



·前沿技术与交叉科学·

基于消失点检测算法的束靶红外图像畸变校正*

陈丽萍^{1,2}, 许永建², 於子辰^{1,2}, 汪日新^{2,3}, 彭旭峰^{2,3}, 徐益臻^{2,3}, 于玲²

(1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601; 2. 中国科学院 合肥物质科学研究院 等离子体物理研究所, 合肥 230031; 3. 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘 要: 传统的霍夫变换、Cannylines 直线检测算法、霍夫概率变换方法在图像上的直线检测效果不佳, 存在检测线段不连续不正确的问题, 因而, 利用 Sobel 滤波对红外图像横轴和纵轴两个方向分别进行锐化, 通过线段检测 (LSD) 算法实现线段特征检测, 进而经线段聚类拟合获得图像中完整的直线, 通过对直线交点计算获得消失点, 最后依据透视关系计算得到校正图像。实验结果表明, 该方法可以实现对中性束红外图像的自动有效校正。

关键词: 消失点检测; 直线检测; 图像校正; 线段聚类; 中性束诊断

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220109

Neutral beam infrared image distortion correction based on vanishing point detection

Chen Liping^{1,2}, Xu Yongjian², Yu Zichen^{1,2}, Wang Rixin^{2,3}, Peng Xufeng^{2,3}, Xu Yizhen^{2,3}, Yu Ling²

(1. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The key parameters of the neutral beam, such as beam uniformity and beam divergence angle, can be obtained by analyzing the infrared images generated by the beam bombarding the target surface. Due to the camera setup angle, the IR images show geometric distortion, which affects the accurate analysis of the beam parameters. Therefore, so the images should be corrected for the distortion. The traditional Hough transform, canny lines algorithm, and probabilistic Hough transform methods are not effective in detecting straight lines on this image, and there is a problem of detecting discontinuous and incorrect line segments. In this paper, Sobel filter is used to sharpen the infrared image in the horizontal and vertical directions respectively and line segment feature is detected by line segment detector (LSD) algorithm. Then complete straight lines are obtained in the image by clustering and fitting the line segments according to the geometric and angular relationships between them. Vanishing points is calculated by the intersection points of the lines. Finally, the corrected image is obtained based on the perspective relationship. Experiment results prove that this method can achieve automatic and effective correction of neutral beam infrared images and it lays a basis for obtaining key parameters of the beam.

Key words: vanishing point detection, linear detection, image rectification, line segment clustering, neutral beam diagnosis

核聚变是解决能源问题的“终极手段”。中性束注入是聚变等离子体加热和电流驱动的有效方法, 是聚变界公认的实现聚变堆点火和燃烧等离子体控制的必备手段^[1]。为了诊断引出束流的质量, 必须对束均匀度、中性化效率、束散角等关键参数进行测量。红外测温技术是利用红外热像仪将被测物表面红外辐射度转化为电信号, 达到测温目的。相比于热电偶测温, 红外测温有响应速度快、测温范围广、灵敏度高、非接触等优点^[2]。当束流轰击

* 收稿日期: 2022-04-14; 修订日期: 2022-09-23

基金项目: 中国聚变堆主机关键系统综合研究设施 (2018-000052-73-01-001228); 中国科学院合肥科学中心协同创新计划项目 (2020HSC-CIP016); 国家自然科学基金项目 (11975262, 11905248)

联系方式: 陈丽萍, liping.chen@ipp.ac.cn。

通信作者: 许永建, yjxu@ipp.ac.cn。

靶面时,束能量主要以热能的形式沉积在靶面,然后沿着靶向各方向传递,在靶面形成与束引出面形状相类似的束斑。通过分析红外热像仪拍摄的靶上的红外图像即可获得束散角、束均匀度等参数^[3]。这种方式是众多束诊断工具中分辨率最高的一种手段^[4]。由于红外相机架设角度原因,需要对红外图像进行处理。本文根据图像上的线段特征对图像进行锐化处理,运用LSD检测图像线段,根据线段间的数学关系拟合直线,计算获得消失点,运用透视关系修正图像畸变。

