

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104437

基于 3D 视觉的风电塔筒焊缝检测系统设计^{*}

肖苏华¹ 乔明娟¹ 赖南英² 罗文斌² 刘普京¹ 曹应斌² 王志勇¹
(1. 广东技术师范大学机电学院 广州 510635; 2. 湖南恒岳重钢结构工程有限公司 衡阳 421300)

摘 要:为满足风电机组塔筒行业对焊缝外观质量缺陷检测高效性、精确性的需求,采用 3D 机器视觉技术研制了基于风电塔筒焊缝外观质量缺陷检测系统。首先,通过点云滤波、点云分割、点云精简对采集的点云数据进行预处理,确保后期缺陷评判的准确性;其次,对三维数据进行轮廓切片化处理以及断点拟合处理,得到轮廓特性;再次,采用递归粗提取改进算法提取特征点,进行缺陷评判,获得焊缝外观缺陷检测结果;最后,根据系统焊缝缺陷评判流程及标准,选取典型的焊缝样板进行焊缝宽度、焊缝错边以及焊缝直线度测试,焊缝检测精度可达 0.001 mm,速度为当前人工检测速度的 3 倍,检测结果表明,系统具备高准确性、高速度和高精度特性,能代替人工检测,具有良好的应用前景。

关键词: 机器视觉;风电塔筒;焊缝检测;高精运动;点云处理
中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Design of wind turbine tower weld detection system based on 3D vision

Xiao Suhua¹ Qiao Mingjuan¹ Lai Nanying² Luo Wenbin² Liu Pujing¹ Cao Yingbin² Wang Zhiyong¹
(1. College of Electromechanical Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510635, China;
2. Zhong-gang Steel Structure Engineering Co., Ltd. of Hunan Heng-yue, Hengyang 421300, China)

Abstract: In order to meet the demand of high efficiency and accuracy of weld appearance quality defect detection in wind turbine tower cylinder industry, the 3D machine vision technology was used to develop the weld appearance quality defect detection system based on wind turbine tower cylinder. First, the point cloud data was preprocessed by point cloud filtering, point cloud segmentation and point cloud simplification to ensure the accuracy of defect evaluation in the later stage. Secondly, the contour characteristics of 3D data were obtained by slice processing and breakpoint fitting. Thirdly, the improved recursive rough extraction algorithm was used to extract the feature points, and the defect evaluation was carried out to obtain the detection results of weld appearance defects. Finally, according to the evaluation process and standard of weld defects in the system, a typical weld sample is selected to test the weld width, weld dislocation and weld straightness. The weld detection accuracy can reach 0.001 mm, and the speed is 3 times of the current manual detection speed. The detection results show that the system has the characteristics of high accuracy, high speed and high precision, which can replace manual detection, and has a good application prospect.

Keywords: machine vision; wind power tower; weld detection; high precision movement; point cloud processing

0 引 言

近年来,全球风力发电行业迅速发展,风能就是当今社会重点关注的一种清洁能源,风电设备的制造以及风电技术的研发也备受关注^[1],我国也因为资源短缺、环境

污染等问题将风力发电列为国家重点项目^[2]。焊接工程是整个风电塔筒设计过程的关键,可以占到风机塔筒制作过程的 80%^[3],同时焊缝是焊接工程的重要组成部分^[4],为避免对焊缝力学性能产生不良影响,要求良好的塔筒焊缝没有裂纹、夹渣、气孔、鱼鳞纹、漏焊、烧穿、弧坑、咬边、未熔合等缺陷^[5]。因此,焊缝外观检测已经成

为塔筒生产过程中重要的检测工序,以此来保证焊接的质量。

在风电装备行业中,传统的焊缝质量检测手段有人工目测检测^[6]、超声波检测^[7-9]、红外热波检测^[10-11]、X射线检测^[12]等。人工目测检测方法存在对检测人员素质要求高、主观评判性强、检测精度低、效率慢、检测实时性能差等缺点^[13-14],使得检测效果不稳定;超声波检测对被检测面光洁度要求较高,表面不能有污物及附着层,在检测之前多数需要对塔筒及焊缝表面进行打磨,导致检测效率降低^[15];红外热波检测^[16]中图像对比度低,分辨细节能力差,成本高,价格昂贵;X射线检测由于焊缝图像采集过程中影响因素众多,自身存在噪声多、对比度低、检测底片难于长时间保存^[17]、焊缝图像纹理复杂、焊缝区域边缘比较模糊等特点^[18-19],致使现有的一些缺陷检测方法准确率过低,或是只适用于某些特定的焊缝图像,通用性较差^[20]。将3D视觉技术与精密运动控制系统有效融合,实现高效率、高精度、高稳定性的塔筒焊缝外观缺陷检测技术和自动化检测,能提升行业检测水平,推动行业进步。

