

线结构光光条中心亚像素精确提取方法

江永付 江开勇 林俊义

华侨大学厦门市数字化视觉测量重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 线结构光三维测量中,光条中心点提取的精度直接影响系统最终测量精度。针对现有光条中心提取方法获得的条纹中心存在折线缺陷的问题,提出了一种基于曲线拟合的线结构光光条中心的亚像素提取方法。该方法通过腐蚀细化获得光条基本骨架,采用均方灰度梯度求取骨架上每一点的法线方向,利用加权灰度重心法获得光条中心初始点,应用分段3次多项式曲线拟合获得光滑的光条亚像素中心坐标。实验结果表明:该方法可以改善光条中心的折线缺陷,提高中心线提取的精度。

关键词 测量;线结构光;光条骨架;均方灰度梯度;多项式曲线拟合

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.071502

Extrication Method for Sub-Pixel Center of Linear Structured Light Stripe

Jiang Yongfu Jiang Kaiyong Lin Junyi

Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract In the three-dimensional measurement based on the linear structured light projection, the extraction precision of light stripe center affects the ultimate measurement accuracy of system directly. Aiming at the problem of broken line defect which exists in stripe center acquired from current light stripe center extraction algorithms, an proposed approach based on curve fitting of the linear structured light stripe center sub-pixel extraction is proposed. The proposed approach uses the erosion thinning method to get the stripe's basic skeleton. The normal direction of each point on the skeleton line is computed by using the average squared gray gradient. The initial light stripe central points are obtained by weighted barycenter method. Sectional cubic polynomial curve fitting method is used to achieve smooth light stripe central positions in sub-pixel. The experimental results show that method can improve the broken line defect and the accuracy of light stripe center extraction.

Key words measurement; linear structured light; light strip skeleton; average squared gray gradient; polynomial curve fitting

OCIS codes 150.6910; 140.5960; 100.2000

1 引言

线结构光扫描技术具有非接触式、测速快、成本低、操作方便灵活等特点,在三维视觉测量与检测中获得了广泛的应用,尤其是在汽车、医学与模具等行业。根据线结构光测量的原理,光条受到被测量物体表面深度的调制后发生变形,变形的程度反应了物体表面的三维形貌。测量物体的表面信息,首先要从图像中提取光条中心线,所以快速准确的中心线提取是关键环节之一。

传统的光条中心线提取方法可分为两类:1)提取光条的几何中心法,如阈值法、边缘法等;2)提取光条的能量中心法,如极值法、拟合法、重心法等。重心法是计算光强的重心,其与上述方法相比精度较高、运算速度快、易于实现。

收稿日期:2015-01-16;收到修改稿日期:2015-03-09;网络出版日期:2015-06-24

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAF12B15)、福建省科技计划重点项目(2008H0085)、福建省自然科学基金(2013J01190)、厦门市科技计划项目(3502Z20143042)

作者简介:江永付(1989—),男,硕士研究生,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: yongfu_jiang@126.com

导师简介:江开勇(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉、快速成形技术、特种加工技术等方面的研究。E-mail: jiangky@hqu.edu.cn(通信联系人)

以上方法是基于图像中某一行或列的灰度分布来计算该行或列上的光条中心,没有考虑光条的方向性,因此在处理曲率变化比较大的光条图像时会产生较大的误差。为了提高光条中心提取的精度,必须先确定结构光光条的法线方向。国内外学者提出了多种方法,Hessian矩阵方法^[1-3]可精确计算光条各点的法线方向,但计算费时;方向模板技术^[4-5]的引入大大提高了计算效率,但仅能计算出近似法线方向,误差较大。均方灰度梯度方法^[6-8]不仅省去了Hessian矩阵方法的庞大计算量,而且弥补了方向模板和一般灰度梯度^[9]近似法线方向的不足,因而适用于求取精确的光条法线方向。由于环境噪声、被测量表面的复杂性和图像分辨率等的影响,光条中心提取结果存在折线缺陷的问题,金俊等^[10]采用贝塞尔曲线拟合改善了刘振等^[11]的2次曲线拟合后出现的光条中心折线特征,但由于贝塞尔曲线基函数的次数与顶点数紧密相关,从而产生为提高光条中心光滑度而增加拟合点数引起的高次多项式拟合的复杂性。