1 实验测试平台环境

中国科学院等离子体物理所的射频负离子源测试平台安装了一红外靶用于束流剖面诊断,(如图1所示),红外相机拍摄角度与靶面成 70° 夹角,平台使用铜靶作为束诊断靶,如图2(a)所示,装置上采用一台型号为FLIR A655sc的红外相机用于拍摄靶面,其分辨率为 640×480 ,靶面上有横向与竖向的宽1 mm、深8 mm的凹槽以减小因靶板表面的热传递带来的测量误差。束流轰击靶面时会在靶中央形成明亮的跑道形束斑,且温度值沿着束斑向外不断降低(如图2(b)所示)。为了消除拍摄角度带来的图像失真,针对本实验平台拍摄的红外图像,本文利用消失点检测算法实现了图像自动校正,为束诊断提供有效的图像数据。

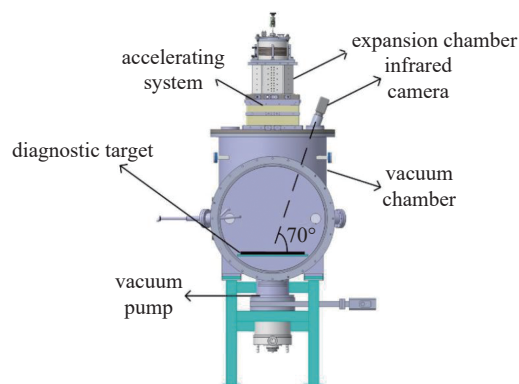
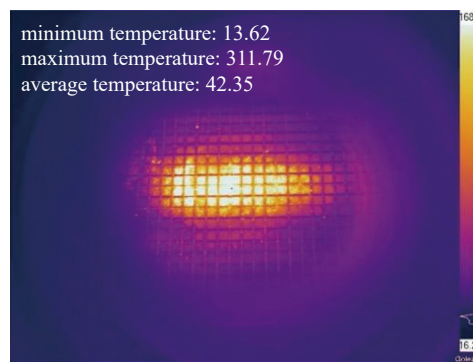


Fig. 1 Section of experimental platform

图1 实验平台剖面图



(a) diagnostic target



(b) experimental thermal infrared image

Fig. 2 Diagnostic target and experimental thermal infrared image

图2 诊断靶图像和实验时的红外图像

透视畸变可以通过四个像素点坐标代入线性公式求解单应性矩阵得到校正结果。当像素点信息不足时,可以利用直线对应关系、点与直线混合对应关系计算校正单应性矩阵^[5-6]。当没有点和直线对应关系时,可以利用圆锥曲线得到校正单应性矩阵^[7]。本文中的透视畸变图像存在明显的线特征,因此采用消失点检测算法,利用直线关系得到消失点,通过线性矩阵得到校正结果。

物理世界中平行的直线以相交的形式投影在透视图像上,交点被称为消失点。消失点在计算机视觉中常应用于包括相机标定、距离估计和三维重建等。现有的消失点检测方法主要有以下四类:基于空间变换的方法、基于边缘的方法、基于纹理的方法、基于区域的方法^[8]。例如,基于空间变换的方法运用级联霍夫变换检测消失点^[9]。基于边缘的方法利用边缘检测和霍夫变换检测直线段,得到消失点^[10]。基于纹理的方法利用纹理的方向特征,投票计算获得消失点^[11]。也有文献利用Gabor滤波获得道路图像的主纹理方向^[12]。基于区域的方法利用人类视觉中的注意力机制获得空间内的消失点^[13]。以上研究在道路检测、遥感等领域有优秀的表现。但在本图像上,上述算法不能很好解决校正问题。针对本实验图像中表现的边缘特征,本文提出了一种利用LSD算法直线检测,基于线段投影的方法拟合直线,计算直线交点得到消失点并计算校正单应性矩阵的方法对本文的多线段特征红外图像进行校正。

2 图像畸变矫正原理

2.1 图像畸变校正技术路线

本文首先对图像进行灰度化处理,再利用Sobel算子进行边缘检测,实现了边缘增强,从而提高了LSD算法的

直线检测的准确率。由于需要提取的线特征在行和列方向均有,因此分别对两个方向进行直线检测。在实际检测过程中发现检测后线段不连续,在一条线性凹槽上存在多条线段特征,因此需要把多个线段拟合成一条直线。通常情况下线段之间的距离和角度差值能反映是否属于同一直线,通过设置阈值后遍历,将线段聚类成不同集合,对线段数量最多的两个集合进行最小二乘法拟合获得两条直线,直线交点则为消失点。行列两方向的消失点确定后即可得到校正矩阵,从而实现图像校正。图3给出了图像畸变校正的技术路线。