1 系统总体设计

系统总体采用3D视觉技术和精密运动控制技术,如图1所示,2为塔筒,3为焊缝,7为工作台,10为工作台万向轮。系统主要包括3个主要模块,分别为基于激光的3D视觉传感器模块、运动控制模块和图像处理模块。其中,基于激光的3D视觉传感器模块包括视觉传感器4、相机支架5;运动控制模块包括:滚轮架1、滚轮架控制器8;图像处理模块为PC平台包括:显示器6、工控机主机(含检测软件)9。检测软件集成了滚轮架运动控制功能和3D视觉处理功能。视觉传感器4安装在相机支架5上,滚轮架1由滚轮架控制器8控制并带动塔筒匀速转动,此时传感器采集点云数据,经过一段时间后,塔筒停止转动,系统对采集的图像进行缺陷检测,最后显示检测结果并保存留档。滚轮架再次控制塔筒转动,如此循环,直至检测一圈结束为止。

滚轮架的控制采用运动控制卡发送信号控制变频器进行无极调速,实现塔筒的运动;采用Halcon视觉库开发图像处理模块,实现3D图像处理功能;采用Visual Studio开发检测系统总体软件,实现界面交互功能。

2 图像预处理及焊缝特征提取

2.1 视觉检测流程

视觉检测算法流程如图2所示,当系统连接相机之后,启动运动控制,采集数据,并判断是否有采集到数据。

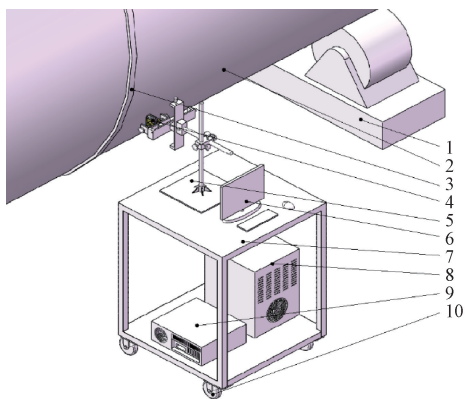


图1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system structure

若未采集到数据,则重新采集数据,若采集到数据,则进行点云数据预处理,去除噪声;其次,进行点云切片化处理,提取轮廓特征点;然后,计算特征值,根据预设的阈值,判断是否存在外观缺陷;最后三维重建,显示结果。

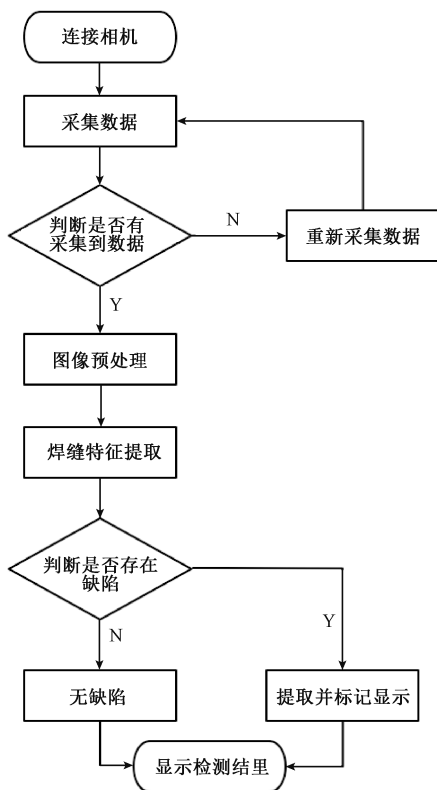


图2 视觉检测算法流程

Fig. 2 Flow of visual detection algorithm

2.2 图像预处理

1) 点云滤波

在高精度运动控制的前提下,激光相机采集的数据比较准确,但依旧存在各种噪点和离群点,而噪点将干扰

图像有用信息的提取,严重影响焊缝图像的处理效果,因此,需对点云数据进行滤波降噪处理。采用移动最小二乘法对点云进行滤波,其具有拟合精度高、通用性强的特点。对图像中的每个点 P ,采用移动最小二乘法拟合到 k -邻域,为达到更好的滤波效果,采用带 σ 参数的加权函数进行最小二乘滤波,具体函数如式(1)所示,其中 P' 为 P 的最邻近点。

$$w(P') = \exp(-\frac{\|P' - P\|^2}{\sigma^2})$$

(1)

对所有点都重复上述过程,所有点 P 均被投影到表面上,得到一个光滑的点集。但此时点集密度是随机分布的,为使得点云滤波后的点集适应点密度变化,设置相对应的加权参数,如式(2)所示,其中 σ_p 为每个点 P 的加权参数, σ_{rel} 是所有点的全局参数, $P_{\frac{k}{2}}$ 是点 P 的第 $\frac{k}{2}$ 邻居。

$$\sigma_p = \sigma_{rel} \|P_{\frac{k}{2}} - P\|$$

(2)

