

文章编号:1001-5078(2019)09-1141-06

· 图像与信号处理 ·

# 复杂光线环境下结构化光斑的差动成像提取方法研究

张 辉<sup>1,2</sup>, 陈静萍<sup>1,2</sup>, 文梓豪<sup>1,2</sup>, 潘 孟<sup>1,2</sup>

(1. 中山大学智能交通研究中心, 广东 广州 510006; 2. 广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘 要:**结构化光斑提取是线结构光三维视觉测量的重要基础。针对在复杂背景光环境下结构化光斑难以提取的问题,本文提出一种基于时域差动成像的结构化光斑提取方法。通过电路控制线结构光与成像单元的同步工作,使连续拍摄得到的两帧图像中一帧含有结构化光斑,另一帧不含结构化光斑,通过对两帧图像灰度值的相似性特征参数识别,提取光斑的潜在区域,再结合关联区域筛选处理,即可有效提取出结构化光斑。这一方法能够在复杂的背景环境中将低信噪比结构化光斑准确提取出来,对于线结构光三维视觉测量等结构化光斑的相关应用都具有很高的实用价值。

**关键词:**结构化光斑;差动成像;分段处理;相似性识别;关联区域筛选

**中图分类号:**U467.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.09.019

## Research on structured spot extraction method based on differential imaging in complex light environment

ZHANG Hui<sup>1,2</sup>, CHEN Jing-ping<sup>1,2</sup>, WEN Zi-hao<sup>1,2</sup>, PAN Meng<sup>1,2</sup>

(1. Research Centre of Intelligent Transportation System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Structured spot extraction is an important basis for line structured light three-dimensional vision measurement. To overcome the difficulty of extracting structured spot in complex background light environment, a method of extracting structured spot based on time-domain differential imaging is proposed in this paper. In this paper, the circuit control line structure light and the imaging unit are synchronized, so that one frame of the two consecutive images contains structured spot and the other frame does not contain structured spot. By identifying the similarity characteristic parameters of the gray values of the two frames, extracting the potential area of the spot, and combining with the correlation region filtering, the structured spot can be effectively extracted. This method can accurately extract the low signal-to-noise ratio structured spot in complex background environment, and has high practical value for the related applications of structured spot such as line structure light three-dimensional vision measurement.

**Keywords:** structured spot; differential imaging; segmented processing; similarity recognition; relevant region screening

### 1 引 言

线结构光三维视觉测量方法因其非接触性、结构简单、精度较高等优点在几何测量中得到了较为

广泛的应用。当线结构光投射在被测物体表面时,在被测物体的表面形成光条,图像采集到有“厚度”光条,提取光条纹中心坐标,再对结构光进行匹配融

**作者简介:**张 辉(1973-),男,博士,副教授,从事交通参数提取技术,车辆监控与驾驶行为检测技术,车联网技术与应用等方面的研究。E-mail:zhanghui@mail.sysu.edu.cn

**收稿日期:**2019-03-01

合或者点云拼接等方法实现三维重建,可以实现三维视觉测量<sup>[1-4]</sup>。

提取结构光中心线是实现结构光三维视觉测量的关键,目前常见的结构光中心线的提取方法都是在比较单一的背景光条件下对单幅图像进行处理,在室外复杂光斑环境下,结构光提取容易被背景光掩盖,不利于室外使用。有学者提出采用类似激光测距的调制光源避免背景光干扰<sup>[5]</sup>,但是该方法只适合运用于点状激光光源上。

针对在复杂背景光环境下结构化光斑难以提取的问题,本文提出一种基于时域差动成像与图像掩膜的结构化光斑提取方法,通过同步控制差动成像单元和结构光源的开启与关闭,在短时间内(如 3ms)拍摄两帧图像,一帧含有结构化光斑,另一帧不含结构化光斑,通过对图像进行相似性识别和关联区域筛选,可以在复杂环境中提取结构化光斑。

## 2 差动图像采集

单个成像单元的帧频较低,常见为 25 f/s,因此成像单元连续两次拍摄的背景光环境可能存在较大变化,且当成像单元与被测目标存在相对运动时,单个成像单元连续两次拍摄时的成像区域不重合,得到的连续两帧图像的差异较大。为了解决这一问题,本文使用两个成像单元,并且运用基于时域差动的图像采集方法<sup>[6]</sup>,缩短成像单元第一次拍摄与第二次拍摄的时间差,使成像区域基本完全重合。

