

基于投影统计特征与 K 均值聚类的 十字光斑中心定位算法

苗家壮,胡旭晓,伍非凡,兰国清,吴跃成

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

摘 要:以光斑中心准确定位为核心问题的激光三角法广泛应用于轧钢平直度检测系统中。针对湿平整后钢板形貌检测中面临的液滴干扰,为保持光斑中心提取的准确性和鲁棒性,提出了一种十字激光光斑中心定位算法。该算法首先采集所有十字光斑像素在多个方向的投影值,投影方向自图像坐标系 X 轴正方向开始 0 到 π 之间均匀分布;然后通过构建频数直方图,利用 K 均值聚类算法确定光条投影值边界;最后通过坐标变换求得十字光斑中心坐标。通过计算机仿真与实验,比较了该算法与直线拟合法在施加液滴干扰前后,对十字光斑进行中心定位的精度与鲁棒性。结果表明:该算法在液滴干扰下的重复定位结果可靠,置信度为 99% 的置信椭圆面积大约相当于三种点激光中心定位算法的 2% 。因此,该算法不仅能够液滴干扰下准确定位十字光斑中心,而且使十字激光较点激光体现出更好的重复定位精度。

关键词: 十字光斑;投影统计特征; K 均值聚类;鲁棒性;中心定位

中图分类号: TP301.6;TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2017)05-0705-07

0 引 言

中厚冷轧钢板广泛应用于船舶、汽车、桥梁与建筑等领域,是一种重要的钢铁产品。中厚钢板需要进行多项检测以保证产品良好的品质^[1],其中平直度是衡量中厚钢板品质的重要指标^[2]。平直度检测方法大体可分为接触式与非接触式两类。采用非接触式检测方法的检测设备不与钢板直接接触,避免了传感器与钢板的磨损,同时机械结构更为简单,有效降低了检测设备的成本,成为目前研究的重点和未来发展的方向。非接触检测方法中一个重要的分支是机器视觉法,而激光三角法是机器视觉法的重要理论基础^[3]。

基于激光三角法的中厚钢板平直度检测方法的核心是光斑中心的准确定位和坐标的获取。因此寻求高精度、强鲁棒性的光斑中心定位方法具有重要

研究意义。目前,多数基于激光三角法的轧钢板材平直度检测设备采用点激光为结构光源,并发展出许多点光斑中心位置定位算法。其中,典型的方法有重心法^[4]、平方加权质心法、圆拟合法^[5]和高斯拟合法^[6]。随着湿平整工艺在冷轧钢板生产中日益普及^[7],钢板表面不可避免地会残留液滴。若液滴溅落在钢板表面激光照射处将形成光斑,该光斑是光线经液滴表面反射和散射所形成。平直度检测系统工作时,液滴会受到周围气流吹拂和带钢传送过程中的振动影响产生微小位移,使得光斑随之产生位移,这种现象被称为液滴干扰。液滴干扰直接影响到点光斑中心的重复定位精度和可信度。因此对于采用激光三角法原理的检测设备,其光斑中心定位算法在液滴干扰下仍须保持较好的鲁棒性。因此,尝试以十字结构光源替代点结构光源。

十字结构光的光斑由两条相互垂直的光条构

收稿日期:2017-03-22 网络出版日期:2017-08-07

基金项目:浙江省自然科学基金重点项目(LZ14E050003);浙江省自然科学基金项目(LY13E050025)

作者简介:苗家壮(1991-),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事图像处理、信号处理与模式识别方面的研究。

通信作者:胡旭晓,E-mail:huxuxiao@zju.edu.cn

成,理论上两光条相交处的中心即为光斑中心。传统的十字光斑中心定位算法试图获取两光条的中心线,以两光条中心线交点为十字光斑中心。这种算法称为直线拟合法^[8-10]。但由于十字光斑可能不关于光斑中心对称,这导致许多快速光条中心提取算法不适用于十字光斑^[11-12],两条中心线需要通过拟合运算得到,大大增加了直线拟合法的计算量。此外,直线拟合法还具有对十字光斑姿态要求严格,在液滴干扰下无法准确定位光斑中心的缺陷。

