

基于多尺度分析的激光光条中心点坐标提取方法

李凤娇 李小菁 刘 震

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要 在线结构光测量系统中, 激光光条图像中心准确提取是影响整个测量系统精度的关键因素之一。针对高反光等复杂环境下光学测量中激光光条图像中心提取问题, 提出了一种基于多尺度分析的激光光条图像中心高精度定位方法。该方法利用骨骼化图像处理确定激光光条图像中心的初值, 根据每一个光条中心初值处的光条宽度确定该位置处对应的高斯核均方差 σ 的初值。对图像进行多尺度卷积, 确定最优的 σ 值, 并求得光条亚像素级中心点, 最后完成光条链接。结果表明该算法抗噪声能力强, 可实现光条宽度变化较大的激光光条图像中心的高精度提取。

关键词 图像处理; 光条中心; Steger; Hessian 矩阵; 亚像素; 多尺度

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1110002

A Multi-Scale Analysis Based Method for Extracting Coordinates of Laser Light Stripe Centers

Li Fengjiao Li Xiaojing Liu Zhen

(Ministry of Education Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract In a line structured light measurement system, the accurate extraction of the light stripe centers is one of the key factors affecting the accuracy of the entire system. For the problem of light stripe center extraction in optical measurements in complex environment with high reflection, a multi-scale analysis based method that realizes high-precision extraction of light stripe centers is proposed. The skeleton algorithm is applied to determine the initial centers of the laser stripe, and the mean square deviation σ of the Gaussian kernel is determined based on the width of the light stripe at each initial center. Multi-scale image convolution is carried out to determine the optimal σ , in order to further improve the accuracy of extracting light stripe center. Interlinkage of the light stripe centers is finished. The results show that the method is of high noise immunity, and can achieve high-precision results when the width of the light stripe changes sharply.

Key words image processing; light stripe center; Steger; Hessian matrix; sub-pixel; multi-scale

OCIS codes 100.1160; 150.1135; 330.1880

1 引 言

结构光视觉三维测量系统^[1-4]由于其测量速度快、柔性好、非接触式等优点, 在工业、医疗和计算机视觉领域得到了广泛的应用^[5-7]。在获取结构光视觉测量系统信息的过程中, 首要的便是从包含光条的图像中提取光条中心的图像坐标。因此, 在线结

构光测量系统中, 如何实现光条中心的快速、高精度提取是影响整个测量系统速度和精度的关键因素。

被测物体表面性质、系统噪声和光照条件等影响因素使得精确提取光条中心存在一定的难度。尤其是在高反光的环境下, 光条图像会出现亮度不均匀、光条宽度变化剧烈的情况。普通的光条中心提

收稿日期: 2014-04-08; **收到修改稿日期**: 2014-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51175027)、北京市自然科学基金(3132029)

作者简介: 李凤娇(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事视觉测量算法方面的研究。E-mail: lifj1217@163.com

导师简介: 刘 震(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电检测及计算机视觉方面的研究。

E-mail: liuzhen008@buaa.edu.cn

取方法如边缘法、阈值法、极值法和重心法等,虽然实现简单,但精度不高。Steger^[8-9]利用 Hessian 矩阵得到图像中光条纹的法线方向,通过求法线方向上的极值点得到光条纹中心线的亚像素位置。该方法精度高,稳健性好,但也无法适应光条粗细变化剧烈的情况。在 Steger 方法的基础上,Li^[10]和Frédéric^[11]等对光条中心提取进行了统计行为分析,并进一步提出优化方法。

针对复杂环境下拍摄的光条图像,提出了一种多尺度激光光条中心提取方法。该方法通过多尺度图像分析实现光条宽度变化剧烈图像中心的高精度定位,稳健性强,尤其适用于高反光测量环境中。首先详细介绍了该方法的基本原理和实现步骤;然后通过仿真实验和实物实验验证了该方法的必要性和有效性。

2 算法原理

在 Steger 方法中,图像通过高斯卷积计算图像中每个像素的 Hessian 矩阵。 σ 是高斯函数的均方差,控制着平滑效果。 σ 越大,平滑程度越好,但 σ 过大会造成图像特征过分模糊。而 σ 的选取与光条的宽度有关,且影响着光条中心的提取精度^[8]。因

