

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415597

基于感兴趣区域的螺栓位姿及尺寸检测研究

戴先鑫 付振山 马栋 孔飞一 屈家辉

(山东交通学院船舶与港口工程学院 威海 264210)

摘要: 为了提高工业生产中螺栓定位抓取的效率和准确性,提出基于感兴趣区域的螺栓位姿及尺寸检测方法。首先利用 YOLOv5 目标识别算法对螺栓目标进行识别,将识别出的目标区域截取为感兴趣区域。再利用中值滤波和二值化方法对 ROI 进行预处理,采用 Canny 改进算法检测目标轮廓。通过最优拟合直线算法获取螺栓的倾斜角度,并用矩特征算法求解出螺栓重心位置。最后采用霍夫两直线段最短距离算法检测螺栓直径。经过实验验证采用 YOLOv5 目标识别算法的识别准确率达到 92.7%,螺栓倾斜角度的检查误差为 $\pm 1.2^\circ$,螺栓直径的检测误差率为 $\pm 5.5\%$,实现了对螺栓位姿和尺寸的识别。

关键词: 螺栓识别;感兴趣区域;Canny 改进算法;图像分析;位姿识别;尺寸识别

中图分类号: TP391;TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5030

Research on bolt pose and size detection based on region of interest

Dai Xianxin Fu Zhenshan Ma Dong Kong Feiyi Qu Jiahui

(School of Naval Architecture and Port Engineering, Shandong Jiaotong University, Weihai 264210, China)

Abstract: In order to improve the efficiency and accuracy of bolt positioning and grasping in industrial production, a bolt pose and size detection method based on region of interest was proposed. Firstly, YOLOv5 target recognition algorithm is used to identify the bolt target, and the identified target area is intercepted as the region of interest. Then the ROI region is preprocessed by median filtering and binarization, and the Canny improved algorithm is used to detect the target contour. Then the bolt tilt Angle is calculated based on the best fitting line algorithm, and the bolt center of gravity is calculated by the moment feature algorithm. Finally, the shortest distance algorithm of Hough two straight line segments was used to detect the bolt diameter. After experimental verification, the recognition accuracy of YOLOv5 target recognition algorithm reaches 92.7%, the inspection error of bolt tilt Angle is $\pm 1.2^\circ$, and the detection error rate of bolt diameter is $\pm 5.5\%$, which realizes the identification of bolt pose and size.

Keywords: bolt recognition; region of interest; improved Canny algorithm; image analysis; pose recognition; size recognition

0 引言

在人工智能技术快速发展的推动下,伴随着新一轮产业革命的到来,机器视觉技术在工业、农业、医疗等各个行业都得到了广泛的应用,和普通的人工劳动相比,其在质量、精度和生产速度方面有着巨大的优势^[1]。基于机器视觉的螺栓定位抓取广泛应用于工业装配和检修等工作场景,通过运用基于机器视觉的目标识别、位姿和尺寸测量技术可以极大程度地提高定位抓取的效率和准确性。

近年来,针对特定物体的目标抓取、位姿及尺寸测量等方面,有许多创新性的方案被提出。袁斌等^[2]运用 YOLO (you only look once, YOLO)v4-tiny 算法并结合金字塔场景解析网络(pyramid scene parsing network, PSPNet)提

取目标零件的感兴趣区域(region of interest, ROI),并通过计算轮廓的最大内接圆圆心获取物体的最佳抓取点。孙海等^[3]通过加速稳健特征(speeded up robust features, SURF)算法进行模板匹配获取 ROI,并通过霍夫变换拟合的方式得到角点的坐标信息。孙先涛等^[4]采用 YOLOv4 轻量级旋转目标检测算法对物体进行识别和定位,并通过改进的 DeepLabV3+ 算法训练模型检测目标的抓取位姿。唐心亮等^[5]提出了基于改进快速区域卷积神经网络(fast region-based convolutional neural network, Faster R-CNN)的多方向多尺度螺栓检测模型,通过引入角度感知机制,使得该算法能够检测不同方向和角度的目标物体。Lou 等^[6]提出了基于高斯混合机器视觉模型的机器人抓取

收稿日期:2024-03-07

和跟踪方法,通过建立目标物体姿态和机械臂关节角度之间的映射关系,从而实现机器人对物体的自主抓取。Comari等^[7]提出了一种基于视觉的机器人卷盘抓取方法,通过使用轮廓法、RBrown法和Hough变换法来检测图像中的卷盘核心,并根据目标物体的不同特征来选择最佳的计算流程。