滤波处理后,点云数据变得更加平滑、密度均衡^[21],如图 3 所示。

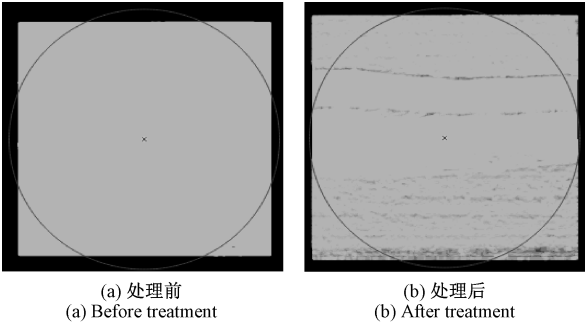


图 3 点云数据对比

Fig. 3 Comparison of point cloud data

2) 点云分割

点云分割是根据空间、几何和纹理等特征对点云进行划分,使得同一划分内的点云拥有相似的特征。点云的有效分割是焊缝特征描述和提取的前提,选择合适的阈值,可以最大限度的去除非必要数据同时保留必要数据。分割方法一般分为连通域分割和硬阈值分割。连通域分割为直接选择合适的阈值,得到合适的点云数据,处理后得到的数据如表 1 所示。硬阈值分割为点云数据进行表面三角化处理,通过输入的点云数据,由邻近的三元组成三角形面,采用贪婪三角剖分算法,处理后得到的数据如表 2 所示。

通过表 1 和 2 的对比,在大量点云数据的前提下,连通域分割处理速度明显更快,因此,采用连通域分割点云数据,以满足对数据快速处理的需求。

表 1 点云连通域分割数据的数目对比表

Table 1 Number comparison table of segmented data in point cloud connected domain

样板	处理前数据的数目	处理后数据的数目	处理时间/ms
1	1 701 055	1 684 944	77
2	1 686 555	1 671 382	57
3	1 713 408	1 698 532	85
4	1 446 180	1 426 349	32
5	1 699 154	1 683 981	43

表 2 点云硬阈值分割数据的数目对比表

Table 2 The number comparison table of point cloud hard threshold segmentation data

样板	处理前数据的数目	处理后数据的数目	处理时间/ms
1	1 701 055	1 701 055	476 663
2	1 686 555	1 686 550	228 515
3	1 713 408	1 713 048	147 030
4	1 446 180	1 446 100	453 085
5	1 699 154	1 699 150	516 765

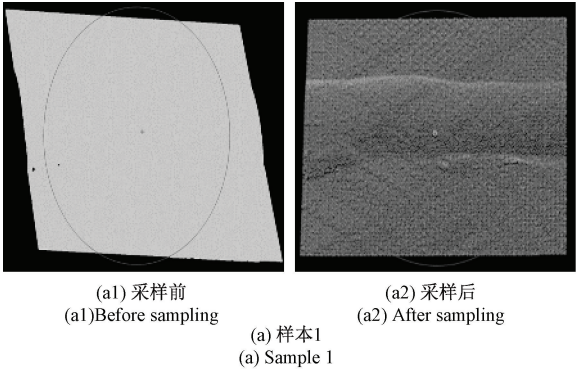
3) 点云精简

由于采集的数据庞大,在分割处理之后,需对数据进行采样精简,以减少点云数据,减轻后续算法的数据压力,提高后期三角剖分、截面切片化等算法处理速度,同时保持点云的形状特征。采用给定范围的球体内重心替代法(用给定范围内的三维立方体的重心近似替代三维立方体内的所有点云),精确快速地精简点云。采样处理数据数目对比如表 3 所示,采样三维图对比如图 4 所示。

表 3 点云采样数据数目对比表

Table 3 Comparison table of point cloud sampling data numbers

样板	处理前数据的数目	处理后数据的数目
1	1 713 408	15 371
2	1 709 115	15 223
3	1 698 532	15 371
4	1 426 349	12 747
5	1 683 981	14 745



