

基于斜率分析法的焊缝条纹直线特征提取分析

洪磊<sup>1</sup>, 杨小兰<sup>2</sup>, 钟冬平<sup>3</sup>

(1. 南京工程学院 汽车与轨道交通学院,南京 211167; 2. 南京工程学院 机械工程学院,南京 211167;  
3. 南京中建化工设备制造有限公司,南京 210034)

**摘 要:**提出了一种基于直线拟合的斜率分析法,用于提取线结构光焊缝条纹特征直线. 该方法将光条上的所有  $n$  个像素点按坐标大小顺序排列,从起始点开始顺次推移,每连续  $n_0$  个光点进行直线拟合,共记录  $n - n_0$  个斜率值,通过斜率变化特征计算光点在各条纹直线上的分布数量,以完成点集划分,根据划分后的各点集拟合直线作为求得的焊缝特征直线,最后讨论了参量  $n_0$  对拟合直线的影响. 结果表明,该方法能够有效地检测角接、搭接及 V 形等各类焊缝特征直线,满足焊缝检测的试验现场要求.

**关键词:** 焊缝检测; 特征提取; 斜率分析法; 直线拟合; 线结构光

**中图分类号:** TG 409      **文献标识码:** A      **doi:**10. 12073/j. hjxb. 20151012002

0 序 言

随着机器视觉技术的发展,基于线结构光视觉的焊缝检测方法已经成为自动化焊接的热门研究领域. 结构光焊缝检测的关键问题是焊缝条纹中心线的特征提取,Nele 等人<sup>[1]</sup> 和 Chen 等人<sup>[2]</sup> 采用标准 Hough 变换算法提取焊缝直线特征,但存在时间复杂度、占用系统内存大的缺点. 邓景煜等人<sup>[3]</sup> 提出了动态小窗 Hough 变换法实现焊缝直线特征提取,提高了运算速度,但需依赖焊缝跟踪过程中前后系列图像的相似性. 此外,学者们对非 Hough 变换类的特征提取算法也进行了广泛研究.

陈海永等人<sup>[4]</sup> 采用过度参数直线拟合和 B 样条曲线拟合得到条纹中心线,并基于距离搜索算法得到焊缝特征点,但算法仅适用于窄焊缝的特征提取. 秦涛等人<sup>[5]</sup> 提出了一种基于线性度的改进最小二乘法用于提取焊缝特征直线,具有较强的适应性,但需人工设置的参量数较多,若取值不当会影响算法的效率和精度. He 等人<sup>[6]</sup> 采用多项式拟合及极值方法可动态检测焊缝特征点,但需进行二阶导数运算,算法复杂度较高.

综上所述,现有的特征提取方法在一定程度上不能同时满足计算复杂度、适应性和精度等方面的综合要求,文中在常见的结构光条纹焊缝图像预处理

理算法基础上,提出了基于直线拟合的斜率分析法,其能快速准确地拟合结构光条纹中心直线,并可检测角接、搭接、V 形焊缝等多种类型的特征直线,具有广泛的适应性.

1 斜率分析法的原理

在进行特征检测之前,首先需进行结构光条纹图像处理,经过中值滤波、阈值分割和条纹中心线提取等处理后,形成具有纵向单像素宽度的细化图像,在此基础上应用斜率分析法进行研究.

