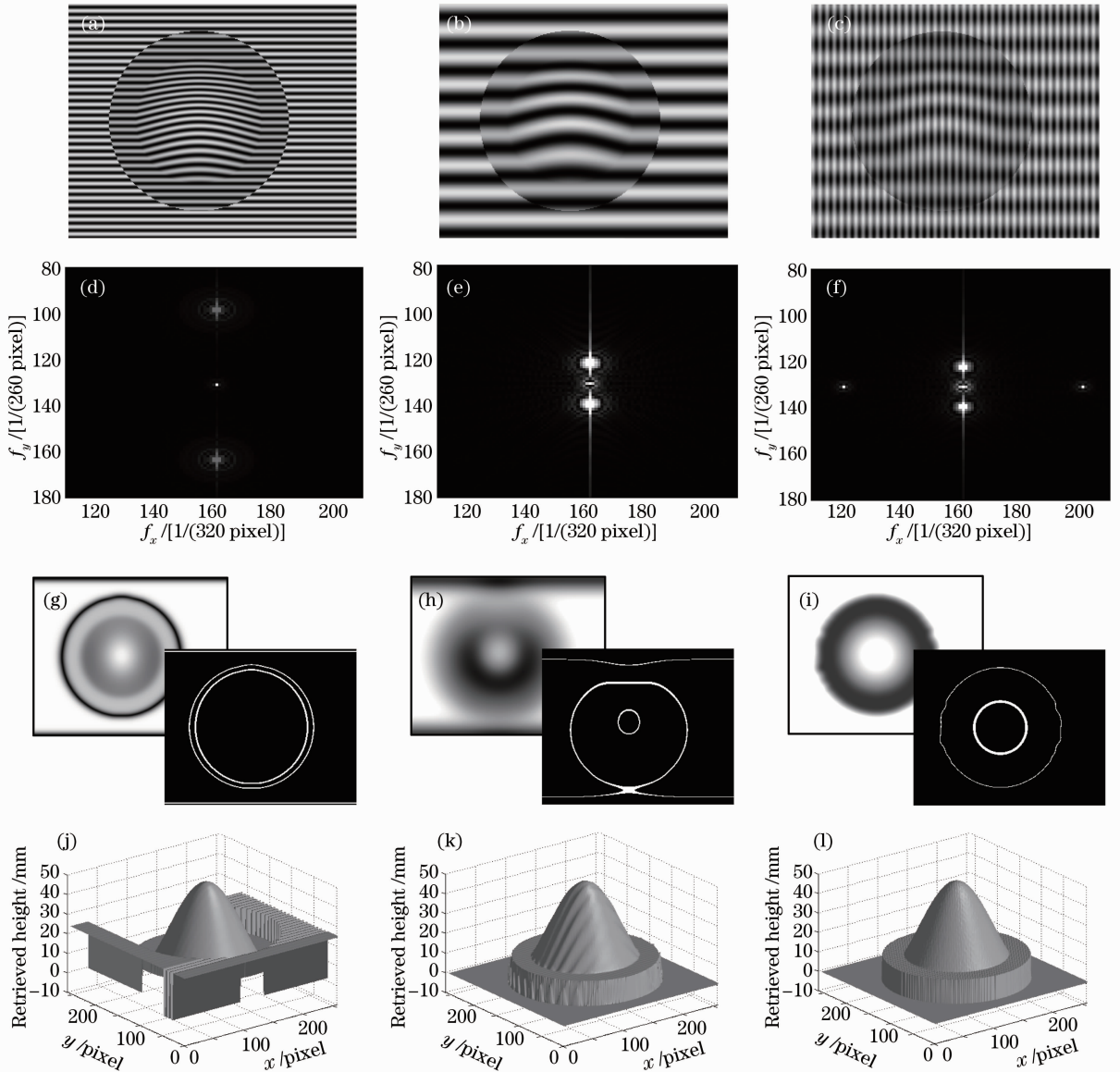


图 3 测量结果比较。(a)、(b)、(c)分别为高频、低频、正交变形条纹图;(d)、(e)、(f)分别为(a)、(b)、(c)的二维傅里叶频谱分布;(g)、(h)、(i)分别为对应的调制度图和二值化层析调制度图;(j)、(k)、(l)分别为三种光栅对物体的三维重构结果
Fig. 3 Comparison of measurement results. (a), (b) and (c) corresponding high frequency, low frequency and orthogonal deformed pattern respectively; (d), (e) and (f) corresponding 2-D Fourier spectrum distribution; (g), (h) and (i) corresponding modulation and delaminated binary modulation; (j), (k) and (l) corresponding height retrieved by the three gratings respectively