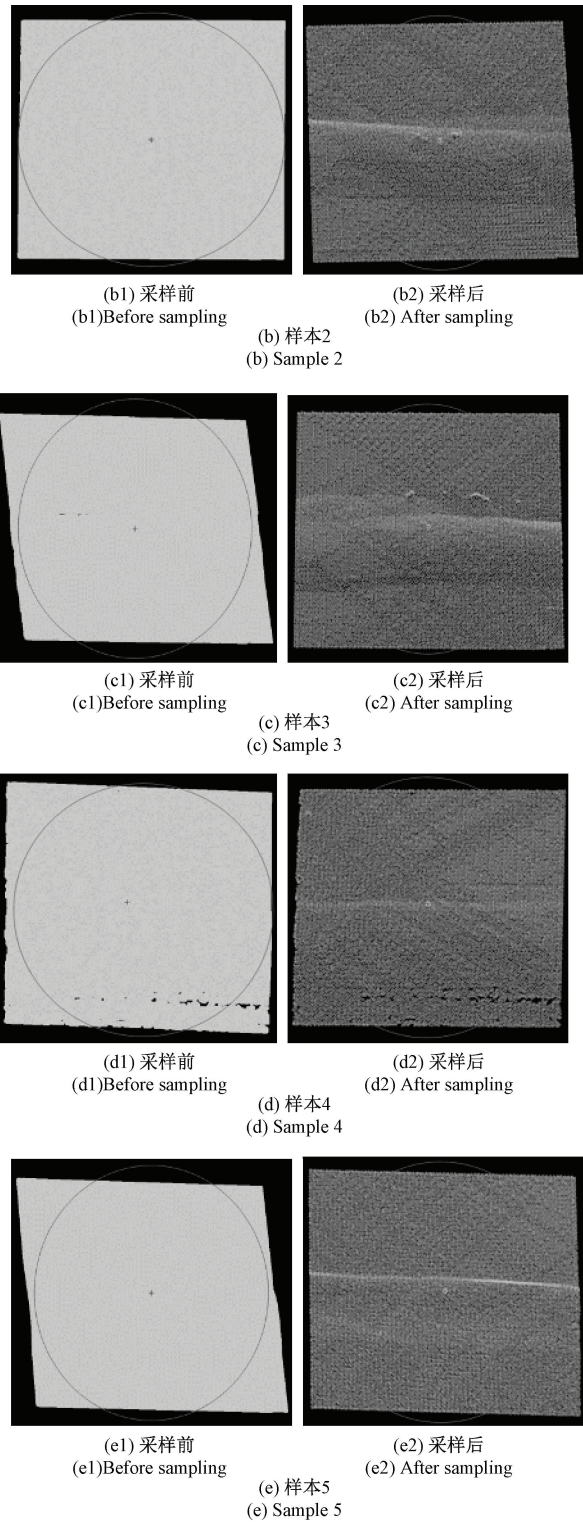


图 4 采样三维图对比

Fig. 4 Comparison of sampling 3D graph

2.3 焊缝特征的提取

上述图像预处理为后续的焊缝外观特征提取提供了条件,而焊缝成形尺寸是焊缝外观特征的重要参数,通过

对焊缝成形尺寸的测量可以判断焊缝成形的质量。不同的焊接方法以及不同的施焊形式对焊缝成形尺寸有不同的要求,具体要求如表 4 所示。

表 4 焊缝成形尺寸
Table 4 Line size of weld

焊接方法	施焊形式	焊缝宽度	焊缝余高	焊缝边缘 直线度 f*	焊缝错 边量
埋弧焊	I 型焊缝	$b+14\sim20$	1~3	≤ 3	$\leq \delta/5$ (且不大 于 3 mm)
	非 I 型焊缝	$g+4\sim8$	1~3	≤ 3	
手工电弧焊及 气体保护焊	I 型焊缝	$b+6\sim10$	平焊 1~3	≤ 3	
	非 I 型焊缝	$g+4\sim8$	其余 1~4	≤ 3	