将光条上的所有点按像素坐标大小顺序排列,各像素点记为  $P_i (i = 1 \sim n)$ , 共计  $n$  个点,取  $P_i$  到  $P_{i+n_0-1} (i = 1 \sim n - n_0 + 1)$  连续  $n_0$  个点做直线拟合并记录直线斜率值  $k_i (i = 1 \sim n - n_0 + 1)$ , 当  $P_i$  从起始点  $P_1$  顺次推移到  $P_{n+n_0-1}$  的过程中,各直线斜率值随之连续变化,形成以点序  $i$  为横坐标,斜率  $k_i$  为纵坐标的斜率变化曲线  $(i = 1 \sim n - n_0 + 1)$ . 当斜率不变时,说明对应的  $n_0$  点集在同一条纹直线上,反之则分散在不同条纹直线上,特别是当  $n_0$  点集通过条纹折线拐点时,斜率曲线发生急剧变化,形成极小或极大值. 因此,斜率变化反映了点在条纹线上的分布情况,对斜率变化曲线的分析可作为点的分布划分依据,进而提取条纹直线特征. 文中将结合角接、搭接和 V 形接口焊缝的特点,具体阐述斜率法的原理.

1.1 角接焊缝检测

角接焊缝特点是结构光在焊件上形成二条直

收稿日期: 2015 - 10 - 12  
基金项目: 河南省重点科技攻关资助项目 (122102210154); 河南省教育科学技术研究重点资助项目 (12B460013); 南京工程学院校级科研基金资助项目 (PTKJ201606)

线,在焊缝处形成一个拐点,称为二直线问题.

设二直线分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,光点数分别为  $n_1$  和  $n_2$ ,对应的斜率分别为  $t_1$  和  $t_2$ ,满足  $n = n_1 + n_2, n_1, n_2 > n_0, t_1 > t_2$ . 该问题可表述为根据斜率曲线特征求出  $n_1$  和  $n_2$ ,完成总点集  $n$  的划分,进而拟合出二直线并求解直线交点,变化曲线如图 1 所示.

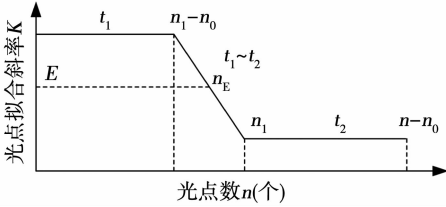


图 1 角接焊缝条纹斜率变化曲线

Fig. 1 Slope curve of corner weld stripe

根据图 1 的斜率变化特点,选择斜率曲线均值  $E$  为曲线特征,设对应  $E$  的光点序号为  $n_E$ ,搜索斜率值  $k_i \leq E$  的总点数即为  $n_E$ ,进一步解得

$$\left. \begin{aligned} n_2 &= \frac{n_0^2 + 2(n - n_0)(n_E - n + n_0)}{2(2n_0 - n)} \\ n_1 &= n - n_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)完成点域划分后,用  $P_1 \sim P_{n_1}, P_{n_1+1} \sim P_n$  可分别拟合两条直线,再求直线交点即为焊缝特征点.

1.2 搭接焊缝检测

搭接焊缝特点是结构光在焊件及搭接处形成三条直线,在焊缝处形成两个拐点,称为三直线问题.

设三直线分别为  $L_1 \sim L_3$ ,光点数分别为  $n_1 \sim n_3$ ,对应的斜率分别为  $t_1 \sim t_3$ ,满足  $n = n_1 + n_2 + n_3, n_1, n_3 > n_0, n_2 < n_0$ ,斜率变化曲线如图 2 所示.

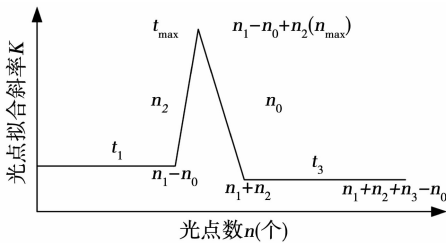


图 2 搭接焊缝条纹斜率变化曲线

Fig. 2 Slope curve of overLap weld stripe

由图 2 可以看出,曲线具有最大值  $t_{max}$ ,对应点序  $n_{max} = n_1 - n_0 + n_2$ . 选择  $t_{max}$  做为曲线特征,在总点集内搜索满足条件  $k_i = t_{max}$  所对应的点序即为  $n_{max}$ . 由此,可首先求直线  $L_3$  上的光点数  $n_3$  为

$$n_3 = n - (n_1 + n_2) = n - (n_{max} + n_0) \quad (2)$$

从总点集  $n$  中去掉后  $n_3$  点后,三直线问题即转化为总点集数为  $n - n_3$  的二直线问题,可利用 1.1 节方法完成后续求解.