为了使基于激光三角法的中厚钢板平直度检测设备更好地适应湿平整工艺的工作环境,探索十字激光作为结构光源的优势,本文提出了一种综合利用十字光斑像素的统计特征与 K 均值聚类算法的十字光斑中心定位的算法。首先,计算每个光斑像素自图像坐标系 X 轴正方向开始 0 到 π 之间各个方向单位向量上的投影;然后,计算各个方向投影的统计直方图,利用 K 均值聚类算法确定光条投影边界;最后通过坐标变换得到十字光斑的中心坐标。本文通过计算机仿真和实验两种方式获取多种算法的光斑中心定位结果并进行比较,以分析本文算法的定位精度和液滴干扰下的定位鲁棒性。

1 十字光斑成像特性

激光束可视为一束拥有圆形截面的平行光。要获得条形光斑图像,需使用圆柱透镜将平行光分散开,得到具有一定宽度且符合高斯能量分布特征的光条。而十字激光可视为看作两个光条的组合。为获得十字光斑,需将圆柱透镜更换为图1所示的十字激光整形透镜,该透镜等价于横置与纵置圆柱透镜的组合。十字激光的成像过程如图1所示,激光光源射出的激光束沿 Z 方向传播,通过整形透镜的折射使所有光线分成两组,分布于两个互相垂直的平面,两个平面与成像平面的交线即为两个光条,两个光条分别沿 X 和 Y 方向分布。

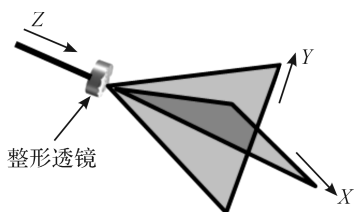


图1 十字激光光线的形成过程

激光束经过透镜,折射成许多光线,这些光线在粗糙的钢板平面上的散射情况可以用双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)描述。在构建粗糙表面散射模型时,Kirchhoff近似法使用广泛^[13]。基于Kirchhoff近似法建立的散射模型主要适用于粗糙表面的曲率半径远大于入射光波波长的情形^[14],符合钢板表面粗糙的特点,因此适用于对钢板表面激光散射的描述。由于钢板表面粗糙程度不均匀,不可视为朗伯体。从James等^[13]和刘源洞^[15]的实验结果可知,当激光垂直钢板表面入射时,其反射光线分布最为均匀。

2 算法流程

十字光斑在数字图像中由 N 个像素所构成。 N 在每一幅图像中是固定的常数,而在不同图像中可能不同。十字光斑的像素点 i 可以生成一个向量 \mathbf{P}_i , \mathbf{P}_i 的起点是原点,终点是像素点 i 。从图像坐标系 X 轴正方向开始逆时针将 0 到 π 的角度平均分为 M 份,向量 \mathbf{D}_j 表示第 j 份对应角度的单位方向向量。 \mathbf{P}_i 和 \mathbf{D}_j 的点积为 V_{ij} , V_{ij} 也称为向量 \mathbf{P}_i 在方向 \mathbf{D}_j 上的投影。容易得到所有像素点 $i=1,2,3,\dots,N$ 在方向 \mathbf{D}_j 上的投影集合 \mathbf{R}_j 。绘制 \mathbf{R}_j 的频数统计直方图,其组数为 S ,直方图横坐标为方向 \mathbf{D}_j 上的投影值,纵坐标为每个投影值区间的像素数目。

如果某一方向 \mathbf{D}_j 的直方图如图2所示,则方向 \mathbf{D}_j 平行于十字光斑的一个光条,把这样的方向 \mathbf{D}_j 记作称作 \mathbf{D}_L 。 \mathbf{D}_{L1} 和 \mathbf{D}_{L2} 分别表示十字光斑的两个光条的方向。图2中的图形呈脉冲形,其峰值段表示垂直于 \mathbf{D}_L 方向光条的像素投影值的所在区间和频数。理论上当处于 \mathbf{D}_{L1} 和 \mathbf{D}_{L2} 方向时,统计直方图中的峰值段有最短的区间长度 $[V_{Dmin}, V_{Dmax}]$ 。若十字光斑的两个光条截面的能量符合高斯分布,十字光斑中心点在 \mathbf{D}_L 方向的投影值 V_D 为 V_{Dmin} 和 V_{Dmax} 的均值。

