

文章编号: 0253-2239(2008)08-1527-06

结构光测量中的高精度相位误差补偿算法

李中伟 王从军 史玉升 王圆圆

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 在模拟分析投影仪伽马非线性对相位误差影响的基础上, 提出一种直接分析投影光栅特征并建立相位误差查找表的算法, 对相位误差进行补偿。该算法通过分析一组投射到标准白色平板上的光栅图像, 确定光栅相位值与相位误差的对应关系, 并量化存储在一个查找表中, 测量过程中使用查找表对相位误差进行补偿。实验结果表明, 该方法可大大降低由投影仪伽马非线性引起的相位误差, 系统测量精度达到 0.043 mm, 比误差补偿前提高了 5.6 倍。

关键词 光学测量; 结构光; 相位误差补偿; 查找表; 伽马非线性

中图分类号 TN206 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082808.1527

High Precision Phase Error Compensation Algorithm for Structural Light Measurement

Li Zhongwei Wang Congjun Shi Yusheng Wang Yuanyuan

(State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract Based on simulation of the impact of gamma nonlinearity of the projector on phase error, an algorithm is proposed to build a look-up table (LUT) for phase error compensation by analyzing the projector grating directly. In this algorithm, a set of grating images of a uniform flat surface board are captured and the relation of grating phase and phase error is established. Then the relation is analyzed and stored in a LUT for phase error compensation. Experimental results show this algorithm reduces greatly the phase error caused by the gamma nonlinearity of the projector. The measurement precision of the system reaches 0.043 mm, 5.6 times higher than that before error compensation.

Key words optical measurement; structural light; phase error compensation; look-up table; Gamma nonlinearity

1 引 言

结构光测量系统的测量误差有两个主要来源: 相移误差和非正弦波形误差。相移误差是由于相移步距的不准确所致, 它常常是不可避免的, 但可通过采用精密的相移装置和测量过程中采用实时相移校正技术来降低^[1]。随着数字显示技术的发展, 商业化的数字投影仪(DLP)在结构光测量系统中得到广泛应用。数字投影仪投射光栅可以消除相移误差, 这时由数字投影仪的伽马非线性引起的非正弦波形

误差, 将成为影响测量系统测量精度的主要因素^[2]。

现有的减小伽马非线性引起的测量误差的方法包括: 双三步相移算法^[3], 预先标定投影系统非线性^[4~6], 直接修正投影仪的非线性变形^[7~10]等。这几种方法可以大大提高测量精度, 但仍不能完全消除误差。S. Zhang 等^[11]提出了一种标定投影仪伽马值的算法, 将预先计算出的相位误差存储在一个查找表(LUT)里用于降低相位误差, 可大大降低由投影仪伽马值引起的相位误差, 但标定投影仪伽马

收稿日期: 2007-12-04; 收到修改稿日期: 2008-01-07

基金项目: 2007 年粤港关键领域重点突破项目(2007498212)资助课题。

作者简介: 李中伟(1981-), 男, 博士研究生, 主要从事机器视觉、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: lizhongwei226@gmail.com

导师简介: 王从军(1963-), 男, 副教授, 主要从事逆向工程、快速成型等方面的研究。E-mail: walden@263.net

值的过程需要大量时间,且要求投影仪的伽马值固定不变。

本文提出一种直接分析投影光栅特征并建立相位误差查找表的算法,对相位误差进行补偿。该算法将四幅光栅图像投射到一个标准的平板上,拍摄光栅图像,然后利用四步相移法对光栅图像进行解相,通过分析统计确定相位值与相位误差的对应关系并量化存储在一个查找表中,用于在三维测量过程中对相位误差进行补偿。