1.3 V 形口焊缝检测

V 形口焊缝特点是结构光在焊件及 V 形口处形成四条直线及三个拐点,称为四直线问题.

设四直线分别为  $L_1 \sim L_4$ ,光点数分别为  $n_1 \sim n_4$ ,对应斜率分别为  $t_1 \sim t_4$ ,满足  $n = n_1 + n_2 + n_3 + n_4, n_1, n_4 > n_0, n_2, n_3 < n_0$ ,斜率变化曲线如图 3 所示.

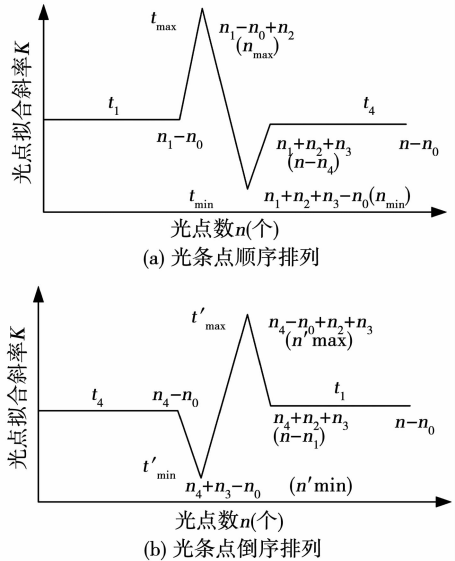


图 3 V 形口焊缝条纹斜率变化曲线

Fig. 3 Slope curve of V-groove weld stripe

由图 3 可以看出,当光点顺序排列时,斜率曲线中存在最大和最小值分别为  $t_{max}$  和  $t_{min}$ ,对应的点序分别是  $n_{max} = n_1 - n_0 + n_2; n_{min} = n_1 + n_2 + n_3 - n_0$ . 同理,当光点倒序排列时,曲线中具有最大和最小值为  $t'_{max}$  和  $t'_{min}$ ,对应的点序分别是  $n'_{max} = n_4 - n_0 + n_2 + n_3; n'_{min} = n_4 + n_3 - n_0$ .

选择  $t_{max}, t_{min}, t'_{max}$  和  $t'_{min}$  作为曲线特征,在光条点顺序时,总点集内搜索满足条件  $k_i = t_{max}$  所对应的点序即为  $n_{max}$ ,同理可搜索得到  $n_{min}, n'_{max}$  和  $n'_{min}$ .

由此可求出各直线对应的光点数为

$$\left. \begin{aligned} n_3 &= n_{min} - n_{max} \\ n_2 &= n'_{max} - n'_{min} \\ n_1 &= n_{max} + n_0 - n_2 \\ n_4 &= n'_{min} + n_0 - n_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(3)完成点域划分后,即可分别拟合四条直线,并根据直线求交得到各焊缝特征点.

2 焊缝检测试验

2.1 试验系统与结构光图像处理

试验采用的线结构光视觉传感器由 1/3in SONY XC-ES50CE CCD 摄像机和波长 635 nm 的 MTO-laser 线性激光器组成,摄像机配置 8 mm Computar 镜头. 采集到的焊缝结构光原始图像大小为 768 像素 × 576 像素,图像坐标原点  $O$  为左上角点, $x$  轴正向水平向右, $y$  轴正向竖直向下. 直线特征检测前通过图像处理获取光条纹的单像素连通线.

2.2 各类型焊缝检测

设计如下角接、搭接和 V 形口焊件焊缝检测试验,结构光焊缝图像分别如图 4a,c,e 所示.