本文基于以上分析,在考虑光条法线方向的基础上,提出了一种基于分段3次多项式曲线拟合的线结构光光条中心线提取方法。该方法采用均方灰度梯度方法求取腐蚀细化后光条骨架上每一点的法向,在法向方向上应用加权灰度重心法获得亚像素级光条中心,引入分段3次多项式曲线拟合改善了光条中心的折线缺陷,避免了贝塞尔曲线方法中高次多项式拟合的庞大计算量。

2 算法原理描述

线结构光光条中心线提取方法的原理如图1所示,通过腐蚀细化光条得到光条骨架,采用均方灰度梯度方法求取骨架上每一点的光条法线方向,并沿光条法线方向上利用加权灰度重心法获取光条的亚像素中心初始点,最后对初始光条中心点进行分段3次多项式曲线拟合求得最终光条的亚像素中心坐标。

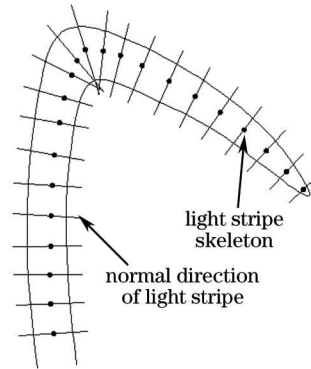


图1 光条中心线提取方法原理图

Fig.1 Approach principle of stripe center extraction method

2.1 光条法线方向的求解

光条法线方向的求解精度直接影响到光条提取的结果,如果不考虑光条的方向性,在光条曲线的曲率变化较大处会产生很大的误差。因此采用大津阈值法得到的阈值对光条图像进行二值化,对光条图像进行腐蚀细化得到单像素宽度的骨架,基于骨架求解光条在该位置处的法线方向。考虑到光条骨架处的梯度变化较小,不利于法向的精确求解,采用均方灰度梯度方法^[7-8,12]计算法向。设骨架上任意一点的灰度值记为 $f(x,y)$,则点 (x,y) 处的方向角 $\theta(x,y)$ 计算如下。

根据复平面上任意向量取平方后,该向量与 x 轴正方向的夹角将增加一倍这一特质,将灰度梯度定义为复平面上的向量 $f=(f_x, f_y)$,取其平方得

$$(f_x + j \cdot f_y)^2 = (f_x^2 - f_y^2) + j \cdot (2f_x f_y), \quad (1)$$

式中实部为平方灰度梯度的实轴分量,虚部为平方灰度梯度的虚轴分量, f_x 与 f_y 分别为采用Sobel梯度算子计算点 (x,y) 在 x 方向与 y 方向的偏导数。

为提高法向求解的精度和稳健性,以点 (x,y) 为中心,取 $w \times w$ 区域内的平方灰度梯度的平均值来计算该点法向,则法向角 $\theta(x,y)$ 计算公式为

$$v_x(x,y) = \sum_{u=x-\frac{w}{2}}^{x+\frac{w}{2}} \sum_{v=y-\frac{w}{2}}^{y+\frac{w}{2}} [f_x^2(u,v) - f_y^2(u,v)], \quad (2)$$

$$v_y(x,y) = \sum_{u=x-\frac{\pi}{2}}^{x+\frac{\pi}{2}} \sum_{v=y-\frac{\pi}{2}}^{y+\frac{\pi}{2}} 2f_x(u,v)f_y(u,v), \quad (3)$$

式中 $v_x(x,y)$ 和 $v_y(x,y)$ 分别为均方灰度梯度向量的实部和虚部。则

$$\theta(x,y) = \begin{cases} \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{v_y(x,y)}{v_x(x,y)}, & v_x(x,y) \geq 0 \\ \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{v_y(x,y)}{v_x(x,y)} + \pi, & v_x(x,y) < 0 \cap v_y(x,y) > 0 \\ \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{v_y(x,y)}{v_x(x,y)} - \pi, & v_x(x,y) < 0 \cap v_y(x,y) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