使用立方体分光棱镜使两个成像单元的视场保持一致,即在静止时两个成像单元的拍摄区域完全重合。并将两个成像单元连接至同一时钟信号源,以保证两者的时钟同步。并在其中一个成像单元电源处加入延时电路模块,同时采用单片机控制其启动时刻,使两个成像每次拍摄都存在相同的微小时间间隔,实现两者的差动成像。本文采用的差动图像采集平台可以控制差动时间达到 1 ms。

## 3 结构化光斑提取方法

本文使用差动图像采集方法,并且同步控制结构光的开启与关闭,固定地使第一个成像单元拍摄的图像含有结构化光斑,第二个成像单元拍摄的图像不含结构化光斑。由于成像单元的拍摄间隔时间足够短,例如 1 ms 时间间隔,所以其成像区域基本完全重合,且背景光环境近似相同,理论上两次拍摄

得到的图像只存在是否含有结构化光斑这一差异,对两帧图像进行差分运算即可将结构化光斑提取出来,过程示意图如图 1 所示。

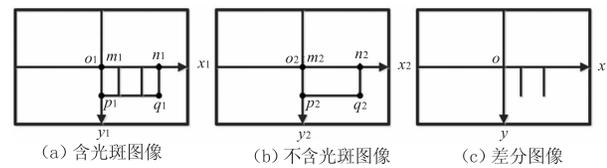


图 1 结构化光斑的差动图像提取原理

Fig. 1 Extraction principle of structured spot based on differential image

但是在实际拍摄中,由于微弱移动,成像传感器的误差以及周围景物或者光斑的微弱变化,连续拍摄的两张图像存在着差异,且在边缘处的差异最为明显。虽然差动成像已经尽可能缩小了两帧图像之间的差异,但是由于两帧图像间的固有差异,导致直接图像差分进行光斑提取难以实现,尤其是复杂光线下,光斑亮度相对于背景亮度差异不大的情况,曲线灰度值如图 2 所示。为此,本文采用图像灰度曲线形态的相似性识别方法提取光斑所在区域。

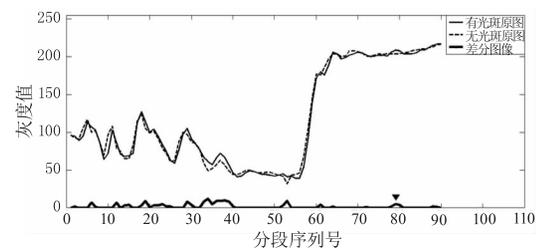


图 2 曲线的灰度值

Fig. 2 Gray value of the curve

从实际采集的图像中不难发现,结构化光斑所在区域亮度总是高于附近不含光斑区域的,其在每行像素中的亮度值总是呈现出一个波峰形态,如图 2 所示,而且,这一波峰并不会出现在不含光斑的差动图像另一帧中。因此为了有效识别出这一光斑,不妨将曲线中的所有波峰全部分割出来,通过相似性进行识别提取。具体过程可以分为以下几个步骤:

- 1) 基于形态的像素亮度曲线分割;
- 2) 曲线段形态特征参数计算;
- 3) 基于形态特征参数的光斑区域识别;
- 4) 基于区域关联的扰动抑制。

### 3.1 曲线分割

由于曲线分割的目标是提取光斑,因此以含光斑的 A 帧图像的灰度值为基准进行分割,假设 A 帧

图像是由  $M \times N$  个像素点组成。分割结果表示为：

$$V_{i,z+1} = j, a_{i,j-1} < a_{i,j} \leq a_{i,j+1} \quad (1)$$

其中,  $a_{i,j}$  表示 A 帧图像中第  $i$  行、第  $j$  列的像素点的灰度值;  $i$  的取值范围为  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $j$  的取值范围为  $j = 2, 3, \dots, N$ ;  $V_{i,z+1}$  表示第  $i$  行的第  $(z + 1)$  个分割点。