注: b 为对接间隙; g 为坡口宽度; * 表示任意 300 mm 长度内; δ 为板料厚度

1) 三角剖分、切片化截面生成

为获得焊缝特征信息,采用三角剖分、切片化截面生成焊缝截面轮廓,实现从三维空间到二维空间的转换,以便后续焊缝特征点的提取,步骤如下。

(1) 考虑到切片化截面生成必须为三角剖分的三维模型,因此先对精简化的点云数据创建表面三角剖分。

(2) 获取包含三角剖分的三维模型在三维空间中的位姿,创建与位姿垂直相交的平面(平面亦需要进行三角剖分处理),进行截面截取,获得交线轮廓,如图 5 所示。

(3) 将获取的交线轮廓投影到 YOZ 轴,实现从三维空间转换到二维空间,实现降维处理。

(4) 在新生成的二维空间中,原三维空间的 Y 值数据转换为二维空间的 X 轴数据,原三维空间中的 Z 值数据转换为二维空间的 Y 轴数据。

(5) 得到焊缝截面模型轮廓亚像素轮廓(eXtended line descriptions, XLD)。

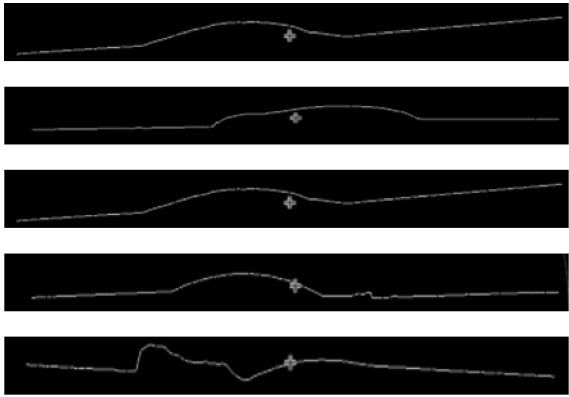


图 5 交线轮廓图

Fig. 5 Intersecting line profile

由于焊缝存在一定的缺陷,在进行交线轮廓投影时,会出现断点、断线的现象,如图 6 所示,需将轮廓进行拟合及提取处理,处理后的效果如图 7 所示。

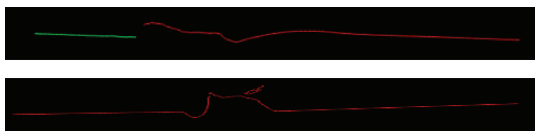


图6 断点交线轮廓

Fig. 6 Intersecting line outline of breakpoint

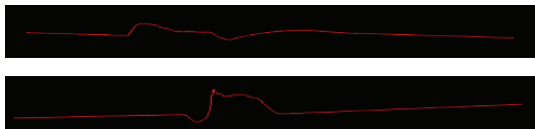


图7 拟合断点交线轮廓

Fig. 7 Fit the contour of the intersecting line of the breakpoint

2) 特征点选取

为实现焊缝成形尺寸的测量,需进一步将焊缝截面交线轮廓 XLD 中的特征点提取出来。

采用递归粗提取改进算法提取特征点, XLD 轮廓点集为 $P_i | (X_i, Y_i), i = 0, 1, 2, \dots, n \}$, 轮廓的初始点为 P_0 , 终止点为 P_n , P_2 , P_1 , P_3 分别为焊缝左端点、焊缝最高点、焊缝右端点, 如图 8 所示。

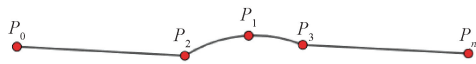


图8 焊缝特征点示意图

Fig. 8 Schematic diagram of weld characteristic points

递归粗提取改进算法实现的方式如下所示: 点 P_1 为 XLD 轮廓 $| P_0 P_n |$ 点集到直线 $P_0 P_n$ 距离最大的点, 点 P_2 为 XLD 轮廓 $| P_0 P_1 |$ 点集到直线 $P_0 P_1$ 最大距离的点, 点 P_3 为 XLD 轮廓 $| P_1 P_n |$ 点集到直线 $P_1 P_n$ 最大距离的点。

计算点到直线的距离, 假设已知点为 (X_0, Y_0) , 及直线的两点 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) , 则存在:

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1} \quad (3)$$

即:

$$(Y_2 - Y_1)(X - X_1) = (Y - Y_1)(X_2 - X_1) \quad (4)$$

$$(Y_2 - Y_1)X + (X_1 - X_2)Y + X_1(Y_1 - Y_2) + Y_1(X_2 - X_1) = 0 \quad (5)$$

根据直线方程的一般式可得:

$$A = Y_2 - Y_1 \quad (6)$$

$$B = X_1 - X_2 \quad (7)$$

$$C = X_1(Y_1 - Y_2) + Y_1(X_2 - X_1) \quad (8)$$

再根据点到直线的距离公式, 可计算点到直线的距离:

$$\frac{|Ax_0 + By_0 + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (9)$$

通过式(9)可求得点到直线的最大距离, 最大距离点即为特征点, 特征点提取的效果如图 9 所示。

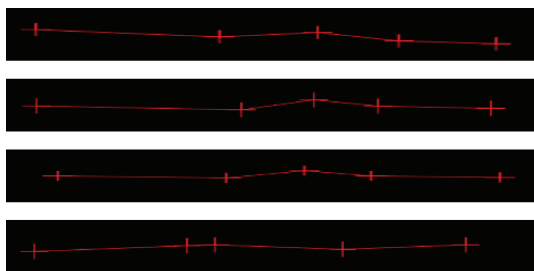


图9 特征点选取效果

Fig. 9 Selection effect of feature points

3) 计算距离、评判缺陷

针对提取的焊缝特征点, 并结合焊缝成形尺寸的定义, 可以计算出焊缝几何特征参数, 具体过程如下。

焊缝宽度 (D_{weld}) 为 P_3 与 P_2 的 Y 值的差值, 即:

$$D_{weld} = Y_3 - Y_2 \quad (10)$$

错边 (Mis_{weld}) 为 P_3 与 P_2 的 X 值的差值, 即:

$$Mis_{weld} = X_3 - X_2 \quad (11)$$

直线度 (Str_{weld}) 为前后 Y 值的差值, 本系统计算为任意 100 mm 内的直线度, 其中 m 为切片循环次数, 左右直线度求法一致, 以左直线度为例, 左直线度为 P_2 的 Y 值切片循环最后一次的数值与第一次数值的差值, 即:

$$Str_{weld} = Y_m - Y_1 \quad (12)$$

3 数据选取与实验分析

3.1 样本选择

为验证算法的可行性, 选择了塔筒焊接最常见使用的 5 块钢板焊缝块, 其几何规格为 119 mm × 91 mm × 10 mm, 母材与母材之间的对接间隙 b 为 10 mm, 实物如图 10 所示。

3.2 系统焊缝缺陷评判流程及标准

焊缝缺陷判断总流程如图 11 所示, 系统可判断直线度缺陷、宽度缺陷、咬边缺陷以及错边缺陷。直线度缺陷判断流程及标准如图 12 所示; 焊缝宽度缺陷判断流程及标准如图 13 所示 (b 为母材与母材之间的对接间隙); 此外, 图 13 可判断咬边缺陷; 错边缺陷判断流程如图 14 所示 (δ 为母材厚度)。

3.3 样本数据检测结果及人工检测结果对比

系统每隔 10 mm 截取一条轮廓线, 获取特征值并计算焊缝相关几何尺寸, 同时为了便于体现系统检测所耗费的时间, 以 5 块样板在相同轮廓线上检测所耗费时间的均值作为系统检测时间。