2 原 理

2.1 伽马非线性对相位误差的影响

在结构光测量系统中,由计算机编程产生送到DLP的归一化正弦条纹^[12~15],可以表示为

$$u(x, y) = c + d \cos[2\pi f_0 x + \varphi_0(x, y)], \quad (1)$$

式中 c 和 d 分别为条纹的背景和初比度, φ_0 为初始相位。令 $\varphi_0(x, y) = 0, 0 \leq u(x, y) \leq 1$ 。由于DLP的伽马非线性的影响,DLP输出条纹为

$$z(x, y) = [u(x, y)]^\gamma. \quad (2)$$

γ 一般大于1,国家电视系统委员会(NTSC)推荐的 γ 值为2.2,但是具体每个DLP的 γ 值由生产厂家具体调整,并且受计算机显卡的影响会动态进行调整,以改善显示效果^[8]。

为了研究DLP的伽马非线性对相位的影响程度,本文使用四步相移法^[6]进行了模拟实验,实验结果见图1(其中 $\gamma=3$)。图1(a)中虚线为输入DLP的理想正弦信号,实线为经过DLP的伽马非线性调制后输出的非正弦信号,图1(b)分别显示了由理想正弦信号计算出的理想相位值 φ_i 和由输出的非正弦信号计算的实际相位值 φ_r ,由 $\varphi_i - \varphi_r$ 可得到DLP的伽马非线性产生了相位误差,如图1(c)所示,可见相位误差是周期性分布的。这种周期性的相位误差会在后续三维点云匹配过程中产生周期性误差,使测量得到的物体表面严重失真。因此在测量过程中需对这种误差进行补偿。

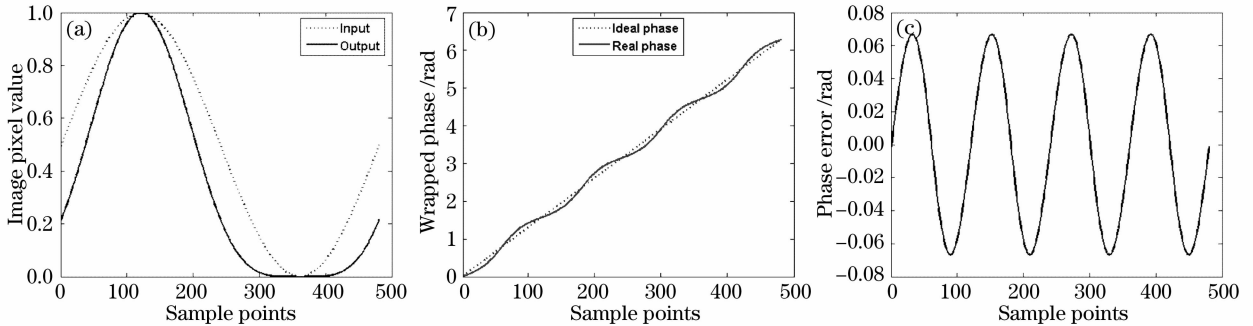


图1 模拟结果。(a)输入的正弦信号和输出信号,(b)真实相位主值和理想的相位主值,(c)由投影仪的伽马非线性引起的相位误差

Fig.1 Simulated results. (a) Input sinusoidal signal and output signal, (b) real wrapped phase and ideal wrapped phase, (c) phase error caused by the Gamma nonlinearity of the projector

2.2 误差补偿

根据(1)式由计算机编程生成4幅正弦光栅图像 I_i ,相位初值分别为 $-\pi, -0.5\pi, 0, 0.5\pi$,每个周期由四步相移法可计算出光栅的真实相位值