根据公式(1),假设第  $i$  行找出  $l_i$  个最小值点,结合曲线的首尾两点,则第  $i$  行共有  $(l_i + 2)$  个分割点,曲线被分割成了  $(l_i + 1)$  段。因此  $z$  的取值范围为  $z = 0, 1, 2, \dots, l_i + 1$ , 且当  $z = 0$  时,  $V_{i,1} = 1$ ; 当  $z = l_i + 1$  时,有  $V_{i,l_i+2} = N$ 。

### 3.2 曲线分段特征参数

#### (1) 幅值

曲线分割出来的每一个分段存在最大值与最小值,最大值与最小值之差反映区域内灰度值的变化幅度。记 A 帧图像中第  $i$  行的第  $k$  个分段内像素点灰度值的最大值与最小值之差为  $CA_{i,k,1}$ , 其计算公式为:

$$CA_{i,k,1} = \max \begin{pmatrix} V_{i,k+1} \\ a_{i,p} \\ p = V_{i,k} \end{pmatrix} - \min \begin{pmatrix} V_{i,k+1} \\ a_{i,p} \\ p = V_{i,k} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中,  $k$  的取值范围为  $k = 1, 2, \dots, l_i + 1$ 。

#### (2) 形态

每一个分段的两个分割点可以构成一条直线,该分段内的点到这条直线的距离能反映该分段的形态变化情况。对于 A 帧图像,假设第  $i$  行的第  $k$  个分段两端的分割点构成的直线方程为  $L_{i,k} : \alpha_{i,k} \cdot x + \beta_{i,k} \cdot y + \gamma_{i,k} = 0$ , 计算分段内的点  $(x_0, y_0)$  到直线  $L_{i,k}$  的距离的最大值:

$$CA_{i,k,2} = \max \left\{ \frac{|\alpha_{i,k} \cdot x_0 + \beta_{i,k} \cdot y_0 + \gamma_{i,k}|}{\sqrt{(\alpha_{i,k}^2 + \beta_{i,k}^2)}} \right\} \quad (3)$$

其中,  $x_0$  与  $y_0$  的取值范围分别为  $x_0 \in (V_{i,k}, V_{i,k+1})$ ,  $y_0 \in (a_{i,V_{i,k}}, a_{i,V_{i,k+1}})$ 。

#### (3) 分段内像素点的灰度值之和

分段内所有像素点的灰度值之和反应了该分段内总体灰度值的大小。对于 A 帧图像,计算分段内所有像素点的灰度值之和,有:

$$CA_{i,k,3} = \sum_{p=V_{i,k}}^{V_{i,k+1}} a_{i,p} \quad (4)$$

#### (4) 最小值与最大值连线与水平方向的夹角

每一个分段内最小值与最大值连线的斜率反映了曲线在该区域内幅值和相位上的变化情况。假如第  $i$  行的第  $k$  个分段内最大值与最小值的坐标分别为  $(x_{i,k}^{\max}, y_{i,k}^{\max})$  与  $(x_{i,k}^{\min}, y_{i,k}^{\min})$ , 对于 A 帧图像,则曲线最小值与最大值的连线与水平方向的夹角为:

$$CA_{i,k,4} = \left| \frac{y_{i,j}^{\max} - y_{i,j}^{\min}}{x_{i,j}^{\max} - x_{i,j}^{\min}} \right| \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (5)$$

其中,  $y_{i,k}^{\max} = a_{i,x_{i,k}^{\max}}$ ,  $y_{i,k}^{\min} = a_{i,x_{i,k}^{\min}}$ 。

### 3.3 基于形态特征参数的光斑区域识别

用与 A 帧图像相同的分割点对不含光斑的 B 帧图像进行分割,则 B 帧图像与 A 帧图像具有相同的分割区域。根据 3.2 节,用与 A 帧图像相同的方法计算出 B 帧图像每一行中每个分段的特征参数  $CB_{i,k,v}$ , 其中  $v = 1, 2, 3, 4$ 。计算 A 帧图像与 B 帧图像中每一个分段的特征参数的差分值,记为关联特征参数  $C_{i,k,v}$ , 其计算公式为:

$$C_{i,k,v} = CA_{i,k,v} - CB_{i,k,v} \quad (6)$$

找出每一行中四个关联特征参数均排在前  $\tau$  位的分段,其分段序列号集合记为  $S_{i,v}^\tau$  ( $v = 1, 2, 3, 4$ ),  $\tau$  取自然数,假设光斑数量为  $\mu$ , 本研究中  $\tau$  值一般取值范围为  $[1.25\mu, 2\mu]$ 。