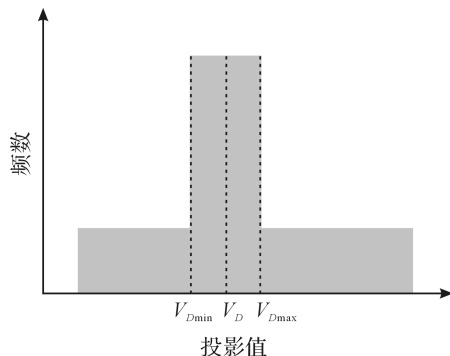


图2 十字激光沿 \mathbf{D}_L 方向上的频数统计直方图

考虑到钢板粗糙表面对激光的散射,实验中难以得到如图 2 所示的理想直方图,确定合适的 V_{Dmin} 和 V_{Dmax} 很困难。构建直方图的过程中,已经将属于十字光斑所有像素的投影,自最小投影值到最大投影值分为 S 个区间,每个区间都由其频数表示,这 S 个频数构成了一个数组。考虑到 K 均值聚类算法具有算法简单、运算量较小的特点,并且采用合适的初始策略可以得到较好分类结果^[16],因此对这个数组采用 K 均值聚类算法进行分两类运算。其中较大频数的聚类对应于垂直于投影方向的光条,进一步可以得到类内各频数对应的投影值区间,将其中的最小和最大投影值区间的中值视为 V_{Dmin} 和 V_{Dmax} 。考虑到 K 均值聚类算法对初始点敏感,并且待分类特征向量只有一个维度,故采用 maxmin 初始策略较为合适,即选取最大和最小频数作为两个聚类的初始中心点。

建立新坐标系,以 D_{L1} 方向为 X 轴, D_{L2} 方向为 Y 轴。在此坐标系下,十字光斑中心坐标是 (V_{D1}, V_{D2}) 。要得到图像坐标系下的十字光斑中心坐标,需获得从新坐标系到图像坐标系的变换矩阵。图像坐标系和新坐标系分别称作坐标系 1 和坐标系 2,光斑中心投影的坐标变换示意图如图 3 所示。

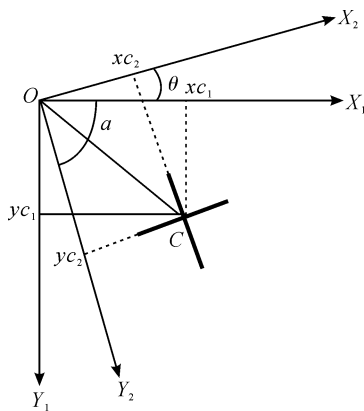


图 3 光斑中心投影的坐标变换

十字光斑中心点 C 在两个坐标系下的坐标分别为 (xc_1, yc_1) 和 (xc_2, yc_2) 。其中 (xc_2, yc_2) 即为 (V_{D1}, V_{D2}) , X_1 轴和 X_2 轴的夹角为 θ , X_1 和 Y_2 的夹角为 α , θ 和 α 互余。

可以利用坐标系旋转变换矩阵计算 C 点坐标,即 (xc_1, yc_1) 。令旋转变换矩阵为 T ,则 T 表示为式(1)。

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

光斑中心点 C 的坐标可用式(2)表示如下:

$$\begin{bmatrix} xc_1 \\ yc_1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} xc_2 \\ yc_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

综上所述,算法的完整流程如图 4 所示。

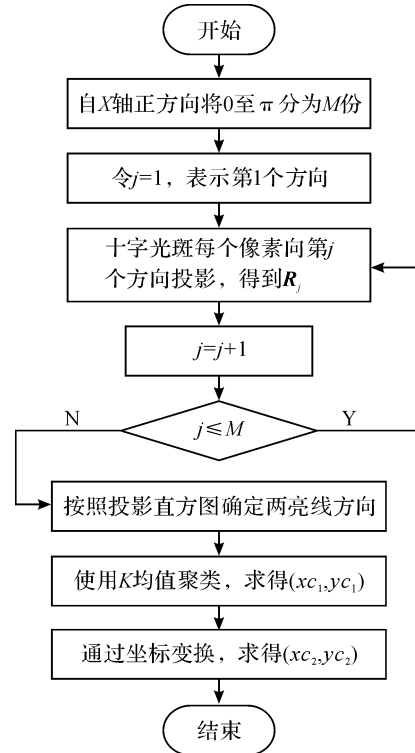


图 4 算法流程

3 光斑仿真及定位结果

通过计算机仿真得到有无液滴干扰两种情况下的十字光斑图像,并评估本文算法与直线拟合法的定位精度。使用光学仿真软件 TracePro 7.0,仿真时在激光器前设置整形透镜,激光器射出圆形光束半径为 2.5 mm,其波长为 650 nm,输出功率为 80 mW。激光源设置在距钢板表面 800 mm 处,入射方向垂直于钢板表面。得到仿真图像分辨率为 100×100 。参考刘源洞^[15]和 Sadao^[17]的实验数据,设置入射平面的材料特性和表面特性。用半椭球形的 BK7 光学玻璃珠表示钢板表面湿平整后遗存的液滴。

