

基于灰度曲线交点的结构光编码条纹边缘检测

吴海滨 于晓洋 关丛荣

(哈尔滨理工大学, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 在分析结构光编码白条纹扩散的原因和实际边缘形态的基础上, 提出一种同时检测多边缘并消除扩散影响的亚像素精度方法——交点法。首先向被测表面投射互为反色的两组格雷编码图案, 提取两组强度图像中灰度梯度较大的点作为边缘依据点, 并对其进行曲线拟合, 然后将对应拟合曲线的交点作为边缘。分析了交点法对结构光系统中常见的被测表面倾斜和离焦两个主要误差因素的适应能力。介绍了检测原理及误差因素分析, 并进行了边缘检测实验。实验结果表明, 对于宽度大于 4 pixel 的编码条纹, 边缘检测相对误差小于 1%, 可消除被测表面倾斜和离焦的影响。

关键词 结构光; 边缘检测; 亚像素; 扩散

中图分类号 TH741 **文献标识码** A

Structured Light Encoding Stripe Edge Detection Based on Grey Curve Intersecting Point

Wu Haibin Yu Xiaoyang Guan Congrong

(Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract Based on analysis of reasons for structured light encoding white-stripe diffusion and practical edge shape, an intersecting point method with sub-pixel precision is presented which can detect multiple edges simultaneously and eliminate the influence of diffusion. Two groups of grey encoding patterns with inverse grey value each other were projected onto the measured surface, and then points with larger grey gradient in the two groups of intensity images were selected as reference edge points. Intersecting points of corresponding curves fitted by reference edge points were treated as edges. The adaptability of intersecting point method to two main error factors such as measured surface sloping and defocus in structured light system was analyzed. The detection principle and error factor analysis are presented. Finally, edge detection experiment was done. Experimental results show, the detection relative error is less than 1% for encoding stripes wider than 4 pixels, and the method can eliminate the influence of measured surface sloping and defocus.

Key words structured light; edge detection; sub-pixel; diffusion

1 引 言

目前, 在结构光三维测量的领域, 提高测量准确度和效率成为实用化过程中的关键问题。基于格雷码条纹边缘编码、解码的结构光三维测量技术^[1], 可以消除格雷码固有的 1 位解码误差, 其技术关键依赖于图像中条纹边缘的准确定位。传统的线结构光

系统向被测表面投射激光光条, 其投射光强基本符合高斯分布, 因此被测表面光强成高斯分布, 在强度图像中利用亚像素定位法^[2]确定光条中心即可。编码结构光系统为提高测量效率, 利用投影仪^[3]向被测表面投射黑白相间的编码条纹。投影仪条纹和激光光条的本质区别是, 其投射光强非高斯分布, 而是

收稿日期: 2007-09-17; **收到修改稿日期:** 2007-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(60572030)、教育部博士学科点专项科研基金(20050214006)、黑龙江省教育厅海外学人项目(1055HZ027)、哈尔滨市科技攻关计划(2005AA1CG152)和黑龙江省研究生创新科研资金(YJSCX2005-238HLJ)资助课题。

作者简介: 吴海滨(1977—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事三维视觉检测方面的研究。

E-mail: woo@hrbust.edu.cn

导师简介: 于晓洋(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测、三维视觉检测等方面的研究。

E-mail: yuxiaoyang@hrbust.edu.cn

近似阶跃分布。因此,理论上被测表面和强度图像中黑白条纹边缘应为阶跃变化,但是由于多种因素影响,该边缘呈渐变趋势,且边缘向黑条纹一侧偏移,称其为扩散。条纹扩散将带来较大解码误差和图像点定位误差。为寻求一种能够消除边缘扩散的影响,同时确定多个条纹边缘位置的方法,本文提出了一种边缘检测方法,分析被测表面特性对边缘检测的影响。

2 边缘扩散分析

边缘是结构光编码图像的重要特征,边缘检测是测量的基础和关键。理想的边缘,应为离散的阶跃曲线。然而,由于被测表面的散射、光学系统点扩散特性和离焦等因素,边缘发生扩散。

2.1 表面散射

通常将粗糙表面看作是符合高斯分布的随机表面,其起伏是相对某一平滑的“参考平面”^[4]。粗糙表面相对于平面的高度分布通常用高斯密度函数表示。当用投影仪投射一定宽度强度均匀的白光条到粗糙表面时,就会产生散射,在数码相机的接收方向上将出现一条近似正态分布的散射光带^[5]。同理,投射黑白相间的等宽编码条纹时,白条纹的散射部分侵入黑条纹一侧,造成边缘扩散。