2.2 图像灰度化

本文输入的为RGB三通道红外图像,线特征不会随着图像颜色变化而改变,因此需要对彩色图像进行灰度化处理减少计算复杂度。本文采用加权平均法计算,公式如下

$$\delta\text{gray}(i, j) = 0.299 \times R(i, j) + 0.587 \times G(i, j) + 0.144 \times B(i, j) \quad (1)$$

式中: $\delta\text{gray}(i, j)$ 表示一个像素的灰度值, $R(i, j)$ 、 $G(i, j)$ 和 $B(i, j)$ 表示彩色图像像素的分量值

2.3 Sobel算子边缘检测

图像边缘是图像区域属性突变的地方,即不同灰度属性区域间的分割线^[4]。在本文中表现为检测出图中的凹槽线段。本文所采用Sobel算子的卷积公式为

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{G}_x 表示 x 方向的卷积核, \mathbf{G}_y 表示 y 方向的卷积核,得到两个方向的图像增强结果。从实际效果来看, Sobel算子比其它算子的噪音过滤效果更好,边缘定位更准确。

2.4 LSD直线检测

LSD^[5]是Goi提出的一种基于梯度特征的直线检测算法,与传统的直线检测算法相比, LSD不需要设定阈值参数、检测结果更准确、检测速度更快。LSD算法的步骤分为生成直线支持区域、直线支持区域的矩形拟合和直线确认三步:第一步先计算每个像素点的梯度值,对梯度值进行伪排序,设置梯度阈值,将大于阈值且梯度值相同的像素作为一个直线区域;第二步在直线区域进行矩形拟合,每一个矩形是一个候选线段,将直线区域的主轴方向作为矩形的方向;第三步是通过Contrario方法和Helmholtz判断直线是否正确^[6]。矩形 r 的方向角度和直线区域内线段的方向角度偏差小于阈值 τ 的点为对齐点,像素点属于对齐点的概率为 p ,对齐点的数量为 k ,直线区域内像素总数为 n , B 为二项概率分布,由此得到

$$F(r) = (N)^{\frac{2}{3}} \cdot B(n(r), k(r), p) \quad (4)$$

$$B(n, k, p) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (5)$$

式中: N 为图像分辨率大小,矩形宽度最大为 \sqrt{N} ,因此所有可能的矩形数为 $N^{\frac{2}{3}}$ 。当 F 即虚警数量小于某一阈值时,说明直线区域有效,可以看做一个线段。

用Sobel算子分别对横向和纵向两个方向卷积后,直线检测结果如图4所示, LSD算法会检测出很多线段特征,在一条线性凹槽上有多个线段,且线段长度、斜率和截距等参数不完全相等,需要对线段特征进行分析计算。