依照上述步骤即可获得骨架上每一点的法线方向。

2.2 加权灰度重心法提取光条亚像素中心

腐蚀细化后的骨架为光条几何中心,并非光条能量中心,一般情况下,两者之间是不相同的;为了提高中心线提取的精度,以骨架为基础,根据其上每点的法线方向搜索到能量极值点,以能量极值点为初始点,沿着法线方向采用加权灰度重心法获得亚像素能量中心。沿法线方向上取所需的离散点,可以根据实际需要调整所需的离散点间距即步长的大小。取点方法如下:设骨架上任意一点 (x,y) 的单位法线方向为 $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$,如图2所示,骨架中心点记为 (x_0, y_0) ,以点 (x_0, y_0) 为中间点,按步长 l 沿法线方向两侧各取 n 个点,并将各点的灰度值定义为集合 $G_{x_0, y_0}(x, y)$, 其中

$$\begin{cases} x = x_0 + k \cdot l \cdot n_x \\ y = y_0 + k \cdot l \cdot n_y \end{cases} \quad (5)$$

式中 $k \in \{-n, -n+1, \dots, n\}$ 。取点效果如图2所示。

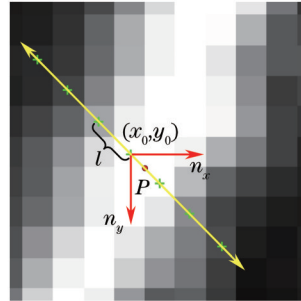


图2 光条法向与取点效果图

Fig.2 Results of stripe's normal direction and the intersection points

按适当步长 l 得到一系列亚像素点,各点的灰度值是在其领域内通过双线性插值获得,以灰度值为依据,在集合 $G_{x_0, y_0}(x, y)$ 中搜索灰度值最大的极值点,记为 P ,以 P 点为中心点,在其两侧按照合适的步长 l ,重新插值得到 n' 个点,得到更新后的集合 $G'_{x_0, y_0}(x, y)$,则此方向上光条中心点的亚像素位置 (x_{center}, y_{center}) 可由加权重心法^[13]来确定:

$$\begin{cases} x_{center} = \frac{\sum_{n'} x \cdot G'^2_{x_0, y_0}(x, y)}{\sum_{n'} G'^2_{x_0, y_0}(x, y)} \\ y_{center} = \frac{\sum_{n'} y \cdot G'^2_{x_0, y_0}(x, y)}{\sum_{n'} G'^2_{x_0, y_0}(x, y)} \end{cases} \quad (6)$$

式中 n' 为集合 $G'_{x_0, y_0}(x, y)$ 中点的个数。步长 l 的大小需要根据实际的测量情况来确定,当步长 l 较小时,为实现点系列的灰度值保留正态分布特性,需要增加点系列个数;当步长 l 较大时,集合坐标在灰度极值点附近点相当稀疏,则未能充分利用灰度极值点两侧的信息。按照上述方法,依次遍历骨架上每一个点找到整幅光条的亚像素坐标。

2.3 拟合中心线

根据上述方法计算的光条中心,实际上存在折线缺陷的问题,以一直线光条提取的结果为例,如图3所示,所提取出的中心虽然已经是亚像素了,但存在严重的折线现象,直接使用这些点进行三维重构将得到粗糙的模型表面。为了改善上述问题,采用分段多项式曲线拟合光条中心,以获得较光滑的光条亚像素中心坐标。多项式定义为

$$f(x) = a_0 + a_1x^1 + a_2x^2 + \dots + a_nx^n. \quad (7)$$

光条中心拟合步骤:

1) 设置拟合区段的点数 m (点数越多,光条中心拟合结果越光滑;但是点数过多,光条细节特征会丢失);

2) 使用最小二乘法将区段内的点拟合成 n 次多项式,并计算多项式最大曲率,如果曲率 $k = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{1.5}}$ 大于阈值 K ,则将该拟合区段内的光条初始点一分为二,分别进行拟合;