结合螺栓零件轮廓对称且两条螺杆边线可以拟合成直线的结构特点,本文提出了基于ROI的螺栓位姿及尺寸检测方法。在对目标Canny边缘检测的过程中,为了提高对较小的目标物体的边缘识别的清晰度,采用Sobel卷积算子代替原有的Canny算子计算图像梯度方向和幅值,并采用Otsu的方法自适应选择高低阈值^[8]。同时本文在Hough直线检测的基础上,采用两直线段最短距离算法对螺栓直径进行检测。

该方法总体分为两个阶段。第1阶段,通过YOLOv5对目标进行检测,并快速定位螺栓零件,确定ROI。第2阶段,基于开源计算机视觉库(open source computer vision library, OpenCV)对ROI进行二值化、降噪等预处理,通过Canny改进算法进行边缘检测并提取目标轮廓,最后对螺栓的倾斜角度、重心,以及螺栓直径等重要参数进行计算和分析。

1 方法提出

本次实验主要由目标识别算法、图像分析算法和基于霍夫直线检测的两线段间最短距离算法组成,具体的方法流程,如图1所示。

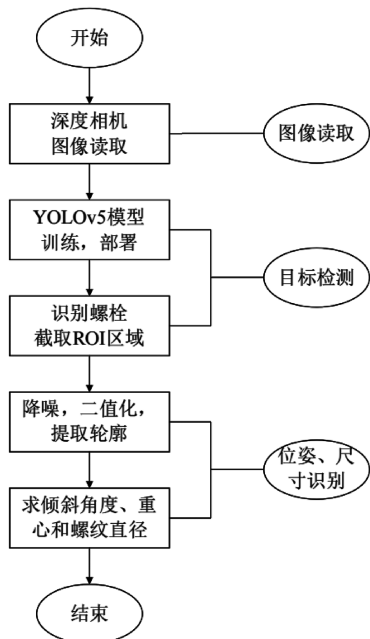


图1 螺栓位姿及尺寸识别方法流程图

具体步骤如下:

步骤1)将螺栓零件放上工作台,通过Astra Pro深度

相机进行图像读取和信息采集。

步骤2)对YOLOv5训练好的模型通过开放式视觉推理和神经网络优化(open visual inference and neural network optimization, OpenVINO)进行模型调用和部署,并对深度相机采集到的图像进行目标检测,识别螺栓并框出ROI。

步骤3)单独截取出螺栓零件所在的ROI。

步骤4)将ROI的部分进行二值化和降噪处理,并通过Canny改进算法进行边缘检测,同时提取螺栓的图像轮廓。

步骤5)基于提取到的图像轮廓,运用最优拟合直线算法获取螺栓的倾斜角度,运用矩特征算法获取螺栓的重心。

步骤6)通过霍夫变换将图像拟合合成直线,然后保留最长的两条线段 S_1 和 S_2 ,并计算线段 S_1 上的点到线段 S_2 上的点的最短距离,最短距离即为螺栓直径。

2 YOLOv5 目标识别

YOLO是一种基于深度学习的目标检测算法,能够快速且精确地检测出图像中的多个目标物体。YOLOv5是其中非常经典且应用较为广泛的版本,和前代相比运算速度更快且更加轻量化。在使用YOLOv5进行目标检测的过程中,需要进行数据集的制作和模型的训练。通过网络查找和自己拍照的方式,收集不同角度和不同光照条件下的螺栓数据集共1098个,并将图像调整为 640×640 像素。使用开源工具Labelme进行数据集标注,标注类别为“Bolt”即螺栓,其余部分都视作“背景”。训练集、测试集和验证集按照8:1:1的比例进行划分。为了提高模型的鲁棒性,同时防止训练过程中出现过拟合的情况,对标注完成后的数据集进行镜像、旋转、模糊、调节亮度和对比度等数据集增强操作。

在模型训练过程中,本实验使用轻量级的YOLOv5s进行模型训练。当训练轮次到300时,准确率(Precision)为92.7%,召回率(Recall)为91.5%,阈值IoU为0.5时的计算平均精度(mAP_{0.5})为94.7%,已满足实验需求。