2.2 光学系统点扩散

光学系统的理想状态是物空间一点发出的光能量在像空间也集中在一点上,但实际的光学系统成像时,物空间一点发出的光在像空间总是分散在一定的区域内,其分布的情况称为点扩展函数(PSF)^[6]。点扩展函数包括“核”和“晕圈”两部分^[7],对于大部分光学系统,决定系统点扩展函数的众多因素综合的结果总是使它的“晕圈”的强度分布呈高斯型。由于点扩展函数的存在,一个理想的非相干光学成像系统可以看作是一个低通滤波器,系统的线响应函数是系统的点扩展函数在线光源方向的积分。当光学系统的输入为阶跃函数时,其输出响应称为边缘响应。点扩展函数使白条纹边缘产生扩散。

2.3 离焦

结构光系统将投影仪和数码相机看作小孔模型,但实际测量时,投影仪投射图案在世界坐标系中的焦平面成清晰像,焦平面以外的图案由于离焦逐渐模糊;同理,被测表面处于数码相机焦平面时,CCD呈清晰像,焦平面以外部分的像由于离焦逐渐模糊。因此,条纹边缘的灰度由阶跃变化趋于正弦过渡缓慢变化。

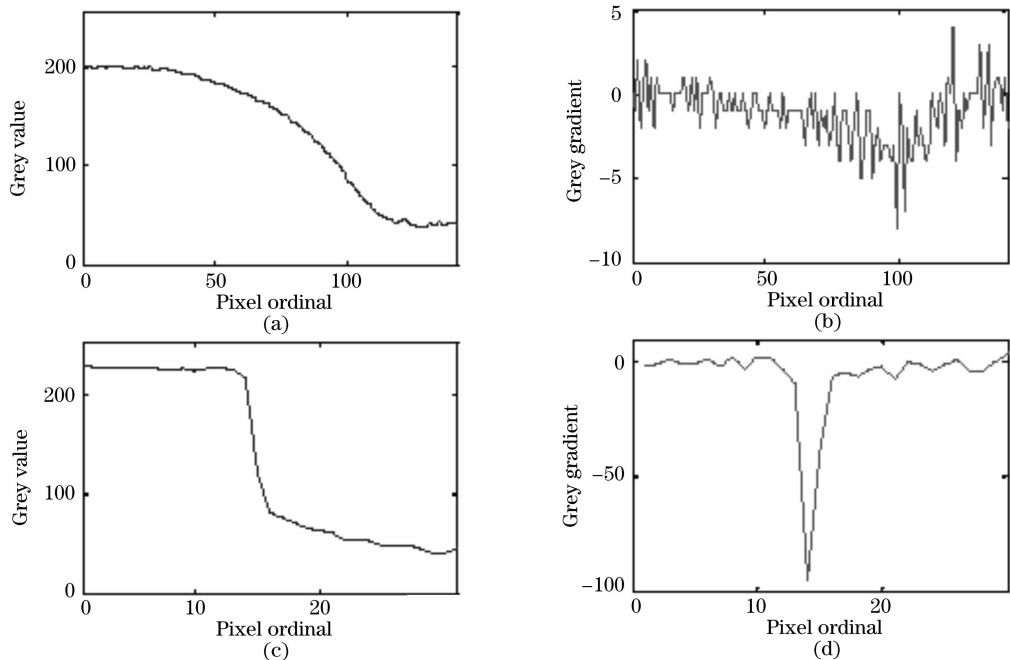


图1 条纹边缘形态及一阶差分。(a)放大的边缘灰度值,(b)放大的边缘灰度梯度,(c)正常的边缘灰度值,(d)正常的边缘灰度梯度

Fig.1 Stripe edge shape and first difference. (a) Edge grey value by zoom capturing, (b) edge grey gradient by zoom capturing, (c) edge grey value by normal capturing, (d) edge grey gradient by normal capturing

实验表明,光学系统的点扩展函数对调焦情况比较敏感,但受物距影响不大。因此,受限的投影仪和摄像机景深造成的被测表面离焦,导致了轻微的条纹边缘扩散。

理论上对边缘离散信号作一阶差分后,其分布应基本符合高斯曲线。但投影仪的方向性好,光能分布集中,其输出是均匀平面光波,因此图像中边缘梯度变化很大。若将条纹边缘放大拍摄(数码相机分辨率大于投影仪分辨率),则边缘基本符合高斯曲线,如图 1(a)、图 1(b)所示;若按结构光系统设计要正常拍摄(数码相机分辨率等于投影仪分辨率)则边缘是类似斜坡的直线或曲线,白条纹略有扩散,如图 1(c)、图 1(d)所示。