期有60 pixel,如图2所示。DLP将这4幅光栅图像投射到白色的标准平板上,CCD分别拍摄的四幅图像 I_i ,如图3所示。

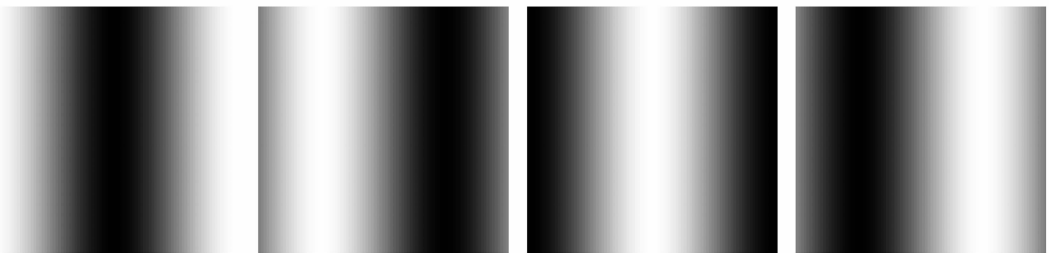


图2 计算机生成的4幅正弦光栅图像

Fig.2 Four sinusoidal grating patterns generated by computer

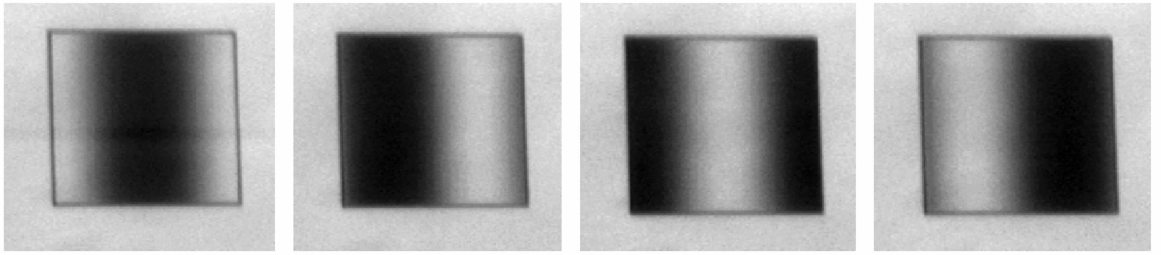


图 3 CCD 拍摄的四幅正弦光栅图像

Fig. 3 Four sinusoidal grating patterns captured by CCD

$$\varphi(x, y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}\right), -\pi < \varphi \leq \pi \quad (3)$$

由模拟实验可知, 投射出的光栅图像经过投影仪的伽马非线性变化后会引入相位误差, 实际的相位值与理想的符合线性变化的相位值的差值为

$$\Delta[\varphi(x, y)] = \varphi(x, y) - kx, \quad (4)$$

式中 $k = 2\pi/N$, N 为一个周期的采样点数。真实相位在一个周期内会在 $0 \sim 2\pi$ 内线性变化。

Δ 为真实相位 $\varphi(x, y)$ 的函数, 则 (φ, Δ) 即为相位误差的查找表, 测量过程中可根据计算得到的真实相位值 $\varphi(x, y)$ 在查找表中得到对应的误差值 Δ , 然后由 $\varphi(x, y) + \Delta$ 得到误差补偿后的相位值。图 4 为由拍摄的四幅光栅图像得到的相位误差与真实相位值的对应关系(取图中间 10 行)。

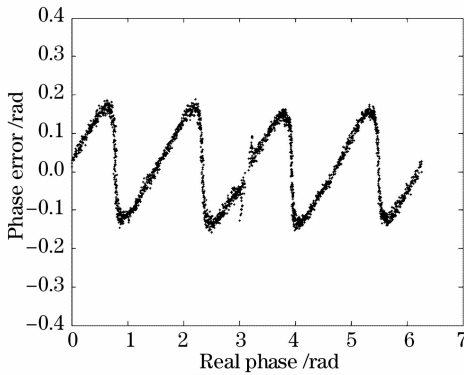


图 4 相位误差与真实相位值的关系

Fig. 4 Phase error versus real phase

本文进一步分析了三种不同波长(60 pixel、120 pixel和 240 pixel)的光栅图像的相位误差。图 5 为三种不同波长图像中间 10 行的相位误差与真实相位值的对应关系。由图 5 可见, 不同波长的相位误差与真实相位值的对应关系是一致的, 即由伽马非线性引起的相位误差与光栅图像的波长无关。因此, 可以利用特定波长的光栅图像统计出相位误差查找表, 用于测量时对相位误差进行补偿。