3 ROI 提取

3.1 模型调用部署

本文使用英特尔开发的OpenVINO对深度学习模型进行推理部署,以提高模型的推理性能和效率。在模型部署过程中,需要对输入数据进行缩放、归一化和格式转换等预处理操作,以适应模型的输入要求^[9]。配置好推理引擎和输入数据预处理后,可以调用推理引擎进行目标检测推理,并输出预测的目标检测结果。在得到输出结果后,需要进行后处理操作,如非最大抑制,以去除重复的检测结果并提高精度。

最终的目标识别结果如图2所示。图中方框框出来的是识别出来螺栓的ROI,“Bolt”为标注类别螺栓。本实例高度还原了螺栓定位抓取工作环节中螺栓零件的摆放、光

照及背景情况。虽然工作流水线的背景一般都为深色且较为单一,并且与螺栓的像素差较大,但由于受光照变化、反射等影响,产生的椒盐噪声对图像的可读性产生了一定程度的干扰,因此不可或缺的需要对图像进行下一步的预处理。

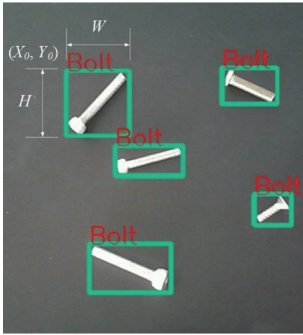


图 2 目标识别示例图

3.2 ROI 截取

为了能够减少图像分析过程中的干扰项、提高检测准确性、加快处理速度,需要截取 ROI。如图 2 所示,以 (X_0, Y_0) 为坐标原点, W 为图像的宽度, H 为图像的高度,进行 ROI 截取。

4 图像预处理

为了提高 ROI 特征的可读性,增加关键信息的可检测度,同时减少图像畸变、噪声等干扰,对图像进行位姿及尺寸检测前需要进行预处理,从而提高后续检测结果的可靠性和准确性^[10]。

4.1 图像降噪

通过图 2 可以看出,受到光照条件的影响,图像中出现了椒盐噪声、离散噪声等干扰噪声。图像降噪正是为了去除图像中的干扰噪声,提高后续处理的准确性和稳定性。OpenCV 提供了多种降噪方法,如高斯滤波、中值滤波等。其中,中值滤波是将每个像素点替换为其周围邻域像素的中值,适用于去除椒盐噪声等离散噪声^[11]。对于螺栓零件图像中的噪声污染,本文采用中值滤波算法进行降噪处理。图像降噪处理结果如图 3 所示。由于在螺栓定位抓取的场景中,流水线背景与螺栓的像素差往往比较大,同时滤波核值过大容易产生图像畸变,因此本实验的中值滤波核取最小值。通过中值滤波的降噪方法,可以有效地去除背景中的椒盐噪声、离散噪声等,同时相对于其他降噪方法能够更好地保持螺栓的轮廓边缘信息。

4.2 图像二值化

在螺栓位姿及尺寸检测中,图像二值化是一项重要的预处理步骤。在二值化处理过程中,通常指定一个像素灰度值作为阈值,将小于阈值的部分的像素值设置为 0,其余设置为 255,为了保留较多的图像细节,取像素灰度中值 127 作为阈值,图像二值化处理结果如图 4 所示。通过对



图 3 图像中值滤波降噪效果图

图像的二值化,可以进一步去除噪声和增强对比度,同时将螺栓从背景中分离出来,便于对目标进行分析和测量,从而为下一步螺栓的形状和轮廓分析打下基础^[12]。



图 4 图像二值化效果图

4.3 Canny 改进边缘检测

在轮廓提取前,首先对图像进行边缘检测。其中 Canny 算法是一种较为经典,同时又应用非常广泛的边缘检测算法。该算法主要包括以下几个步骤。首先选择高斯滤波器削弱模糊噪声,并利用一阶偏导有限差分计算每个像素点的梯度幅值与方向^[13]。然后通过非极大值抑制对平滑后的图像进行处理,只保留局部最大值为边缘。最后采用双阈值抑制和边缘追踪的方法,获取最终的边缘图像^[14]。

传统 Canny 算法在求梯度幅值时用的是 2×2 的 Canny 算子,由于卷积算子维度小且又是近似计算,所以易受到噪声影响并且计算精度较差,使得检测的结果不够准确,从而更易检测到伪边界或遗漏掉真实边缘。Sobel 算子是一种结合了高斯平滑的离散微分算子,利用 3×3 邻域来计算中心像素点的梯度,而其靠近中心像素点的权值更高。Sobel 算子通过在图像上应用水平方向和垂直方向两个滤波器来计算图像的梯度。Sobel 算子计算简单、快速,适用于实时边缘检测。同时对于较小的目标物体和边缘清晰的图像,Sobel 算子能够提取出较强的边缘。Sobel 算子 x 轴和 y 轴的卷积模板如图 5 所示。