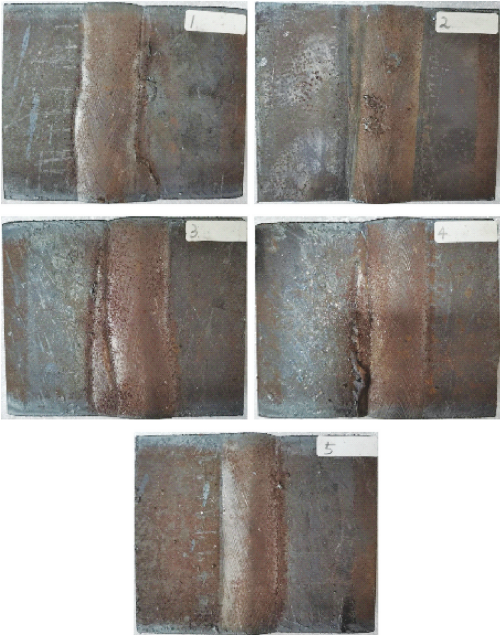


图 10 焊缝数据样本实物
Fig. 10 Physical of weld data sample

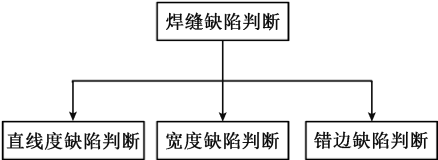


图 11 焊缝缺陷判断总流程
Fig. 11 General flow of weld defect judgment

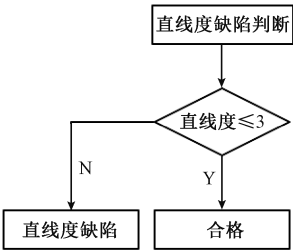


图 12 焊缝直线度缺陷判断流程
Fig. 12 Flow of judgment of weld straightness defects

1) 数据测量结果

系统检测的焊缝宽度结果如表 5 所示,人工检测的焊缝宽度如表 6 所示。

系统检测的焊缝错边如表 7 所示,人工检测的焊缝错边如表 8 所示。

系统检测的焊缝直线度如表 9 所示,由于人工检测的直线度一般用肉眼观察,故不在此显示。

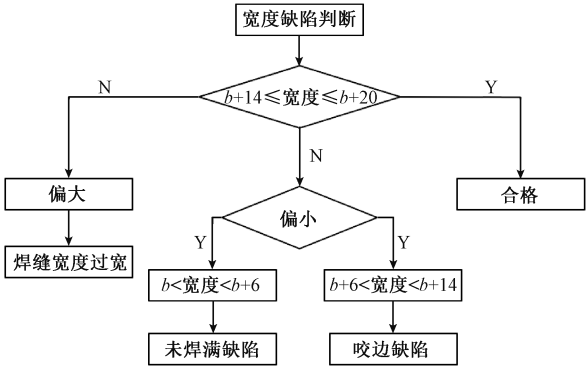


图 13 焊缝宽度缺陷判断流程
Fig. 13 Flow of weld width defect judgment

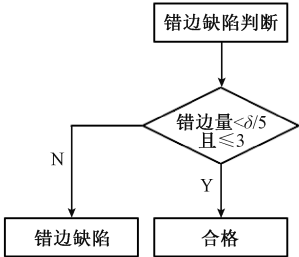


图 14 焊缝错边缺陷判断流程
Fig. 14 Flow of judgment of weld misalignment defects

表 5 系统测得的焊缝宽度						
Table 5 Weld width measured by the system						
轮廓线	样板 1	样板 2	样板 3	样板 4	样板 5	检测时间/s
1	38.822	31.853	41.034	25.255	25.080	7.544
2	33.571	32.693	40.225	27.791	25.393	7.521
3	33.477	33.678	38.224	36.310	25.582	7.449
4	33.707	32.782	37.313	36.689	24.592	7.396
5	30.986	33.528	34.583	35.354	25.501	7.284
6	29.153	34.416	34.583	35.303	26.078	7.435
7	28.246	35.435	29.121	33.817	24.593	7.667
8	28.720	35.962	28.241	30.623	24.534	7.515
9	27.709	36.891	28.212	28.376	26.330	7.509

表 6 人工检测的焊缝宽度						
Table 6 Width of welding seam inspected manually						
轮廓线	样板 1	样板 2	样板 3	样板 4	样板 5	检测时间/s
1	39.14	31.15	41.17	25.35	24.06	30
2	33.26	32.52	40.26	27.18	25.65	30
3	33.30	32.74	38.12	35.71	25.83	30
4	33.36	32.40	36.23	35.41	25.97	30
5	30.16	32.22	35.35	35.17	25.68	30
6	28.40	34.64	35.22	35.32	26.06	30
7	27.70	35.34	28.23	32.23	25.11	30
8	27.73	35.54	28.64	29.92	24.77	30
9	27.70	36.11	27.62	27.81	25.92	30

