

狭小空间内基于线激光的枕簧缺口视觉间接定位

刘桓龙^{1,2}, 李大法^{1,2*}, 周建义^{1,2}, 魏涛^{1,2}¹先进驱动节能技术教育部工程研究中心, 四川 成都 610031;²西南交通大学机械工程学院, 四川 成都 610031

摘要 针对转向架侧架空间狭小以及不确定光照条件下难以通过传统的视觉系统及算法实现枕簧端面缺口定位的问题, 本团队提出了一种基于线激光光斑特征的枕簧缺口视觉间接定位方法。通过对 K6 型转向架承载弹簧和减振弹簧这两类枕簧外簧第一、第二层簧圈的尺寸特征进行分析, 并采用最小二乘法拟合尺寸数据, 分别建立了两类枕簧簧圈高度比值与枕簧端面缺口方位对应关系的数学模型。采用 YOLOv3-tiny 目标检测算法实现了复杂背景下枕簧的检测与感兴趣区域(ROI)的分割, 基于阈值分割和边界框拟合算法提出了激光光斑高度自适应求解方法, 该方法提升了定位方法的灵活性。试验结果表明, 所提方法的定位精度在 $-5^{\circ} \sim +5^{\circ}$ 以内, 单次定位时间不超过 0.15 s, 而且对光照强度的变化具有很强的鲁棒性。

关键词 测量; 枕簧缺口; 线激光; YOLOv3-tiny 目标检测算法; 视觉定位; 鲁棒性

中图分类号 U279.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1704002

1 引言

枕簧是铁路货车减振装置的关键零部件之一, 由内簧和外簧组成, 通常安装在转向架侧架内部的狭小空间中。在列车运行过程中, 枕簧直接暴露于外界环境, 交变载荷、煤渣碳粉、日晒雨淋等不确定因素常使枕簧出现裂纹、大变形、大磨损等一系列损伤^[1], 这些损伤的积累会对列车的运行速度、运行安全性具有直接影响。因此, 定期进行铁路货车枕簧的检修至关重要^[2]。

在对枕簧进行检修时, 需要将内外弹簧组从侧架中拆卸取出, 检修完毕后再将其安装回原来的位置。目前, 枕簧的拆卸均通过人工倾斜扳倒取出的作业方式完成, 极其有限的侧架空间使得枕簧在扳倒过程中易出现与侧架内腔上方的定位销相撞甚至卡死, 导致枕簧无法顺利取出的情况。检修人员通常通过目视判断枕簧外簧上端面缺口位置, 并手动将缺口转动至定位销正下方, 以避免碰撞、卡死的情况发生, 但该方式的劳动强度较大, 而且作业效率低下。因此, 研发一套适用于狭小空间枕簧的智能拆卸装备来替代人工作业具有一定的实用价值。目前, 狭小空间以及不确定光照条件下的枕簧端面缺口定位是亟待解决的关键技术难点。

近年来, 随着机器视觉技术的日益完善和成熟, 其在工业领域的识别和定位应用变得越来越广泛。文

献[3]基于机器视觉提出了一种无故障枕簧目标图像识别方法, 解决了货车枕簧丢失故障的自动识别问题。文献[4]采用 SURF 局部特征描述子完成了复杂背景下日常生活用品的目标识别与定位, 并结合基于图像的视觉伺服技术实现了日常生活用品的抓取。文献[5]基于模板匹配算法设计了一种新型的计算机视觉管线, 实现了射频拉远单元电源端口的识别和图像流跟踪。线激光以其方向性好、亮度高、单色性和抗干扰能力强等优点^[6]在检测技术领域获得了广泛应用。文献[7]基于液晶偏振光栅提出了一种实现光学边缘检测的新方法。文献[8]利用三个线结构激光传感器在轮胎表面形成的三条特征曲线确定了车轮的空间位置。文献[9]将基于结构光的激光三角法应用于沥青路面构造深度检测, 结合相机采集的图像, 利用相关阈值分割算法实现了亚像素级的质心定位。为了实现焊接机器人焊枪定位与焊缝走向的识别, 文献[10]提出了一种交叉式双条纹激光传感方式, 并根据该传感方式下双条纹激光间距与焊枪高度关系的理论模型, 快速地实现了焊枪的准确定位。文献[11]利用线激光检测车轮踏面的轮廓圆弧特征, 验证了所提方法在光散射和局部变形等因素产生邻近离群点条件下的有效性。为了改进选煤厂水泵闸板阀开度调节的作业方式, 文献[12]基于模板匹配算法提出了一种闸板阀开度的线激光辅助视觉监控方法, 并采用该方法实现了不同亮度背景条件下闸板阀的准确定位。类似地, 文

献[13-15]在焊缝识别^[13]、水下三维测量^[14]、激光光斑中心定位^[15]方面均取得了良好的应用效果。

线激光结合图像处理技术在特征检测和目标定位上的显著优势,为狭小空间以及不确定光照条件下的枕簧端面缺口定位提供了研究思路。枕簧由不同旋向的分离的内外螺旋弹簧组成,且服役转向架的状态差异较大。枕簧端面上部极其有限的作业空间使得无法直接对其端面缺口进行精确定位。经过调研分析发现,目前暂无相关文献针对狭小空间中具有复杂几何特征的枕簧开展定位研究的报道。基于上述背景,本团队针对枕簧这一全新研究对象,通过分析外簧的结构特征以及采集第一、第二层簧圈的高度数据,发现了簧圈高度与端面缺口方位的变化规律,然后基于最小二乘法建立承载弹簧和减振弹簧两类枕簧簧圈高度与缺口方位对应关系的数学模型;将基于线激光的视觉系统用于枕簧缺口定位,结合 YOLOv3-tiny 目标检测、阈值分割和边界框拟合算法提出了一种簧圈高度自适应求解方法;基于簧圈高度自适应求解方法以及簧圈高度与缺口对应关系的数学模型,提出了一种适用于狭小空间的枕簧缺口视觉间接定位方法;通过试验探讨了不同方位下应用该方法进行枕簧端面缺口定位的精度、效率以及该方法对光照变化的鲁棒性。

2 线激光视觉系统

线激光视觉测量是非接触式测量中获取物体表面特征信息最常用的方法之一^[16],其系统主要由线激光发射器、网络摄像头和安装支架组成,如图 1 所示。线激光发射器和网络摄像头保持固定的安装距离,且与被测物体表面形成一定的倾斜角度。系统工作时,首先由线激光发射器向被测目标方向投射出一个散射的激光平面,激光平面在与被测物体表面相交处形成一条明亮的光斑;然后用网络摄像头采集视野中的被测物体及其表面的光斑图像,图像平面上的明亮光斑包

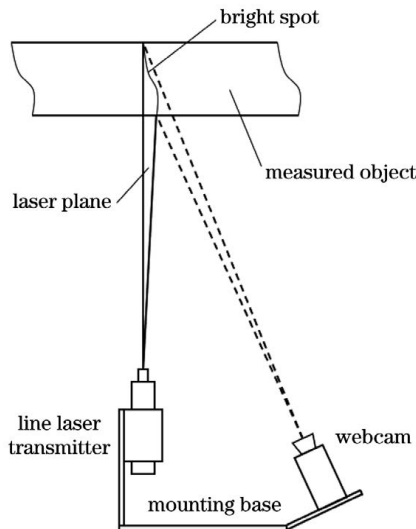


图 1 线激光视觉系统示意图

Fig. 1 Schematic of line laser vision system

含了被测物体表面与激光平面相交线所在平面的三维信息;最后通过建立相关的几何数学模型即可计算得到被测物体的表面特征数据。

3 枕簧簧圈高度与缺口方位的关系

3.1 理论分析

枕簧的内外簧为旋向不同的空间螺旋弹簧。为了建立外簧簧圈高度与端面缺口方位的对应关系,本节针对左旋的外簧展开讨论分析。图 2 展示了外簧的螺旋结构,可以看出簧圈截面的中心线为一条空间曲线。枕簧端部第一层簧圈均经过了磨平处理。文献[17]在自然坐标系下对上述空间曲线的理论方程进行了描述。空间螺旋曲线示意图如图 3 所示。