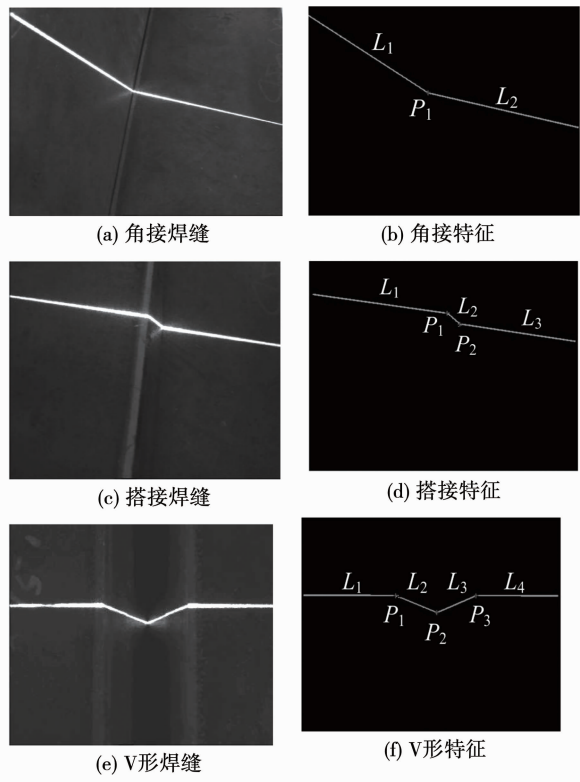


图 4 焊缝图像及其特征提取  
Fig. 4 Weld seam images and feature extraction

采用斜率法对上述三种类型的焊缝图像分别进行直线特征检测,其中检测到的光点总数  $n$  分别为 749,751 和 736. 设拟合点数  $n_0$  分别为 100,70 和 90,按式(1)~式(3)得各直线所占光点数为角接: $n_1=334,n_2=415$ ;搭接: $n_1=382,n_2=42,n_3=327$ ;V 形: $n_1=283,n_2=101,n_3=101,n_4=248$ . 得到各斜率变化曲线如图 5 所示.

根据斜率法得到的图像特征提取结果分别如

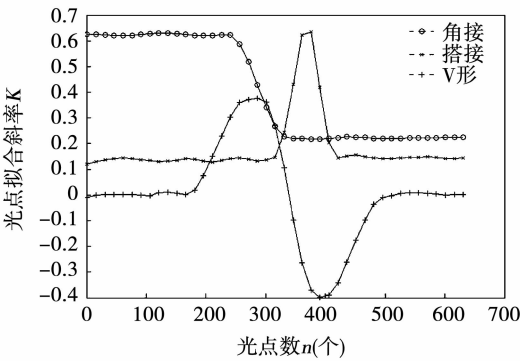


图 5 焊缝图像斜率变化曲线  
Fig. 5 Slope curves for weld seam images

图 4b,d,f 所示,其中  $L_1 \sim L_4$  表示直线特征, $P_1 \sim P_3$  表示特征点. 试验采用 Matlab 编写算法,测试主机为 Inter(R) Core(TM) i3-3240, CPU3.40 GHz. 检测数据如表 1 和表 2 所示. 其中直线特征参数用斜率-截距表示,特征点参数用图像坐标表示,单位为像素 (pix). 采用 Hough 变换法与斜率法进行比较.