表 7 系统测得的焊缝错边

Table 7 Weld misalignment detected by the system						
轮廓线	样板 1	样板 2	样板 3	样板 4	样板 5	检测时间/s
1	1.585	1.133	-0.950	-1.948	2.012	9.043
2	1.494	1.262	-0.915	-1.251	2.017	8.629
3	1.531	1.307	-0.992	-0.911	1.995	8.947
4	1.660	1.308	-0.966	-1.135	2.008	9.036
5	1.857	1.446	0.507	-0.849	2.078	8.361
6	1.266	1.517	-0.309	-1.064	2.054	8.555
7	1.992	1.677	0.802	-1.085	2.210	9.656
8	2.242	1.725	-0.558	-0.982	2.171	8.873
9	2.797	1.772	-1.146	1.233	2.180	9.200

表 8 人工测得的焊缝错边

Table 8 Welding seam misalignment measured manually						
轮廓线	样板 1	样板 2	样板 3	样板 4	样板 5	检测时间/s
1	1.3	1.2	-1.0	-2.0	2.0	30
2	1.2	1.2	-0.9	-1.2	2.0	30
3	1.3	1.2	-0.8	-0.8	2.0	30
4	1.8	1.5	-1.0	-1.0	2.0	30
5	1.5	1.9	0.5	-0.8	2.0	30
6	1.2	1.5	-0.3	-0.9	2.0	30
7	1.8	1.6	0.8	-0.9	2.2	30
8	2.8	1.7	-0.5	-1.0	2.0	30
9	2.9	1.8	-1.2	1.0	2.0	30

表 9 系统测得的焊缝 100 mm 内直线度

Table 9 The straightness of welds within 100 mm measured by the system					
位置	样板 1	样板 2	样板 3	样板 4	样板 5
左	9.047	7.761	5.088	15.879	1.805
右	9.715	1.671	0.825	5.170	0.969

2) 结果分析

焊缝宽度检测结果如图 15 所示;焊缝错边检测结果如图 16 所示。

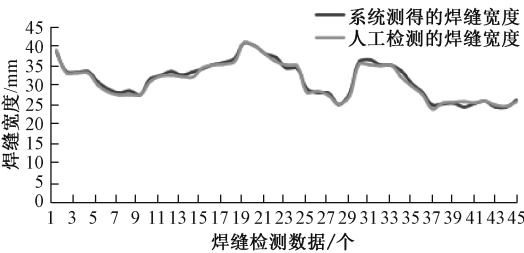


图 15 焊缝宽度检测结果

Fig. 15 Test results of weld width

从表 5~8 中得出,利用机器视觉检测系统的精度可以保留到小数点后 3 位,高于人工使用测量工具检测保留到小数点后一位或两位,使得系统在检测精度上得到

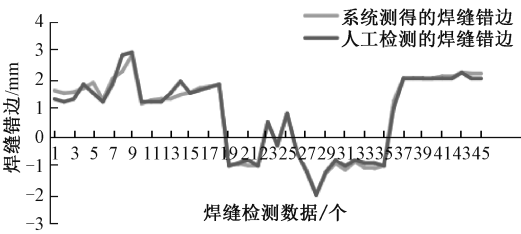


图 16 焊缝错边检测结果

Fig. 16 Testing results of weld misalignment

保障;同时,系统检测所需时间较短,检测时间可缩短为人工检测时间的 1/3,使得系统检测在效率方面得到大幅度的提高。从图 15 和 16 得出,系统与人工检测结果一致稳定,进一步验证了系统测量结果的准确性和稳定性。

4 结 语

针对目前风电塔筒焊缝外观缺陷检测的效率低、精度低的情况,本文基于 3D 视觉技术,提出先通过点云数据三角剖分、切片化截面生成等以快速获得焊缝缺陷三维特征,再采用递归粗提取改进算法提取特征点,进行缺陷类型的评判。由于焊缝缺陷类型繁多,当前系统的几何尺寸缺陷检测准确度高,而焊瘤、焊渣缺陷的检测准确度不高,后续研究中,将对更多的缺陷进行特征检测及识别,以提高系统的普适性,促进风电塔筒焊缝外观检测自动化水平的提升。

参考文献

[1] 林键. 风力发电及其控制技术新进展探究[J]. 中国设备工程, 2021(13): 221-223.
LIN J. Research on new progress of wind power generation and control technology[J]. China Equipment Engineering, 2021(13): 221-223.
[2] 王月普. 风力发电现状与发展趋势分析[J]. 电力设备管理, 2020(11): 21-22.
WANG Y P. Current situation and development trend analysis of wind power generation[J]. Power Equipment Management, 2020(11): 21-22.
[3] 匡晓龙, 钟华兵, 杨庆. 风机塔筒焊缝相控阵超声检测工艺研究[J]. 无损检测, 2020, 42(2): 52-55, 60.
KUANG X L, ZHONG H B, YANG Q. Research on phased array ultrasonic testing technology for weld seam of wind turbine cylinder[J]. Nondestructive Testing, 2020, 42(2): 52-55, 60.
[4] 吴海宏, 章鹏, 华绪银. 提高风电塔筒焊缝外观质量[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(4): 80-84.
WU H H, ZHANG P, HUA X Y. To improve the