求出  $S_{i,1}^\tau, S_{i,2}^\tau, S_{i,3}^\tau, S_{i,4}^\tau$  的交集  $S_i^\tau$ :

$$S_i^\tau = S_{i,1}^\tau \cap S_{i,2}^\tau \cap S_{i,3}^\tau \cap S_{i,4}^\tau \quad (7)$$

那么集合  $S_i^\tau$  为四个关联参数的值均排在前  $\tau$  位的区域分段序列号的集合。对于差分图像 D, 滤除区域分段序列号不在集合  $S_i^\tau$  内的值, 保留在集合  $S_i^\tau$  内的分段的灰度值, 其计算公式为:

$$d_{i,k} = \begin{cases} d_{i,k}, & k \in S_i^\tau \\ 0, & k \notin S_i^\tau \end{cases}, k \in [V_{i,k}, V_{i,k+1}] \quad (8)$$

其中,  $d_{i,k}$  表示差分图像 D 中第  $i$  行、第  $k$  列的像素点的灰度值。

### 3.4 基于区域关联的扰动抑制

对 A 帧图像与 B 帧图像的每一行进行如 3.1 ~ 3.3 节所述的处理, 可以将结构化光斑提取出来, 但是存在一定的噪声。这是因为对图像每一行进行处理时, 筛选保留下来的区域数大于该行的光斑条数或者是在保留下来的区域中除了光斑还有其他噪声干扰。因此, 需要对图像进行基于区域关联的扰动

抑制,去除噪声干扰,进而将光斑更为准确的提取出来。

考虑到结构光的光斑通常为连续曲线,尤其是本研究中采用的纵向条纹状光斑,其在图像中的出现具有很高的连续性,基于此,本文采用区域关联的方法对光斑的有效性进行进一步判断,抑制噪声斑点的出现。

针对纵向条纹状光斑,定义:

如果  $\sum_{r=V_{i-2,k}}^{V_{i-2,k+1}} d_{i-2,r} > 0$ , 则  $P_{i-2,k} = 1$ ,

如果  $\sum_{r=V_{i-2,k}}^{V_{i-2,k+1}} d_{i-2,r} = 0$ , 则  $P_{i-2,k} = 0$ ;

如果  $\sum_{r=V_{i-1,k}}^{V_{i-1,k+1}} d_{i-1,r} > 0$ , 则  $P_{i-1,k} = 2$ ,

如果  $\sum_{r=V_{i-1,k}}^{V_{i-1,k+1}} d_{i-1,r} = 0$ , 则  $P_{i-1,k} = 0$ ;

如果  $\sum_{r=V_{i+1,k}}^{V_{i+1,k+1}} d_{i+1,r} > 0$ , 则  $P_{i+1,k} = 2$ ,

如果  $\sum_{r=V_{i+1,k}}^{V_{i+1,k+1}} d_{i+1,r} = 0$ , 则  $P_{i+1,k} = 0$ ;

如果  $\sum_{r=V_{i+2,k}}^{V_{i+2,k+1}} d_{i+2,r} > 0$ , 则  $P_{i+2,k} = 1$ ,

如果  $\sum_{r=V_{i+2,k}}^{V_{i+2,k+1}} d_{i+2,r} = 0$ , 则  $P_{i+2,k} = 0$ 。

求出  $P_{i-2,k}$ ,  $P_{i-1,k}$ ,  $P_{i+1,k}$  与  $P_{i+2,k}$  的值之后,如果它们的和大于我们设定的某个阈值  $T$ ,那么在图像 D 中,该分段的灰度值保留,反之,将该区域的灰度值赋为 0,判断公式如下:

$$d_{i,r} = \begin{cases} d_{i,r}, & P_{i-2,k} + P_{i-1,k} + P_{i+1,k} + P_{i+2,k} > T \\ 0, & P_{i-2,k} + P_{i-1,k} + P_{i+1,k} + P_{i+2,k} \leq T \end{cases}$$

$$r \in [V_{i,k}, V_{i,k+1}] \quad (9)$$

其中,  $T$  为设定的阈值;  $T$  的取值为  $T = 0, 1, \dots, 6$ , 对图像的每一行中每一个保留下来的分段进行判断,抑制噪声扰动,去除光斑图像的纵向噪声,进而将光斑提取出来。

