

基于互相关算法的激光条纹中心提取

刘振 李声 冯常

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 线结构光三维测量中,光条中心点提取的准确度和精度直接影响最终测量结果的精确度。针对现有激光条纹中心提取方法抗干扰能力强、稳健性好与计算量大之间的矛盾,提出了一种互相关中心条纹提取方法。利用梯度阈值自动分割出有效光条区域,将赋予不同权值的互相关系数与相对应的光条纹灰度值进行互相关运算,以互相关极大值对应的条纹作为初始光条纹中心,通过曲线拟合的方法对条纹中心进行精确定位。以互相关值大小作为条纹中心点是否存在的评判依据,利用相邻光条中心点间的灰度、位置相似性约束消除噪声影响。实验结果表明,该算法条纹提取精度较高,满足实时性要求。同当前算法相比,互相关算法简单实用、稳健性好、抗噪声能力强,且对断线条纹具有很强的修补能力。

关键词 机器视觉;条纹中心;互相关算法;精确度;稳健性;梯度阈值

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0508004

Laser Stripe Center Extraction Based on Cross-Correlation Algorithm

Liu Zhen Li Sheng Feng Chang

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract In line structured light vision measurement, the extraction accuracy and precision of the light stripe center point directly affects the final accuracy of the measurement results. The contradiction between high capacity of anti-interference, good robustness and intensive computation exists in optical center extraction algorithm, so a cross-correlation stripe center extraction algorithm is proposed. The gradient threshold is used to separate the effective stripes region, and correlation is applied between cross-correlation coefficient and corresponding gray scale. The stripe with cross-correlation's extreme value is selected as the initial center, and then the curve fitting method is used to refine the accurate stripe center. Here the cross-correlation's value is used to evaluate whether the stripe center exists or not, and the similarity constraints of gray scale and position in the neighborhood stripes are employed to eliminate the noise. The experimental results show that the algorithm has high stripe extraction accuracy and calculation speed. Compared with current algorithms, it is simple and practical, and also has good robustness and the ability of anti-noise repair on disconnected stripes.

Key words machine vision; stripe center; cross-correlation algorithm; accuracy; robustness; gradient threshold

OCIS codes 150.0155; 000.3870; 100.3008; 140.3295

1 引言

线激光扫描是目前三维测量中的重要手段之一^[1],具有非接触、测量速度快、精度适中等优点,在工业测量等领域得到广泛应用。线结构光三维视觉测量技术中,光条纹图像包含被测量物体表面的三维形貌信息,是被测点三维坐标求取的依据。传统线结构光测量系统一般由摄像机、线形激光器、计算机以及扫描设备组成^[2]。测量系统对提取出的激光

条纹运用三角法获取深度信息。在获取深度信息前需要进行标定,包括线结构摄像机内部参数的标定和光平面方程的标定两个方面^[3]。中心理想光条位置应是位于光条“中心”的一条单像素宽的细线^[4],但实际光平面具有一定的厚度,使得光平面与物体表面的交线即光条纹也具有一定的宽度^[5],因此实现对激光条纹中心的快速、精确提取对结构光三维扫描系统的研究具有重要意义。

