

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514284

基于机器视觉的飞机连接件识别与分类算法*

支 珊,张宇航,廖宇杰,孙 玲,杨振远

(辽宁科技学院机械工程学院 本溪 117004)

摘 要:典型飞机连接件种类繁多且批量巨大。然而,不同尺寸、外观形状复杂各异,位姿摆放无序的飞机连接件识别与分类是实际应用亟待解决的难题。针对此类问题,提出了基于机器视觉的飞机连接件识别与分类算法。首先,利用高斯滤波消除图像噪声,采用双阈值二值法提取图像边缘过渡带;然后,建立图像坐标系,对飞机连接件图像边缘进行定位,将图像分割为 4 个象限,对每个象限中的连接件几何中心进行定位,并计算连接件边缘过渡带点的关键参数;最后,通过容差视觉识别算法、划分封闭连接件测量关注区域、支持向量机预设值算法和基于第二关注区角点识别算法,对连接件进行识别与分类。在机器视觉图像处理实验平台上,将垫片、螺纹、卡簧和螺母这 4 种不同类型的飞机连接件作为实验对象,对飞机连接件进行检测与识别精度验证。在此基础上,展示了该算法的求解过程。实验结果表明,该研究平均检测每幅图片时间为 2.14 s,平均分类识别正确率为 95.02%,单个零件识别时间为 0.54 s,错误识别率仅为 4.98%;SIFT 和 Hu 算法检测平均分类识别正确率为 90.29%和 72.42%,单个零件识别时间为 1.16 和 1.34 s;2 种检测方法识别时间相差 0.62 和 0.80 s,识别正确率相差 4.8%和 22.65%,其视觉识别方法可以满足飞机连接件的快速、准确识别要求。

关键词:飞机连接件;机器视觉;识别分类;图像处理

中图分类号: TH161 TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Machine vision-based algorithm for recognition and classification of aircraft connecting components

Zhi Shan, Zhang Yuhang, Liao Yujie, Sun Ling, Yang Zhenyuan

(College of Mechanical Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China)

Abstract: Typical aircraft fasteners are characterised by their extensive variety and substantial production volumes. However, the recognition of these components—which vary in size, exhibit complex geometries, and often appear in disordered orientations—remains a pressing challenge in practical applications. To address this issue, a machine vision-based aircraft connector recognition and classification algorithm is proposed. Firstly, Gaussian filtering is employed to eliminate image noise, followed by a dual-threshold binarisation method to extract edge transition zones. Subsequently, an image coordinate system is established to locate connector edges, partitioning the image into four quadrants. The geometric centres of connectors within each quadrant are then positioned, and key parameters of edge transition zone points are calculated. Finally, the components are identified and classified through a tolerance-based visual recognition algorithm, delineation of enclosed measurement regions for the fasteners, a support vector machine preset value algorithm, and a corner point recognition algorithm based on secondary regions of interest. On a machine vision image processing experimental platform, four distinct types of aircraft fasteners—gaskets, threads, retaining rings, and nuts—were employed as test subjects to validate the detection and recognition accuracy. Building upon this, the algorithm's solution process is demonstrated. Experimental results indicate that the average detection time per image is 2.14 seconds, with an average classification accuracy of

收稿日期:2025-07-18 Received Date: 2025-07-18

* 基金项目:辽宁省教育厅项目(JYTMS20231781)、广东省机器人与智能系统重点实验室开放基金项目(2924040132)资助

95.02%。Individual part recognition takes 0.54 seconds, with an error rate of only 4.98%. The SIFT and Hu algorithms achieved average classification accuracy rates of 90.29% and 72.42%, respectively, with individual part recognition times of 1.16 seconds and 1.34 seconds. The recognition time differences between the two detection methods were 0.62 seconds and 0.80 seconds, while the accuracy differences were 4.8% and 22.65%. These results demonstrate that the proposed method meets the requirements for rapid and accurate recognition of aircraft fasteners.