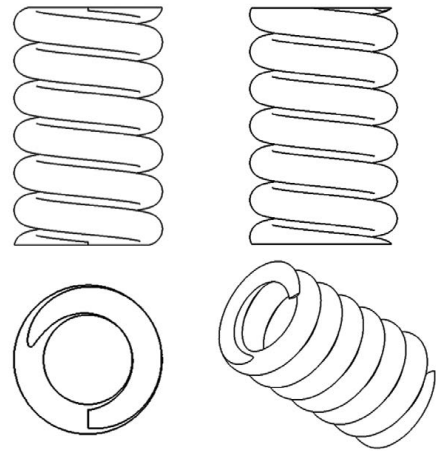


图 2 外簧螺旋结构

Fig. 2 Helical structure of outer spring

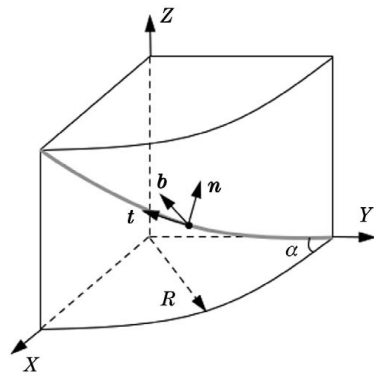


图 3 空间螺旋曲线示意图

Fig. 3 Schematic of space helical curve

根据 Frenat 公式^[17]可以得到

$$\begin{cases} \frac{dt}{ds} = \kappa n \\ \frac{dn}{ds} = -\kappa t + \tau b \\ \frac{db}{ds} = -\tau n \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 、 n 、 b 分别为空间螺旋曲线的切线、法线和副法线的单位矢量; κ 、 τ 分别为曲线的法曲率和扭曲率。

对于枕簧而言,其螺旋线为圆柱螺旋线,法曲率

κ 、扭曲率 τ 与圆柱半径、螺距之间的关系为

$$\begin{cases} \kappa = \frac{R}{R^2 + b^2}, \\ \tau = \frac{b}{R^2 + b^2} \end{cases}, \quad (2)$$

式中： R 为圆柱半径； $b = h / (2\pi)$ ，是与螺距 h 相关的变量。

若枕簧螺旋角 α 已知，则 κ 和 τ 可以直接计算得到，计算公式为

$$\begin{cases} \kappa = \frac{\cos^2 \alpha}{R} \\ \tau = \frac{\sin(2\alpha)}{2R} \end{cases} \quad (3)$$

以磨平的枕簧端面为基准，沿着螺旋线向下，枕簧簧圈的截面高度呈逐渐增大的趋势。理论上，基于枕簧簧圈截面中心螺旋曲线方程、枕簧丝径与枕簧端面所在平面方程可以建立簧圈截面高度与端面缺口的对应关系；然而，通过对式(1)、(2)、(3)进行分析后发现，枕簧簧圈截面中心螺旋曲线方程与枕簧螺距/螺旋角、圆柱半径密切相关。由于本文的研究对象是服役过程中的待检修枕簧，其螺距/螺旋角与新造枕簧的螺距/螺旋角存在差异，因此，本团队采用实测方式获得枕簧簧圈截面高度，以构建其与端面缺口方位的对应关系。

3.2 数学模型

K6 型转向架单侧侧架内部枕簧由 2 组减振弹簧和 7 组承载弹簧(其中 1 组为中心承载弹簧)组成，如图 4 所示。考虑到中心承载弹簧的自由高度低且数量

少，拆卸取出过程中基本不会发生碰撞，因此选择其余 6 组承载弹簧和 2 组减振弹簧作为研究对象。

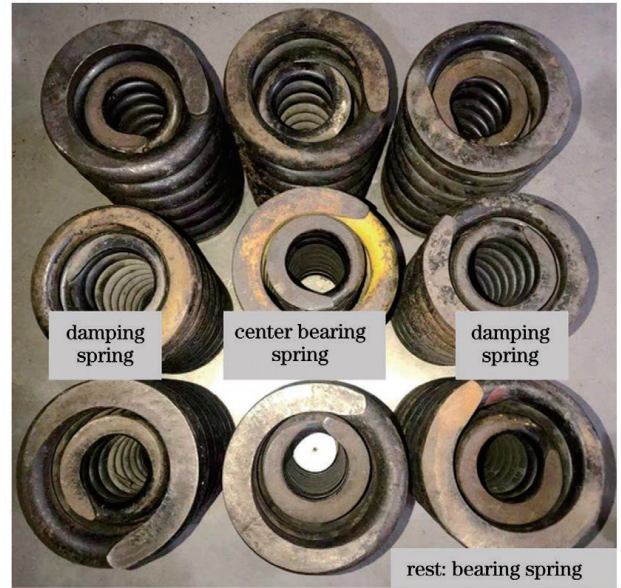


图 4 K6 型转向架单侧侧架内部枕簧的组成

Fig. 4 Constitue of bolster springs inside one-side of K6 bogie

为了增强对应关系在不同图像尺度下的有效性，选择枕簧端面(第一层簧圈上表面)到第二层簧圈下表面的总高度 H_{total} 和第二层簧圈截面高度 H_2 的比值与端面缺口方位的对应关系分别建立两类枕簧的数学模型。如图 5 所示，以枕簧外簧圆心为中心，端面缺口为起始点(0°)，沿逆时针方向将外簧圆周等分为 18 份，每份对应的圆心角为 20° 。

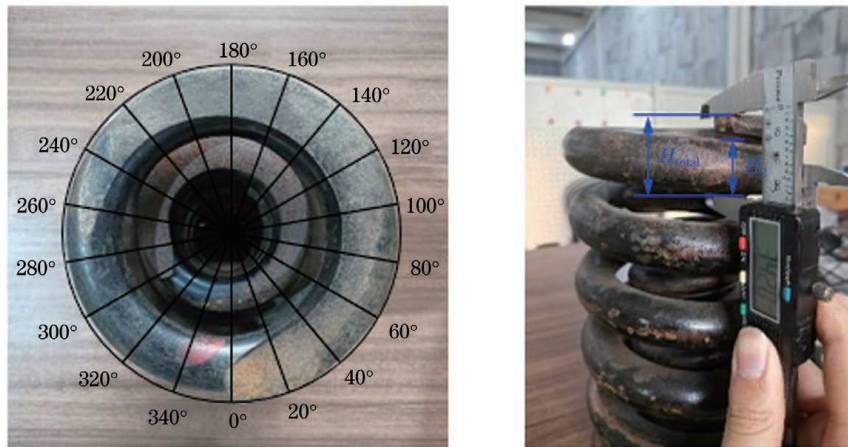


图 5 枕簧分度(左)和高度测量(右)

Fig. 5 Scale division (left) and height (right) measurement of bolster spring

针对 6 组承载弹簧和 2 组减振弹簧，采用游标卡尺在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内对其第一层和第二层簧圈的总高度 H_{total} 以及第二层簧圈的截面高度 H_2 进行测量。承载弹簧的测量结果如表 1 所示，减振弹簧的测量结果如表 2 所示。

由表 1 和表 2 可以看出：两类枕簧第一、第二层簧圈的总高度 H_{total} 均随着分度度数的增加而增大，当分度 $\Delta\beta$ 为 300° 时，第一层簧圈进入非磨平区域， H_{total}

测量值维持不变；第二层簧圈有着固定的丝径，因此两类枕簧的 H_2 测量值始终为恒定值，其中承载弹簧的 H_2 值为 24 mm，减振弹簧的 H_2 值为 20 mm。为了更直观地展示 H_{total}/H_2 与枕簧端面缺口方位的关系，将表 1 和表 2 中的样本数据分别绘制成散点图，如图 6 和图 7 所示。同时，基于最小二乘法对两类枕簧各自的样本数据均值进行分段线性拟合，分别得到了图 6 和图 7 中的趋势线。图 6 和图 7 中的拟合关系曲