收稿日期: 2012-12-10; **收到修改稿日期**: 2013-01-07

基金项目: 中国科学院西部之光“人才培养”基金(A11K007)资助课题。

作者简介: 刘 振(1988—),男,硕士研究生,主要从事计算机视觉测量方面的研究。E-mail: 591583943@qq.com

导师简介: 李 声(1962—),男,研究员,硕士生导师,主要从事特种光电检测技术及集成等方面的研究。

常见的光条中心线提取方法有极值法、阈值法、梯度重心法^[6]、灰度重心法、方向模板法^[7]、曲线拟合法^[8]、样条插值提取法^[9]和 Hessian 算法^[10]。极值法速度快,但很容易受到噪声的影响,为此,文献^[11]提出对两边搜索找到实际正确的边界,可克服这一缺点。阈值法是一种骨架抽取的方法,速度较快但定位精度差。灰度重心法是把一定区域内的光带灰度重心作为光带中心,但仍受环境噪声的影响,它的主要误差来源于对中心点的选择,包括左面或右面少(多)取一些点而造成的误差^[12]。在灰度重心法的基础上,李霖^[13]提出了基于骨架的灰度重心法,该方法能达到亚像素测量精度,但是法线的提取很复杂,特别耗时,难以满足实时性要求。基于激光光条截面灰度近似高斯分布这一特点,贺忠海等^[8]提出了曲线拟合法,但比较耗时。为此,文献^[14]提出了自适应窗曲线拟合方法。实验表明,曲线拟合法较质心法的精度要高^[15],但不适合窄光带中心提取^[16],因此文献^[17]提出了变边限高斯拟合提取激光条纹中心线的方法。文献^[18]指出,面积比较法对条纹中心点提取效果较好。Steger^[10]通过 Hessian 矩阵得到光条横截面上二阶导数过零点,求得光条纹中心线的亚像素位置。这种方法具有精度高、稳健性好等优点,但算法的运算量很大,很难实现结构光光条中心线的实时提取。王伟华等^[19]提出的质心法与 Hessian 法结合的中心条纹实时提取方法较好地解决了以上问题。

结构光横截面光强近似服从高斯分布^[20],在实际情况下,结构光强分布发生畸变,使得高斯曲线拟合法与抛物线拟合法均不适用,但是,畸变光条强度从中心到两边灰度值减小的总体趋势并没有改变。文献^[21]指出,区域内光条的灰度值越高,代表结构光条的能量也越高,图像上该处存在结构光条中心的可信度越大。因此,采用一定区域内的灰度值大小对光条中心进行关联与表征是完全可行的。

本文提出了一种对噪声不敏感的高精度条纹中心提取算法,该算法以联合区域的方法获取光条纹中心。邻域光条纹的相关性在于物体本身的一致连续性,即在场景本身深度与物体表面反射特性未发生突变的场合下,条纹灰度的变化是相对平稳的。因此,相邻条纹中心点间的坐标位置与灰度值均具有一定相似性,利用这种相似性约束可以在很大程度上降低噪声的干扰,从而能够提高中心条纹提取精度。

2 条纹中心提取互相关算法

2.1 梯度阈值法分割光条区域

对结构光光条图像进行去噪处理后,首先要分割出有效光条区域。为了提高对条纹中心的定位与提取精度,提出了梯度阈值法进行光条分割,在此基础上,进一步提取出激光条纹中心。这里的灰度梯度是指在图像行方向上的相邻像素灰度值差分的绝对值。设图像上某一点 (x, y) 的灰度值为 $f(x, y)$, 则该点的梯度为 $G(x, y) = f(x + 1, y) - f(x, y)$ 。梯度阈值法首先搜索每行光条点的极大值,然后以极大值为中心,将灰度值大于阈值 T_1 的光条点保留,然后计算它们的梯度值,由于光条纹中心点附近梯度值非常大,所以,如果梯度值小于阈值 T_2 , 则停止搜索。这时,有效条纹边界可能会受到噪声影响,如果极大值左边区域 $G(x, y) < 0$ 或者右边区域 $G(x, y) > 0$, 则停止搜索。为防止极大值点附近出现噪声点导致搜索失败,光条中心灰度值 $f(x, y)$ 大于阈值 T_3 时,继续搜索。其中 $T_3 > T_1 > T_2$ 。为验证梯度阈值法的效果,采用最常用的大津分割法与之比较。结果如图 1 所示,其中图 1(a)、(b)、(c) 分别为采用大津阈值法取 0.5、1、2 倍阈值时分割得到的光条纹图像,图 1(d) 为所提方法得到的有效条纹区域,可以看出,在图 1(a)、(b) 中,由于设置的分割阈值太小、背景光强度太大,导致有效条纹区域没有被分割出来。而梯度阈值法分割效果良好,分割出的光条图像能够明显表征出光条纹中心附近区域的总体分布情况。