表 1 焊缝图像直线特征提取检测数据

Table 1 Detection data of line feature extraction for weld seam images

| 焊缝形态<br>类型 | 特征    | 斜率分析法<br>(图像坐标/像素) |            | Hough 变换法<br>(图像坐标/像素) |            |
|------------|-------|--------------------|------------|------------------------|------------|
|            |       |                    |            |                        |            |
| 角接         | $L_1$ | 0.624 2            | 15.792 1   | 0.625 4                | 15.123 9   |
|            | $L_2$ | 0.222 0            | 154.644 5  | 0.224 3                | 153.532 7  |
|            | $P_1$ | 345.219 5          | 231.290 6  | 345.113 4              | 230.941 3  |
| 搭接         | $L_1$ | 0.135 7            | 92.192 3   | 0.134 2                | 92.658 2   |
|            | $L_2$ | 0.835 6            | -183.732 6 | 0.829 7                | -183.251 0 |
|            | $L_3$ | 0.145 3            | 112.403 0  | 0.139 5                | 113.005 9  |
|            | $P_1$ | 394.270 8          | 145.712 6  | 396.706 3              | 145.896 2  |
|            | $P_2$ | 429.029 5          | 174.756 2  | 429.233 5              | 172.884 0  |
| V 形        | $L_1$ | 0.005 1            | 211.182 8  | 0.003 5                | 211.986 0  |
|            | $L_2$ | 0.376 3            | 107.581 2  | 0.363 6                | 112.090 9  |
|            | $L_3$ | -0.394 6           | 415.668 9  | -0.388 1               | 411.059 7  |
|            | $L_4$ | 0.001 0            | 212.136 6  | 0.000 5                | 213.003 2  |
|            | $P_1$ | 279.137 5          | 212.613 3  | 277.378 6              | 212.955 9  |
|            | $P_2$ | 399.680 9          | 257.970 6  | 400.386 3              | 257.685 9  |
|            | $P_3$ | 514.550 6          | 212.647 6  | 515.538 5              | 213.012 4  |

由表 1 可见,斜率法与 Hough 变换法的检测结果接近,各特征点在两个方向平均绝对偏差仅为 1.033 0 和 0.566 2 图像的横轴和纵轴像素. 斜率法对三种类型焊缝的检测时间分别为 0.224,0.420 和 0.662 s,Hough 法分别是 0.416,0.628 和 0.876 s,

可见斜率法的算法平均时间优于 Hough 变换法,平均节省了 0.205 s. 由表 2 可以看出,斜率法的检测结果误差很小,与 Hough 变换法的精度近似. 结果表明,斜率分析法能有效实现各类焊缝的检测,在保证计算准确度的情况下,比 Hough 变换法的执行效率更高.

表 2 直线特征提取精度比较

Table 2 Comparison of linear feature extraction accuracy

| 焊缝类型 | 实际尺寸                  |                 | 斜率分析法                 |                 | Hough 变换法             |                 |
|------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
|      | 夹角                    | 高度              | 夹角                    | 高度              | 夹角                    | 高度              |
|      | $\theta_1/({}^\circ)$ | $h_1/\text{mm}$ | $\theta_2/({}^\circ)$ | $h_2/\text{mm}$ | $\theta_3/({}^\circ)$ | $h_3/\text{mm}$ |
| 角接   | 120.50                | —               | 120.93                | —               | 120.87                | —               |
| 搭接   | 59.50                 | 15.20           | 59.71                 | 15.32           | 59.82                 | 15.38           |
| V 形  | 59.50                 | 30.00           | 59.69                 | 29.83           | 59.66                 | 29.89           |

2.2 参量  $n_0$  的取值

在斜率分析法中参量  $n_0$  是直线拟合精度的主要影响因素.  $n_0$  取值过小会影响检测的准确度,且造成拟合组数  $n - n_0$  过大,降低运算效率;而取值过大,也会增加每组拟合的计算量. 同样降低效率,因此需选择适当的  $n_0$  值.

角接焊缝检测时,两条直线分占的光点数  $n_1$  和  $n_2$  均较大,在不影响效率的情况下,  $n_0$  可适当取较大值,根据多次检测经验,  $n_0$  可取 80 ~ 100.

搭接焊缝检测时,搭接处的直线较短,即  $n_2$  较小,  $n_0$  取值应小于角接时的取值,而略大于  $n_2$ ,根据多次检测经验,  $n_0$  可取 50 ~ 70.