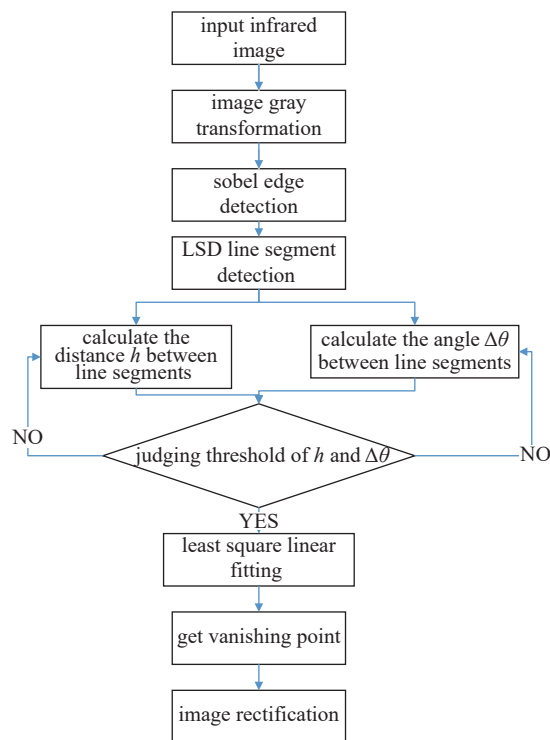


Fig. 3 Flowchart of image rectification

图3 图像畸变校正流程图

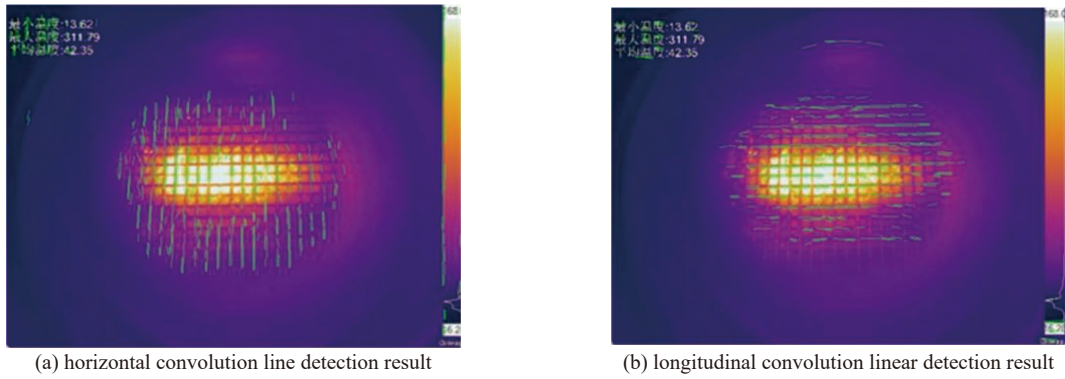


Fig. 4 Results of line segment detection after Sobel convolution

图 4 Sobel 卷积后图像直线检测结果

2.5 直线拟合与消失点检测

文献 [17] 提出了一种基于线段关系的线段聚类算法, 本文参考此算法部分设定, 对线段数量最多的集合进行聚类, 利用最小二乘法拟合得到两条直线, 并对直线取交点, 交点即为消失点, 如图 5 所示。线段 L_1 和线段 L_2 中点连线与 L_1 和 L_2 的夹角设定为 θ_1 和 θ_2 , 定义 $\Delta\theta = |\theta_1 - \theta_2|$ 。线段 L_1 端点和线段 L_2 端点连线, 取连线中点, 中点到 L_1 和 L_2 的距离为 h_1 和 h_2 , 定义 $h = h_1 + h_2$ 。

聚类流程如表 1 所示。

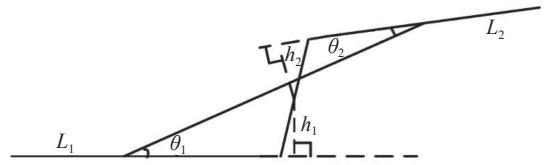


Fig. 5 Diagram of line segment relations

图 5 线段关系示意图

表 1 线段聚类算法

Table 1 Line segment clustering algorithm

algorithm	line segment clustering algorithm based on line segment relation
input	the sample set $D = \{L_1, L_2, \dots, L_m\}$, L means coordinate values of two endpoints of a line segment
output	coordinates of vanishing points
1:	$R = \emptyset$
2:	for $i = 1, 2, \dots, m$ do
3:	$C = \emptyset$
4:	for $j = 1, 2, \dots, m$ do
5:	calculate h between L_i and L_j
6:	calculate $\Delta\theta$ between L_i and L_j
7:	if $h < \text{threshold}$ and $\Delta\theta < \text{threshold}$ then
8:	$C = C \cup L_j$
9:	remove L_j from D
10:	$R = R \cup C$
11:	remove L_i from D
12:	take the two sets from R with the largest number of line segments.
13:	use the least square method to fit the two lines in Step 12.
14:	calculate the intersection of two lines. That is the vanishing point.