Keywords: aircraft connectors; machine vision; recognition and classification; image processing

0 引 言

机器人分拣是指通过机器人技术(如机械臂、视觉识别系统等),结合自动化控制算法和传感器,对物体进行识别、抓取、分类和定向搬运的过程。广泛应用于工业、农业、物流、航空航天,以及医疗器械等科技领域。机器人分拣零件是工业生产的重要环节。其中,识别零件是分拣系统的核心技术问题^[1-3]。通过视觉识别和 AI 算法,可以快速、准确识别零件形状、纹理和缺陷等,彻底改变了人工分拣方式和效率,实现生产智能化,推动工业产业升级^[4-7]。

近年来,国内外不少学者对机器视觉零件识别、分拣开展了广泛研究^[8-10]。Ruiz 等^[11]提出对制造过程中的飞机固定元件螺纹和螺母,利用卷积神经网络进行检测和分类,在每张图像处理时间为 0.8 ms 的情况下,准确率达到 98.3%;罗杭等^[12]提出了一种基于 SGV-YOLOv8 模型的机械零件智能识别与抓取方法,使工业机器人在抓取机械零件过程中零件识别速度提高了 37.6%;余永维等^[13]提出一种基于 Inception-SSD 框架的零件深度学习识别方法,该方法在实际生产过程复杂情况下检测准确率达到 97.8%,检测速率为 41 fps;鲁晟焱等^[14]提出一种基于 Hu-尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)特征匹配与遗传算法的零件视觉分拣方法。将螺栓、垫片和螺栓挡片为目标零件进行识别实验,查全率和处理时间分别为 93.25% 和 3.03 s。

国内外参考文献的零件识别算法主要采用特征点、轮廓矩和模板匹配识别物体。传统算法具有不能同时识别图像局部细节与全局形状的矛盾;模板匹配算法对尺度变化大的飞机连接件高度敏感,为匹配效果带来极大不确定度。并且上述文献仅对两类连接件进行分类和识别。该研究以 4 种类型小尺寸飞机连接件:螺纹、卡簧、垫片和螺母为研究对象,根据飞机连接件的全局形状和边缘细节特征,提出基于机器视觉飞机连接件识别与分类算法。利用容差视觉识别算法、支持向量机预设值算法、基于第二关注区角点法识别螺母视觉算法,解决不同尺寸、外观形状复杂各异,位姿摆放无序、批量大,且种类繁多的飞机连接件识别与分类问题。在此基础上,在机

器视觉图像处理实验平台 MV-VS1000 验证了算法的准确性。

1 连接件图像预处理

1.1 连接件边缘过渡带提取

连接件图像边缘过渡带的灰度值在边缘法截面内呈高斯积分曲线分布^[15]。采用灰度双阈值二值法^[16],可以提取连接件图像边缘过渡带,如图 1 所示。

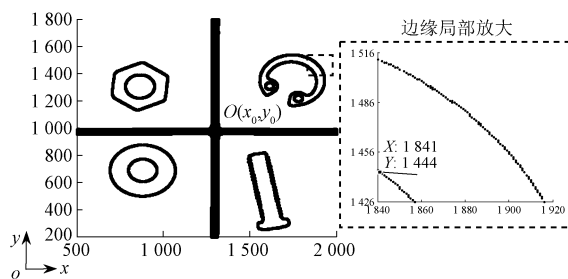


图1 像素级连接件边缘带提取图像

Fig. 1 Pixel-level connector edge band extraction images

为保证图像边缘过渡带连续,且尽量减小过渡带的宽度,提高过渡带中心位置的统计精度,减少计算量^[12]。当前试验条件下,取双阈值分别为: $g_1 = 105$, $g_2 = 165$ 。

1.2 图像分割

为方便测量和提高测量效率,对连接件边缘过渡带图像划分零件视觉识别的关注区。图像分割步骤为:

1) 建立图像坐标系与测量坐标系,将测量基准点位于图像中心 $O(x_0, y_0)$ 点处,如图 1 所示。

2) 在图 1 坐标系中,根据视觉成像原理,图像横坐标 x 和纵坐标 y 分别代表该像素在数字图像中的列数和行数。

3) 以图像中心 $O(x_0, y_0)$ 为测量基准点,将图像划分为 4 个象限,分别为:第一象限 $Q_1 = \{(x, y) \in N | 0 \leq x \leq x_0 \text{ 且 } 0 \leq y \leq y_0\}$;第二象限 $Q_2 = \{(x, y) \in N | x_0 \leq x \leq x_1 \text{ 且 } 0 \leq y \leq y_0\}$;第三象限 $Q_3 = \{(x, y) \in N | x_0 \leq x \leq x_1 \text{ 且 } y_0 \leq y \leq y_1\}$;第四象限 $Q_4 = \{(x, y) \in N | 0 \leq x \leq x_0 \text{ 且 } y_0 \leq y \leq y_1\}$ 。根据上述方法分割后的图像,如图 2 所示。