仿真所得光斑如图 5 所示,图 5(a)、(b)分别是有和没有液滴干扰的十字光斑图像。从图 5(b)可以看出液滴干扰下的十字光斑产生了明显的散射。

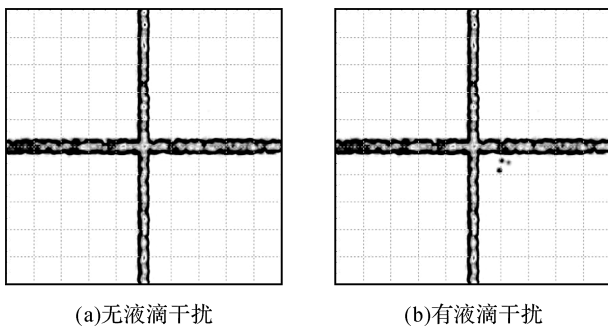


图5 有无液滴干扰时的十字光斑仿真

将光源中心设定在(50,50)的位置,再分别利用两种算法计算光斑中心点坐标,计算结果如表1所示。

表1 有无液滴干扰时两种十字光斑

坐标	参考值	算法中心定位结果		像素	
		无液滴干扰		有液滴干扰	
		本文算法	直线拟合法	本文算法	直线拟合法
X	50.00	50.17	49.81	50.23	53.54
Y	50.00	50.01	49.99	49.99	50.18

通过表1可以看出本文算法和直线拟合法在没有液滴干扰时都有着较高的定位精度,但直线拟合法对液滴干扰下的十字光斑中心定位存在显著误差,显示直线拟合法在液滴干扰下可能无法准确定位十字光斑中心。

4 实验与结果分析

4.1 实验设置

实验仪器的设置如图6所示。结构光源由波长为650 nm的半导体激光器与十字激光整形透镜构成。激光器的最大输出功率为100 mW,发散角小于3 mrad。采用CMOS工业相机采集图像,相机的主要参数如下:像面尺寸为10.1 mm×10.1 mm,单个像素尺寸为2.2 μm×2.2 μm;相机镜头为无畸变透镜组;采集图像分辨率为640×480。

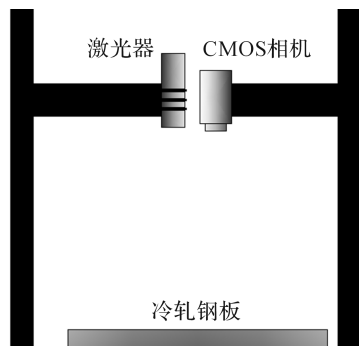


图6 实验装置示意图

结构光源设置为垂直于钢板平面入射,光源与竖直方向,即Z轴的夹角小于 $\pm 0.5^\circ$ 。钢板放置于实验台架上,其绕X轴的转角小于 $\pm 1^\circ$,绕Y轴的转角小于 $\pm 1^\circ$,如图7所示。

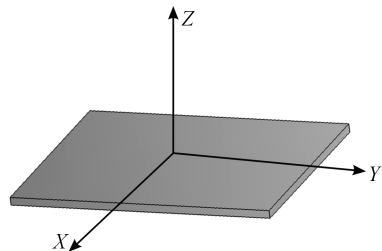


图7 钢板放置示意图

不同姿态十字光斑如图8所示。为验证本算法对不同姿态十字光斑中心定位的精度,待相机进入热稳定状态后采集100幅图像。光源的输出功率设定为约80 mW。算法中自X轴正方向开始0到 π 逆时针地均匀分成360份,即 $M=360$ 。自最小投影值至最大投影值均匀分为1000个区间,即 $S=1000$,构建统计直方图。