表 1 承载弹簧簧圈的高度测量结果
Table 1 Height measurement results of bearing spring coil

$\Delta\beta / (^{\circ})$	H_{total} / mm							H_2 / mm	H_{total} / H_2
	Spring 1	Spring 2	Spring 3	Spring 4	Spring 5	Spring 6	Average value		
0	32.47	32.73	32.22	33.65	33.71	32.26	32.84	24	1.37
20	34.36	35.20	34.28	35.97	36.21	35.18	35.20	24	1.47
40	36.51	37.78	35.89	38.06	38.09	37.70	37.34	24	1.56
60	39.60	40.54	38.12	40.23	39.92	40.40	39.80	24	1.66
80	41.92	43.12	40.57	42.48	41.52	42.83	42.07	24	1.75
100	44.64	45.69	42.58	44.62	43.34	44.91	44.30	24	1.85
120	46.76	47.95	44.83	46.88	45.20	47.04	46.44	24	1.94
140	48.75	50.19	47.17	49.11	47.35	49.18	48.63	24	2.03
160	50.80	52.74	49.27	51.66	49.78	51.16	50.90	24	2.12
180	52.96	54.62	51.84	53.90	52.07	53.03	53.07	24	2.21
200	55.20	56.46	53.93	56.13	54.66	55.87	55.38	24	2.31
220	57.10	58.38	55.93	58.58	56.98	57.55	57.42	24	2.39
240	59.07	60.76	58.30	60.57	58.32	59.52	59.42	24	2.48
260	61.15	62.94	60.60	62.31	60.27	61.82	61.52	24	2.56
280	62.58	64.74	61.78	64.02	61.04	62.28	62.74	24	2.61
300	63.30	65.80	62.40	64.18	61.50	63.75	63.49	24	2.65
320	63.30	65.80	62.40	64.18	61.50	63.75	63.49	24	2.65
340	63.30	65.80	62.40	64.18	61.50	63.75	63.49	24	2.65
360	63.30	65.80	62.40	64.18	61.50	63.75	63.49	24	2.65

表 2 减振弹簧簧圈的高度测量结果
Table 2 Height measurement results of damping spring coil

$\Delta\beta / (^{\circ})$	H_{total} / mm			H_2 / mm	H_{total} / H_2
	Spring 1	Spring 2	Average value		
0	30.43	29.57	30.00	20	1.50
20	32.37	31.81	32.09	20	1.60
40	34.23	33.33	33.78	20	1.69
60	36.05	35.79	35.92	20	1.80
80	38.04	37.48	37.76	20	1.89
100	39.92	39.00	39.46	20	1.97
120	41.80	41.84	41.82	20	2.09
140	43.59	43.52	43.56	20	2.18
160	46.16	45.94	46.05	20	2.30
180	48.38	47.89	48.14	20	2.41
200	50.56	49.62	50.09	20	2.50
220	52.64	51.74	52.19	20	2.61
240	54.50	53.98	54.24	20	2.71
260	56.27	55.36	55.82	20	2.79
280	56.94	57.79	57.37	20	2.87
300	57.22	58.06	57.64	20	2.88
320	57.22	58.06	57.64	20	2.88
340	57.22	58.06	57.64	20	2.88
360	57.22	58.06	57.64	20	2.88

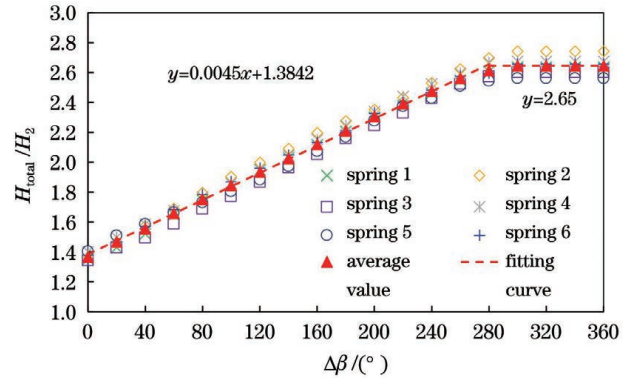


图 6 承载弹簧的 H_{total}/H_2 与缺口方位的关系曲线图
Fig. 6 Relationship between H_{total}/H_2 and gap orientation of bearing spring

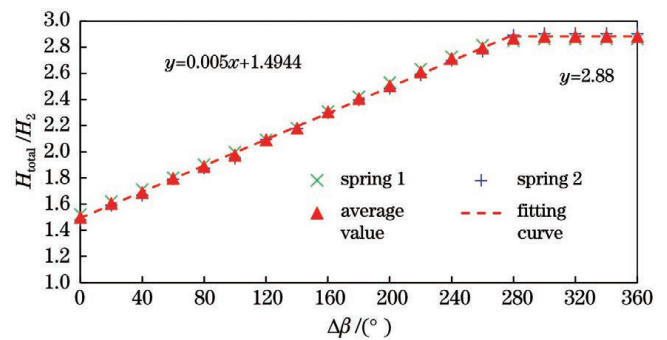


图 7 减振弹簧 H_{total}/H_2 与缺口方位的关系曲线
Fig. 7 Relationship between H_{total}/H_2 and gap orientation of damping spring

线分别反映了承载弹簧和减振弹簧 H_{total}/H_2 与枕簧端面缺口方位的一一对应关系,为后文通过线激光光斑高度计算两类枕簧缺口方位奠定了良好的理论基础。

4 基于线激光的枕簧缺口视觉间接定位

4.1 总体技术路线

为了实现转向架狭小空间内枕簧缺口视觉间接定

位,本文采用了如图 8 所示的技术路线。首先,将手工标注的枕簧数据集用于 YOLOv3-tiny 模型的训练,训练后的模型对输入的新图像中的枕簧目标具有自动推理预测功能。将模型输出的检测边界框内部的图像区域定义为本文的感兴趣区域(ROI),然后基于 ROI 分割、阈值分割和边界框拟合算法自适应地计算出 H'_{total}/H'_2 (图像平面上第一、第二层簧圈高度的像素比值),最后基于 H'_{total}/H'_2 与缺口方位对应关系的数学模型获得枕簧缺口的方位值。