3 边缘检测方法

一类边缘检测方法是在二维图像中按像素的某邻域构造边缘检测算子,如梯度算子、索贝尔(Sobel)算子、拉普拉斯算子等^[8~10]。这类方法得到的边缘都具有一定的宽度,通过抽取骨架等形态学^[11]运算可精确到一个像素宽度,但检测精度仍偏低。此外,易将非边缘或噪声与边缘混淆,因此不能直接用于结构光编码图像的解码。

结构光编码条纹在图像中是近似列方向的,这是由投影仪投射条纹方向和被测表面形态决定的,因此采用扫描方法逐行分析像素灰度变化趋势,在此基础上进行边缘检测。该类方法的主要优点是可以根据图像中由表面形状,环境光影响等造成的局部灰度变化调整边缘检测方法和参量,得到理想的结果。

3.1 常用行扫描边缘检测方法

线结构光测量系统常用二值化法或插值法检测激光光条的边缘。二值化法首先将一行中有效像素的灰度值二值化,然后以 0、1 交界处作为边缘。二值化阈值有多种选取方法,本文实验部分采用平均阈值法,即以一行中所有有效像素灰度值的均值作为阈值。插值法的理论依据是:像边缘特征点处于光强函数斜率最大的地方^[12]。本文实验部分将一行中每个像素点做向前差分,计算其梯度。以梯度较大的点作为边缘点,以其为节点拟合连续的插值函数,以函数曲线上斜率最大的点的横坐标作为边缘的亚像素位置。结构光系统拍摄图像中,条纹边缘基本处于梯度最大值处。针对本文编码条纹图像边缘的插值区间节点数目较少的特点,实验部分采用了牛顿插值函数。

3.2 交点法

二极化法或插值法也可以用来检测编码结构光系统的条纹边缘,但易受环境影响。本文提出一种适用于编码结构光系统的交点法。该方法向被测表面投射互为反色的两组格雷码编码图案,如图 2(a)所示,分别拍摄图像。在系统参量不变的前提下,同一边缘在正、反色两幅图像中偏移的方向相反、幅度相同,因此以两幅图像同一行像素灰度曲线的交点作为边缘点,如图 2(b)所示。具体算法流程图如图 2(c)所示,需要说明的是流程中由噪声或非边缘产生的孤立点被剔除。

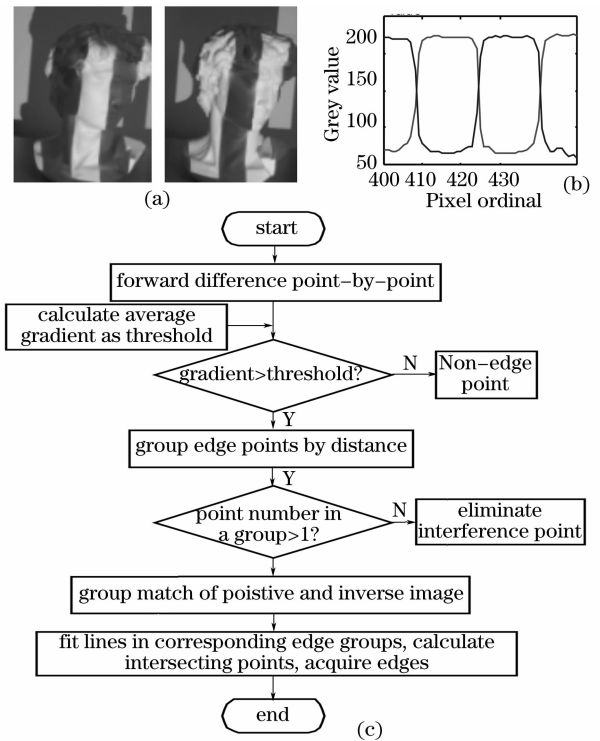


图 2 交点法边缘检测。(a)反色格雷编码,(b)灰度值曲线,(c)算法流程图

Fig. 2 Intersecting point edge detection method. (a) Grey encoding by inverse grey value, (b) grey value curve, (c) algorithm flow chart