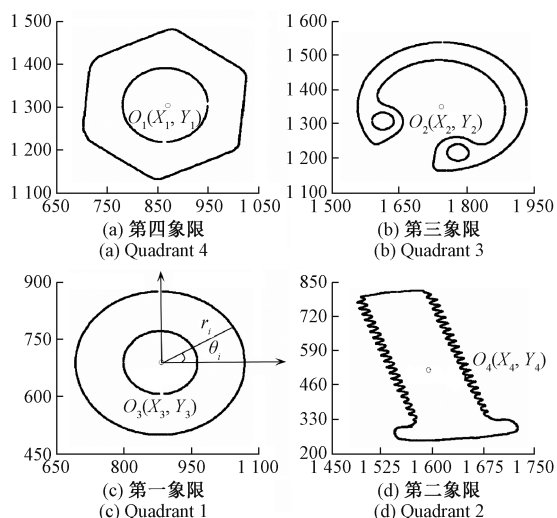


图2 图像分割后的连接件图像

Fig. 2 Connector image after image segmentation

2 基于机器视觉飞机连接件识别与分类算法

从图2可以看出,分割后的图像清晰、完整,并且呈现出被分类零件的全局形状和边缘细节特征。飞机连接件通常包括4种类型,分别为卡簧、垫片、螺母和螺纹。实验针对此4种连接件进行分类识别,提出基于机器视觉飞机连接件分类视觉算法。

2.1 计算连接件几何中心和关键参数

由于飞机连接件具备轴对称性,因此将飞机连接件几何中心作为图像分类的基准点。几何中心是几何图形中所有点的平均位置,连接件边缘过渡带是离散点集,该边缘过渡带由离散点集 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 组成,因此连接件图像几何中心 $O(\bar{x}, \bar{y})$,如式(1)和(2)所示。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2)$$

计算后几何中心分别为: $O_1(X_1, Y_1)$ 、 $O_2(X_2, Y_2)$ 、 $O_3(X_3, Y_3)$ 和 $O_4(X_4, Y_4)$,如图2所示。为了方便计算,将图像直角坐标系转化为极坐标系,计算连接件图像几何中心 $O(\bar{x}, \bar{y})$ 到连接件图像边缘过渡带内任意像素点 P_i 的距离 r_i , r_i 为像素点 P_i 的极径;计算极轴 Ox 与射线 OP_i 之间的夹角 θ_i , θ_i 为像素点 P_i 的极角,如图2(c)所示。

$$r_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$\theta_i = \arccos \frac{\bar{x} - x_i}{r_i} \quad (4)$$

2.2 基于容差识别的卡簧视觉分类算法

连接件按外部轮廓分为:封闭型图形和不封闭图形2种类型。卡簧是不封闭图形;垫片、螺母和螺纹属于封闭图形。利用首尾两点角度差值,检查连续极角差值是否在容差范围内,判断连接件边缘过渡带坐标是否足够接近,即可区分两类图形。采用基于机器视觉卡簧边缘过渡带点计算相邻极角容差,可以区分封闭型图形和不封闭图。

因此,首先计算飞机连接件边缘过渡带内点的极角,然后按照从小到大的顺序排列,最后计算相邻两极角的差值, δ 代表极角的容差值。如式(5)所示。

$$\theta_{i+1} - \theta_i > \delta \quad (5)$$

经过大量实验表明,连续图像相邻两点之间极角差值在 $0^\circ \sim 2^\circ$ 范围。本算法成立的关键在于容差值 δ 的选取,容差值 δ 和卡簧开口大小有关,实验样本中卡簧开口的角度在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 范围。为了保证方法的有效性,因此本实验选取容差值 $\delta = 5^\circ$ 。当连续两点坐标极角容差 $> \delta = 5^\circ$ 时,则图像边缘出现间断点,表明图像不封闭,判断为卡簧;否则图形封闭,判断为垫片、螺母和螺钉。该方法计算简单,可操作性强。

2.3 划分封闭连接件测量关注区域

为了识别封闭连接件,需要聚焦连接件的几何特征,针对不同封闭连接件,才能采用不同的方法进行计算,然而划分测量关注区是关键步骤。过程为:

1) 利用式(3),计算连接件边缘过渡带像素点 P_i 的极径 r_i ;

2) 计算连接件边缘过渡带点的平均极径值为 $\bar{r} = \sum_{i=1}^n r_i$;