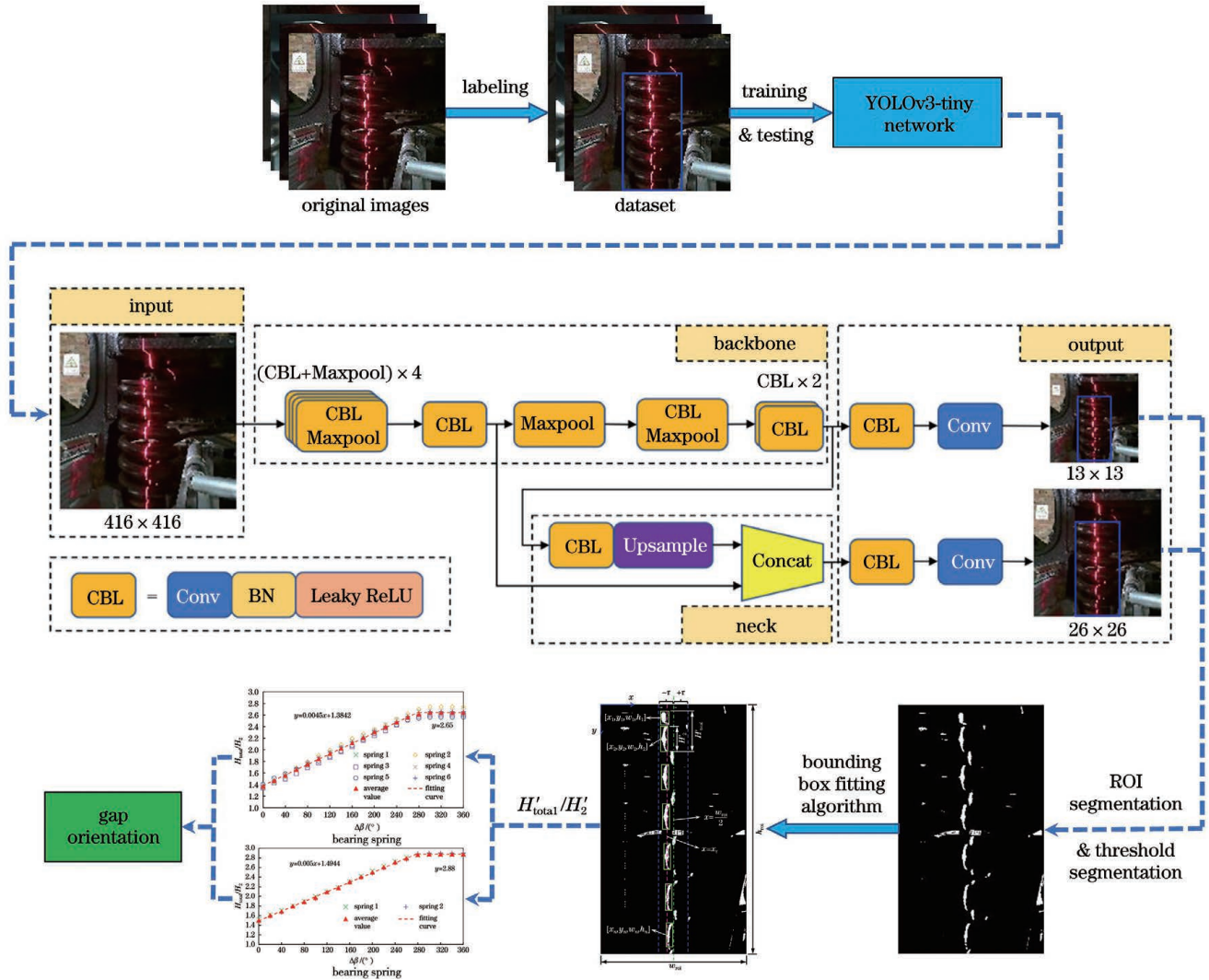


图 8 所提定位方法的技术路线

Fig. 8 Technical route of proposed positioning method

4.2 枕簧检测与 ROI 分割

实际场景中的枕簧处于转向架侧架的狭小空间内,枕簧上方为摇枕,下方为侧架内腔底面,其所在环境空间背景复杂且光照条件多变。为了准确、高效地获取到投射在枕簧表面的线激光光斑图像,需要将包含激光光斑的枕簧目标 ROI 与复杂的干扰背景分割开来。基于深度学习的目标检测算法在目标检测与定位方面具有显著优势^[18-21],为复杂背景和不确定光照条件下的枕簧目标图像分割提供了思路。YOLO 是基于边界框回归的 one-stage 目标检测算法的代表,目

前已形成了 YOLOv1^[18]、YOLOv2^[19]、YOLOv3^[20]、YOLOv4^[21] 等多个版本。YOLOv3 和 YOLOv4 相比于 YOLOv1、YOLOv2 在检测精度和速度方面都有很大提升。鉴于本文枕簧目标检测场景及摄像头工作距离较为固定,选择 YOLOv3-tiny 作为本文枕簧目标的检测模型。

图 9 展示了 YOLOv3-tiny 检测模型的卷积神经网络结构,其主要由输入、骨干网络、颈部网络和输出 4 部分组成。骨干网络从输入图像中提取出各类特征,颈部网络对相应的特征图进行组合,输出部分对目标进行多

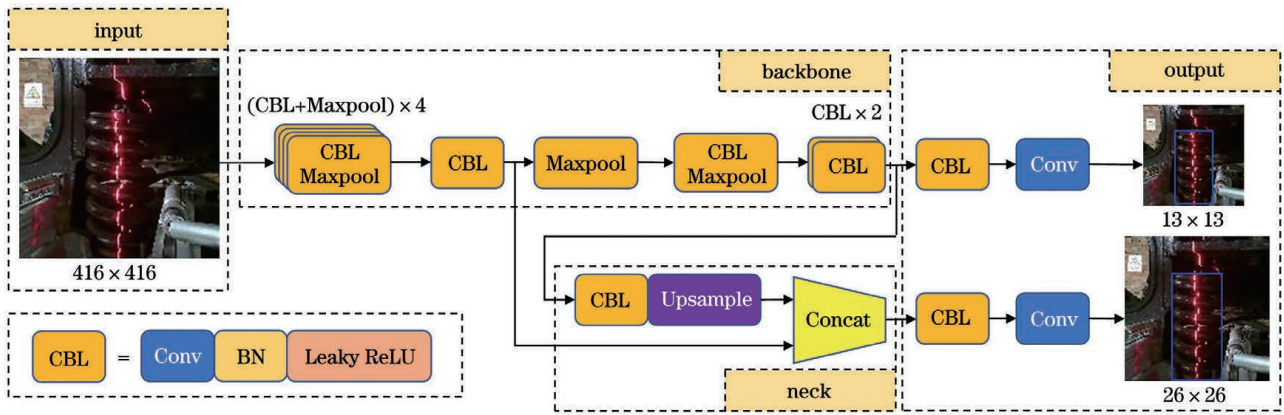


图 9 YOLOv3-tiny 的卷积神经网络结构

Fig. 9 Convolutional neural network structure of YOLOv3-tiny

尺度预测。该网络主要模块的组成和功能如下：

1) CBL 模块。主要由卷积层 Conv、批归一化层 BN 和 Leaky ReLU 激活函数组成,是 YOLOv3-tiny 网络中最常见的结构。

2) Maxpool 模块。最大池化操作的直观作用是在池化区域提取某个特征并保留其最大值,起到减小模型大小、提高计算速度以及提高所提取特征的鲁棒性等作用。

3) Upsample 和 Concat 操作。Upsample 实现图像的上采样功能,起到放大图像的作用;Concat 负责张量的拼接。

为了实现枕簧目标的检测,在转向架实际场景下采集了 1430 张枕簧图像。采用图像标注工具 LabelImg

对所采集的图像逐一进行标注,带标注的部分枕簧图像数据集如图 10 所示。将标注结果与对应的枕簧图像构成的数据集按 7 : 3 划分为训练集(1001 张)和测试集(429 张),训练集用于 YOLOv3-tiny 模型的训练。模型训练采用的硬件配置如下: Intel Core i7 7700 CPU, 8 GB NVIDIA RTX 3070 GPU。训练时的参数设置如下: 输入图像尺寸为 416 pixel × 416 pixel, 学习率为 0.001, 批尺寸为 8, 迭代轮次为 1000。表 3 展示了模型训练后采用测试集对其检测平均精度(AP)进行评估的结果,结果显示: 当交并比(IoU)阈值设置为 0.5 时,平均精度为 100%; 当 IoU 阈值设置为 0.75 时,平均精度为 98.96%。可见,模型的平均精度较为理想。