该方法对条纹边缘的检测精度及对多种干扰因素的适应能力,将在实验部分加以分析。

4 表面形貌对条纹检测的影响

被测表面的形貌将对条纹检测精度产生影响,而表面倾斜最具代表性。

4.1 表面倾斜对投影仪的影响

若投影仪投射角为 2α ,其主光轴与水平平面垂直,其投射条纹在水平平面上的投影宽度为 d_1 ,数码相机主光轴与水平平面夹角为 θ ,则条纹在成像

方向的投影宽度为 d 。当被测表面产生角度为 β 的倾斜后,投影仪镜头中心沿主光轴到被测表面的距离由 L 变为 L' 则条纹在成像方向的投影宽度为 d' ,如图 3 所示。

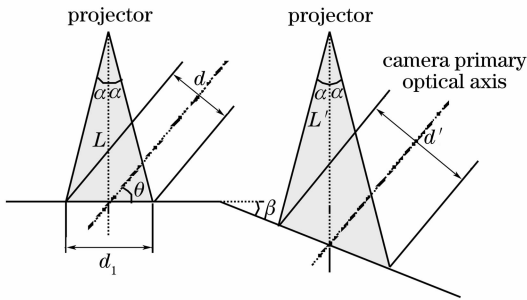


图 3 条纹宽度与表面倾斜关系

Fig. 3 Relationship between stripe width and surface sloping

水平表面与倾斜表面的入射光强 I_d , I'_d 与条纹像宽度 d , d' 的关系为

$$\frac{I'_d}{I_d} = \frac{d'}{d} = \frac{4L \cos^2 \alpha \cos \beta \sin(\beta + \theta)}{L' \sin \theta (\cos^2 \beta - \sin^2 \alpha)}, \quad (1)$$

通常斜面上的条纹被拉伸,宽度增加,但具体受 L , L' , α , β , θ 等参量影响,变化较复杂。由于投影仪投射光束的总能量一定,则单位面积上的入射能量改变,通常斜面处面积增大后入射光强减小。

4.2 表面倾斜对数码相机的影响

在结构光系统中,数码相机主要接收来自被测

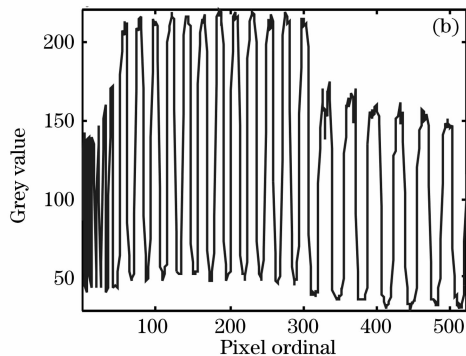
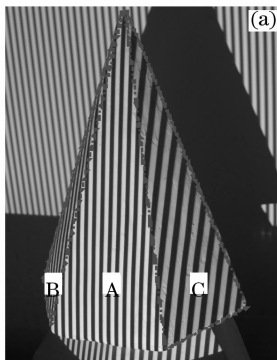


图 4 图像灰度与表面倾斜关系。(a)不同斜率的被测表面,(b)灰度值曲线

Fig. 4 Relationship between image grey value and surface sloping. (a) Measured surfaces with different slope ratio, (b) grey value curve

复杂表面可视为倾角和距离连续变化的斜面的集合,因此上述分析具有普遍性,但具体复杂情况对条纹边缘检测的影响需从实验角度加以分析。

此外,通常被测表面粗糙度参量是均匀的,即表面上不同位置的散射体是稳定的,此时粗糙表面上的各方向的散射光强是一个近近平稳的过程。如果粗糙度参量不均匀,即(2)式中 K_d 不为常量,则对

表面的散射光线。对于石膏、金属、纸等表面粗糙度,散射光强可用朗伯(Lambert)模型表示^[13]:

$$I_o = K_d I_i \sin \gamma, \quad (2)$$

式中 K_d 为散射率, I_i 为入射光强, γ 为散射光线与被测表面夹角。 γ 较小时,散射强度随其增加而迅速增加, γ 增至一定值后,散射强度变化比较缓慢,当 γ 在反射角附近时,散射强度最强。图 3 中被测表面倾斜 β 时,数码相机主光轴与被测表面夹角由 θ 变为 $(\theta + \beta)$, 在其视场角内,接收的每条散射光线与主光轴的方向均不同,因此以主光轴方向为例,在斜面处接收到的散射光强普遍增大,但具体受 β , θ 等参量影响,变化较复杂。