此,当一幅图像中光条宽度变化较大,采用单一的均方差 σ 会造成提取误差。鉴于此,提出了一种基于多尺度分析的激光光条图像中心高精度提取方法,根据光条不同位置处的宽度确定该处卷积核函数对应的均方差 σ 。该方法具体步骤及其对应的流程图如下:

- 1) 通过形态学图像处理方法提取光条图像中心初始值,并确定光条法线方向和光条宽度初值;
- 2) 对光条图像进行多尺度卷积,确定每个光条中心点对应的最佳 σ 值,进而确定光条中心点亚像素坐标,最后完成光条中心点链接。

2.1 提取初始光条中心

采用多阈值法^[12]针对光条图像进行二值化处理,再基于条件膨胀算法提取连通分量,根据面积和形状因子约束消除小的干扰区域和大面积背景干扰区域。针对每一个满足约束的连通分量,抽取其骨骼作为光条中心初始点: $(u_i, v_i), i = 1, 2, \dots, n$ 。

对于光条中心初始点点列中任意一点 (u_i, v_i) ,在点列中选取邻近的 $2k$ 个点(k 为正整数,一般为 $k = 2$)拟合直线,得到直线的归一化法线方向,作为光条法线方向初始值,如图 1(a)所示。

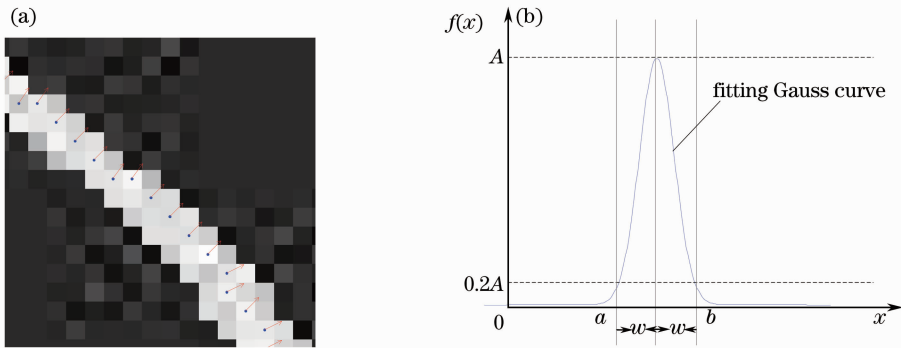


图 1 (a) 光条初始中心点及法线方向的计算结果; (b) 灰度高斯函数拟合

Fig. 1 (a) Initial central points and their corresponding normal directions; (b) Gaussian fitting of the gray scale

沿光条中心初始点的法线方向对光条灰度图像横截面进行高斯拟合。如图 1(b)所示,光条灰度图像横截面的最大值为 $A, 0.2A$ 对应的 $2w$ 为光条初始宽度。

2.2 多尺度光条中心提取

2.2.1 规范化算子

设 $I(u, v)$ 是图像灰度分布函数。计算图像中任意像素 $p = (u, v)^T$ 的 Hessian 矩阵,如(1)式。

$$\mathbf{H}(u, v) = \begin{bmatrix} r_{uu} & r_{uv} \\ r_{uv} & r_{vv} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 r_{uu}, r_{uv} 和 r_{vv} 为图像二阶偏导数,由 $I(u, v)$ 与高斯卷积核 g 的二阶导数卷积核 g_{uu}, g_{uv}, g_{vv} 卷积得到。

针对高斯卷积核进行 γ -坐标规范化^[13],如(2)式:

$$\begin{cases} \bar{g}_{uu} = \sigma^2 g_{uu} \\ \bar{g}_{uv} = \sigma^2 g_{uv} \\ \bar{g}_{vv} = \sigma^2 g_{vv} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\bar{g}_{uu}, \bar{g}_{uv}, \bar{g}_{vv}$ 为经过 γ 规范化的高斯卷积核的二阶导数卷积核。

由此得到 γ 规范化后的算子 C , 如(3)式:

$$C(u, v) = \sigma^2 |\lambda|_{\max}, \quad (3)$$

式中 $|\lambda|_{\max}$ 为 Hessian 矩阵的模最大特征值。设定光条中心点的判别条件为(4)式, 其中 $C_{\text{threshold}}$ 为阈值:

$$C(u, v) > C_{\text{threshold}}. \quad (4)$$

2.2.2 多尺度光条中心坐标提取

1) 多尺度卷积

根据 2.1 节中光条初始宽度 $2\omega_i$, 设定高斯核参数 $\sigma_i = \omega_i / \sqrt{3}^{[6]}$ 。由于 ω_i 存在偏差, 故在 σ_i 附近选取 σ_{i-1} 和 σ_{i+1} 。对于以骨骼像素点 (u_i, v_i) 为中心的邻域范围 (RON) 中的每个像素, 分别采用 σ_{i-1} 、 σ_i 和 σ_{i+1} 计算 γ 规范化算子 C , 得到 C_{i-1} 、 C_i 和 C_{i+1} 。