素匹配。直接用正交光栅计算相位差,图 3(1)表明,正交光栅在保证相位展开正确和较好调制度提取的情况下,实现了被测物体的三维重构。

为了验证该光栅的实用性,进行了实物实验。实验过程中,待测物为“米奇”和方块,将其置于参考面上随步进电机运动,投影仪(CP-HX6500)以 1 frame/s 的切换速度投影条纹于待测物,由 CCD(MTV1881EX)同步采集变形条纹。实验前,移动 6 次参考面对系统参数进行了标定^[15],每次移动距离为 3 mm。图 4(a)为受物体高度调制的 1 frame 变形条纹图,图像大小为 908 pixel \times 524 pixel,图 4(b)为对应频谱分布,虽然出现了频谱混叠和低频扩展的情况,但由于高频条纹的一级频谱离零频较远,依然能较好地提取调制度,图 4(c)分别为调制

度分布和“米奇”的二值化层析调制度分布,以二值化层析调制度图为依据,对变形条纹进行像素匹配后,物体的三维重构结果如图 4(d)所示。可以看出,该方法成功地恢复物体的三维面形。傅里叶变换轮廓术(FTP)是动态测量中应用较为普遍的方法之一^[16~18],PMP 是静态测量中精度较高的一种方法^[2]。同等实验条件下,用 FTP 对运动物体进行了测量,测量过程中单频光栅的频率等于正交光栅中低频条纹的频率,三维重构结果如图 4(e)所示。在物体静止的条件下,用 PMP 对物体进行了测量,得到的物体三维分布如图 4(f)所示。图 4(g)为第 350 行处三种测量结果的比较,可以看出,用本文方法的测量结果更接近静态 PMP 的测量结果。