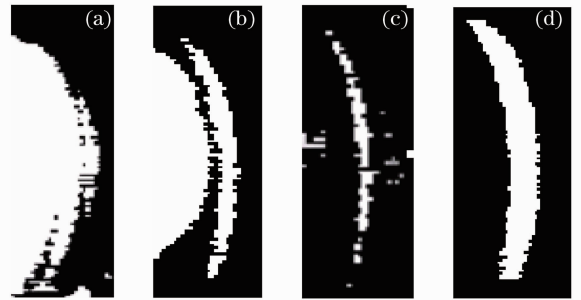


图 1 有效光条纹区域

Fig. 1 Effective stripe center

2.2 条纹中心定位提取

2.2.1 确定互相关系数

采用梯度阈值法得到有效激光条纹区域后,需要对中心条纹进行精确定位。为给出互相关法条纹提取的具体实现方法,引入高斯分布互相关系数。互相关系数的选择受到光条纹横截面灰度变化规律的制约,即互相关系数之间满足单峰性、对称性几何

性质。进一步,经实验表明,凡满足以上条件的曲线模型均可以用来求取互相关系数。选用高斯曲线模型来确定互相关系数

$$h(r, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

式中 r 表示偏移中心的位移量大小。在计算高斯函数的离散近似时,省略了 3σ 距离之外的函数值,即限定相关系数范围在 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 区间上,建议 σ 取值为 $0.05 \sim 1.50$,如图 2 所示,其中 a 为与 σ 值大小相等的常量。

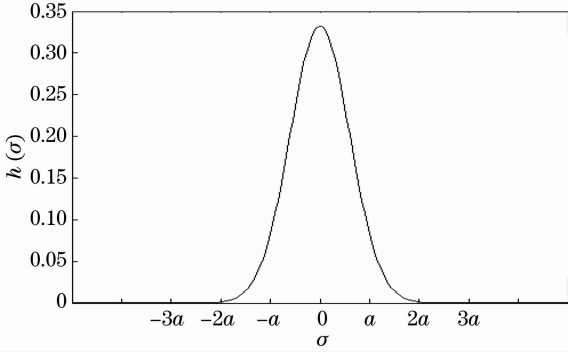


图 2 高斯曲线分布

Fig. 2 Gauss curve distribution

在实际应用中,不同条纹光条图像有效条纹宽度大都大于 10 pixel,为减少无效像素点同时避免漏掉有用光条点,采用宽度可以变化的互相关系数模板来准确求取条纹中心。互相关系数模板如表 1 所示。其中, j 的取值范围为 $6 \sim 15$, a_i 为模板中心,是 $\sigma = 0$ 时 $h(r, \sigma)$ 的取值,两边互相关系数以 a_i 为中心按高斯曲线成对称分布,上下两行系数各对应位置大小相等,为简化模板,使其与中间行相关系数相差一个比例因子 α , α 取为 0.5,目的是要突出当前光条中心点所在区域的权重,同时利用相邻区域的相似性信息提高算法的抗噪声能力。使用时,模板宽度大小随光条横截面大小变化,横截面越宽,模板宽度越大;反之越小。

表 1 互相关系数

Table 1 Cross correlation coefficients

Proposed coefficient template										
b_{i-j}	...	b_{i-3}	b_{i-2}	b_{i-1}	b_i	b_{i+1}	b_{i+2}	b_{i+3}	...	b_{i+j}
a_{i-j}	...	a_{i-3}	a_{i-2}	a_{i-1}	a_i	a_{i+1}	a_{i+2}	a_{i+3}	...	a_{i+j}
c_{i-j}	...	c_{i-3}	c_{i-2}	c_{i-1}	c_i	c_{i+1}	c_{i+2}	c_{i+3}	...	c_{i+j}

事实上,模板系数 $h(i, j, \sigma)$ 中 σ 的取值虽然对相关系数影响很大,但对光条中心的提取影响很小。如图 3 所示,实验时,在激光条图像上随机选取一行,先分别用灰度重心法、抛物线拟合法计算出光

条纹中心点坐标值为 143.1,单位为 pixel,然后用所提算法拟合了 σ 在 $0 \sim 50$ 之间变化时所求取光条中心点坐标随 σ 变化的曲线图,光条中心坐标始终保持在 143 位置附近,表明 σ 的变化对光条纹中心点坐标的影响不大。