3) 计算拟合后的光条中心坐标,为保证相邻区段之间的光滑过渡,仅保存其结果中间 $m/2$ 个点,并将该区段后 $m/2$ 个光条初始值作为下一区段的前 $m/2$ 参与光条拟合。如此循环,直至完成所有初始点的拟合。

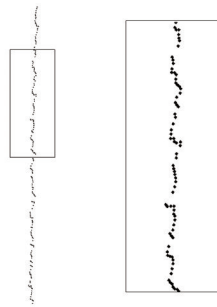


图3 直线光条中心提取结果

Fig.3 Results of straight strip center position extraction

3 实验结果

应用 VS2008 作为开发平台,结合 OpenCV 函数库进行激光中心线提取。实验采用的摄像机为 WATEC902B,其分辨率为 768 pixel×576 pixel,镜头为 8 mm Computar 镜头,线激光源采用富喆 650 nm 波长红光。

线结构光投射于鞋植上,其原始光条如图4(a)所示,经过腐蚀细化得到光条骨架如图4(b)所示。采用均方灰度梯度计算骨架上每一点的法线方向,图4(c)中白色小线段显示出了每一点对应的光条法向,与曲线的法线方向非常接近,因此可将均方灰度梯度近似为光条曲线的法线方向。由于光条的宽度大约为 12 pixel,这里选取计算法线方向子块大小 $w=13$ pixel。

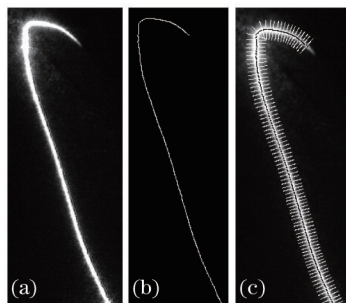


图4 光条骨架和法向的求解。(a) 原始光条; (b) 光条骨架; (c) 光条法向

Fig.4 Computation of strip skeleton and stripe normal direction. (a) Original light stripe; (b) light strip skeleton; (c) light stripe normal direction

选取合适的步长 l 是获得精确的光条初始点的关键,如图5所示,随着步长的减小,获得的光条中心坐标的平均偏差和标准偏差均减小,但光条中心的计算时间呈指数上升。综合考虑,选取步长 $l=0.4$ pixel,以骨架上任意一点 (x,y) 为原点按步长 0.4 pixel 沿单位法线方向 $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ 两侧各取 25 个点,根据加权重心法计算光条的亚像素坐标,结果如图8(a)所示,该光条中心线存在严重的折线缺陷。

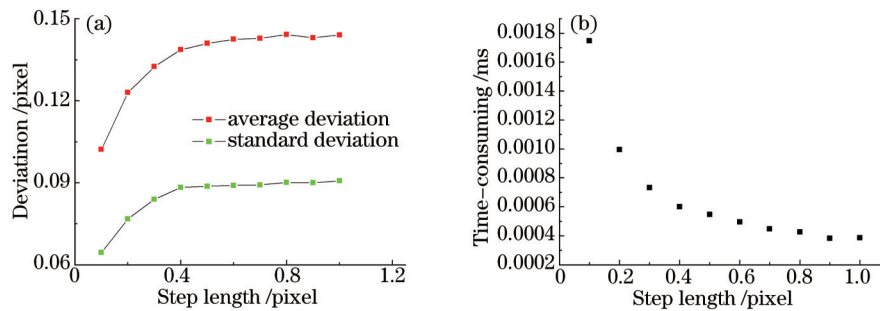


图5 拟合区段点数的选取。(a) 步长与曲线拟合偏差的关系; (b) 步长与耗时的关系

Fig.5 Selection of fitting section point number. (a) Relationship between step length and curve fitting deviation; (b) relationship between step length and time-consuming

按照上述方法获得初始光条中心点后,便可采用分段多项式曲线拟合以改善初始光条中心点的折线缺陷,其中拟合区段的多项式次数 n 和点数 m 的设置是获取光顺的光条亚像素坐标的关键。