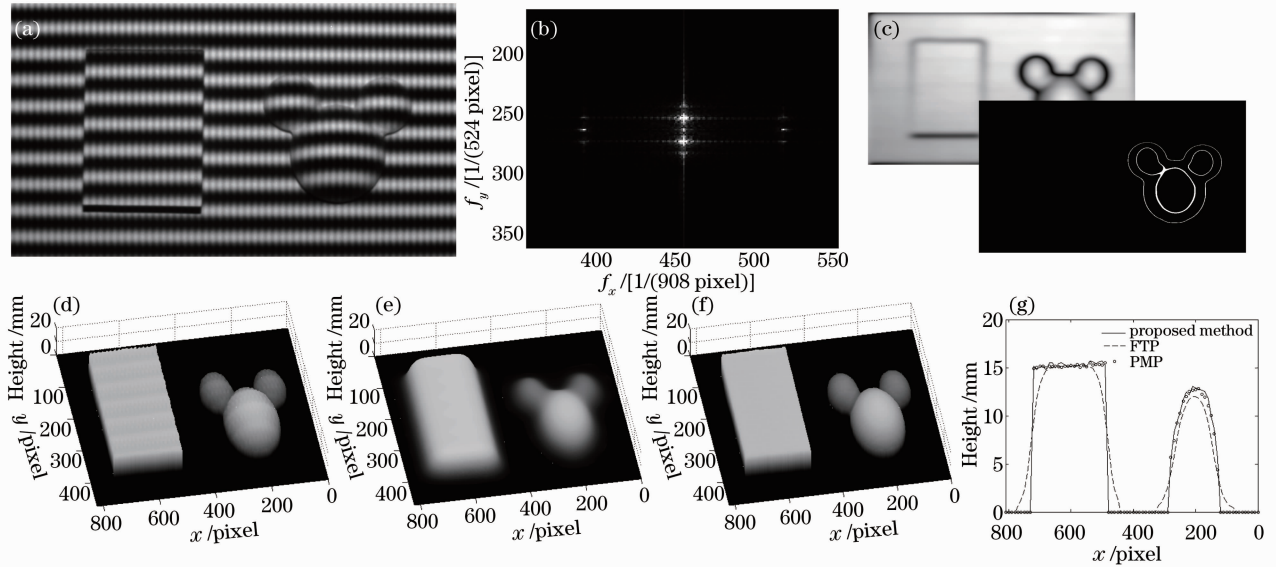


图 4 实验结果。(a)变形条纹图;(b)频谱分布;(c)调制度图和以米奇为标志的调制度层析二值化分布;(d)本文所提方法的三维重构结果;(e) FTP 的三维重构结果;(f)静态 PMP 的三维重构结果;(g) 350 行处三种测量结果的比较
Fig. 4 Experimental results. (a) Deformed pattern; (b) spectrum distribution; (c) modulation distribution and delaminated binary modulation of "Mikey"; (d) height retrieve by the proposed method; (e) height retrieve by the FTP; (f) height retrieve by the static PMP; (g) comparison of the three measurement results in line 350

为了评价该光栅的测量精度,分别对高度为 5.5、8.0、11.0、16.5 mm 的平面进行了测量,由于

平面的调制度信息没有明显特征,在其上放置了“米奇”用于调制度提取实现像素匹配,如同 5(a)所示,

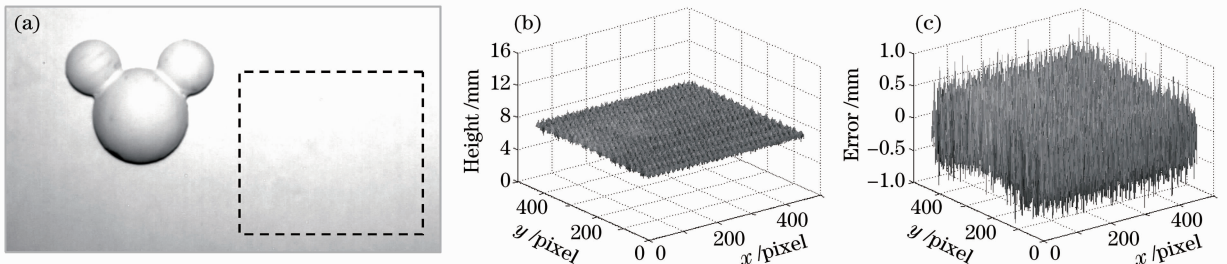


图 5 精度评价。(a)被测平面;(b)高度重构;(c)误差分布
Fig. 5 Accuracy evaluation. (a) Measured plane; (b) height retrieved; (c) error distribution

对图中虚线所框区域进行测量,图 5(b)为 8 mm 平面的三维重构结果,图 5(c)为对应的测量误差分布。对 4 个平面的测量结果作误差分析,均方根(RMS)分别为:0.2408、0.2236、0.2376、0.2731 mm。从图 5(b)可以看出,平面的测量结果中存在明显的周期性误差,这源于投影成像器件的伽马效应^[19,20]。为了提高测量精度,对伽马效应引入的误差进行了校正,校正后对应的 RMS 分别为:0.1302、0.1047、0.1124、0.1481 mm。可以看出,该光栅在保证较大测量范围的同时,具有较高的测量精度。

4 结 论

本文所提正交双频光栅较好地解决了调制度提取和相位展开对频率要求不同的矛盾,使 PMP 用于三维在线检测更具普适性。较高频率的条纹容易滤出基频,用于提取调制度信息以完成像素匹配;较低频率的条纹用于相位计算,避免了测量面形突变较大的物体时条纹错级导致相位展开失败。采用低频条纹计算相位时,无需滤除高频条纹,避免了频域滤波造成的信息丢失,保证了测量精度。