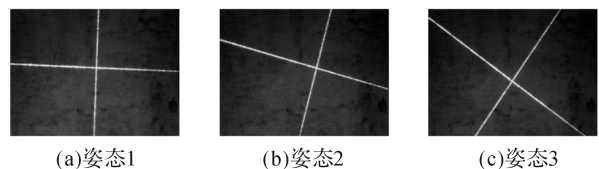


图8 不同位置不同姿态的十字光斑图像

在钢板表面选取5个半径为3 mm的圆形区域,如图9所示,在每个区域上分布一些液滴作为干扰,分别将十字光斑和点光斑中心调整到区域中,10 s内匀速拍摄20幅图片,反复进行3次拍摄。采用本文算法与直线拟合法计算液滴干扰下十字光斑图片中光斑中心的位置。同时采用重心法、平方加权质心法和高斯拟合法,计算点光斑中心位置。

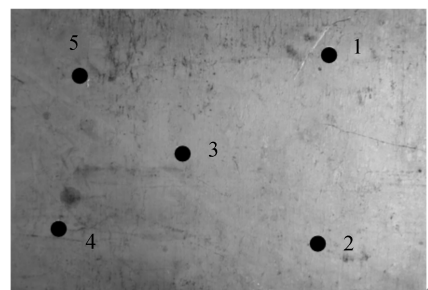


图9 5个有水滴干扰的拍摄区域分布

4.2 实验结果

对不同姿态的十字光斑,采用本文算法的定位结果如图 10 所示。图 10 展示从 100 幅拥有不同姿态的十字光斑的图像中选出的 9 幅图像,图中的星号代表定位结果。只有十字光斑的一条光条水平,另一条竖直时才能使用直线拟合法,本文算法则突破了这一限制。

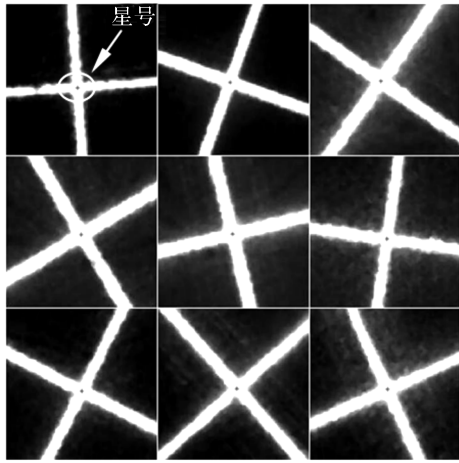


图 10 采用本文算法对不同姿态十字光斑的定位结果

图 11(a)所示为十字光斑在液滴干扰下直线拟合法的定位结果,两条虚线表示拟合得到的两条光条中心线,两虚线交点为定位结果,其明显偏离十字光斑中心。图 11(b)中星号为本文算法的中心定位结果,其定位准确。

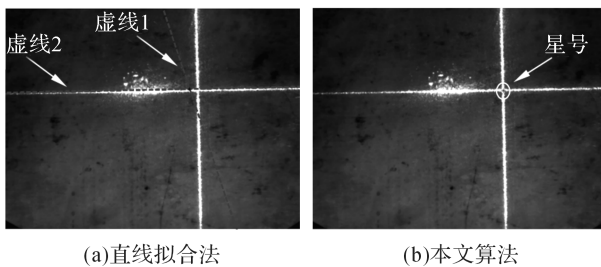
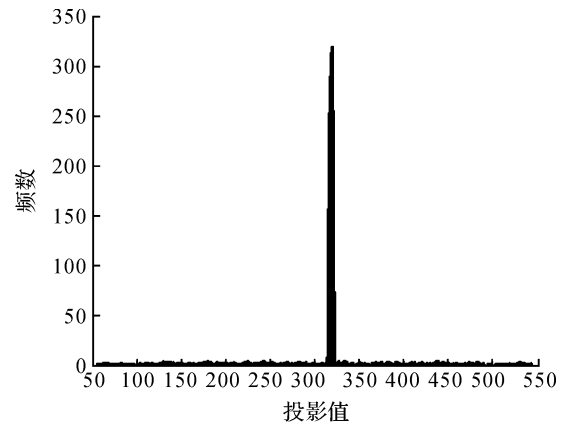