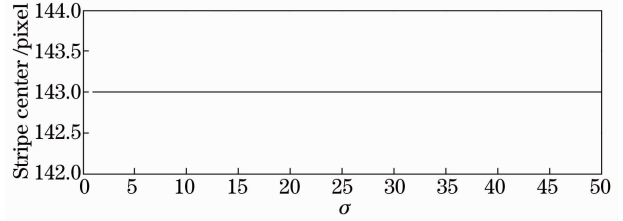


图 3 光条中心坐标与 σ 关系

Fig. 3 Relationship between stripe center position and σ

2.2.2 光条点互相关值

假定结构光条纹图像上各点坐标为 (x, y) ,灰度值大小为 $f(x, y)$,则其对应的互相关值大小为

$$G(x, y) = \iint_{(x, y) \in D} f(x+i, y+j) \cdot h(i, j, \sigma) dx dy, \quad (2)$$

式中 D 为搜索区域。

由于数字图像是离散的灰度数据,其相关函数用估计公式表示为

$$G(x_0, y_0) = \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n f(x_0+i, y_0+j) \cdot h(i, j, \sigma), \quad (3)$$

式中 $G(x_0, y_0)$ 为对应光条像素点的互相关值, $h(i, j, \sigma)$ 为互相关系数, $m = 1$,表征互相关系数模板的行坐标, n 值表征了模板的宽度,取值为有效光条点宽度。若

$$G(x_0, y_0) > G(x, y), \quad x \neq x_0, y \neq y_0, \quad (4)$$

则光条点 (x_0, y_0) 即为初始中心条纹上的点。

计算时,将相关系数模板中心置于光条点 (x_0, y_0) 上,各光条点灰度值与对应相关系数进行互相关运算,顺序移动互相关系数模板,直到计算完每行光条点的互相关值,取互相关极大值对应的像素点为该行初始条纹中心点。

2.2.3 中心点坐标曲线拟合

上述方法求取的条纹中心点仅为初始值,这里采用二次曲线拟合的方法精确求取条纹中心位置。拟合时,从光条起始点开始,每次选取 4 个初始条纹中心点,并求取每个光条纹中心点的拟合误差,从后三个初始中心点中选出绝对误差最小的像素点,并将其作为下一次拟合的起始点,直到拟合完所有激光条纹中心为止,这样求得较高精度的条纹中心。

2.3 算法实现的具体步骤

- 1) 获取光条纹图像,进行图像滤波与直方图均衡化处理。
- 2) 用梯度阈值法分割出有效条纹区域。
- 3) 根据有效光条条纹横截面宽度改变互相关系数模板宽度,以选定模板。
- 4) 将互相关系数模板中心移到光条区域某行像素点上,各像素点与对应的 $h(r, \sigma)$ 进行互相关运算,得到互相关值 $G(x_0, y_0)$, 取局部极大值对应点为初始光条中心点。
- 5) 对初始光条中心点进行曲线拟合,求得最终中心条纹坐标。

3 实验结果与分析

根据以上算法,进行了仿真实验,实验时以中心波长为 650 nm、功率为 5 mW 的线激光器投射被测物体,用 576 pixel×768 pixel 的 CONICE 工业相机获取激光图像。在暗室背景条件下,首先以竖立的鸡蛋作为被测对象来验证方法的有效性,因为鸡蛋表面宏观上是一张凸起的曲面,并随机分布着小颗粒。图 4(a)为利用 CONICE 工业相机获取并进行灰度转换后的鸡蛋效果图,其中白亮条纹为投射在鸡蛋上的线激光光条。图 4(b)~(e)分别为运用极值法、灰度重心法、抛物线拟合法与互相关法获取的光条纹中心。从图 4(b)可以看出,极值法得到的不是单像素宽的中心条纹,激光条纹像素饱和时不适用;图 4(c)中,灰度重心法求取的中心条纹出现断点,在很大程度上需要进行断线修复工作;图 4(d)显示抛物线拟合法在较窄光条情况下效果较差;从图 4(e)中可以看出,所提算法得到的条纹中心点连续性较好,对条纹断线具有一定的修补能力,更客观地反映了光条实际分布情况。