具体步骤如图 2 所示: ① 定位以 (u_i, v_i) 为中心的 RON, RON 中像素表示为 $p_j, j = 1, 2, \dots, N$; ② 根据高斯核的大小, 以 p_j 为中心, 定位图像中相同大小的范围 (ROC); ③ 高斯核的一、二阶偏导数与 ROC 进行单像素卷积得到 p_j 对应的 Hessian 矩阵。其中单像素卷积指平移卷积模板的中心到像素点 p_j 处, 计算模板与 p_j 的邻域加权和; ④ 由 Hessian 矩阵根据(3)式计算得到 p_j 对应 C_{i-1} 、 C_i 和 C_{i+1} 。

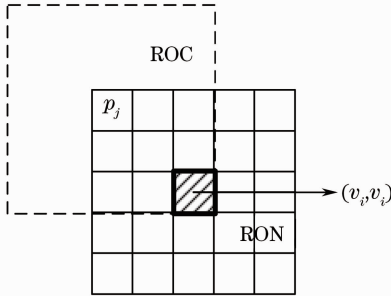


图 2 多尺度卷积步骤: 以 (u_i, v_i) 为中心定义 RON, 以 RON 中像素 p_j 为中心定义 ROC

Fig. 2 Steps of multi-scale convolution: (u_i, v_i) is centered by RON, and p_j in RON is centered by ROC

2) 判断最佳尺度因子

RON 中的每个像素 p_j 所对应的 C_{i-1} 、 C_i 和 C_{i+1} 构成一个 C 值集合:

$$C_{\text{set}} = \{ \{C_{i-1}, C_i, C_{i+1}\}_{p_1}, \{C_{i-1}, C_i, C_{i+1}\}_{p_2}, \dots, \{C_{i-1}, C_i, C_{i+1}\}_{p_N} \}, \quad (5)$$

C_{set} 中最大 C 值对应的 σ 为最佳 σ , 记为 σ_0 ; 最大 C 值对应的像素点作为像素级光条中心的候选点, 记为 (u_0, v_0) 。像素 (u_0, v_0) 相对于 σ_0 的 Hessian 矩阵记为 H_0 , H_0 的模最大特征值对应的特征向量即为光条法线方向, 用 (n_u, n_v) 表示。

3) 提取光条亚像素级中心点

以点 (u_0, v_0) 为基点, 对其邻域范围的灰度分布函数进行二阶泰勒展开, 根据其在方向 (n_u, n_v) 上的一阶方向导数为零, 得到光条图像特征的亚像素坐标为 $(p_u, p_v) = (u_0 + tn_u, v_0 + tn_v)$, 其中 $t = -\frac{n_u r_u + n_v r_v}{n_u^2 r_{uu} + 2n_u n_v r_{uv} + n_v^2 r_{vv}}$ 。判断 $(tn_u, tn_v) \in [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}] \times [-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}]$, 即一阶导数为零的点位于当前像素内, 则该点 (p_u, p_v) 为光条亚像素级中心点。

最后根据文献[8]中介绍的链接方法完成光条中心链接。

3 仿真实验

仿真实验中, 使用 Matlab 仿真 $121 \text{ pixel} \times 121 \text{ pixel}$ 的激光光条图像。图像中加入均值为 0, 方差为 1 的高斯图像噪声。

3.1 不同光条宽度对应的 C 值分布分析

图 3 是仿真分析 σ 对光条中心提取精度影响的结果。仿真图像中光条宽度依次对应于 $\omega = 2, 3, \dots, 20 \text{ pixel}$ 。图 1(a) 显示了在 σ 由 $1/\sqrt{3}$ 变化到 $70/\sqrt{3}$ (间距为 $1/\sqrt{3}$) 时, 光条中心处的一点对应的 C 值的变化曲线。图中曲线对应的光条宽度从左到右依次为 $2, 3, \dots, 20 \text{ pixel}$ 。