结合(1)式、(2)式表面倾斜对投影仪入射光强和摄像机接收的散射光强两方面的影响,倾斜前后图像中的像素灰度 I , I' 关系为

$$\frac{I'}{I} = \frac{L(\cos^2 \beta - \sin^2 \alpha)}{L' \cos^2 \alpha \cos \beta}, \quad (3)$$

倾斜前后像素灰度受多个参量影响,数码相机主光轴和被测表面夹角较大时,入射光强变化占主导地位;数码相机主光轴和被测表面夹角较小时,散射光强变化占主导地位。如图 4(a) 中 A 面被投影仪垂直投射, B、C 面被倾斜投射,因此图 4(b) 中 A 面像素灰度较 B、C 面大;数码相机从右侧拍摄,因此 C 面与其主光轴夹角较大,故 C 面像素灰度较 B 面大。

图像像素点灰度产生影响。

5 实 验

利用 Mitsubishi XD300U 投影仪(分辨率为 768 pixel \times 1024 pixel)和 Canon a520 数码相机(分辨率为 768 pixel \times 1024 pixel)组建的结构光系统,如图 5 所示,在多种情况下拍摄了条纹图像,进行了

边缘检测实验。



图 5 结构光测量系统

Fig. 5 Structured light measurement system

因为相邻边缘之间的距离即条纹宽度,所以可比较相应的黑白条纹宽度,检验边缘检测方法的精

度及其对白条纹扩散的适应能力。调整投影仪垂直平面投射,数码相机垂直平面拍摄,二者分辨率相同,则可以计算图像中条纹的标准宽度。当平面处于聚焦和离焦位置时,检测结果如表 1、表 2 所示。

由表中数据可知,对于不同宽度的条纹,交点法的检测精度高于二值化法和插值法。对于宽度小于等于 4 个像素的条纹,插值法无法检测,因为构造插值多项式至少需 5 个节点。

在被测表面离焦时,白条纹扩散严重,因此正、反色图像灰度曲线交点的灰度值相对聚焦时增大,如图 6 所示,图中虚线分别为聚焦和离焦情况下的交点位置。因此交点法可适应离焦条纹的宽度变化,而二值化法必须调整阈值才能适应白条纹扩散。

表 1 平面边缘检测结果比较

Table 1 Edge detection results of flat surface

Stripe width /pixel	Measurement method	Maximum error /pixel	Relative error /%	Mean square deviation /pixel
8	Binary	1	12.5	0.60
	Interpolation	0.42	5.25	0.31
	Intersecting point	-0.07	0.90	0.06
4	Binary	1	25.00	0.40
	Interpolation	—	—	—
	Intersecting point	0.26	6.50	0.21

表 2 平面(离焦)边缘检测结果

Table 2 Edge detection results of flat surface (defocus)

Stripe width /pixel	Measurement method	Maximum error /pixel	Relative error /%	Mean square deviation /pixel
8	Binary	1	12.5	0.75
	Interpolation	0.61	7.62	0.42
	Intersecting point	0.06	0.75	0.05
4	Binary	1	25.00	0.74
	Interpolation	—	—	—
	Intersecting point	0.27	6.50	0.20