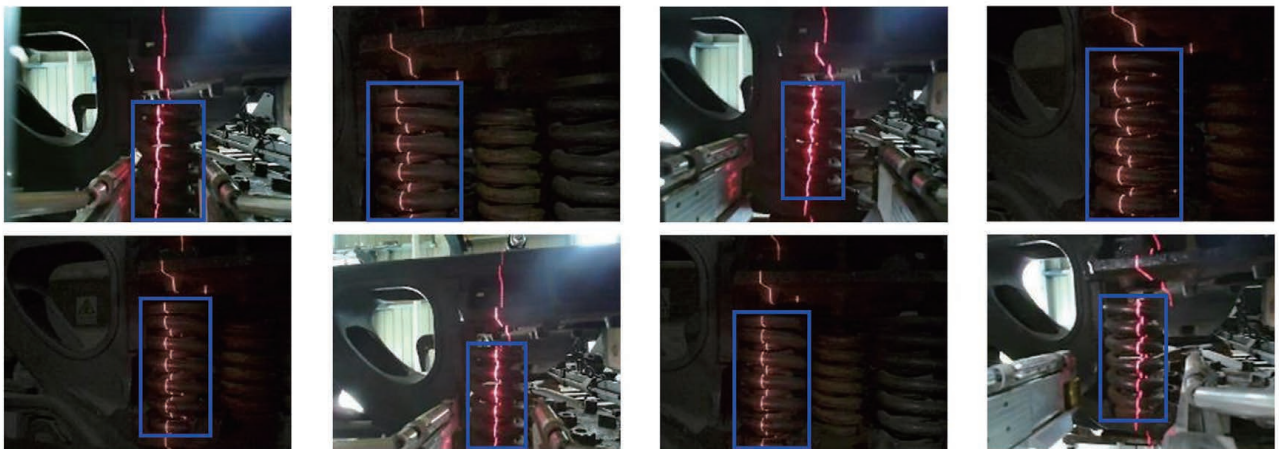


图 10 枕簧图像数据集

Fig. 10 Bolster spring dataset

表 3 YOLOv3-tiny 模型精度的评估结果

Table 3 Precision evaluation of YOLOv3-tiny model

Number of images	IoU threshold	Average precision / %
429	0.50	100
	0.75	98.96

将图像尺寸为 416 pixel × 416 pixel 的包含激光光斑的枕簧图像输入到训练后的 YOLOv3-tiny 检测

模型中,经过一系列卷积特征提取、特征融合操作,模型直接输出枕簧目标的检测边界框,如图 9 输出模块中枕簧图像上的蓝色矩形框所示。边界框内部的图像区域即为 ROI。基于检测边界框对输入的原图像进行分割得到的 ROI 图像如图 11 所示。

4.3 激光光斑高度测量与缺口定位

从图 11 所示的分割得到的 ROI 图像可以看出,投射在枕簧表面上的激光光斑能够很好地反映出枕簧

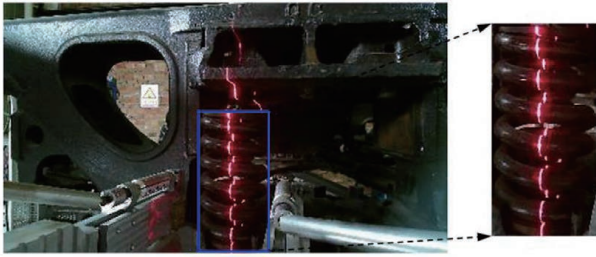


图 11 ROI 分割

Fig. 11 ROI segmentation

簧圈的特征。本节将外簧第一、第二层簧圈总高度 H_{total} 与第二层簧圈高度 H_2 比值的计算转化为图像平面上像素比值的计算。分析图 12 所示的 ROI 灰度直方图可以发现,激光光斑部分的灰度值明显高于其他非光斑区域,因此本节基于 OpenCV 库中的阈值分割和边界框拟合算法开展激光光斑高度自适应求解方



图 12 ROI 灰度直方图

Fig. 12 Gray histogram of ROI



图 13 二值图像

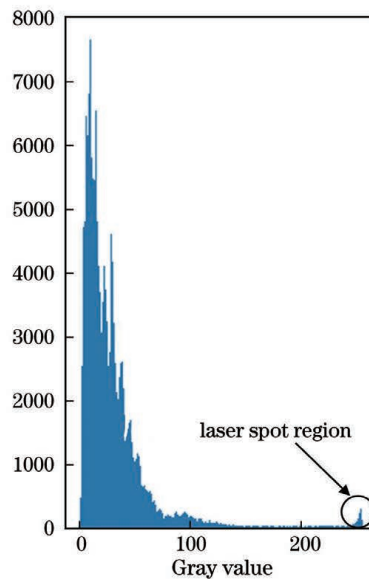
Fig. 13 Binary image

法的研究。

阈值分割算法通常分为全局阈值分割和自适应阈值分割两种^[22]。从枕簧 ROI 图像中可以看出背景的灰度值在整个图像中较为恒定,而且激光光斑与背景具有几乎相同的对比度,因此本文选择全局阈值分割。假设图 12 中的 ROI 灰度图像对应于图像 $f(x,y)$,那么从背景中提取激光光斑后即可通过直接选取阈值 T 来分离相对应的像素点。满足 $f(x,y) > T$ 的所有像素点都称为目标点,其他的点称为背景点。阈值处理后的图像 $g(x,y)$ 定义为

$$g(x,y) = \begin{cases} a, & f(x,y) > T \\ b, & f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 表示目标对应的像素; b 表示背景对应的像素。将阈值设置为 $T = 175$ 时,阈值处理之后得到的二值图像如图 13 所示。



从图 13 可以看出,明亮的光斑已通过全局阈值分割算法从背景中分割出来,但分割出来的图像既包含外簧表面的光斑,也包含内簧表面的光斑,同时也有一部分较亮的非光斑区域。基于 OpenCV 库中的边界框拟合算法可以计算出光斑轮廓的矩形边界框,并返回其左上角坐标以及宽和高 (x,y,w,h) 。本文提出了一种激光光斑高度的自适应测量算法,其原理如图 14 所示。

由于激光光斑始终投射在枕簧中心,因此在算法程序中给定了一个阈值 τ ,在距离枕簧中心的 $\pm\tau$ 区域内只包含内外簧表面的光斑。针对 $\pm\tau$ 区域内所有内外簧表面光斑轮廓应用边界框拟合算法。为了计算图像平面上外簧第一、第二层簧圈总高度 H'_{total} 和第二层簧圈高度 H'_2 ,本文制定了内外簧表面光斑自适应分离阈值计算规则,即

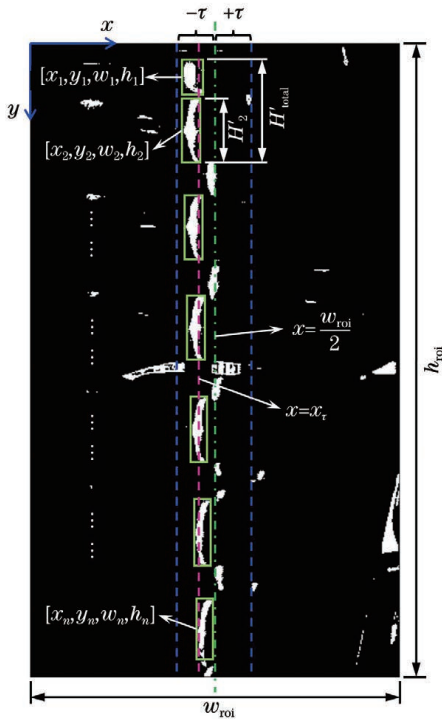


图 14 激光光斑高度自适应测量算法的原理图
Fig. 14 Principle diagram of adaptive measurement algorithm for laser spot height

$$\begin{cases} x_{\min} = \min \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \\ w_{\text{avg}} = \text{sum} \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\} / n, \\ x_{\tau} = x_{\min} + w_{\text{avg}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： x_n 为 $\pm\tau$ 区域内边界框拟合算法计算出的轮廓矩形边界框左上角的横坐标； w_n 为边界框拟合算法计算出的矩形边界框的宽度； x_{\min} 和 w_{avg} 分别为横坐标 x 的最小值和宽度 w 的平均值； x_{τ} 为内外簧表面光斑自适应分离阈值。

x_{τ} 左侧全部为外簧表面的光斑,如图 14 所示。 H'_{total}/H'_2 为图像平面上的第一、第二层簧圈高度的像素比值,基于这一比值结合图 6 或图 7 的 H_{total}/H_2 与缺口方位的关系曲线图即可判断出枕簧端面的缺口方位。

5 试验验证

5.1 枕簧试验平台

为了验证本文提出的基于线激光光斑特征的枕簧缺口视觉间接定位方法对承载弹簧和减振弹簧端面缺口定位的有效性和稳定性,在图 15 所示的枕簧试验平台上针对两类枕簧开展了不同缺口方位和不同光照强度条件下的多组定位试验。