由图 3(a), 光条宽度一定时, 随着 σ 值增大, C 值呈现出先增大后减小的形式, 波峰 C_{max} 对应于 σ 的最优值。由图可知不同宽度的光条对应的最优 σ 不同。这证明了多尺度方法——通过确定光条宽度来确定最优 σ 的有效性和必要性。

不同宽度的光条对应 C_{max} 的变化曲线如图 3 (b) 所示。随着 ω 值增大, C_{max} 递减。假设图像中光条宽度变化较为剧烈或存在粗细不同的光条, 采用单一的 σ 对图像进行卷积, 难以保证所有的光条中心点满足约束(4), 会使所提取的光条中心出现断裂。此现象在第 4 节实验中有展示。

3.2 均方差 σ 对激光光条图像中心提取精度的影响

仿真实验中光条宽度对应的 ω 依次为 $3, 10, 20 \text{ pixel}$, σ 由 $1/\sqrt{3}$ 变化到 $70/\sqrt{3}$, 间距为 $1/\sqrt{3}$, 重复 10 次实验, 比较光条图像中心的计算值和理论值, 计算光点图像中心定位均方根 (RMS) 误差, 结果如图 4 所示。不同宽度的光条中心提取误差在不同的 σ 值处达到最小, 这证明了所提算法的有效性。

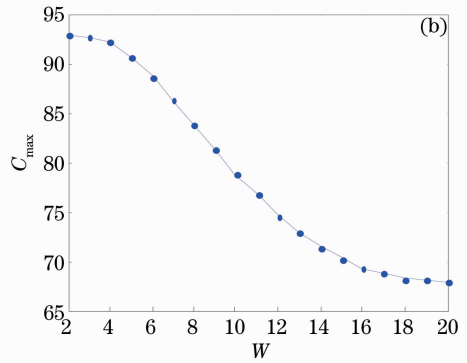
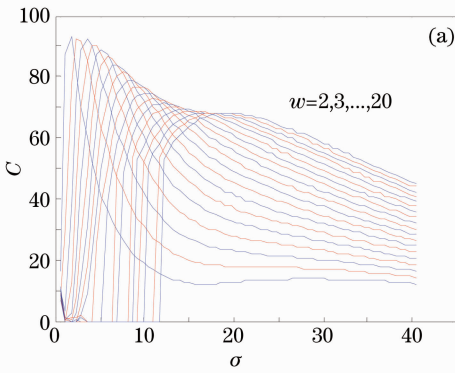


图 3 (a)不同宽度光条对应的 C 值随尺度因子变化的曲线; (b)不同宽度光条对应的 C 最大值的变化曲线
Fig. 3 (a) C value versus σ of light stripes with different widths; (b) C_{\max} value versus light widths

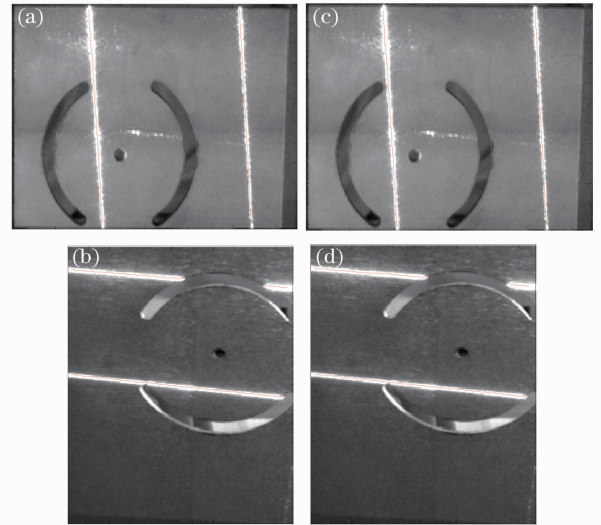
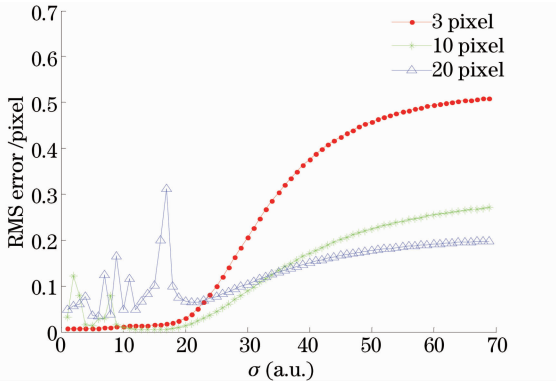