多项式次数 n 的选择:由图6可知,在光条曲线的曲率变化较小处每4个相邻点成直线排列,2次和3次多项式对于光条中心折线缺陷的拟合效果相对于4次和5次多项式更为光顺;此外在曲率变化较大处2次多项式拟合出的光条中心会出现文献[11]的光条中心坐标直线缺陷,光条细节特征无法得到保留,因此这里选取3次多项式作为最小二乘逼近的目标函数。

拟合区段点数 m 的选择:如图7所示,在曲率较小处随着拟合区段点数的增加,拟合得到的曲线的相关系数越大,但在曲率较大处则反之。综合考虑以上两种情况,取 $m=20$ 。阈值 K 的选取需要根据最小曲率来确定,针对鞋楦测量估算出其特征部位的最小曲率为 $1/20$,因而选取阈值 $K=1/20$,即当多项式最大曲率大于 $1/20$ 时,将该拟合区段一分为二分别进行拟合。

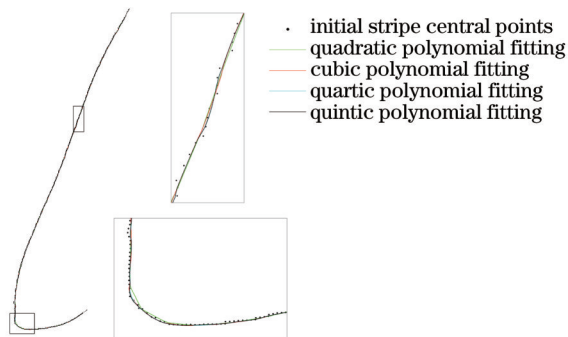


图6 4种不同次数多项式拟合结果

Fig.6 Fitting results of four different multinomials

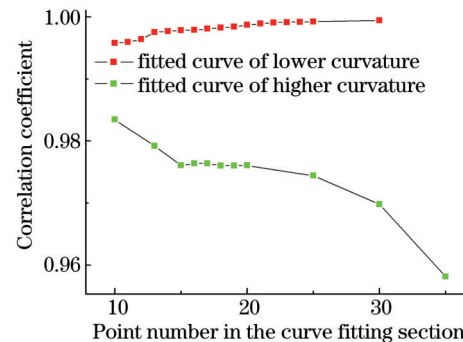


图7 拟合区段点数对拟合曲线的影响

Fig.7 Effect of point number in the fitting section to the fitted curve

图8(b)和(c)分别为在图8(a)的基础上,进行三次B样条曲线拟合和利用本文方法拟合后的结果,可以看出,采用本文方法能更好地改善光条中心提取存在的折线缺陷的问题,其三维重建结果如图9(b)所示,比图9(a)的原始结果更为光顺。

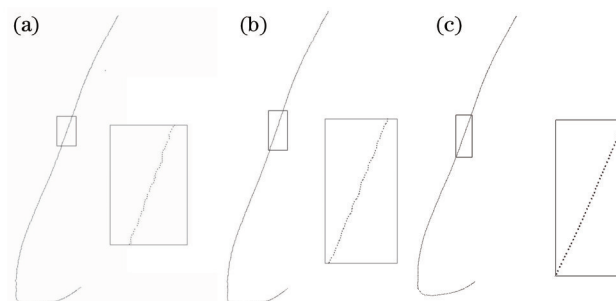


图8 光条中心提取结果比较。(a) 初始光条中心; (b) 三次B样条曲线拟合的结果; (c) 本文方法拟合的结果

Fig.8 Comparison of light stripe center extraction results. (a) Initial light stripe central points; (b) results with cubic B-spline curve fitting; (c) results with the proposed fitting approach