-1	0	1	-1	-2	-1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	1	2	1

图 5 Sobel 算子模板

在 Canny 算法中,设置了高低两个阈值。高阈值点标记为强边缘点,低阈值点标记为弱边缘点。在进行阈值处理时,最终保留的是强边缘以及与强边缘相连的弱边缘点^[15]。针对传统 Canny 算法需要人工确定高低阈值的问题,本文采用基于 Otsu 的自适应双阈值选择方法。Otsu 方法使用最大类间方差(intra-class variance, ICV)作为评价准则,通过对图像直方图的计算给出类间最优分离的最优阈值^[16]。ICV 的具体公式如下:

$$ICV(T) = P_F \times (m_F - m)^2 + P_B \times (m_B - m)^2 \quad (1)$$

其中, F 和 B 为阈值分割的像素集合, P 为像素数的占比, m 为灰度均值。使类间方差最大时的灰度值 T 即为最优阈值。

针对视觉识别的应用场合,本文采用 Canny 改进边缘检测算法,通过 3×3 的 Sobel 卷积算子代替原有 2×2 的 Canny 卷积算子计算高斯平滑后图像的近似梯度,并采用 Otsu 的方法自适应选择高低阈值。改进后的 Canny 边缘检测算法流程如图 6 所示。

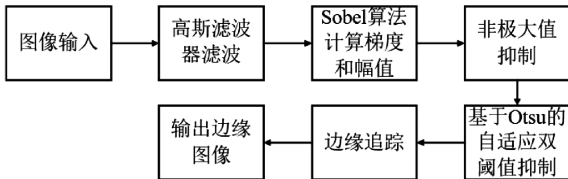


图 6 Canny 改进算法流程图

Canny 改进边缘检测算法和传统 Canny 边缘检测算法的结果对比如图 7 所示。通过改进前后的图像对比,可以看出 Canny 改进算法获得的目标图像边缘噪声点较少,同时去除了部分伪边缘,目标物体的边缘轮廓也比传统 Canny 算法更连续。

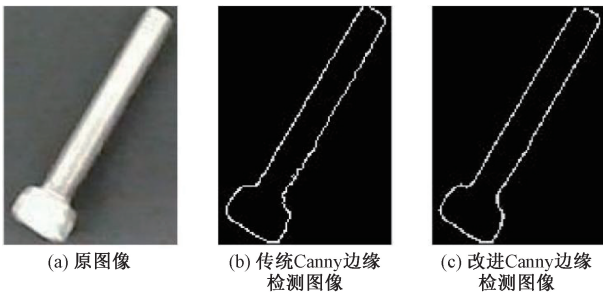


图 7 改进 Canny 算法和传统 Canny 算法结果对比图

4.4 图像轮廓提取

在 Canny 改进边缘检测算法的基础上,通过 $findContours$ 函数,对二值图像进行轮廓检测。图像轮廓提取结果如图 8 所示。通过检测图像中的连续像素点集合,可以得到螺栓的整体外部轮廓。根据轮廓的形状、长度和宽度等特征,可以进一步筛选和分析螺栓的形状信息。

5 螺栓位姿及尺寸检测分析

螺栓零件图像经过降噪、二值化、轮廓提取等预处理工



图 8 图像轮廓提取效果图

作之后,需要进行零件的位姿及尺寸检测,这是进行本次实验的最终目的^[17]。尤其是对螺栓直径的测量,更是此次实验的重要内容。

5.1 螺栓位姿分析

对于螺栓的位姿检测,本实验主要分析螺栓的倾斜角度和重心位置。

在螺栓倾斜角度分析中,可以在最优拟合直线算法的基础上通过计算获取螺栓在图像中的倾斜角度,从而提供有关螺栓位置和方向的信息。通过在实验中使用最优拟合直线的计算,可以返回拟合直线的向量参数(v_x 和 v_y)以及直线上的一点(x 和 y)。利用拟合直线的向量参数,进而可以计算出螺栓的倾斜角度。具体公式如下:

$$angle = np. arctan2(v_y, v_x) \times 180/np. pi \quad (2)$$

其中, v_x 和 v_y 为最优拟合直线上点的方向向量。这里使用 $np. arctan2()$ 函数计算向量的反正切值,并将结果转换为角度制。

螺栓倾斜角度示意图如图 9 所示。

L :最优拟合直线
 A :螺栓倾斜角度
 (x,y) :拟合直线上的点坐标
 (v_x,v_y) :拟合直线上点的方向向量

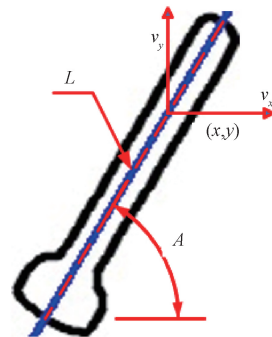


图 9 螺栓倾斜角度分析图

在螺栓重心分析中,可以使用矩特征函数来计算轮廓的矩,并从中提取螺栓的重心位置。螺栓的重心位置可以提供有关螺栓位置和对称性的信息。计算轮廓的矩的函数为: $M = cv2. moments(cnt)$ 。上式将返回包含轮廓的矩信息的字典。利用轮廓的矩信息,可以计算出螺栓的重心位置。具体公式如下:

$$c_x = \text{int}(M['m_{10}'] / M['m_{00}']) \quad (3)$$

$$c_y = \text{int}(M[‘m_{01}’] / M[‘m_{00}’]) \quad (4)$$

其中, c_x 和 c_y 分别表示重心位置的 x 和 y 坐标。 $M[‘m_{00}’]$ 表示图像区域的零阶矩, 也就是螺栓轮廓总的像素数即面积。 $M[‘m_{10}’]$ 和 $M[‘m_{01}’]$ 分别代表图像区域在 x 轴和 y 轴的一阶矩, 用来描述图像的质心、平均位置和分布。测量时的重心点坐标示例如图 10 所示。通过以上步骤, 可以得到螺栓的倾斜角度和重心位置, 这些数据可以提供有关螺栓位置和对称性的重要信息, 对于螺栓检测、定位和抓取等问题具有重要意义。

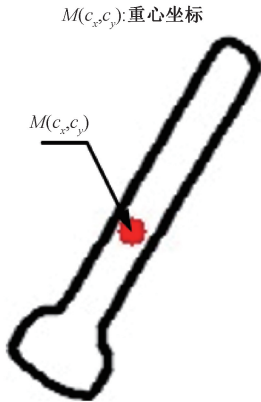


图 10 螺栓重心分析图

5.2 计算螺栓直径

计算螺栓直径是螺栓检测和测量中的重要任务之一。螺栓直径测量的准确性对于尺寸和质量控制、装配过程、故障诊断和验证标准符合等方面具有重要作用。准确测量螺栓直径可以提高产品质量、降低成本, 并确保螺栓零件的正确配合和可靠性。

Hough 直线检测是将图像空间中的直线检测转换为参数空间中的点检测, 通过统计特性来解决检测问题。如果图像中的像素构成一条直线 L , 那么这些像素坐标值 (x, y) 在参数空间对应的曲线必相交于一点 P , 所以只需要将图像中的所有像素点转换成参数空间中的曲线, 并在参数空间检测曲线交点即可实现直线检测^[18]。Hough 直线检测原理如图 11 所示。

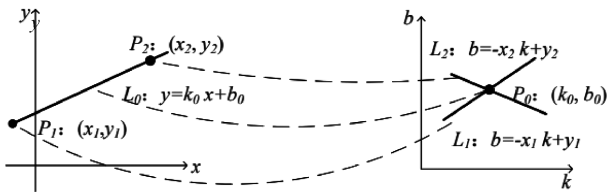


图 11 Hough 直线检测原理图

本文在 Hough 直线检测的基础上, 提出了两直线段最短距离算法以测量螺栓直径。两直线段最短距离算法的具体计算方法如下:

假定螺杆的拟合线段 S_1 上的像素坐标为 $s_1 = (p_1, p_2)$, S_2 上的像素坐标为 $s_2 = (p_3, p_4)$ 。

计算螺栓拟合线段的方向向量:

$$v_1 = (p_2 - p_1) \quad (5)$$

$$v_2 = (p_4 - p_3) \quad (6)$$

如果 v_1 和 v_2 之差满足一定要求, 计算线段起点之间的向量:

$$p_1 p_3 = (p_3 - p_1) \quad (7)$$

计算方向向量的点积 dot :

$$dot = v_1 \times v_2 \quad (8)$$

如果点积为零, 则线段平行。计算起点之间的距离:

$$Distance = \| p_1 p_3 \| \quad (9)$$

否则, 计算参数 t_1 和 t_2 在两个起始点之间的投影长度, 同时将 t_1 和 t_2 值限制在 0 到 1 的范围内:

$$t_1 = (p_1 p_3 \times v_1) / (v_1 \times v_1) \quad (10)$$

$$t_2 = (p_1 p_3 \times v_2) / (v_2 \times v_2) \quad (11)$$

计算线段上最短距离对应的点:

$$closest_point_1 = p_1 + t_1 \times v_1 \quad (12)$$

$$closest_point_2 = p_3 + t_2 \times v_2 \quad (13)$$

计算最短距离对应点之间的距离:

$$D = \| closest_point_1 - closest_point_2 \| \quad (14)$$

两直线段最短距离(螺栓直径)计算的数学分析部分的具体流程如图 12 所示。

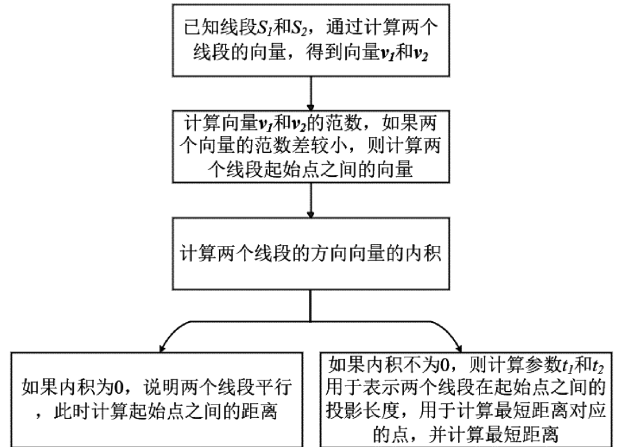


图 12 两直线段最短距离数学计算流程图

螺栓直径的检测示意图如图 13 所示。

5.3 结果验证

为验证螺栓倾斜角度检测和螺栓直径检测方法的有效性和准确性, 在 Windows11 操作系统中利用 OpenCV 库对深度相机所采集到的螺栓图像进行处理分析并验证算法。其中图像采集设备选择 Astra Pro 深度相机, 分辨率为 640×480 , 深度相机放置在工作台上方。工作台和镜头距离为 200 mm, 并保证工作台 ($120 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$) 在深度相机的视野范围之内。螺栓倾斜角度、尺寸测量实验的数据如表 1 和表 2 所示。

根据表 1 和表 2 的实验数据可以看出, 通过本文所使用的算法, 对螺栓倾斜角度的检测误差控制在 $\pm 1.2^\circ$ 以

S_1, S_2 :最长拟合线段
 (p_1, p_2) : S_1 任意点像素坐标
 (p_3, p_4) : S_2 任意点像素坐标
 v_1, v_2 :拟合线段方向向量
 D :最短距离(螺栓直径)

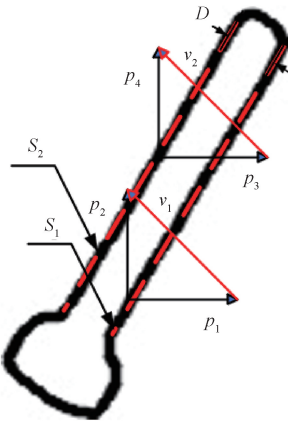


图13 螺栓直径检测示意图

表1 螺栓倾斜角 θ ($^{\circ}$)

序号	视觉测量倾斜角	手工测量倾斜角
1	35.2	36.1
2	56.5	55.8
3	114.8	115.9
4	91.4	90.2
5	132.8	133.7
6	76.5	75.7
7	123.1	124.2
8	65.9	65.2

表2 螺栓直径 d mm

序号	M4	M5	M8	M20
1	3.85	5.19	8.13	19.43
2	3.93	4.78	7.71	19.65
3	3.84	5.17	7.78	20.02
4	4.04	4.76	7.72	19.75
5	3.79	4.95	7.70	19.53
6	3.85	4.75	8.14	19.55
7	3.78	4.84	7.79	19.47
8	3.82	4.79	7.76	19.46