## 4 光斑提取实验

### 4.1 图片拍摄

控制相机的拍摄参数与拍摄位置不变,对同一目标车辆进行连续两次拍摄得到连续两帧图像,假设 A 帧图像含有光斑, B 帧图像不含光斑,将含光斑图像

与不含光斑的图像进行差分处理,得到含有光斑的差分图像 D 如图 3 所示。已知在含光斑的图像中,光斑平均灰度值为 7.55,整幅图像平均灰度值为 123.27,其信噪比为 0.061,结构化光斑的信噪比低。



(a) 含光斑的A帧图像 (b) 不含光斑的B帧图像 (c) 含光斑的差分图像D

图 3 待处理的图像

Fig. 3 Images to be processed

### 4.2 对图像单行进行处理结果

对图 3 所示的图像的第 50 行进行分析,根据公式(2)找出含光斑曲线中的分割点并将其标记出来,得到曲线分区域结果如图 4 所示。

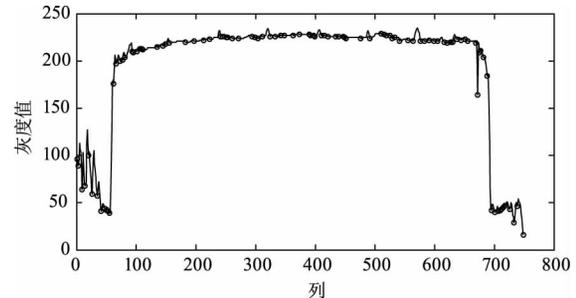


图 4 A 帧图像第 50 行的曲线分段情况

Fig. 4 Curve segmentation in line 50 of image A

如图 4 所述找出了 100 个分割点,那么曲线被分割成了 99 段。用相同的分割点对 B 帧图像与差分图像的第 50 行进行划分,曲线同样也被分割成 99 段。

使用 3.2 节所述的方法计算含光斑的曲线与不含光斑的曲线第 50 行的分段特征参数的差分值  $CA_{50,k,n}$ ,得到结果如图 5 所示。在实验中,光斑的数量为  $\mu = 8$ ,使用 3.3 节所述的方法对关联区域进行处理,取  $\tau = 10$ ,图 5 中倒三角形所标记的是图像该行中四个特征参数值均在前 10 的分段。

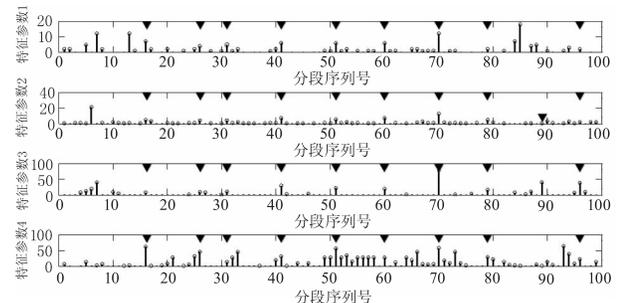


图 5 关联区域特征参数

Fig. 5 Characteristic parameters of correlation regions

将关联区域筛选结果运用到差分曲线进行处理,在差分曲线中,保留图5中倒三角形标记的区域的灰度值,其他区域的灰度值赋值为0,得到单行的光斑提取结果如图6所示。

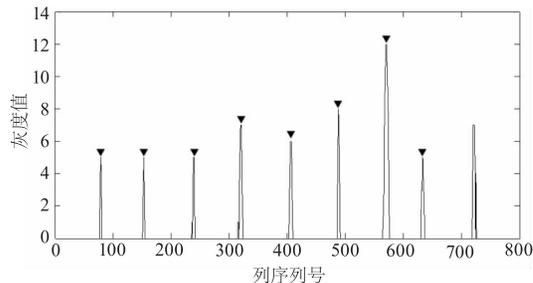


图6 第50行的光斑提取结果

Fig. 6 The results of spot extraction in line 50

图6中倒三角形标注的是光斑所在分段,由图可知第50行的光斑提取结果中除了光斑之外还存在其他干扰噪声。这是因为该噪声点的值与光斑的特征相似,在单行处理中无法将其滤除,该噪声点将在后续图像整体处理时滤除。