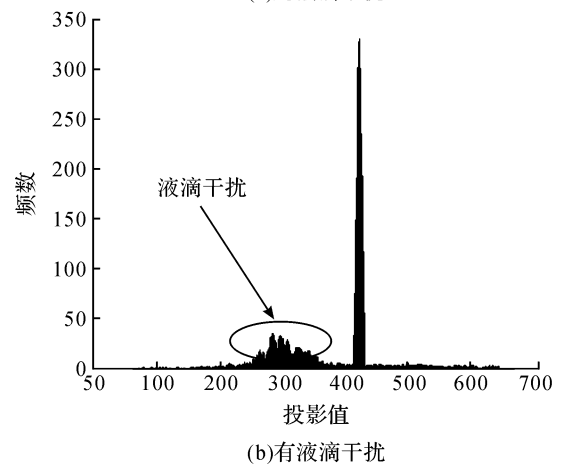
图 11 液滴干扰下两种十字光斑中心定位算法的结果

无液滴干扰时,图像中仅包含十字光斑和背景,十字光斑其中一条光条方向的投影直方图如图 12(a)所示。施加液滴干扰后,将其引起的散射视为加入图像的新图案。直线拟合法定位失败是因为在干扰下不能选取正确的点来参与拟合。本文算法同样受到散射产生的新图案的影响,图 12(b)为十字光斑的一条光条方向液滴干扰下的投影直方图。从图 12(b)可看出,光条方向上的投影因液滴亮斑而产生一个小波峰,这是因为水滴亮斑等价于扩大十字光斑的面积,并在局部改变了十字光斑的形态。但

由于液滴亮斑面积较小,其对统计直方图中液滴亮斑所属区间频数的影响难以影响 K 均值聚类算法的分类结果,故而保证了光斑中心定位的鲁棒性。



(a)无液滴干扰



(b)有液滴干扰

图 12 有无液滴干扰下某一光条方向上投影直方图

每处有液滴干扰的圆形区域得到十字光斑与点光斑的各 60 幅图像,用本文算法计算十字光斑中心坐标,用三种点光斑中心定位算法(重心法、平方加权质心法、高斯拟合法)计算点光斑中心坐标,计算得到每个区域每种算法的 99%置信度下的置信椭圆。为了获取置信椭圆,需首先求得光斑中心坐标的协方差矩阵,进一步计算协方差矩阵的特征值 λ_1 、 λ_2 与特征向量,并将特征向量单位化。假设光斑中心坐标在特征向量方向服从正态分布,则置信椭圆服从卡方分布,查得自由度为 2,置信水平为 99% 的卡方值为 9.21。若 $\lambda_1 > \lambda_2$,则置信椭圆的半长轴 a 与半短轴 b 可由式(3)、(4)得到。

$$a = \sqrt{9.21\lambda_1} \quad (3)$$

$$b = \sqrt{9.21\lambda_2} \quad (4)$$

这些置信椭圆的半长轴和半短轴及其均值如表 2 所示。

表2 各算法置信椭圆参数 像素

区域 编号	椭圆 参数	本文 算法	重心 法	平方加权 质心法	高斯 拟合法
1	半长轴	0.03	0.31	0.23	0.33
	半短轴	0.01	0.23	0.21	0.24
2	半长轴	0.18	0.53	0.48	0.47
	半短轴	0.05	0.51	0.38	0.36
3	半长轴	0.06	0.78	0.75	0.77
	半短轴	0.01	0.57	0.51	0.49
4	半长轴	0.19	0.61	0.51	0.46
	半短轴	0.01	0.32	0.28	0.31
5	半长轴	0.24	0.47	0.22	0.47
	半短轴	0.01	0.13	0.13	0.27
平均值	半长轴	0.14	0.54	0.44	0.50
	半短轴	0.02	0.35	0.30	0.34

本文算法在 99% 置信度下的置信椭圆平均面积, 分别只有重心法的 1.37%、平方加权质心法的 1.96% 和高斯拟合法的 1.54%。其定位的重复性精度得到了显著提升。

5 结 论

直线拟合算法对十字光斑姿态有限制, 同时在水珠干扰下也不能准确定位光斑中心。本文提出了基于十字光斑统计特征及 K 均值聚类的光斑中心定位算法, 该算法能够弥补上述直线拟合算法的缺陷。

液滴干扰下的重复定位实验表明, 本算法的置信椭圆只有三种常用点光斑算法的 1% 到 2%, 显示出本文算法在定位的重复性方面更加可靠。正因为采用本文算法光斑中心重复定位精度更高, 使十字激光作为激光三角法的光源体现出独到的优势。

参考文献:

- [1] FENG Z H, MIAO C Y, HAN M, et al. Study on ultrasonic automatic detection system of large steel plate [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 2140-2145.
- [2] 李博, 张清东, 张晓峰. 带钢平整轧制过程中板形缺陷的遗传和演变规律 [J]. 工程科学学报, 2015, 37(2): 231-237.
- [3] 苏涵, 任永杰, 杨凌辉, 等. 基于激光三角法的同步扫描形貌测量传感器 [J]. 传感技术学报, 2016, 29(12): 1791-

1796.