聚类算法遍历每一个线段并计算 h 和 $\Delta\theta$, 对于步骤 8 得到的线段集合不加入下一次遍历, 直到没有线段参与遍历后结束。遍历结束后步骤 12 开始计算线段数最多的两个集合, 拟合后的两直线的交点为消失点。经过多次实验发现, 当 h 和 $\Delta\theta$ 的阈值取 3 和 2 时, 得到的聚类线段结果准确。

2.6 图像校正

图像校正分为两步, 第一步恢复平行直线, 第二步垂线对齐。第一步需要两对直线, (l_1, l_2) 和 (m_1, m_2) , 每对直线在物理上平行, 在图像上可最终相交于无穷远处的两消失点 p_1, p_2 , 直线 l 连接两消失点 p_1, p_2 , 成为消失线 l 。定义变换矩阵 H_1

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ l_1 & l_2 & l_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{l} = (l_1, l_2, l_3)$ 为两消失点叉积后的结果，运算过程中取 l_3 为1，由于 $\mathbf{H}_1^{-T}\mathbf{l} = [0 \ 0 \ 1]^T$ ，解单应性矩阵 \mathbf{H}_1 可以得到值。

第二步将图像中的垂线与 y 轴平行，这一步本质是在对上一步的矩阵做旋转，不影响上一步的平行直线。消失点坐标为 (v_x, v_y) ，垂直方向的消失点矩阵表示为 $\mathbf{V} = [v_x \ v_y \ 0]^T$ ， y 轴的向量为 $[0 \ 1 \ 0]^T$ ，因此旋转角为

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \right) \quad (7)$$

旋转矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

最终的校正矩阵为 $\mathbf{T} = \mathbf{RH}_1$ 。

3 实验结果分析

3.1 实验结果

本文用 Python 作为编程语言，在双核 2.9 GHz、8 GB 内存环境中进行实验，得到图像校正结果如图 6 所示，图 6 表明本算法可以实现对中性束诊断靶红外图像进行自动校正。取图像中心点，对所在的行、列方向温度值分别进行比较分析（如图 7 所示），结果显示图像校正改变了温度变化的曲线。

3.2 算法比较

本文利用线段间的距离和角度关系对多个线段聚类，处理得到直线，完成消失点检测。在本图像上，实验了传统的霍夫变换 (Hough transform)、霍夫概率变换 (Probabilistic Hough transform)、Cannylines 直线检测算法，如图 8(a)、(b)、(c) 所示，白线为检测出的直线。霍夫变换及霍夫概率变换是基于边缘映射的线检测器，在复杂的图像上泛化能力不够，在本图像上能检测横向的直线，但竖向的直线检测效果差，无法满足后续计算要求。Cannylines 是基于边缘的自适应参数的 Canny 算法，如图 8(c) 所示，得到的线段是不连续的，相比 LSD 算法，Cannylines 检测到的线特征更少。如表 2 所示，用 0 和 1 表示直线检测的连续程度，0 代表不连续，1 代表连续，霍夫概率变换和 Cannylines 也都存在不连续的问题。