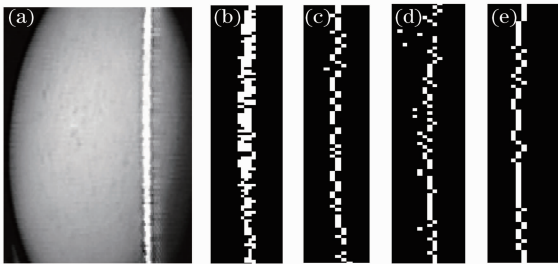


图 4 条纹中心提取结果比较

Fig. 4 Comparison of stripe center extraction results

采用棋盘格来验证互相关条纹中心提取算法的稳健性。实验时,将棋盘格倾斜 30°,如图 5(a)所示,用激光灯照射表面粗糙起伏的棋盘格,这样得到

的条纹图像同时受到目标物体表面不同微观结构、不同反射特性和不同辐射强度的影响,使得各处条纹宽度、灰度均不相同,如图 5(b)所示。运用所提算法获取的激光条纹中心如图 5(c)所示,可以看出,在各个不同黑白方格上的条纹中心线走势相同且比较平滑,对宽度差异较大的条纹提取具有较好效果。采用一段 10 pixel 条纹进行曲线拟合,与 Hessian 法获取像素坐标比较,求得标准误差^[22],结果如表 2 所示,表中第一列、第二列分别为用所提方法与 Hessian 法求取的条纹点坐标,后两列分别为绝对误差与标准误差,以像素为单位。可以看出,运用互相关法求取的标准误差较小,算法稳健性较好,能够满足实际需要。

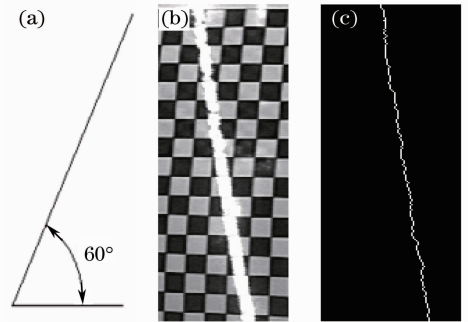


图 5 棋盘格条纹图

Fig. 5 Stripe on checkerboard map

表 2 激光条纹中心点坐标误差(单位:pixel)

Table 2 Center point error of laser stripe (unit: pixel)

Proposed method	Hessian	Error	Standard deviation
67.8	67.912	0.1120	
68.4	68.461	0.0610	
69.0	69.035	0.0350	
69.6	69.701	0.1010	
70.2	70.126	0.0740	
70.8	71.065	0.2650	0.2524
71.4	71.516	0.1160	
72.0	73.561	0.5610	
72.6	73.001	0.4010	
73.2	73.411	0.2110	

图 6 为在噪声干扰情况下的激光条纹图,图 6(a)、(b)椭圆内分别为随机噪声和二次散射形成的噪声^[23],图 6(c)、(d)为光条纹横截面光强实际分布情况,可以看出,噪声的存在给条纹中心的提取带来了困难。图 6(f)~(h)分别为用抛物线法、灰度重心法和所提方法对噪声影响较大的光条[图 6(e)]的条纹提取结果,结果表明,灰度重心法所得到的条纹中心点较为散乱,抛物线法对噪声抵抗能力比灰度重心法高,而所提方法最优,条纹几乎不存在断点,对噪声不敏感。