枕簧试验平台由放置于侧架狭小空间内的枕簧、六自由度工业机器人、线激光视觉系统和工控机组成,工控机的软硬件配置如图 15 所示。为了保证各组试验结果的可比性,假设安装于六自由度机器人末端的线激光视觉系统所发射的激光平面每次都投射在枕簧中心(通过示教方式实现)。采用安装于同一竖直平面的一对线激光发射器共同发射激光,产生激光平面,以增强枕簧表面所成光斑的稳定性。线激光发射器距枕簧表面约 400 mm,网络摄像头光轴与激光平面所成夹角约为 30° 。网络摄像头的曝光时间设置为 $10000 \mu\text{s}$,增益为 8,伽马值为 0.7。在线激光平面的照射下,枕簧的内外簧簧圈表面、摇枕定位销表面及摇枕端面形成明亮的光斑,网络摄像头拍摄包含激光光斑的枕簧图像,最后通过 YOLOv3-tiny 目标检测算法实现 ROI 分割,进而通过激光光斑高度计算出枕簧外簧端面的缺口方位。

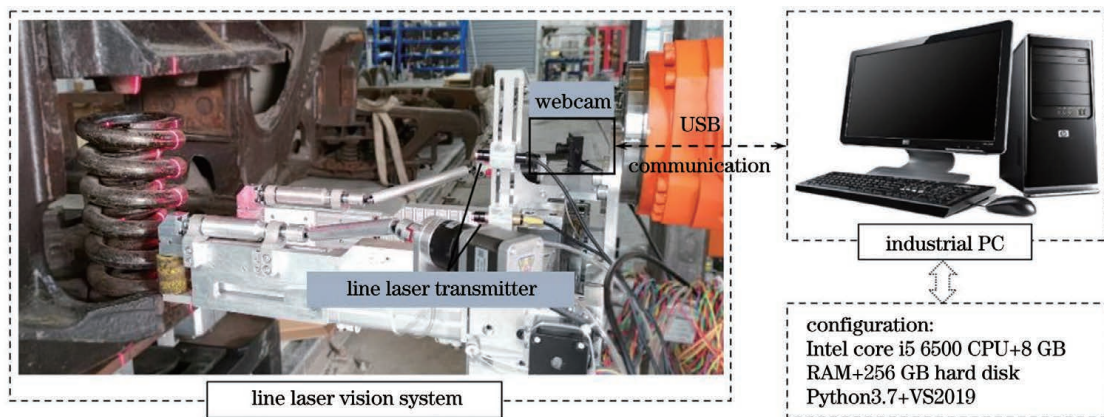


图 15 枕簧试验平台
Fig. 15 Test platform of bolster spring

5.2 试验结果分析

5.2.1 不同缺口方位下的定位试验

为验证所提方法实现承载弹簧和减振弹簧两类枕簧端面缺口定位的精度和效率,分别开展了以 30° 为分度间隔的 12 组定位试验,各分度下的实际枕簧方位

和外表表面激光光斑高度自适应测量结果如图 16 和图 17 所示。

由图 16 和图 17 可知,在不同的缺口方位下,枕簧在线激光视觉系统的光斑成像质量良好。这说明通过式(5)所示的内外簧表面光斑自适应阈值分割方法实

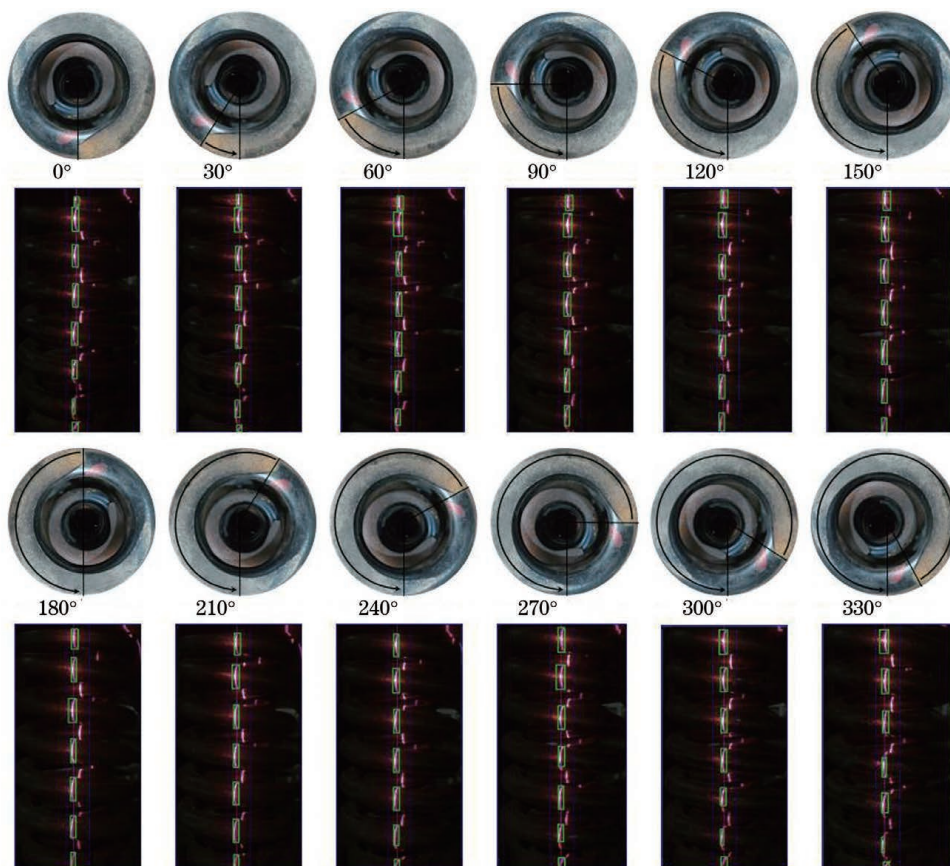


图 16 承载弹簧实际缺口方位和对应的外簧光斑高度测量结果

Fig. 16 Actual gap orientations of bearing spring and corresponding height measurement results of outer spring spot

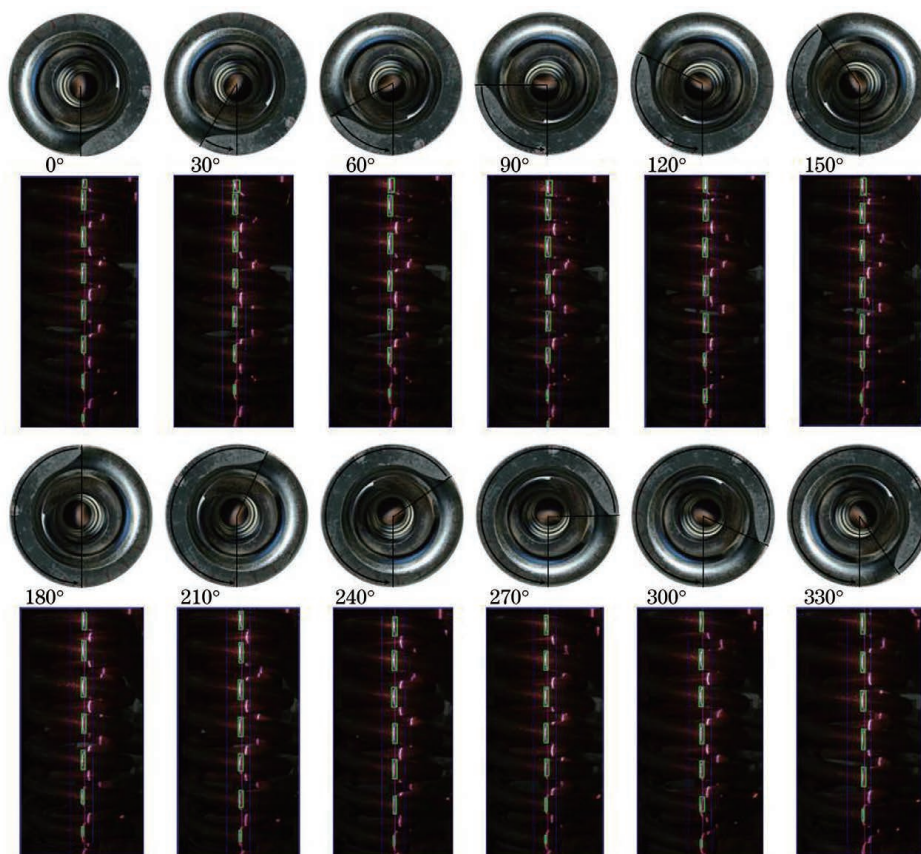


图 17 减振弹簧实际缺口方位和对应的外簧光斑高度测量结果

Fig. 17 Actual gap orientations of damping spring and corresponding height measurement results of outer spring spot