3) 以连接件几何中心 $O(\bar{x}, \bar{y})$ 为圆心,平均极径值 \bar{r} 为半径,将连接件划分为2个测量关注区域,如图3所示。

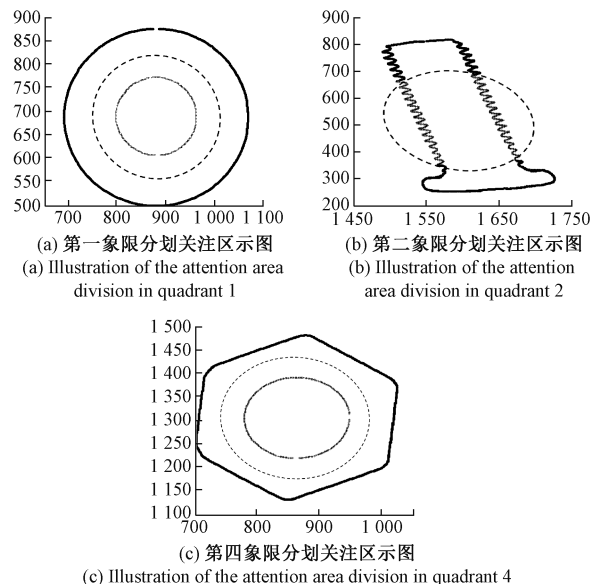


图3 划分两个测量关注区域

Fig. 3 Divide into two measurement areas of interest

在划分后的两个测量关注区内,不同的封闭型连接件呈现不同的几何形状。例如:垫片两个关注区都是接近于圆形的图像;螺母第一关注区为近似圆形,第二关注区近似正六边形;螺纹第一关注区为螺纹牙状分布,第二关注区由螺纹顶尖和螺纹底边构成。封闭型连接件外部轮廓各自呈现一定分布规律,因此采用 SVM 二分类算法找到分类边界,可以解决封闭型连接件识别与分类问题。

2.4 基于支持向量识别螺纹的视觉分类算法

支持向量是样本数据集中位于分类边界上或边界内,对最终分类起决定性作用的样本点。这些关键点直接影响预测样本的正确性^[17]。连接件的极径方差表示不同几何形状的波动程度,因此把连接件的极径方差作为样本,通过求解封闭型连接件极径方差的支持向量,可以区分不同特征的几何形状。根据方差公式,将极径 r_i 代入,得到的公式如式(6)所示。

$$\text{Var}(R) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \quad (6)$$

分别计算图3封闭连接件第一和第二关注区方差,如图4所示。

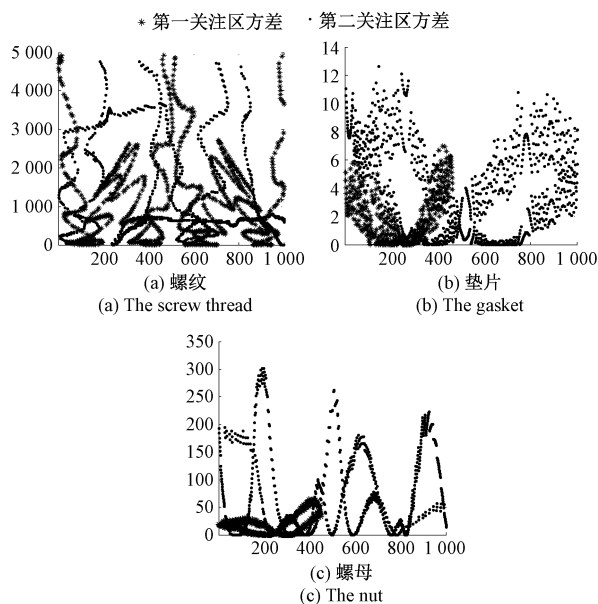


图4 封闭连接件第一和第二关注区方差
Fig.4 Variance of the first and second areas of the closed connector

根据式(6)得:螺纹第一和第二关注区的支持向量的数值为: $\text{Var}(R_{\text{螺纹}}^1) = 1\,286.2$, $\text{Var}(R_{\text{螺纹}}^2) = 1\,269.5$; 垫片第一和第二关注区的支持向量的数值为: $\text{Var}(R_{\text{垫片}}^1) = 2.037$, $\text{Var}(R_{\text{垫片}}^2) = 4.140$; 螺母第一和第二关注区的支持向量的数值为: $\text{Var}(R_{\text{螺母}}^1) = 19.136$, $\text{Var}(R_{\text{螺母}}^2) = 70.861$ 。不难看出,螺纹的第一和第二关注区整体离散程度与极差值最大,螺母是垫片的317~643倍,是螺母