- appearance quality of welding seam of wind power tower drum [J]. Water Conservancy Construction and Management, 2015, 35(4): 80-84.
- [5] 王飞, 朱建江. 机器视觉在复杂环境下焊接缺陷检测的应用研究[J]. 焊接技术, 2017, 46(5): 127-133.
WANG F, ZHU J J. Research on application of machine vision in welding defect detection under complex environment[J]. Welding Technology, 2017, 46(5): 127-133.
- [6] 安康. 焊缝外观的自动检测及质量评估方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
AN K. Study on automatic inspection and quality evaluation method of weld appearance[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [7] MURTA R H F, VIEIRA F A, SANTOS V O, et al. Welding defect classification from simulated ultrasonic signals[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(3): 1-10.
- [8] 夏乐希, 王建国. 建筑钢结构焊缝超声波检测技术探析[J]. 工程技术研究, 2016(5): 44, 55.
XIA L X, WANG J G. Analysis on ultrasonic detection technology of welding seam of building steel structure [J]. Engineering Technology Research, 2016(5): 44, 55.
- [9] 宋寿鹏, 乔梦丽. 基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷超声检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 246-254.
SONG SH P, QIAO M L. Research on ultrasonic detection method of plate weld defects based on NLFM Barker code[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 246-254.
- [10] PARK H, CHOI M, PARK J, et al. A study on detection of micro-cracks in the dissimilar metal weld through ultrasound infrared thermography [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62: 124-131.
- [11] 褚慧慧. 基于视觉的焊缝质量检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
CHU H H. Research on inspection technology of weld quality based on vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [12] 刘辉, 万文, 熊震宇. X 射线焊缝图像的缺陷检测与识别技术[J]. 电焊机, 2017, 47(4): 89-93.
LIU H, WAN W, XIONG ZH Y. Defect detection and identification technology of X-ray weld image [J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(4): 89-93.
- [13] 范力予. 工业焊缝形貌的线激光三维识别检测算法的研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
FAN L Y. Study on line laser 3D recognition and detection algorithm for industrial weld morphology[D]. Taiyuan: North University of China, 2016.
- [14] 高智威, 陈玉铎. 压力容器焊缝的外观检验[J]. 黑龙江科技信息, 2015(34): 6.
GAO ZH W, CHEN Y D. Visual inspection of pressure vessel welds [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(34): 6.
- [15] 常海. 基于声发射的风电塔筒缺陷诊断监测技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
CHANG H. Research on fault diagnosis and monitoring technology of wind turbine tube based on acoustic emission [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [16] 申耀华. 基于机器视觉的拼装结构件焊缝表面缺陷检测算法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
SHEN Y H. Research on inspection algorithm of weld surface defect of assembly structure based on machine vision [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019.
- [17] 安博, 徐伟, 张晓军, 等. 无损检测技术在轨道车辆转向架焊接生产中的应用[J]. 铁路技术创新, 2019(2): 19-22.
AN B, XU W, ZHANG X J, et al. Application of nondestructive testing technology in welding production of rail vehicle bogie [J]. Railway Innovation Technology, 2019(2): 19-22.
- [18] JIANG H, ZHAO Y, GAO J. Adaptive pseudo-color enhancement method of weld radiographic images based on HSI color space and self-transformation of pixels[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(6): 107-112.
- [19] 王思宇, 高炜欣, 张翔松. X 射线焊缝图像缺陷检测算法综述[J]. 热加工工艺, 2020, 49(15): 1-8.
WANG S Y, GAO W X, ZHANG X S. Review of X-ray weld image defect detection algorithms[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(15): 1-8.
- [20] 熊涛. X 射线焊缝图像的缺陷检测与识别技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
XIONG T. Research on defect detection and recognition technology of X-ray weld image [D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [21] 肖艳军, 齐浩, 周围, 等. 锂电池极片轧机轧辊表面缺陷检测与识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 148-156.
XIAO Y J, QI H, ZHOU W, et al. Roll surface defect detection and identification for lithium battery pole sheet mill [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 148-156.

作者简介



肖苏华, 2004 年于广西大学获得硕士学位, 2008 年于华南理工大学获得博士学位, 现为广东技术师范大学教授, 主要研究方向为机器视觉、机电一体化系统。

E-mail: suhuaxiao@126.com

Xiao Suhua received his M. Sc. degree from Guangxi University in 2004 and Ph. D. degree from South China University of Technology in 2008. Now he is a professor at Guangdong Polytechnic Normal University. His main research interests include machine vision and mechatronics systems.



罗文斌(通信作者), 2016 年于国家开放大学获得学士学位, 现为湖南大学在读研究生, 湖南恒岳重钢钢结构工程有限公司工程师, 主要研究方向为塔筒制造。

E-mail: 479184594@qq.com

Luo Wenbin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from the Open University of China in 2016. Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University, and he is an engineer of Zhong-gang steel structure engineering Co., Ltd. of Hunan Heng-yue. His main research interest includes tower tube manufacturing.