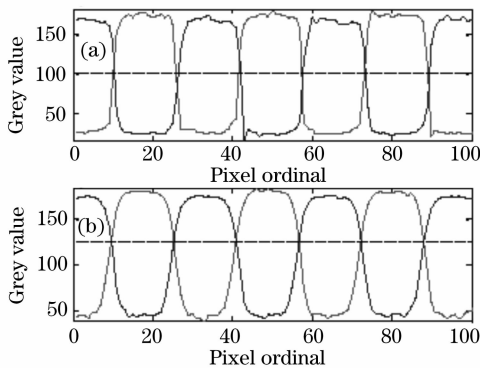


图 6 边缘交点位置。(a)聚焦,(b)离焦

Fig. 6 Edge intersecting points position. (a) focus,

(b) defocus

被测表面斜率变化时,条纹宽度随之变化,因此

无法求其标准值进行比较,但如图 7 所示,交点法求取的条纹宽度介于二值化法求取的正、反色图像条

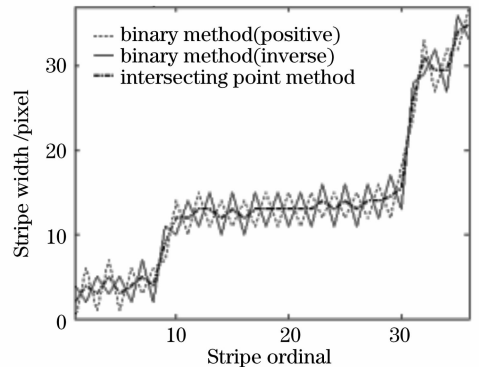


图 7 棱锥表面边缘检测结果

Fig. 7 Edge detection result of pyramidal surface

纹宽度之间,因此边缘检测精度较高。对于图 4(b)所示图像中局部灰度范围变化的情况,二值化法需调整阈值才能完成检测,而交点法具有适应能力。

6 结 论

提出的基于正、反色图像交点的亚像素边缘检测方法,能够同时检测多个编码条纹边缘,相对误差小于 1%,优于二值化法和插值法。此外,交点法对被测表面复杂形貌变化和离焦对边缘检测的影响有适应性,能够在一些特殊条件下完成边缘检测任务,符合结构光测量系统的要求。完善交点法使其能够检测宽度小于 4 pixel 的条纹边缘,是进一步提高结构光系统测量精度的关键。

参 考 文 献

- H. B. Wu, Y. Chen, M. Y. Wu *et al.*. 3D measurement technology by structured light using stripe-edge-based gray code [C]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2006, **2**: 655~659
- Zhang Wentao. Sub-pixel resolution of CCD in optical communication[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 788~790
张文涛. 空间光通信中 CCD 亚像素的分辨率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 788~790
- Cai Yuanyuan, Su Xianyu. Inverse fringe projection technique using multi-projectors simultaneously[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1641~1646
蔡元元,苏显渝. 采用多投影器的反向条纹投影技术 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1641~1646
- Fang Liguang, Yu Jin, Zheng Jun. Number analysis of scatter characteristic on one-dimensional random rough surface[J]. *J. Nanchang University (Natural Science)*, 2004, **28**(4): 383~385
方利广,俞进,郑军. 一维粗糙表面散射特征的数值分析 [J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2004, **28**(4): 383~385
- Wang Ainan. Research on the characteristic parameters of scattered light intensity distribution of rough surface [J]. *J. Hefei University of Technology*, 2002, **25**(6): 1248~1251
王爱因. 粗糙表面散射光强分布的特征参数研究 [J]. *合肥工业大学学报*, 2002, **25**(6): 1248~1251
- Wang Fengpeng. The measurement of the point spread function in optical system with CCD[J]. *J. Gannan Teacher's College*, 2005, (6): 17~18
王风鹏. 用 CCD 测定光学系统的点扩散函数 [J]. *赣南师范学院学报*, 2005, (6): 17~18
- Xiang Yang, Xiang Caixin. The effects of surface roughness on point spread function[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1764~1769
向阳,向才新. 表面粗糙度对点扩散函数影响的研究 [J]. *光学学报*, 1997, **17**(12): 1764~1769
- Wu Xiaobo, Zhong Xianxin, Liu Houquan *et al.*. Improving resolution of CCD camera in dimensional measurement by polynomial interpolation[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 1996, **17**(2): 154~159
吴晓波,钟先信,刘厚权等. 应用多项式插值函数提高面阵 CCD 尺寸测量的分辨率 [J]. *仪器仪表学报*, 1996, **17**(2): 154~159
- Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258
熬磊,谭久彬,崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 253~258
- Wang Gang, Xiao Liang, Jiang Zhijing *et al.*. Sub-pixel multifractal method for image processing application [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(9): 1345~1349
王刚,肖亮,姜志静等. 亚像素多重分形方法在图像处理中的应用 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(9): 1345~1349
- Lihui Jiang, Yanying Guo. Image edge detection based on adaptive weighted morphology [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(2): 77~78
- Zhao Ying, Xu Bin. Paneled CCD sub-pixel edge detection numerical calculation [J]. *Measurement Technique*, 1999, (11): 5~6
赵英,续斌. 面阵 CCD 亚像素边缘检测的数值计算 [J]. *计量技术*, 1999, (11): 5~6
- Liang Zhiguo, Xu Ke, Xu Jinwu *et al.*. Sub-pixel feature extraction and edge detection in 3-D measuring using structured lights [J]. *Chin. J. Mechanical Engineering*, 2004, **40**(12): 96~99
梁治国,徐科,徐金梧等. 结构光三维测量中的亚像素级特征提取与边缘检测 [J]. *机械工程学报*, 2004, **40**(12): 96~99