本算法使用了 LSD 直线检测并对线段聚类似合，得到的结果满足后续计算需求，检测正确率得到保证，如图 8(d)、

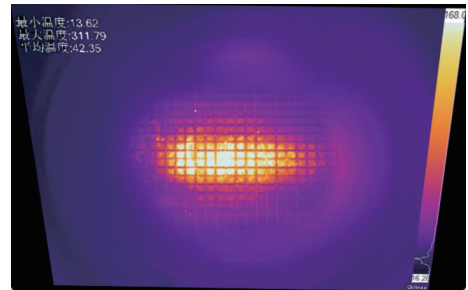


Fig. 6 Result of image rectification

图 6 图像校正结果

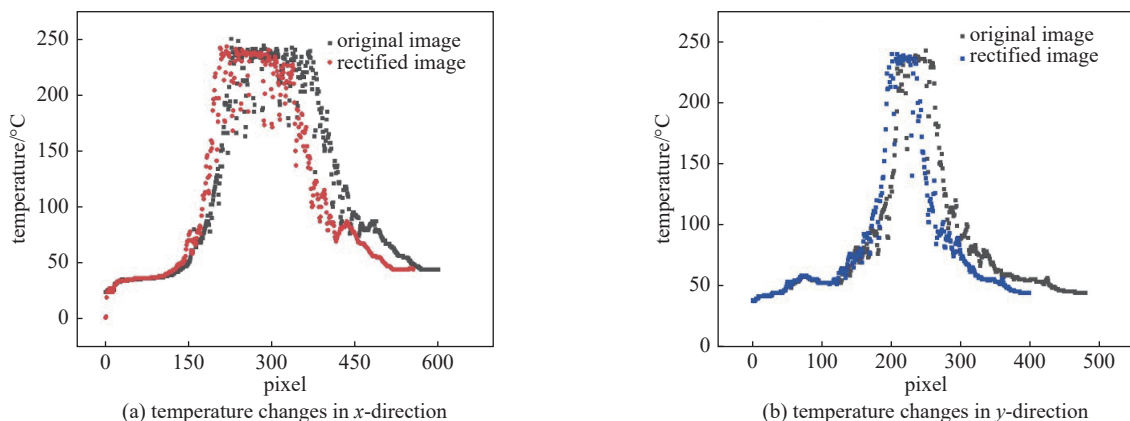


Fig. 7 Changes in temperature

图 7 温度值变化情况

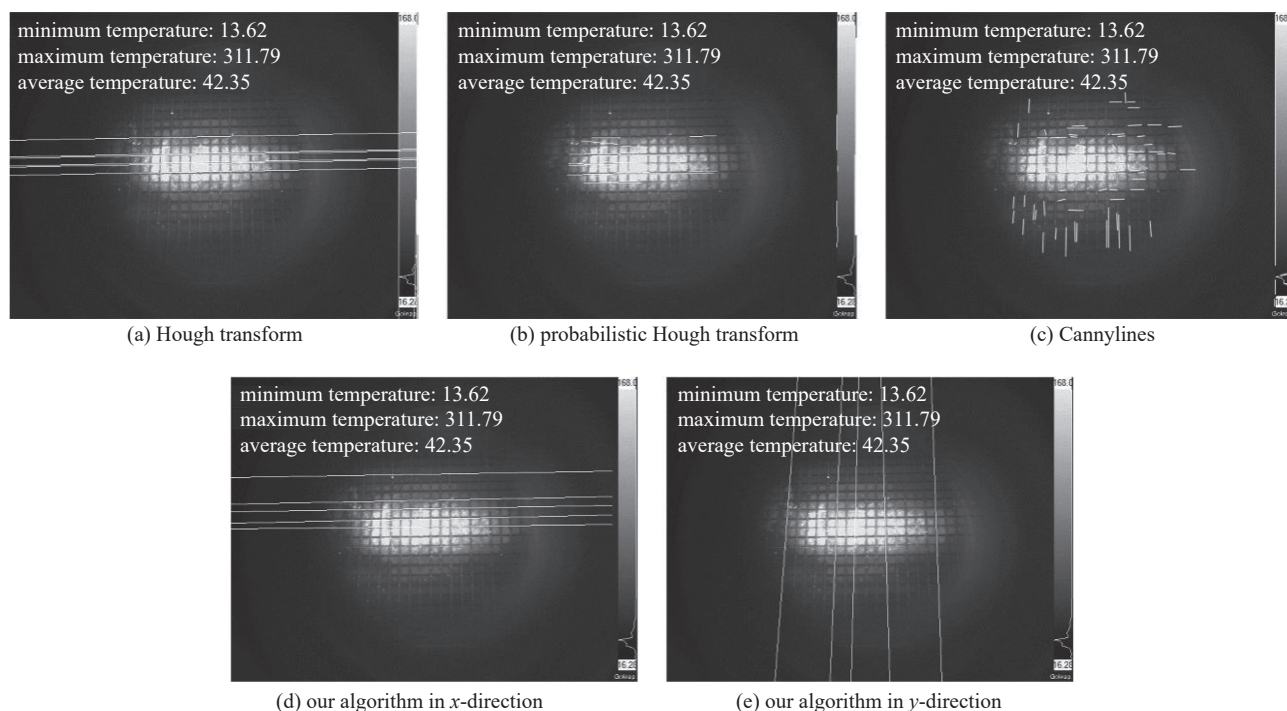


Fig. 8 Comparison of detection results of each line segment detection algorithm

图 8 各直线检测算法检测结果比较

表 2 直线检测方法比较

Table 2 Comparison of linear detection methods

	the degree of continuous	the number of lines detected in x-direction	the effective number of lines detected in x-direction	the number of lines detected in y-direction	the effective number of lines detected in y-direction	run time/s
Hough transform	1	3	3	0	0	0.021
probabilistic Hough transform	0	105	98	11	0	0.014
Cannylines	0	53	44	31	24	3.08
our algorithm	1	5	5	5	5	4.61