#### 4.3 对图像进行整体处理结果

对含光斑的A帧图像与不含光斑的B帧图像的每一行进行如3.1~3.3节所述的处理,得到的结果如图7(a)所示。此时得到的光斑图像含有较多噪声。根据3.4节所述的方法对图像进行进一步处理,这里设定阈值 $T = 3$ ,滤除图像其他噪声干扰,得到光斑提取结果如图7(b)所示。

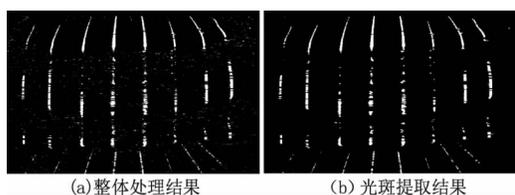


图7 图像整体处理结果

Fig. 7 Overall image processing result

## 5 总结

通过上述分析和实验结果可以证明,本文研究的结构化光斑的差动成像提取方法可以在复杂的背景光环境中将低信噪比的结构光光斑提取出来,后续再使用结构光中心线的提取方法提取出光斑中心<sup>[7-10]</sup>,可以实现结构光三维视觉测量。此方法通过双摄像头同步的高速差动成像有效抑制了被测目标微小位移和背景光环境变化带来的差分图像差异

问题,以及光斑基本形态的提取问题,且方法操作简单,成本低廉,对于三维测量精度要求不是特别高的应用场合,如机器人目标检测,空间形状测量等领域都具有相当的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Zhang G, Sun Z, Wei Z. A novel calibration approach to structured light 3-D vision in section[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 34(5): 373 - 380.
- [2] TANG Ruiyin, CHEN Zhuo. Three-dimensional measurement method based on binocular data fusion[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(10): 118 - 119. (in Chinese)
- [3] 唐瑞尹, 陈茁. 基于双目数据融合的三维测量方法[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(10): 118 - 119.
- [4] Yu Y, Li J, Jia F, et al. Three-dimensional object matching in mobile laser scanning point clouds[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 12(3): 492 - 496.
- [5] 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): 118 - 124. (in Chinese)
- [6] 郑鹭斌, 王晓栋, 严菲. 一种基于线结构光的焊接三维重建方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 118 - 124.
- [7] ZHANG Baojun, BIN Weihong, LIU Qiang, et al. Scanning measurement of coated glass color-difference based on light source modulation[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, (12): 148 - 150. (in Chinese)
- [8] 张保军, 毕卫红, 刘强, 等. 基于光源调制的扫描式镀膜玻璃色差检测[J]. 仪表技术与传感器, 2015, (12): 148 - 150.
- [9] ZHANG Hui, GONG Wenshen, CHEN Jingping, et al. Research on vehicle-mounted speed and direction detection method based on binocular image matching[J]. Automobile Technology, 2017, (11): 7 - 12. (in Chinese)
- [10] 张辉, 龚文森, 陈静萍, 等. 基于双目, 基于双目图像匹配的车载测速测向方法研究[J]. 汽车技术, 2017, (11): 7 - 12.
- [11] MEI Junhua, LAI Leijie. Research on extraction algorithm of light strip center in structured light measurement system[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41

- (21):8-13. (in Chinese)  
梅俊华, 赖磊捷. 结构光测量系统光条中心提取算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(21):8-13.
- [8] LI Yingying, ZHANG Zhiyi, YUAN Lin. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10):13-22. (in Chinese)  
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):13-22.
- [9] LIU Wei, ZHANG Chi, LIU Yang, et al. Extraction method for laser stripe centerline with Gaussian mixing distribution[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(11):1397-1402. (in Chinese)  
刘巍, 张驰, 刘阳, 等. 高斯混合分布中心线提取方法[J]. 激光与红外, 2015, 45(11):1397-1402.
- [10] ZHANG Xiaoyan, WANG Xiaoqiang, BAI Fuzhong, et al. Improved gray centroid method for extracting the centre-line of light-stripe[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5):622-626. (in Chinese)  
张小艳, 王晓强, 白福忠, 等. 基于改进灰度重心法的光带中心提取算法[J]. 激光与红外, 2016, 46(5):622-626.