本文使用波长为 120 pixel 的光栅图像构建相位误差查找表, 具体过程为: 投射 4 幅相移图像到一

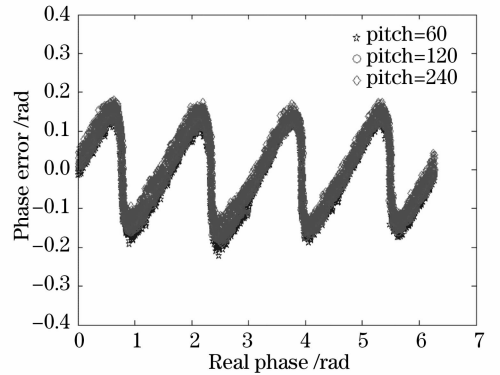


图 5 三种不同波长光栅的相位误差与真实相位值的关系

Fig. 5 Phase error for grating with three pitches versus real phase

个白色的标准平板上并用 CCD 拍摄; 使用上述方法计算相位误差, 图像中间 100 行的相位误差见图 6; 最后分析相位误差与真实相位值的对应关系, 并量化存储在一个查找表(LUT)中。

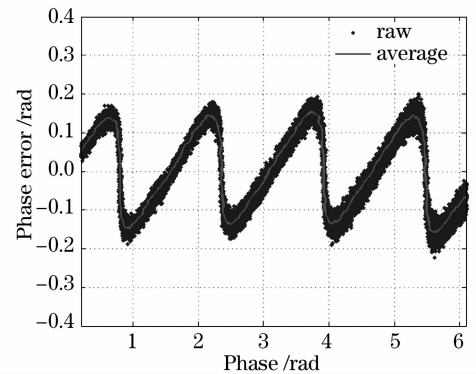


图 6 建立的相位误差查找表

Fig. 6 Phase error LUT

拟建立一个包含 256 个元素的查找表, 因此将相位主值($0 \sim 2\pi$)均分为 256 个小区间, 则第 n 个区域的相位值的范围为: $[2\pi(n-1)/256, 2\pi n/256]$ 。在图像中间 100 行中, 所有相位值在此范围的点所对应的相位误差的平均值被存在查找表中的第 n 个元素中, 图 6 中的实线为根据上述过程建立的相位误差查找表, 测量过程中可根据此查找表对相位误

差进行补偿。假设某点的相位值为 φ , 则对应的相位误差值在查找表中的索引值为 $k = \lceil 2\pi\varphi/256 \rceil$, 因此该点的相位值经补偿为 $\varphi' = \varphi + \text{LUT}(k)$ 。

3 实验及讨论

为验证本文误差补偿算法的有效性, 建立如图 7 所示的结构光测量系统, 该系统由一个聚焦 LP70 型 DLP(分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$) 和一个 Hitachi KP-F3 CCD 摄像机(分辨率为 $644 \text{ pixel} \times 493 \text{ pixel}$) 组成, 系统解相、相位展开及三维重构原理见文献^[17,18]。使用该系统对一个标准平板进行测量, 测量范围为 $400 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 测量过程中拍摄的一组相移光栅图像如图 8。