图 5 第一组实验结果。(a)、(b)传统 Steger 算法结果; (c)、(d)本文算法结果
Fig. 5 First experimental results. (a), (b) Results by custom Steger algorithm; (c), (d) results by the proposed algorithm

第二组图像中反光现象严重,光条宽度变化较大,且光条边缘模糊,如图 6 所示。分别使用传统 Steger 方法(选用 $\sigma=5/\sqrt{3}$ 和 $\sigma=20/\sqrt{3}$)和所提算法进行光条中心提取,实验结果如图(6)所示。

如图 6(a)、(d)所示,采用传统 Steger 方法时,对于两幅图像, $\sigma=5/\sqrt{3}$ 时在光条宽度较大位置提取的中心点发生断裂。究其原因,如仿真实验中图 3 (b)所示,光条宽度值越大, C_{\max} 越小,使得光条不满足(4)式,导致光条中心提取不出来。而当 $\sigma=20/\sqrt{3}$ 时,在光条宽度较小的位置出现较大的偏差,如图 6(b)中右上角的光条中心基本没有提取出来,而图 6(e)中左侧光条的中心偏差较大。由于所提算法是根据光条在不同位置的宽度来选取相应的卷积高斯核参数 σ ,故其在处理两幅图像时均稳定地取

4 实物实验

实验使用的摄像机为配有 17 mm Schneider 光学镜头的 Allied Vision Technologies 相机,激光器为功率 36 W 的线结构光发射器。拍摄对象为 11 cm×14.7 cm 的铝合金板。采用 Matlab 软件编程实现,在 Pentium 3.2 G CPU,2 G 内存的计算机上进行实验。

实验分为两组,针对不同光照条件下的激光光条图像,分别采用所提算法和传统 Steger 方法提取光条中心,对两种方法进行比较。

A 第一组实验

第一组图像如图 5 所示。图中光条宽度基本一致,无反光现象,光条边缘清晰。分别采用传统 Steger 算法($\sigma=4/\sqrt{3}$)和所提算法提取光条中心。

实验中所提算法与传统算法的提取结果基本一致。这说明在无反光现象、光条宽度基本保持一致的情况下,所提算法可以达到与传统 Steger 方法一样的效果。

B 第二组实验

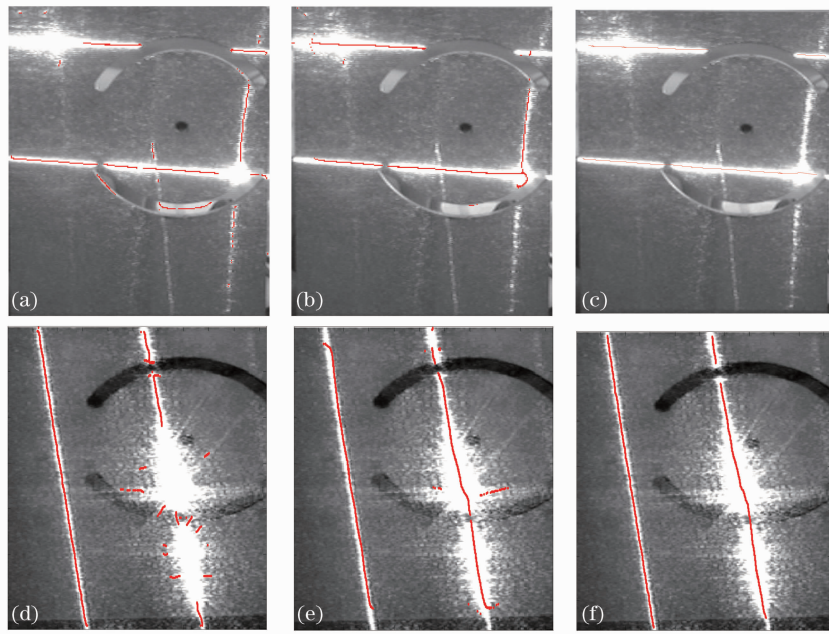


图6 (a)、(b)、(c)第一幅图像处理结果；(d)、(e)、(f)第二幅图像处理结果

Fig. 6 (a), (b), (c) Results of the first image; (c), (d), (e) results of the second image