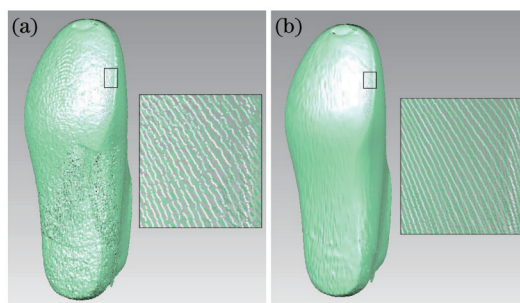


图9 两种算法三维重建结果比较。(a) 初始光条中心线; (b) 本文方法

Fig.9 Results comparison of two 3D reconstruction algorithms. (a) Initial light stripe central points; (b) the proposed method

4 结 论

针对线结构光三维扫描中,光条中心亚像素提取后,存在严重折线缺陷影响重构质量问题,提出了一种基于分段3次多项式曲线拟合的提取方法。该方法在考虑光条法线方向对提取精度影响的基础上,精确提取了光条亚像素能量中心,然后采用分段拟合的方法,获得了较为光滑的中心线,改善了折线引起的三维表面不光滑的缺陷,将该算法运用于实验室研制的激光三维旋转扫描仪中,取得了良好的效果。

参 考 文 献

- 1 Xu Yan, Hu Guangshu, Shang Lihua, *et al.*. Adaptive tracking extraction of vessel centerlines in coronary arteriograms using Hessian matrix[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2007, 47(6): 889-892.
许 燕, 胡广书, 商丽华, 等. 基于Hessian矩阵的冠状动脉中心线的跟踪算法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(6): 889-892.
- 2 C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1998, 20(2): 113-125.
- 3 Li Yingying, Zhang Zhiyi, Yuan Lin. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(10): 100002.
李莹莹, 张志毅, 袁 林. 线结构光光条中心提取综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(10): 100002.
- 4 Zhao Guangjie, Fu Li. Extraction algorithm of the structured light stripes[J]. *Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering*, 2010, (4): 67-70.
赵广杰, 傅 莉. 结构光光条中心的提取算法[J]. *沈阳航空工业学院学报*, 2010, (4): 67-70.
- 5 Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen, *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(4): 151-155.
吴庆阳, 苏显渝, 李景镇, 等. 一种新的线结构光光带中心提取算法[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, 39(4): 151-155.
- 6 Zheng Lubin, Wang Xiaodong, Yan Fei. 3D reconstruction method based on linear-structured light stripe for welding seam[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041005.
郑鹭斌, 王晓栋, 严 菲. 一种基于线结构光的焊缝三维重建方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041005.
- 7 M Popovic B, V Bandur M, M Raicevic A, *et al.*. Different methods for fingerprint image orientation estimation[J]. *Proc of 20th Telfor*, 2012: 20-22.
- 8 A M Bazen, S H Gerez. Systematic methods for the computation of the directional fields and singular points of fingerprints[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 905-919.
- 9 Jia Qianqian, Wang Boxiong, Luo Xiuzhi. Extraction of central positions of light stripe in sub-pixel in 3D surface measurement based on light sectioning method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 390-396.
贾倩倩, 王伯雄, 罗秀芝. 光切法形貌测量中光条中心的亚像素提取[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 390-396.
- 10 Jin Jun, Li Dehua, Li Heping. New method for obtaining the center of structured light stripe[J]. *Computer Engineering and Application*, 2006, 42(4): 42-44.
金 俊, 李德华, 李和平. 结构光三维获取系统条纹中心线检测[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(4): 42-44.
- 11 Liu Zhen, Li Sheng, Feng Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0508004.

- 刘 振, 李 声, 冯 常. 基于互相关算法的激光条纹中心提取[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508004,
- 12 Xiong Huiyuan, Zong Zhijian, Chen Chenghe. Accurately extracting full resolution centers of structured light stripe[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(5): 1057-1062.
- 熊会元, 宗志坚, 陈承鹤. 线结构光条纹中心的全分辨率精确提取[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(5): 1057-1062.
- 13 Wang Wencheng, Xu Jianqiang, Si Shuchun. A improved barycenter method used in light-trap center acquiring[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2005, 16(10): 1239-1242.
- 王文成, 徐建强, 司书春. 一种改进的重心法在光带中心提取中的应用[J]. 光电子·激光, 2005, 16(10): 1239-1242.

栏目编辑: 苏 岑