图 7 结构光测量系统

Fig. 7 Structural light measurement system

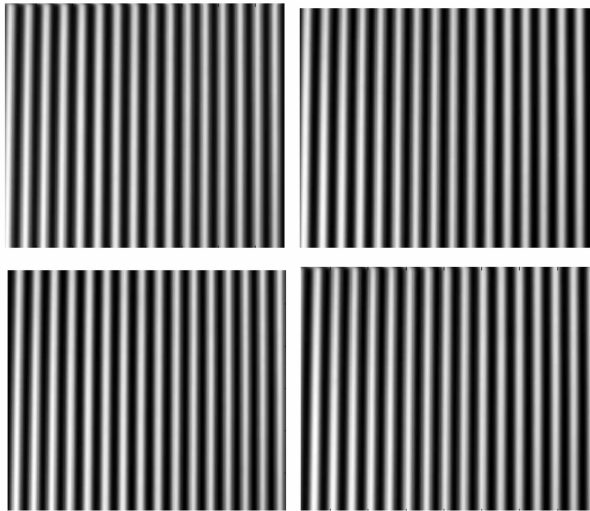


图 8 平板的相移光栅图像

Fig. 8 Phase-shifted grating images for the flat board

图 9 为误差补偿前后测得的点云数据, 图 9(a) 存在明显的周期性误差点云数据。使用点云数据分别拟合出一个理想平面, 测量点云与理想平面的距离可以用来衡量系统的测量误差。误差补偿前后, 平面中间几行中的点与拟合出的理想平面的距离统计结果如图 10, 误差补偿前所有点的标准偏差为 0.242 mm , 误

差补偿后所有点的标准偏差为 0.043 mm , 测量精度提高了 5.6 倍。

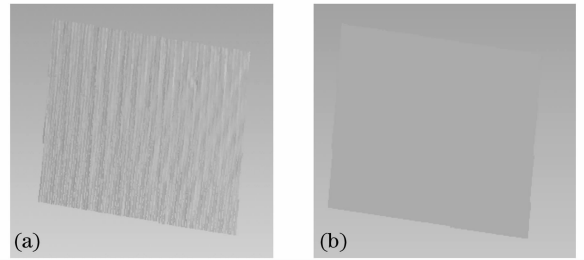


图 9 平板的三维测量结果。(a) 误差补偿前, (b) 误差补偿后

Fig. 9 Three-dimensional measurement result of the planar surface. (a) Before error compensation, (b) after error compensation

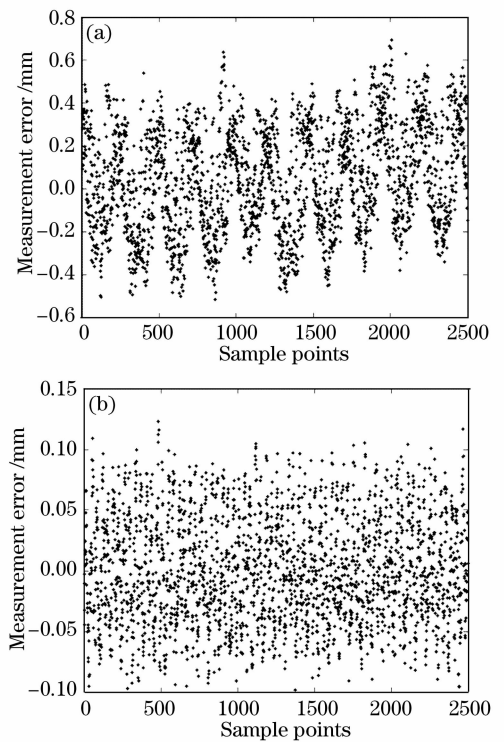


图 10 所有点的测量误差分布图。(a) 误差补偿前, (b) 误差补偿后

Fig. 10 Measured errors of all experimental points.

(a) Before error compensation, (b) after error compensation
另外, 使用该系统对真实人脸进行测量。图 11 为真实人脸照片与误差补偿前后的测量结果, 可见误差补偿后的测量结果比误差补偿前的更为平滑光滑, 视觉效果更好。