(e)所示。由于进行了聚类计算,因此运行时间更长,以后可以对此算法加以改进。

4 结 论

本文针对红外图像,采用了LSD算法进行直线检测,相比传统的霍夫变换,能检测出更多线特征。对于多线段的拟合,首先基于线段间的距离和角度特征,对线段进行聚类,让可能处于同一直线上的线段集合在一起,再对线段进行最小二乘法拟合成直线。考虑到线段数最多的两个集合的检测正确率更高,因此取这两个集合拟合后的直线的交点作为消失点。消失点的准确检测也将为图像校正矩阵的计算提供保证,最终能得到符合需求的校正图像,为中性束诊断提供可靠的图像数据。

参考文献:

- [1] De Muri M, Cavallin T, Pasqualotto R, et al. High energy flux thermo-mechanical test of 1D-carbon-carbon fibre composite prototypes for the SPIDER diagnostic calorimeter[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 02A718.
- [2] 刘泽元, 尚永红, 林博颖, 等. 红外测温设备的空间环境影响及防护研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(4): 165-171. (Liu Zeyuan, Shang Yonghong, Lin Boying, et al. Research on space environment influence and protection of infrared temperature measurement equipment[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(4): 165-171)
- [3] Xu Yongjian, Zhang Li, Yu Ling, et al. Feasibility analysis of 1-D carbon material in application of negative particle beam diagnostics[J]. *Fusion Science and Technology*, 2018, 73(4): 533-538.
- [4] Rizzolo A, Palma M D, De Muri M, et al. Design and analyses of a one-dimensional CFC calorimeter for SPIDER beam characterisation[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2010, 85(10/12): 2268-2273.
- [5] 曾慧, 邓小明, 赵训坡, 等. 基于线对应的单应矩阵估计及其在视觉测量中的应用[J]. *自动化学报*, 2007, 33(5): 449-455. (Zeng Hui, Deng Xiaoming, Zhao

- Xunpo, et al. Line-based homography estimation and its application in visual metrology[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(5): 449-455)
- [6] Zeng Hui, Deng Xiaoming, Hu Zhanyi. A new normalized method on line-based homography estimation[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(9): 1236-1244.
- [7] Liu Tianyang, Xu Weiming, Yin Xiaodong, et al. Planar metric rectification from perspective image via vertical vanishing point[C]//2014 7th International Congress on Image and Signal Processing. 2014: 498-502.
- [8] Su Hongyu. Vanishing points in road recognition: a review[C]//11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). 2018: 132-136.
- [9] Tuytelaars T, Proesmans M, Van Gool L. The cascaded Hough transform[C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. 1997: 736-739.
- [10] Chen Xuehui, Jia Ruiqing, Ren Hui, et al. A new vanishing point detection algorithm based on Hough transform[C]//Third International Joint Conference on Computational Science and Optimization. 2010: 440-443.
- [11] Zu Zhaozi, Hou Yingtuan, Cui Dixiao, et al. Real-time road detection with image texture analysis-based vanishing point estimation[C]//IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC). 2015: 454-457.
- [12] Rasmussen C. Texture-based vanishing point voting for road shape estimation[C]//Proceedings of the British Machine Vision Conference. 2004.
- [13] Stentiford F. Attention-based vanishing point detection[C]//International Conference on Image Processing. 2006: 417-420.
- [14] 吴曦. 基于MATLAB的图像边缘检测算法的研究和实现[D]. 长春: 吉林大学, 2014. (Wu Xi. Image edge detection based on MATLAB[D]. Changchun: Jilin University, 2014)
- [15] Von Gioi R G, Jakubowicz J, Morel J M, et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 32(4): 722-732.
- [16] 曹义亲, 何恬, 刘龙标. 基于改进LSD直线检测算法的钢轨表面边界提取[J]. *华东交通大学学报*, 2021, 38(3): 95-101. (Cao Yiqin, He Tian, Liu Longbiao. Rail surface boundary extraction based on improved LSD line detection algorithm[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2021, 38(3): 95-101)
- [17] Li Mengxuan, Yang Zhi, Zhao Bin, et al. Research on transmission conductor extraction method based on mainline projection LSD algorithm[C]//2022 2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE). 2022: 747-750.