的18~67倍;垫片的第一和第二关注区整体离散程度与极差值最小;螺母的第一关注区比螺母的第二关注区离散程度与极差值小,总体离散程度比垫片大。

基于上述分析,提出基于支持向量识别螺纹视觉分类算法。视觉模型为:

$$\begin{cases} \text{Var}(R_i^1) \geq \text{Var}(R_0) \\ \text{Var}(R_i^2) \geq \text{Var}(R_0) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\text{Var}(R_0)$ 为螺纹支持向量预设值; $\text{Var}(R_i^1)$ 为未知封闭连接件第一关注区点 P_i^1 方差; $\text{Var}(R_i^2)$ 为未知封闭连接件第二关注区点 P_i^2 方差。通过大量实验,选用螺纹支持向量预设值 $\text{Var}(R_0) = 500$ 。

当未知封闭连接件方差 $\text{Var}(R_i^1)$ 和 $\text{Var}(R_i^2)$, 同时满足式(7),即可判定未知封闭连接件是螺母。

本章算法是根据螺纹牙局部细节、垫片和螺母全局形状特点,提出将封闭型连接件极径方差作为支持向量,进而构造基于支持向量识别螺纹视觉模型,实现螺纹视觉识别。仅识别螺母,原因是螺母支持向量机是垫片和螺母的支持向量机的几十到几百倍,螺母支持向量预设值比垫片和螺母更容易选取,因此识别正确率高。实验发现,当垫片边缘存在毛刺和未清洗干净时,或者当螺母尺寸极小时,螺母正六边形的外部轮廓趋近于圆形,垫片与螺母采用此方法选取支持向量,将导致识别错误。

2.5 基于第二关注区角点法识别螺母的视觉算法

完成卡簧和螺纹分类和识别后,继续对螺母和垫片进行识别。通过图3的分析,可知螺母和垫片的区别是:螺母第二关注区近似于正六边形。正六边形的性质是内

切圆半径等于边心距的 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍。边心距是正多边形的每条边到其外接圆的圆心的距离。因此,提出基于第二关注区角点法识别螺母视觉算法,识别螺母视觉算法图解,如图5所示。

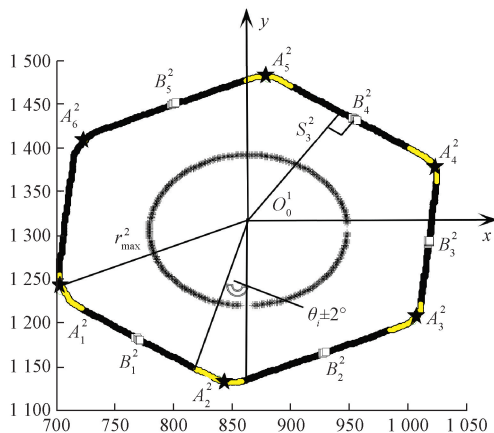


图5 识别螺母视觉算法图解

Fig.5 Illustration of the vision algorithm for identifying nuts

具体步骤为:

1) 对未知零件第一关注区,进行最小二乘法中心定位,拟合后的圆心 $O_0^1(x_0^1, y_0^1)$;

2) 将拟合后的圆心 $O_0^1(x_0^1, y_0^1)$ 代入式(3),寻找第二关注区未知零件边缘过渡带的最大极径 r_{\max}^2 ,定位未知零件第一角点 $A_1^2(x_1^2, y_1^2)$;

3) 建立第二关注区坐标旋转公式,如式(8)所示。

$$\begin{cases} x_i^{2'} = x_0^1 + (x_i^2 - x_0^1) \cdot \cos \theta - (y_i^2 - y_0^1) \cdot \sin \theta \\ y_i^{2'} = y_0^1 + (x_i^2 - x_0^1) \cdot \sin \theta - (y_i^2 - y_0^1) \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

将 $\theta = 60^\circ$ 代入式(8)中,获取极角在 $\theta_i \pm 2^\circ$ 范围,边缘过渡带点的集合,确定在此集合内最大极径点的坐标 $A_2^2(x_2^2, y_2^2)$;

4) 重复计算步骤3),确定正六边形其余4个角点, $A_3^2(x_3^2, y_3^2)$ 、 $A_4^2(x_4^2, y_4^2)$ 、 $A_5^2(x_5^2, y_5^2)$ 和 $A_6^2(x_6^2, y_6^2)$;