V 形焊缝检测时,四直线中 V 形口处的两直线较短,可预估 V 形口处直线光点数作为  $n_0$  初值. 由于图像噪声影响,计算得到的各直线光点总和并不等于总点数  $n$ ,当两者越接近时,拟合精度越高. 取 5 组试验得到的光点数(个)分布值如表 3 所示. 根据上表实测结果,  $n_0$  可取 75 ~ 90.

表 3 不同  $n_0$  取值对 V 形口焊缝检测点分布的影响

Table 3 Influence of  $n_0$  on points distribution for V-groove weld seam detection

| 组号 | 拟合点<br>数 $n_0$ | 直线 $L_1$<br>点数 $n_1$ | 直线 $L_2$<br>点数 $n_2$ | 直线 $L_3$<br>点数 $n_3$ | 直线 $L_4$<br>点数 $n_4$ | 误差点数<br>$\sum_{i=1}^4 n_i - n$ |
|----|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| 1  | 70             | 259                  | 103                  | 103                  | 240                  | -31                            |
| 2  | 75             | 293                  | 88                   | 88                   | 256                  | -11                            |
| 3  | 80             | 291                  | 92                   | 92                   | 253                  | -9                             |
| 4  | 85             | 288                  | 95                   | 95                   | 251                  | -7                             |
| 5  | 90             | 284                  | 101                  | 101                  | 249                  | -3                             |

3 结 论

(1) 基于直线拟合的斜率分析法根据斜率变化特征实现了对光条点集的有效划分,能够准确拟合结构光条纹中心线,该算法可实现角接、搭接、V 形口等多种形式的焊缝特征直线提取,也可进一步推广到更复杂情况的直线提取,具有广泛的适用性.

(2) 参量  $n_0$  的取值关系到斜率分析法的拟合结果和运行效率,角接和搭接可根据经验取值,对于 V 形口焊缝,  $n_0$  越接近焊缝 V 形口处光点数越精确,可取预估初值后再经优化得出最终取值.

(3) 斜率分析法在保证计算精度的情况下,算法执行速度优于 Hough 变换算法,满足焊缝检测的实际需求.

参考文献:

[1] Nele L, Sarno E, Keshari A, An image acquisition system for real-time seam tracking[J]. Int. J Adv. Manuf Technol, 2013, 69(7): 2099 - 2110.

[2] Chen H Y, Liu W P, Huang L Y. The decoupling visual feature extraction of dynamic three-dimensional V-type seam for gantry welding robot[J]. Int. J Adv. Manuf Technol, 2015, 80(9): 1741 - 1749.

[3] 邓景煜, 秦 涛, 张 珂, 等. 基于动态小窗 Hough 变换法的焊缝特征直线提取[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 37 - 40. Deng Jingyu, Qin Tao, Zhang Ke, et al. Extracting weld seam by Hough transform based on dynamic windows[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 37 - 40.

[4] 陈海永, 孙鹤旭, 徐 德. 一类窄焊缝的结构光图像特征提取方法[J]. 焊接学报, 2012, 33(1): 61 - 64. Chen Haiyong, Sun Hexu, Xu De. An image feature extraction method for a certain kind of narrowgap weld seam[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(1): 61 - 64.

[5] 秦 涛, 张 珂, 邓景煜. 基于改进最小二乘法的焊缝特征直线提取方法[J]. 焊接学报, 2012, 33(2): 33 - 36. Qin Tao, Zhang Ke, Deng Jingyu. Algorithm of extracting feature lines in welding seam image based on improved least-square method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(2): 33 - 36.

[6] He Y S, Xu Y L, Chen Y X, et al. Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37(1): 251 - 261.

作者简介: 洪 磊,男,1982 年出生,博士,讲师. 主要从事焊缝图像处理 and 特征检测方法的研究工作. 发表论文 10 余篇. Email: njithl@163.com

通讯作者: 杨小兰,女,教授. Email: yxhh@163.com