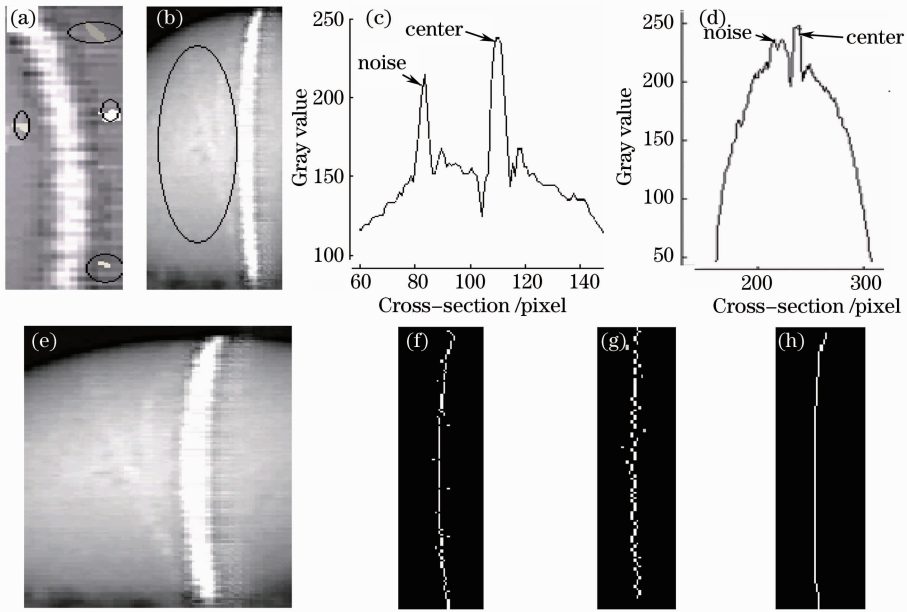


图 6 噪声条纹提取比较

Fig. 6 Stripe extraction comparison under noise interference

在高光强背景下,光条纹如图 7 所示,运用互相关算法对激光条纹图像进行中心条纹提取的结果如图 8 所示,表明本算法对背景光强不敏感,能够在强反射情况下对结构光条纹中心进行准确定位提取,提高了算法的稳健性。

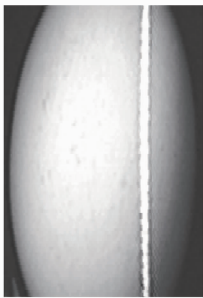


图 7 高光强背景

Fig. 7 High intensity background

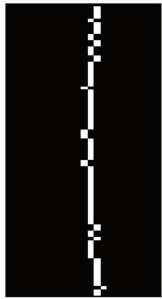


图 8 光条中心提取

Fig. 8 Stripe center extraction

表 3 为上述各种条纹中心提取算法在计算时间上的比较,计算机的配置为 i3 处理器,CPU 主频

3.2 GHz,1.92 GB 内存。由于所提算法复杂度小,从而极大地减小了运算量。从表中可以看出,Hessian 法用时最多,远大于所提方法,极值法耗时最少,而与曲线拟合法相比较,所提算法用时较少,同灰度重心法大体相当,能够满足实时性要求。

表 3 计算时间

Table 3 Run time

Method	Run time /s
Proposed method	0.32
Extremum value	0.16
Bary center	0.34
Parabola fitting	0.94
Hessian method	1.48

在二维移动平台与单线激光器照射条件下,运用 Geomagic-Studio 三维重建软件获取的鸡蛋三维点云和三维复原形状如图 9 所示。



图 9 鸡蛋点云

Fig. 9 Egg clouds

4 结 论

结合光条截面灰度分布特点,利用光条图像邻域之间的相似性约束,给出了可变宽度的互相关系

数模板,结合互相关算法与曲线拟合法实现条纹中心的精确定位提取。算法可扩展性强,同稳健性较好的 Hessian 法相比,其运算量小,能够满足实时性要求,与曲线拟合法、灰度法、极值法等相比,互相关法对噪声等干扰具有更好的稳健性,且对高光强背景不敏感。从实验结果看,算法得到的条纹中心存在“直线”特征,在灰度缓变处精度略低,对这些问题的改进是今后的研究方向。