5) 将正六边形的6个角点,带入边心距 $d_i^2 = \sqrt{(x_i^2 - x_0^1)^2 + (y_i^2 - y_0^1)^2}$, 计算平均边心距 $\bar{d} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 d_i^2$;

6) 计算相邻极角的平均角 $\bar{\theta}_n (n = 1, \dots, 5)$, 平均角公式为 $\bar{\theta}_n = \frac{\theta_n + \theta_{n+1}}{2}$;

7) 获取平均极角 $\bar{\theta}_n \pm 1^\circ$ 在范围内,正六边形边长中心点区域边缘过渡带点的集合 $B_1^2\{(x_{bj}^2, y_{bj}^2) | j \in N^*\}$ 、 $B_2^2\{(x_{bj}^2, y_{bj}^2) | j \in N^*\}$ 、 $B_3^2\{(x_{bj}^2, y_{bj}^2) | j \in N^*\}$ 、 $B_4^2\{(x_{bj}^2, y_{bj}^2) | j \in N^*\}$ 、 $B_5^2\{(x_{bj}^2, y_{bj}^2) | j \in N^*\}$, 如图5所示。

8) 计算中心到正六边形边长中心区域边缘过渡带点的距离 $s_i^2 (i = 1, \dots, 5)$, $s_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sqrt{(x_{bj}^{2'} - x_0^1)^2 + (y_{bj}^{2'} - y_0^1)^2}$;

9) 判断螺母:当 $s_i^2 < \bar{d} (i = 1, \dots, 5)$ 时,该未知零件为螺母;否则为垫片。

当识别未知零件偏心时,若未知零件是螺母,则不影响第二关注区六边形的内切圆半径小于外接圆半径的判别条件,上述识别螺母方法依旧成立;若未知零件是垫片,则第二关注区圆的半径与圆的平均半径有短有长,根据步骤9),可以判定未知零件是垫片。因此基于第二关注区角点法,不受偏心影响,可以有效区分螺母和垫片。

3 实验验证

3.1 计算连接件几何中心和关键参数

为验证研究方法的正确性和可靠性,拍摄大量被测连接件图像,自备含4种典型飞机连接件图像数据库,分别是垫片、螺纹、卡簧和螺母。实验采用机器视觉图像处理实验平台 MV-VS1000 进行验证,如图6所示。该实验平

台工业相机分辨率 $> 592 \times 1\,944$,工业镜头 500 万像素,采用智能视觉控制器,内存在 8 G 以内,硬盘存储小于 1 T。



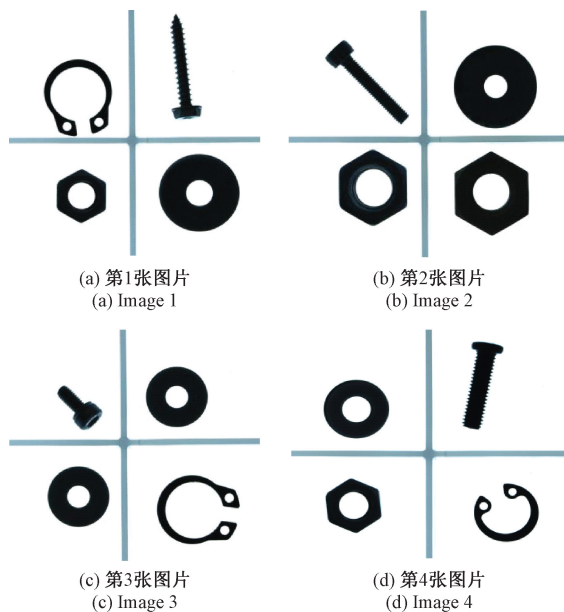
(a) 显示器界面
(a) Display interface

(b) 视觉检测系统
(b) Visual inspection system

图6 机器视觉图像处理实验平台 MV-VS1000

Fig. 6 Machine vision image processing experimental platform MV-VS1000

将4个被测连接件存放在一个单元格中,获取图像库,如图7所示。



(a) 第1张图片
(a) Image 1

(b) 第2张图片
(b) Image 2

(c) 第3张图片
(c) Image 3

(d) 第4张图片
(d) Image 4

图7 图像库的部分图像

Fig. 7 A partial image of the image gallery

获取飞机连接件图片样本的步骤为:

- 1) 清洗被测连接件;
- 2) 调节前光源和背光源亮度;
- 3) 设置拍摄程序;
- 4) 固定单元格位置,调整镜头中心对单元格中心重合,尽量保证每次拍照中心不会移动;
- 5) 将连接件放置在单元格中;
- 6) 调整图像位置 and 物距;
- 7) 启动拍摄。

3.2 视觉算法验证

针对 4 种不同类型的飞机连接件作为实验对象,分别是垫片、螺纹、卡簧和螺母。为验证算法的有效性,对 100 张图片,400 个连接件进行试验,平均测量每幅图片时间为 2.142 s。并且使用论文算法与 SIFT、Hu 算法、文献[17-18]的算法,进行对比试验。在此基础上,以零件测试次数 n 、分类识别正确率 η_1 、平均识别正确率 η_2 和定位与分类时间 T 评估算法的正确性与性能。最终结果,如表 1 所示。

如表 1 所示,综合分析零件测试次数、分类识别正确率,平均识别正确率和定位与分类时间,通过与其他方法比较,本文算法具有良好的识别效果和识别速度,平均分类识别正确率为 95.02%,单个零件识别时间为 0.54 s,错误识别率仅为 4.98%。

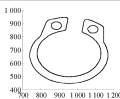

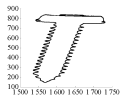
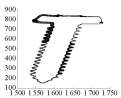
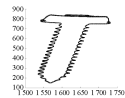
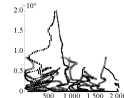
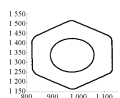
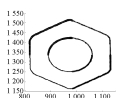
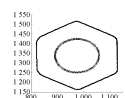
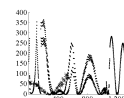
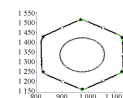
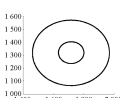
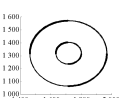
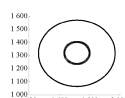
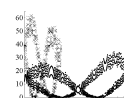
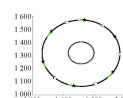
本实验造成错误识别结果的原因为:

- 1) 测量视野受限,被测零件没有拍摄完全,导致识别误差;
- 2) 被测零件边缘异常,导致零件边缘形状发生改变,造成识别错误;
- 3) 测量时,镜头中心与单元格中心没有同轴,测量中心发生偏移,致使图像分割错误。

Table 1 Compare the results of the experiment					
采用算法	零件	测试次数 n	分类识别正确率 $\eta_1/\%$	平均单个零件分类时间 T/s	平均识别正确率 $\eta_2/\%$
本文算法	卡簧	66	91.75	0.54	95.02
	螺纹	138	99.21		
	螺母	99	93.25		
	垫片	97	95.88		
SIFT 算法	螺纹	11	90.91	1.16	90.29
	垫片	29	89.66	1.16	
Hu 算法	螺纹	11	100.00	1.13	72.42
	垫片	29	44.83	1.54	
文献[14]	螺纹	—	91.31	2.15	87.28
	垫片	—	83.24	2.60	
文献[18]	螺纹	—	89.73	5.94	86.38
	垫片	—	83.02	5.83	

在 100 副图像中,选取第 2 副图像,展示基于机器视觉的飞机连接件识别与分类算法的求解过程,如表 2 所示。

表 2 第 2 副图像识别过程
Table 2 The second image recognition process

图像分割后的零件图像	基于容差识别的卡簧视觉分类算法			基于第二关注区角点法识别螺母的视觉算法			基于第二关注区角点法识别螺母的视觉算法			
	划为 4 个象限后的图像, 将极角按照从小到大的顺序排列	计算相邻两极角的差值: $\theta_{i+1}-\theta_i>\delta$ (本实验选取容差值 $\delta=5^\circ$)	是否为卡簧	划分封闭连接件测量关注区域图像	第一和第二关注区离散程度图像	$\text{Var}(R_i^1) \geq \text{Var}(R_0)$ $\text{Var}(R_i^2) \geq \text{Var}(R_0)$ (本实验选取支持向量预设值: $\text{Var}(R_0)=500$)	是否为螺纹	六边形 6 个角点和边长中心点定位	计算中心到六边形边长中心的距离 s_i^2 , 判断螺母: $s_i^2<\bar{d}$	输出结果
		$\text{Max}(\theta_{i+1}-\theta_i) = 22.8^\circ$	是	0	0	0	0	0	0	卡簧
		$\text{Max}(\theta_{i+1}-\theta_i) = 1.9^\circ$	否			$\text{Var}(R_i^1) = 2\,298.7$ $\text{Var}(R_i^2) = 2\,288.1$	是	0	0	0 螺纹
		$\text{Max}(\theta_{i+1}-\theta_i) = 0.514\,3^\circ$	否			$\text{Var}(R_i^1) = 36.3$ $\text{Var}(R_i^2) = 88.5$	否		$s_1^2 = 158.37$ $s_2^2 = 148.87$ $s_3^2 = 145.98$ $s_4^2 = 152.95$ $s_5^2 = 162.34$ $\bar{d} = 174.35$	是 螺母
		$\text{Max}(\theta_{i+1}-\theta_i) = 0.571\,4^\circ$	否			$\text{Var}(R_i^1) = 24.8$ $\text{Var}(R_i^2) = 11.7$	否		$s_1^2 = 248.79$ $s_2^2 = 252.20$ $s_3^2 = 257.33$ $s_4^2 = 257.49$ $s_5^2 = 253.68$ $\bar{d} = 253.80$	否 垫片