上述两组实验结果表明, 误差补偿算法可以显著提高结构光测量系统的测量精度。

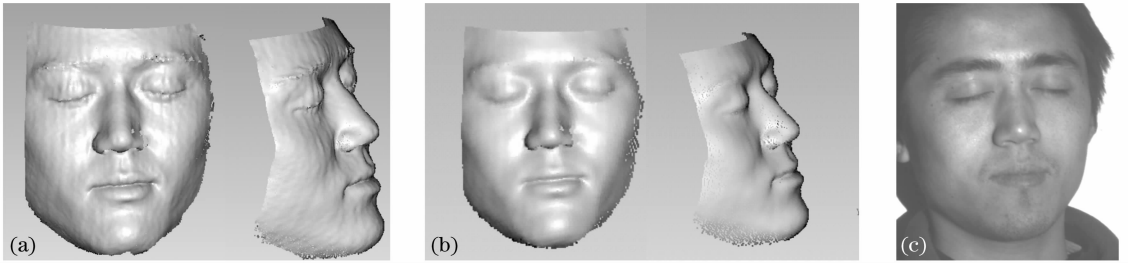


图 11 人脸的三维测量结果。(a)误差补偿前,(b)误差补偿后,(c)人脸照片

Fig. 11 Three-dimensional measurement results of a human face. (a) Before error compensation, (b) after error compensation, (c) photograph of the human face

为了比较本文所提算法与文献[11]中所提算法的优缺点,根据文献[11]中的算法对上述结构光测量系统中 DLP 的伽马值进行了标定,并建立了系统的相位误差查找表,具体实现过程如下:

1) 标定 DLP 的伽马值。利用计算机生成一系列灰度值 $I_n (n=1, 2, \dots, N)$ 在 35~235 范围内的灰度图像;然后将具有不同灰度值的灰度图像投射到一个标准白板上,并使用 CCD 摄像机分别拍摄下来;取每幅图像中图像中心的灰度值 $I_n^c (n=1, 2, \dots, N)$,得到输入 DLP 的灰度值和 CCD 拍摄得到的灰度值的对应关系如图 12 所示,可见图中的曲线明显是非线性的。

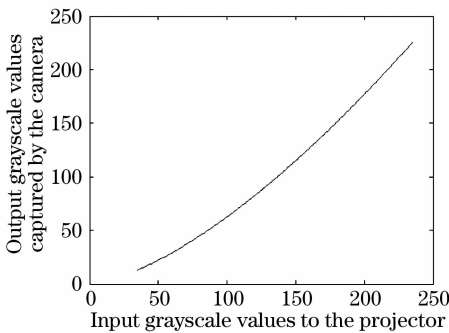


图 12 标定出的投影仪的伽玛曲线

Fig. 12 Calibrated results for the Gamma of the projector

2) 根据 I_n, I_n^c , 使用样条曲线拟合得到系统的灰度响应函数 $f, I_n^c = f(I_n)$ 。

3) 利用计算机编程生成四幅光强分布为 $I_n(x, y) = 100 \left\{ 1 + \cos \left[2\pi f_0 x + \frac{(n-3)\pi}{2} \right] \right\} + 35$ 的光栅图像,根据灰度响应函数 f 模拟出拍摄的光栅图像 $I_n^c(x, y)$,并根据(3)式分别利用 $I_n(x, y), I_n^c(x, y)$ 计算出理想相位值 ϕ 和实际相位值 $\tilde{\phi}$,则由投影仪伽马非线性引起的相位误差为 $\Delta\phi = \tilde{\phi} - \phi$ 。

4) 将计算得到的实际相位值 $\tilde{\phi}$ 和相位误差 $\Delta\phi$ 量化存储在一个查找表中,用以在测量过程中对相位误差进行补偿。

利用此查找表和上述平面测量中拍摄的光栅图像(图 8)重建出标准平板三维数据,平面中间几行的误差分布情况如图 13,可见点云数据的标准偏差为 0.039 mm。

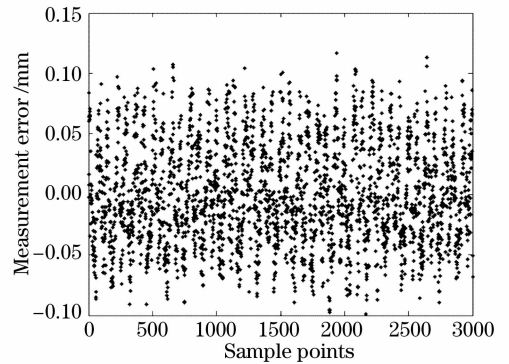


图 13 重建的所有点的测量误差分布图

Fig. 13 Measured errors distribution of all experimental points after reconstruction