得了较好的结果。

表1所示为上述实物实验中处理相应图片所用的时间。相对于传统 Steger 方法对整幅图像进行卷积操作,所提算法虽然添加了形态学图像处理、多

尺度卷积和判断最佳 σ 值等步骤,但其所用的单像素卷积大大减少了卷积运算所需时间。表1显示两种算法所用时间基本相同。

表1 两种算法所用时间

Table 1 Time consumed by the two algorithms

Image	Time consumed by the two algorithms /s	
	Steger algorithm	Algorithm in the paper
A(a)	1.6704	1.2226
A(b)	1.7132	1.2072
B(a)	1.7747	1.7495
B(d)	2.0798	1.7653

5 结 论

提出了一种多尺度结构光光条中心提取方法,该方法通过多尺度图像分析实现一幅图像中不同宽度、亮度光条图像中心的高精度定位,稳健性强,尤其适合在高反光物体测量中激光光条图像中心的快速提取。该方法利用图像处理确定光条区域,通过骨骼细化方法求取光条中心和法线方向的初始值。根据光条宽度确定该光条位置处高斯核均方差 σ 的初始值,再对图像进行多尺度卷积,确定最优的 σ 值和光条像素级中心点,并根据二阶泰勒展开确定光条亚像素级中心点,最后完成光条链接。经仿真和实物实验验证,该算法具有稳健性强、高精度的特点。

参 考 文 献

- 1 Wu Di, Lü Naiguang, Ouyang Jing. A structured light three-dimensional measurement method based on unconstrained system configuration [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 482-486. 吴迪, 吕乃光, 欧阳京. 基于无约束系统的结构光三维测量方法 [J]. 光学学报, 2008, 28(3): 482-486.
- 2 Li Zhongwei, Wang Congjun, Shi Yusheng, *et al.*. High precision phase error compensation algorithm for structural light measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1527-1532. 李中伟, 王从军, 史玉升, 等. 结构光测量中的高精度相位误差补偿算法 [J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1527-1532.
- 3 Wu Zhiwei. Optical system generating wide measurement area and low divergence degree grating structure light [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0908002. 吴志伟. 产生宽测量区域低发散度栅型结构光的光学系统 [J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0908002.
- 4 Zhou Liping, Gan Jianghong, Xu Long. Corneal contour measurement based on non-diffracting grating structure light projection [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308001.

- 周莉萍, 干江红, 徐 龙. 基于无衍射栅型结构光投影的角膜轮廓测量 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308001.
- 5 Zhang Guangjun, Tian Xu. Structured light 3-d vision and its industry application [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(6): 650-654.
张广军, 田 叙. 结构光三维视觉及其在工业中的应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(6): 650-654.
- 6 Hou Wenguang, Zhang Jinping, Chen Dawei. A structure light industrial surveying system based on electronic theodolite and digital camera [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2006, (11): 68-70.
侯文广, 张金平, 陈大为. 一种基于电子激光经纬仪和数码相机的结构光工业测量系统 [J]. 测绘通报, 2006, (11): 68-70.
- 7 Wang Kuanquan, Zuo Wangmeng, Ji Xiaopeng. A Medical Endoscope Containing a Structured Light Three-Dimensional Imaging System; China, CN102283626B [P]. 2013-02-27.
王宽全, 左旺孟, 纪筱鹏. 包含结构光三维成像系统的医用内窥镜; 中国, CN102283626B [P], 2013-02-27.
- 8 C Steger. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- 9 C Steger. Analytical and empirical performance evaluation of subpixel line and edge detection [J]. Empirical Evaluation Methods in Computer Vision, 1998. 188-210.
- 10 L Qi, Y X Zhang, X P Zhang, *et al.*. Statistical behavior analysis and precision optimization for the laser stripe center detector based on Steger's algorithm [J]. Opt Express, 2013, 21(11): 13442-13449.
- 11 F Bouchara, S Ramdani. Statistical behavior of edge detectors [J]. Signal, Image and Video Processing, 2007, 1(3): 273-285.
- 12 Hu Ying, Cui Weifeng. Research of Otsu multi-threshold segmentation algorithm [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry, 2010, 25(2): 79-81.
胡 颖, 崔伟峰. Otsu 多阈值分割算法的研究 [J]. 郑州轻工业学院学报, 2010, 25(2): 79-81.
- 13 Wang Yongming, Wang Guijin. Image Local Invariant Features and Descriptors [M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2010. 18-23.
王永明, 王贵锦. 图像局部不变性特征与描述[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 18-23.

栏目编辑: 张浩佳