现了外簧与内簧表面激光光斑的分离。试验过程中不同方位下的枕簧存在略微倾斜,导致个别枕簧下层外簧簧圈表面的光斑未被正确分离,但由于枕簧端面缺口的定位只需针对第一、第二层外簧表面的光斑高度

进行测量,因此下层光斑的不正确分离不影响定位结果。基于阈值分割和边界框拟合算法的激光光斑高度自适应求解算法计算出的承载弹簧和减振弹簧的 H'_{total}/H'_2 分别见表 4 和表 5。

表 4 不同缺口方位下承载弹簧的定位试验结果

Table 4 Positioning test results of bearing spring under different gap orientations

Actual orientation / (°)	Actual H_{total}/H_2	Calculated H'_{total}/H'_2	Calculated orientation / (°)	Error / (°)	Positioning duration / s
0	1.38	1.40	4	+4	0.14
30	1.52	1.53	32	+2	0.14
60	1.65	1.66	61	+1	0.12
90	1.79	1.77	86	-4	0.13
120	1.92	1.91	116	-4	0.12
150	2.06	2.05	147	-3	0.15
180	2.19	2.17	176	-4	0.13
210	2.33	2.32	208	-2	0.12
240	2.46	2.45	238	-2	0.14
270	2.60	2.59	267	-3	0.14
300	2.65	2.65	280-360		0.12
330	2.65	2.65	280-360		0.12

表 5 不同缺口方位下减振弹簧的定位试验结果

Table 5 Positioning test results of damping spring under different gap orientations

Actual orientation / (°)	Actual H_{total}/H_2	Calculated H'_{total}/H'_2	Calculated orientation / (°)	Error / (°)	Positioning duration / s
0	1.49	1.52	5	+5	0.12
30	1.64	1.66	33	+3	0.11
60	1.79	1.82	64	+4	0.12
90	1.94	1.94	90	0	0.14
120	2.09	2.08	118	-2	0.11
150	2.24	2.26	152	+2	0.11
180	2.39	2.38	177	-3	0.12
210	2.54	2.55	211	+1	0.11
240	2.69	2.71	244	+4	0.10
270	2.84	2.86	272	+2	0.13
300	2.88	2.88	280-360		0.12
330	2.88	2.88	280-360		0.12

由表 4 和表 5 可以看出,计算出的枕簧缺口方位误差始终在 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 范围内。由于外簧端面缺口所在方位为一个较大的区间范围,缺口方位误差只要控制在 $-10^\circ \sim +10^\circ$ 范围内就可以实现枕簧的倾斜扳倒取出,因此,该定位精度满足实际枕簧智能拆卸场景中的缺口定位需求。此外,基于线激光的枕簧缺口视觉

间接定位算法的单次定位时间短于 0.15 s,可以满足系统定位效率的要求。

5.2.2 不同光照强度下的定位试验

为了验证所提方法在光照强度变化条件下的鲁棒性,分别在较暗、正常和较亮三种光照强度条件下进行了定位试验。选取 180° 时的承载弹簧缺口方位开展

对比试验,外簧光斑高度测量结果如图 18 所示,对应的 H'_{total}/H'_2 计算结果见表 6。

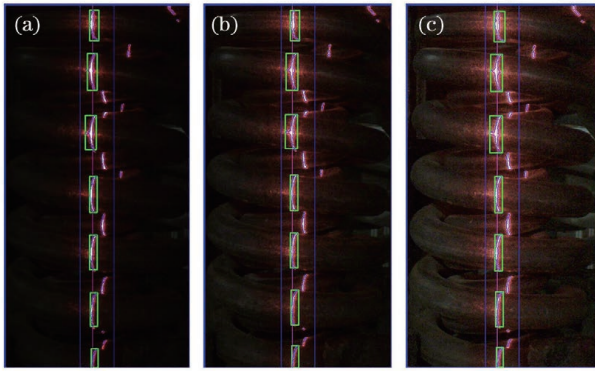


图 18 不同光照强度下的外簧光斑高度测量结果。(a)较暗光照;(b)正常光照;(c)较亮光照

Fig. 18 Height measurement results of outer spring spot under different illumination intensities. (a) Dark illumination; (b) normal illumination; (c) bright illumination

表 6 不同光照强度下的定位试验结果

Table 6 Positioning test results under different illumination intensity

Illumination condition	Actual orientation / (°)	Calculated H'_{total}/H'_2	Calculated orientation / (°)	Error / (°)
Dark		2.17	176	-4
Normal	180	2.18	178	-2
Bright		2.18	178	-2

从表 6 可以看出,对于转向架侧架内不同光照条件下的枕簧,本文所提方法均能够实现枕簧端面缺口的定位。较暗、正常和较亮三种光照条件下的定位误差分别为 -4° 、 -2° 和 -2° ,可以满足枕簧缺口定位精度的要求。

6 结 论

本文提出了一种基于线激光光斑特征的枕簧缺口视觉间接定位方法。通过分析枕簧外簧结构特征以及第一、第二层簧圈高度数据,发现了簧圈高度与端面缺口方位的变化规律;结合最小二乘法对采集的高度数据进行拟合,建立了承载弹簧和减振弹簧两类枕簧簧圈高度与缺口方位对应关系的数学模型。采用基于深度学习的 YOLOv3-tiny 目标检测算法实现了复杂背景下枕簧的检测,进而完成了包含激光光斑图像的 ROI 分割;基于阈值分割和边界框拟合算法提出了一种簧圈高度自适应求解方法,有效地提升了定位算法的灵活性和适应性。在枕簧试验平台上开展了多组枕簧缺口定位试验,结果表明,所提方法可以准确、高效地实现狭小空间中两类枕簧端面缺口的定位,定位精度在 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 以内,单次定位时间不超过 0.15 s,并

且对于光照强度变化具有很强的鲁棒性,可以满足枕簧智能拆卸装备对缺口定位的要求。下一步拟结合枕簧智能拆卸装备进行联合验证,并基于相应的控制策略提升整个拆卸系统的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 辛俊胜, 商跃进, 薛海, 等. 重载货车摇枕弹簧的动态可靠性灵敏度分析[J]. 兰州交通大学学报, 2020, 39(6): 86-91.
Xin J S, Shang Y J, Xue H, et al. Dynamic reliability sensitivity analysis of bolster spring for heavy-haul freight car[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, 39(6): 86-91.
- [2] Li C S, Luo S H, Cole C, et al. Bolster spring fault detection strategy for heavy haul wagons[J]. Vehicle System Dynamics, 2018, 56(10): 1604-1621.
- [3] 姜媛, 周富强, 张广军. 货车枕簧丢失故障动态图像识别方法[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 662-665.
Jiang Y, Zhou F Q, Zhang G J. An automatic recognition method for trouble of sleeper springs of freight cars[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 662-665.
- [4] Anh L T, Song J B. Robotic grasping based on efficient tracking and visual servoing using local feature descriptors[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(3): 387-393.
- [5] Anwar A, Lin W Y, Deng X K, et al. Quality inspection of remote radio units using depth-free image-based visual servo with acceleration command[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8214-8223.
- [6] 华才健, 苏真伟, 乔丽, 等. 基于线激光的棉花中白色异性纤维检测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 181-185.
Hua C J, Su Z W, Qiao L, et al. White foreign fibers detection in cotton using line laser[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 181-185.
- [7] Yang Y, Liu X Y, Wu Y, et al. Optical edge detection with adjustable resolution based on liquid crystal polarization gratings[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(9): 093501.
- [8] 魏鬼, 孙长库, 张效栋, 等. 车轮定位参数的线激光非接触方法研究[J]. 光电子·激光, 2004, 15(12): 1479-1482.
Wei W, Sun C K, Zhang X D, et al. Study on non-contact measurement method based on line-structured laser for vehicle wheel alignment parameters[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(12): 1479-1482.
- [9] 冯兴乐, 徐花艳, 李伟, 等. 沥青路面结构光条质心定位算法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3): 514-520.
Feng X L, Xu H Y, Li W, et al. Centroid position algorithm of structure optical stripe in asphalt pavement test[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(3): 514-520.
- [10] 毛志伟, 周少玲, 赵滨, 等. 双线激光传感焊枪定位与焊缝走向识别[J]. 焊接学报, 2015, 36(2): 35-38, 114.
Mao Z W, Zhou S L, Zhao B, et al. Welding torch position and seam orientation deviation based on two stripes laser vision sensing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(2): 35-38, 114.
- [11] 李森成, 杨岳, 易兵, 等. RC-IRLSCF 方法及服役车轮踏面线激光检测应用[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904005.
Li M C, Yang Y, Yi B, et al. RC-IRLSCF method and application of laser detection of tread line of service wheel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904005.
- [12] 田军, 李明, 姜瑾, 等. 选煤厂水泵闸板阀开度线激光辅助视觉监控[J]. 工矿自动化, 2020, 46(9): 79-82, 93.
Tian J, Li M, Jiang J, et al. Line laser assisted visual monitoring for opening of water plug-in gate valve in coal preparation plant[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 79-82, 93.
- [13] 杜健准, 张艳喜, 王静静, 等. 核相关/卡尔曼滤波焊缝路径识别新方法研究[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202009.