通过实验可见,本文与文献[11]所提出的两种相位误差补偿算法均可以显著改善系统的测量精度;虽然使用文献[11]中的算法对相位误差进行补偿后系统的测量精度稍高,但需拍摄大量图片才能标定出投影仪的伽马曲线,进而得到系统的相位误差查找表,标定过程复杂耗时,且要求投影仪的伽马值固定不变;本文算法则只需 4 幅光栅图像就可得到系统的相位误差查找表,计算过程简单快速,且由于本文算法中相位误差查找表是根据拍摄到的光栅图像建立的,对投影仪的伽马值的可变性无要求,通用性更强。

4 结 论

在模拟分析伽马非线性对相位误差的影响的基础上,使用一种直接分析投影光栅特征并建立相位误差查找表的算法,对相位误差进行补偿。实验结果表明,本算法简单、快速、精度高,测量系统使用建立的相位误差查找表进行误差补偿后,测量精度达

到 0.043 mm,比误差补偿前提高了 5.6 倍,测量得到的人脸三维点云数据质量也明显改善。

参 考 文 献

- 1 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Analysis of two errors in grating projection profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 376~379
郝煜栋,赵洋,李达成. 光栅投影式轮廓测量中两种误差的分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 376~379
- 2 J. Schwider, R. Burow, K. E. Elssner *et al.*. Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(21): 3421~3432
- 3 P. S. Huang, Q. Hu, F. P. Chiang. Double three-step phase-shifting algorithm[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4503~4509
- 4 C. R. Coggrave, J. M. Huntley. High-speed surface profilometer based on a spatial light modulator and pipeline image processor[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(9): 1573~1581
- 5 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- 6 S. Kakunai, T. Sakamoto, K. Iwata. Profile measurement taken with liquid-crystal gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(13): 2824~2828
- 7 Y. P. Cao, X. Y. Su, L. Q. Xiang *et al.*. Intensity transfer function of DMD and its application in PMP[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4778**: 83~89
- 8 H. W. Guo, H. He, M. Chen. Gamma correction for digital fringe projection profilometry[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(14): 2906~2914
- 9 Xu Ping, Chen Wenjing, Su Xianyu. Higher-precision FTP based on digital light projecting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(11): 59~62
许平,陈文静,苏显渝. 高精度的数字光投影傅里叶变换轮廓术[J]. *光电工程*, 2005, **32**(11): 59~62
- 10 G. H. Notni, G. Notni. Digital fringe projection in 3D shape measurement: an error analysis[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5144**: 372~380
- 11 S. Zhang, P. S. Huang. Phase error compensation for a 3-D shape measurement system based on the phase-shifting method [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(6): 1~9
- 12 Ding Wanshan, Liu Yan. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 58~62
丁万山,刘艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 58~62
- 13 Xu Qinghong, Zhong Yueshan, You Zhifu. Study on phase demodulation technique based on wavelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12): 1617~1622
许庆红,钟约先,由志福. 基于小波变换的解相技术研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(12): 1617~1622
- 14 Tang Yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1435~1439
唐燕,陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1435~1439
- 15 Qin Xi, Chen Yong, Cao Jihong *et al.*. Influence of dispersion compensation schemes on phase noise of phase modulation systems[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 62~66
秦曦,陈勇,曹继红等. 色散补偿方式对相位调制系统中相位噪声的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 62~66
- 16 C. Reich, R. Ritter, J. Thesing. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 224~231
- 17 Z. W. Li, Y. S. Shi, C. J. Wang *et al.*. A prototype system for high precision 3D measurement based on grating method [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6834**: 683442
- 18 S. Zhang, P. S. Huang. Novel method for structured light system calibration[J]. *Opt. Eng.*, 2006, **45**(8): 83601~83608