参 考 文 献

- 1 Sai Siva Gorthi, Pramod Rastogi. Fringe projection technique: whither we are? [J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2010, **48**(2): 133~140
- 2 Song Zhang, Shingtung Yau. High-speed three-dimensional shape measurement system using modified two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(11): 113603
- 3 S. Yoneyama, Y. Morimoto, M. Fujigaki *et al.*. Phase-measuring profilometry of moving object without phase-shifting device[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2003, **40**(5): 153~161
- 4 He Dinggao, Cao Yiping. Optimized design of composite grating on PMP [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(2): 128~134
何定高,曹益平.基于相位测量轮廓术的复合光栅优化设计[J].*光电工程*, 2008, **35**(2): 128~134
- 5 Zhang Rui, Cao Yiping, He Dinggao. New method for improving the accuracy of real-time three-dimensional measurement based on a composite grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008005
张睿,曹益平,何定高.一种提高复合光栅实时三维测量精度的方法[J].*中国激光*, 2011, **38**(10): 1008005
- 6 Yu Ruizhi, Cao Yiping. A three dimensional on-line inspecting method for work piece by PMP[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1139~1143
喻睿智,曹益平.一种采用相位测量轮廓术的工件在线三维检测方法[J].*光子学报*, 2008, **37**(6): 1139~1143
- 7 Zhong Lijun, Cao Yiping. An on-line phase measuring profilometry with phase-shifting perpendicular to moving direction of measured object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 417~420
钟立俊,曹益平.相移正交物体运动方向的在线相位测量轮廓术[J].*光学学报*, 2009, **29**(2): 417~420

- 8 Zhong Lijun, Cao Yiping. An improved algorithm adapting to on-line 3D inspection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1503~1507
钟立俊,曹益平.一种适合在线三维检测的改进算法[J].*中国激光*, 2009, **36**(6): 1503~1507
- 9 He Yuhang, Cao Yiping, Zhong Lijun *et al.*. Improvement on measuring accuracy of digital phase measuring profilometry by frequency filtering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 220~224
何宇航,曹益平,钟立俊等.采用频域滤波提高数字相位测量轮廓术的测量精度[J].*中国激光*, 2010, **37**(1): 220~224
- 10 Wu Yingchun, Cao Yiping, Xiao Yanshan. A new method of actively modifying the grating to improve the accuracy of on-line three-dimensional inspection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908009
武迎春,曹益平,肖焱山.一种主动修正投影光栅提高在线测量精度的方法[J].*中国激光*, 2011, **38**(9): 0908009
- 11 Li Kun, Cao Yiping, Chen Yongquan *et al.*. A new method for online three dimensional inspection without marked[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(2): 62~65
李坤,曹益平,陈永权等.一种无需标记的在线三维测量方法[J].*光学与光电技术*, 2009, **7**(2): 62~65
- 12 Zheng Xu, Cao Yiping. A fast on-line 3D measuring algorithm based on two-value modulation delamination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8): 1443~1448
郑旭,曹益平.基于二值化调制度层析的快速在线三维测量算法[J].*光子学报*, 2010, **39**(8): 1443~1448
- 13 Zheng Xu, Cao Yiping, Li Kun. An on-line 3D measurement method based on modulation delamination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2573~2577
郑旭,曹益平,李坤.基于调制度层析的在线三维测量方法[J].*光学学报*, 2010, **30**(9): 2573~2577
- 14 Su Xianyu, Chen Wenjing, Cao Yiping *et al.*. Phase unwrapping algorithm based on the oriented parameter map [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(4): 463~467
苏显渝,陈文静,曹益平等.参数图导向的相位展开方法[J].*光子学报*, 2004, **15**(4): 463~467
- 15 Li Wansong, Su Likun, Su Xianyu. Phase-measuring profilometry in big scale measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 792~796
李万松,苏礼坤,苏显渝.相位检测面形术在大尺度三维面形测量中的应用[J].*光子学报*, 2000, **20**(6): 792~796
- 16 Xianyu Su, Wenjing Chen, Qican Zhang *et al.*. Dynamic 3-D shape measurement method based on FTP[J]. *Opt. & Lasers in Engng.*, 2001, **36**(1): 49~64
- 17 Wen Jiawen, Zhong Jingang. Application of Gabor transform to 3-D shape analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996
翁嘉文,钟金钢.加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J].*光子学报*, 2003, **32**(8): 993~996
- 18 Ma Suodong, Zhu Rihong, Li Jianxin *et al.*. A multi-view measurement system for three dimensional surface distribution of transient moving target[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3091~3097
马锁冬,朱日宏,李建欣等.瞬态飞行目标三维面形的多视角测量系统[J].*中国激光*, 2010, **37**(12): 3091~3097
- 19 S. Zhang, S. Yau. Generic nonsinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 36~43
- 20 S. Ma, C. Quan, R. Zhu *et al.*. A fast and accurate gamma correction based on Fourier spectrum analysis for digital fringe projection profilometry [J]. *Opt. Commun.*, 2012, **288**(5): 533~538