- Du J Z, Zhang Y X, Wang J J, et al. Weld path identification based on kernel correlation/Kalman filters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202009.
- [14] 解则晓, 邵玮婧, 高翔, 等. 基于离散外极曲线模型的水下多线结构光双目测量方法[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1304003.
- Xie Z X, Shao W J, Gao X, et al. Underwater multiple line-structured light binocular measuring method based on discrete epipolar curve model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1304003.
- [15] 伍煜, 龙小祥, 杨坚, 等. 高分七号卫星足印相机激光光斑中心定位方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1728001.
- Wu Y, Long X X, Yang J, et al. Laser spot center positioning method in Gaofen-7 footprint camera[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1728001.
- [16] 陈天凡, 高诚辉, 何炳蔚. 自遮挡物体线激光测量视点规划[J]. 中国机械工程, 2016, 27(10): 1370-1376.
- Chen T F, Gao C H, He B W. View planning in line laser measurement for self-occlusion objects[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(10): 1370-1376.
- [17] 周兆民. 对“螺旋弹簧的理论计算”一文的意见[J]. 力学季刊, 1984, 5(1): 85-87.
- Zhou Z M. Discussion on “the theory and calculation of helical spring”[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 1984, 5(1): 85-87.
- [18] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 27-30, 2016, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2016: 779-788.
- [19] Redmon J, Farhadi A. YOLO9000: better, faster, stronger [C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 6517-6525.
- [20] Redmon J, Farhadi A. YOLOv3: an incremental improvement [EB/OL]. (2018-04-08)[2020-06-03]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [21] Bochkovskiy A, Wang C Y, Liao H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-05-06]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
- [22] 杨杰. 数字图像处理及 MATLAB 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- Yang J. Processing of digital image and realization of MATLAB [M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2010.

Visual Indirect Positioning of Bolster Spring Gap Based on Line Laser in Narrow Space

Liu Huanlong^{1,2}, Li Dafa^{1,2*}, Zhou Jianyi^{1,2}, Wei Tao^{1,2}

¹ *Engineering Research Center of Advanced Driving Energy-Saving Technology, Ministry of Education, Chengdu 610031, Sichuan, China;*

² *School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China*

Abstract

Objective Bolster spring is usually installed in the inner space of the narrow bogie side frame. It is one of the important components of the vibration damping device of railway freight cars, and it requires regular repair. During the repair of the bolster spring, the inner and outer spring groups need to be removed from the side frame and reinstalled in their original positions after the repair. Presently, the bolster spring is disassembled by manually tilting and pulling out. The highly limited side frame space causes the bolster spring to easily collide with or possibly block the locating pin above the inner cavity of the side frame, thereby preventing the smooth removal of the bolster spring. Based on manual operation experience, the gap position of the upper-end surface of the outer spring is usually determined by human eyes and manually turned directly below the locating pin to prevent a collision. However, this process requires high labor intensity and owns low operational efficiency. The key technical difficulty to be solved urgently is positioning the end gap of the bolster spring in a narrow space with uncertain lighting conditions to develop a set of intelligent disassembly equipment for the bolster spring in a narrow space to replace manual operation. After analysis, it was observed that there is no relevant literature to conduct positioning research on the bolster spring object with complex geometric properties in a narrow space. This research proposes a visual indirect positioning method of bolster spring gap based on a line laser to solve the problem of automatic positioning of bolster spring gap in a narrow space, aiming at the new research object of bolster spring, based on line laser, machine vision, and image processing technologies.

Methods In this research, a line laser vision system, an object detection algorithm based on deep learning, and an image processing algorithm were used. Firstly, the variation law between the height of the spring coil and orientation of the end gap was derived by analyzing the structural characteristics of its outer spring and collecting the height data of the first and second layers of the spring coil, aiming at the new research object of bolster spring. Then, the vision system based on a line laser was applied to the new field of bolster spring gap positioning. The adaptive solution method of spring coil height was studied with YOLOv3-tiny object detection, threshold segmentation, and bounding box fitting algorithms. Finally, the visual indirect positioning method of bolster spring gap suitable for a narrow space was analyzed using the adaptive solution method of spring coil height and mathematical model of the relationship between spring coil height and end gap. The accuracy, efficiency, and illumination resistance of bolster spring end gap positioning using this method in different

orientations were analyzed experimentally.

Results and Discussions The mathematical model based on the least square method represents the corresponding relationships between the spring coil height and gap orientation of the two types of bolster springs. The ratio H_{total}/H_2 of the two kinds of bolster springs shows a good piecewise linear relationship with the gap orientation, with the increased division degree (Figs. 6 and 7). The positioning experiments under different gap orientations show that the spot imaging quality under the line laser vision system is better. In this research, the adaptive threshold segmentation method is separated by the laser spot on the surface of the outer and inner springs (Figs. 14 and 15). The calculated orientation error of the bolster spring gap is kept within $-5^\circ \sim +5^\circ$, and the single positioning time is less than 0.15 s, thereby meeting the requirements of system positioning efficiency (Tables 3 and 4). The positioning experiments under different illumination intensities show that the positioning method proposed in this research has strong resistance to the change in illumination intensity (Table 5).

Conclusions This research proposed a visual indirect positioning method to bolster spring gaps based on the spot features of a linear laser. The variation law between the height of the spring coil and orientation of the end gap was derived by analyzing the structural characteristics of the outer spring and height data collection of the first and second layers of the spring coil. The collected height data were fitted, and the mathematical models of the corresponding relationships between the height of the spring coil and gap orientation of the bearing and damping springs were derived with the least square method. The YOLOv3-tiny object detection algorithm based on deep learning was used to detect the bolster spring in a complex background, and then, the region of interest segmentation, including the laser spot image, was produced. An adaptive solution method of spring coil height was proposed based on threshold segmentation and bounding box fitting algorithms, which significantly improves the flexibility and adaptability of the algorithm. Multiple sets of bolster spring gap positioning experiments have been performed on the bolster spring test platform. The results show that the proposed method can accurately and efficiently position the two types of bolster springs in a narrow space. The positioning accuracy is within $-5^\circ \sim +5^\circ$ while the single positioning time is no more than 0.15 s. Meanwhile, the proposed method has strong resistance to changes in illumination intensity, thereby meeting the gap positioning requirements of the bolster spring intelligent disassembly equipment.

Key words measurement; bolster spring gap; line laser; YOLOv3-tiny object detection algorithm; visual positioning; robustness