- [4] CAO M, WANG D D. The application of CCD pixel positioning subdivision in the reach of laser triangulation [J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2016, 11(1): 79-86.
- [5] 王拯洲, 许瑞华, 胡炳樑. 基于圆拟合的非完整圆激光光斑中心检测算法 [J]. 激光与红外, 2013, 43(6): 708-711.
- [6] DONG H J, WANG L. Non-iterative spot center location algorithm based on Gaussian for fish-eye imaging laser warning system [J]. Optik, 2012, 123: 2148-2153.
- [7] 杜文慧, 李秀军, 穆海玲, 等. 平整工艺对冷轧带钢表面性能的影响 [J]. 上海金属, 2014, 36(5): 49-53.
- [8] 张竞丹, 江武汉, 王瑞春. 十字激光图像的亚像素中心检测算法研究 [J]. 深圳信息职业技术学院学报, 2013, 11(3): 56-60.
- [9] 王培昌, 常治学. 十字线激光图像的快速边缘检测方法 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(30): 313-314.
- [10] YANG M M, HU X X, LI J. Research on fast extraction algorithm of cross line laser image center [C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Information Technology and Intelligent Transportation Systems, Xi'an. Springer, 2015: 139-152.
- [11] STEGER C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [12] SONG D, YUE K D, LI Z. A high efficiency algorithm of light stripe center extraction in 3D scanning system [C]//Computer Science & Network Technology (ICCSNT), 2013 3rd International Conference On, Dalian. IEEE, 2013: 1008-1011.
- [13] JAMES E H, ANDREY K, CYNTHIA L V. Modified Beckmann-Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles [J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 078002.
- [14] 于海山, 任宏光, 霍力君, 等. 小斜率近似在粗糙面激光散射 BRDF 计算中的应用 [J]. 光子学报, 2015, 44(6): 183-188.
- [15] 刘源洞. 基于图像处理的钢板表面缺陷成像优化与深度信息提取方法研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011: 33-36.
- [16] CELEBI M E, KINGRAVI H A, VELA P A. A comparative study of efficient initialization methods for the k-means clustering algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(1): 200-210.
- [17] SADA O A. Handbook on Optical Constants of Metals [M]. Singapore: World Scientific, 2012: 317-319.

Cross Laser Stripes Center Location Algorithm Based on Statistical Characteristics of Projection and K -Means Clustering Algorithm

MIAO Jiazhuang, HU Xuxiao, WU Feifan, LAN Guoqing, WU Yuecheng

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Laser triangulation which has a core issue of laser spot center location is widely applied in rolling steel flatness detection system. To overcome droplet interference in shape measurement of wet flattened steel plate and ensure the accuracy and robustness of laser spot center location, a cross laser stripes center location algorithm is proposed. The proposed method is to collect the projection values of all cross laser stripe pixels in different directions (project direction is uniformly distributed from 0 to π in the positive direction of the X axis of the image coordinate); then determine the projection value edge of laser stripe with K -means clustering algorithm by constructing frequency histogram; and lastly obtain the coordinate of cross laser stripes center via coordinate transformation between two coordinate system. Comparison of accuracy and robustness between the proposed method and linear fitting algorithm in cross laser stripes center location before and after droplet interference was made via computer simulation and experiment. The results show that the repeated center location results with the proposed method under the droplet interference are reliable, and the confidence ellipse area of a confidence coefficient of 99% is roughly equivalent to 2% of the three point laser center location methods on average. Hence, the proposed method is useful to locate the center of cross laser stripes accurately under the interference of droplet, and make cross laser achieve a better repeated location accuracy than point laser does.

Key words: cross laser stripes; statistical characteristics of projection; K -means clustering algorithm; robustness; center location

(责任编辑: 康 锋)