内,螺栓直径越大,误差越小,对不同类型螺栓直径检测的误差控制率在了 $\pm 5.5\%$ 以内,能准确识别出螺栓的姿态和尺寸等重要数据,达到了预期的测量精度要求。

6 结 论

为了提高工业生产中螺栓定位抓取的准确性,本文提

出基于 ROI 的螺栓位姿及尺寸检测方法。该方法通过 YOLOv5 目标识别算法对螺栓目标进行识别,将识别出的目标区域截取为 ROI。并在图像预处理的过程中,在传统 Canny 边缘检测算法的基础上采用 Canny 改进算法检测目标轮廓,并根据目标轮廓的结构特点采用基于 Hough 直线检测的两直线段最短距离算法进行相应的尺寸检测分析,并通过最优拟合直线算法和矩特征算法对螺栓进行位姿识别。通过本次实验,最终得到了螺栓的倾斜角度,重心点坐标,以及螺栓直径等重要数据,从而有效的实现了螺栓位姿及尺寸检测在计算机视觉中的应用,同时螺栓倾斜角的检测误差控制在了 $\pm 1.2^{\circ}$ 以内,螺栓直径越大,误差越小,不同类型螺栓直径的检测误差率控制在了 $\pm 5.5\%$ 以内,符合预期的测量精度要求,通过不同类型螺栓直径测量的结果也证明了该方法的适用性和有效性。

参考文献

- [1] 宋春华,彭滋知. 机器视觉研究与发展综述[J]. 装备制造技术,2019,(6):213-216.
- [2] 袁斌,王辉,李荣焕,等. 视觉机器人的零件识别与抓取方法研究[J]. 机械设计与制造,2024,(2):309-313,318.
- [3] 孙海,牛晨,鲁飞. 基于单目视觉的特定工件位姿检测研究[J]. 制造业自动化,2023,45(1):5-8,16.
- [4] 孙先涛,江汪洋,陈文杰,等. 基于感兴趣区域的物体抓取位姿检测[J/OL]. 系统工程与电子技术,1-14[2024-04-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20231103.1105.016.html>.
- [5] 唐心亮,刘子剑,于平平. 面向多尺度多方向螺栓的检测算法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(10):221-231.
- [6] LOU J. Crawling robot manipulator tracking based on gaussian mixture model of machine vision[J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(9):6683-6693.
- [7] COMARI S, CARRICATO M. Vision-based robotic grasping of reels for automatic packaging machines[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15):7835.
- [8] 董阳. 面向机械臂抓取应用的视觉识别与定位技术研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2022.
- [9] 谈世磊,别雄波,卢功林,等. 基于 YOLOv5 网络模型的人员口罩佩戴实时检测[J]. 激光杂志,2021,42(2):

- 147-150.
- [10] 谢俊,李玉萍,左飞飞,等.基于机器视觉的孔类零件尺寸在线检测[J].电子测量技术,2021,44(2):93-98.
- [11] SUN T, NEUVO Y. Detail-preserving median based filters in image processing [J]. Pattern Recognition Letters, 1994, 15(4): 341-347.
- [12] 于福才,豆祥忠,徐昌军,等.基于图像轮廓的泵体口环位姿及尺寸检测算法[J].制造业自动化,2023,45(2):1-5.
- [13] 汪宗洋,王煜,朱硕.基于改进 Canny 算法的边缘检测技术应用及发展趋势[J].信息通信技术与政策,2023,49(8):90-96.
- [14] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(6): 679-698.
- [15] 于新善,孟祥印,金腾飞,等.基于改进 Canny 算法的物体边缘检测算法[J].激光与光电子学进展,2023,60(22):221-230.
- [16] 周向阳,罗雪梅,王霄.结合边缘信息的二维 Otsu 阈值分割算法研究[J].智能计算机与应用,2020,10(6):19-24,30.
- [17] 马建.基于机器视觉的工件识别与定位系统的设计与实现[D].沈阳:中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2020.
- [18] 张喜民,詹海生,余奇颖.基于投票约束的 Hough 变换直线检测算法[J].电子设计工程,2023,31(19):89-93.

作者简介

戴先鑫,硕士研究生,主要研究方向为机械电子工程、机器人、图像处理。

E-mail:nbdaixx@qq.com

付振山(通信作者),博士,教授,主要研究方向为工业机器人、啮合原理、机械电子设备。

E-mail:273482839@qq.com