参 考 文 献

- C. Sun, Q. You, Y. Qiu *et al.*. Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes[J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(11): 2565~2571
- He Bingwei, Zhou Xiaolong. Research of sensor planning method in line laser three-dimensional measurement system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1618~1625
何炳蔚,周小龙. 线激光三维测量仪中视觉传感器规划方法研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1618~1625
- Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibration method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0108002
曾祥军,霍金城,吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0108002
- Huo Long, Zhang Aijun, Liu Weijun. Research on the extraction of lasers knife center based on 3D vision measuring data with line structured light [J]. *Computer Applications and Software*, 2006, **23**(10): 100~102
霍 龙,张爱军,刘伟军. 基于线结构光的视觉 3D 测量中光刀中心提取方法研究[J]. *计算机应用与软件*, 2006, **23**(10): 100~102
- Wu Qingyang, Su Xianyu, Li Jingzhen *et al.*. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. *J. 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
- Wu Jiayong, Wang Pingjiang, Chen Jihong *et al.*. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter[J]. *J. Image & Graphics*, 2009, **14**(7): 1354~1360
吴家勇,王平江,陈吉红等. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, **14**(7): 1354~1360
- Wu Jianbo, Cui Zhen, Zhao Hong *et al.*. An adaptive threshold method for light-knife center acquisition [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, **22**(1): 62~64
吴剑波,崔 振,赵 宏等. 光刀中心自适应阈值提取法[J]. *半导体光电*, 2001, **22**(1): 62~64
- He Zhonghai, Wang Baoguang, Liao Yibai *et al.*. Subpixel algorithm using a curve fitting method[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(2): 195~197
贺忠海,王宝光,廖怡白等. 利用曲线拟合方法的亚像素提取算法[J]. *仪器仪表学报*, 2003, **24**(2): 195~197
- Sui Liansheng, Li Bing, Jiang Zhuangde. Research on method of laser-knife center position extracting based on NURBS interpolation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 933~937
隋连升,李 兵,蒋庄德. 基于 NURBS 曲线插值的激光光刀图像中心提取方法的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 933~937
- C. Steger. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(2): 113~125
- Li Ming. Research on 3D Laser Measurement Techniques and Application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. 25~28
- 黎 明. 三维激光测量技术及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 25~28
- Zhang Jiashen, Zhao Jiguang, Li Shixue. The way of how to compute the geometry centre of single light line in 3D measuring [J]. *J. Institute of Command and Technology*, 2001, **12**(3): 101~103
张加深,赵继广,李仕学. 三维视觉检测中单光条几何中心位置的确定方法[J]. *指挥技术学院学报*, 2001, **12**(3): 101~103
- Li Lin. Contour Extracting from Digital Bandshaped Light Image [D]. Chengdu: Sichuan University, 2001. 31~33
李 霖. 数字光带图像轮廓提取[D]. 成都: 四川大学, 2001. 31~33
- Liu Tao, Wang Zongyi, Yu Xiuhui. Curve fitting method based on adaptive window for center extracting of structured light stripe [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, **31**(1): 152~154
刘 涛,王宗义,于秀辉. 基于自适应窗曲线拟合的结构光条纹中心提取[J]. *半导体光电*, 2010, **31**(1): 152~154
- Xu Ning. Research on Image Processing of Line Structured Light Stripe[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. 46~51
许 宁. 线结构光光条图像处理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007. 46~51
- Wu Qingyang. A Study of Key Techniques of 3D Sensor Based on Line-Structured Light[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. 81~82
吴庆阳. 线结构光三维传感中关键技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2006. 81~82
- Gao Shiyi, Yang Kaizhen. Research on central position extraction of laser strip based on varied-boundary Gaussian fitting [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2011, **32**(5): 1132~1137
高世一,杨凯珍. 变边界高斯拟合提取激光条纹中心线方法的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(5): 1132~1137
- Hu Shuling, Wang Xinlong, Sun Yu *et al.*. Algorithm analysis on extracting the information of central fringe of low-coherence interference image of CMOS camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(11): 111002
胡姝玲,王鑫龙,孙 昱等. 基于 CMOS 相机的低相干图像中心条纹提取的算法分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(11): 111002
- Wang Weihua, Sun Junhua, Liu Zhen *et al.*. Stripe center extraction algorithm for structured-light in rail-way dynamic measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(1): 87~90
王伟华,孙军华,刘 震等. 钢轨磨耗动态测量结构光条纹中心提取算法[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(1): 87~90
- Yu Xiuhui. Research on Key Techniques of Measurement System Based on Machine Vision [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. 28~32
于秀辉. 基于机器视觉的测量系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008. 28~32
- Wang Shun, Xu Jingzhu, Zhang Yixin *et al.*. Reliability evaluation method and application for light-stripe-center extraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1115001
王 顺,徐静珠,张益昕等. 结构光光条中心点信度评价方法与应用[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1115001
- He Junji, Zhang Guangjun. Study on method for processing image of strip in structured-light 3D vision measuring technique [J]. *J. Beijing University of Aeronautics & Astronautics*, 2003, **29**(7): 593~597
贺俊吉,张广军. 结构光三维视觉检测中光条图像处理方法研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, **29**(7): 593~597
- Zhao Bohua, Wang Boxiong, Yang Bocong *et al.*. Extraction method for light-sectioning stripes in the profile measurement of hybrid reflection surfaces[J]. *J. Tsinghua University (Science & Technology)*, 2011, **51**(8): 1084~1088
赵博华,王伯雄,杨博淙等. 混合反射特性表面形貌测量中光刀条纹的提取方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2011, **51**(8): 1084~1088