基于机器视觉飞机连接件识别与分类算法的分类顺序至关重要,依次是:卡簧、螺纹、螺母和垫片。其原因是针对外轮廓特征,透明决策飞机连接件类型,提高识别正确率。

采用基于容差识别的卡簧视觉分类算法、基于支持向量识别螺纹的视觉分类算法,以及基于第二关注区角点法识别螺母的视觉算法,聚焦连接件特征轮廓,优化视觉模型和提升模型计算精度,提高了连接件分类识别正确率;其次,仅对划分后的两个检测关注区分别检测,避免了 Hu 不变矩算法的遍历图像像素计算和 SIFT 算法的尺度空间构建、关键点检测,差值精确定位、巨大常数因子参与计算,以及步骤叠加等问题,简化了计算的冗余步骤,缩减了计算时间。

4 结 论

本研究提出基于机器视觉的飞机连接件识别与分类算法,首先,获取飞机连接件图像,通过高斯滤波、边缘过渡带提取、图像分割等图像处理技术,完成被测零件的准确定位;然后,根据飞机连接件的全局形状和边缘细节特征,提出基于机器视觉飞机连接件识别与分类算法,基于容差识别的卡簧视觉分类算法、基于支持向量识别螺纹的视觉分类算法、基于第二关注区角点法识别螺母视觉算法;最后,解决了对不同位姿、形态飞机连接件垫片、螺母、螺纹和卡簧的快速识别与分类问题。

实验结果表明:对 400 个连接件,进行定位和分类算法试验中,平均分类识别正确率为 95.05%,单个零件识别时间为 0.54 s。并在机器视觉图像处理实验平台进行验证,实现了基于机器视觉飞机连接件的快速、准确识别。作为工业生产中机器人分拣零件的一项新技术,该方法具有很好的实际应用价值,对同类形状物体的识别与分类具有一定参考价值。

参考文献

[1] 杜坡,段振云,张静,等. 基于双目视觉的大直径零件转角高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 35-43.
DU P, DUAN ZH Y, ZHANG J, et al. High-precision measurement method of the corner of large-diameter parts based on binocular vision [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 35-43.
[2] 刘辛军,于靖军,王国彪,等. 机器人研究进展与科学挑战[J]. 中国科学基金, 2016, 30(5): 425-431.
LIU X J, YU J J, WANG G B, et al. Research trend and scientific challenge of robotics [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2016, 30(5): 425-431.

[3] 朱绍维,牟文平,汤立民,等. 融合工艺信息的复杂零件加工状态识别方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(11): 1479-1483.
ZHU SH W, MU W P, TANG L M, et al. Cutting status identification method for complex parts integrating with process informations[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(11): 1479-1483.
[4] 毛向向,王红军. 薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 137-143.
MAO X X, WANG H J. Contour feature recognition of thin-walled parts under complex lighting conditions[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 137-143.
[5] 张彪,苟荣科,许家忠. 基于深度学习的工业轴承缺陷检测算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 136-149.
ZHANG B, XUN R K, XU J ZH. Research on defect detection algorithm for industrial bearings based on deep learning[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 136-149.
[6] BO W, YAN Y, XU M Y, et al. BiCLIP-nnFormer: A virtual multimodal instrument for efficient and accurate medical image segmentation[J]. Instrumentation, 2025, 12(2): 1-13.
[7] ZHAO J L, ZHANG L, WU D, et al. Measurement uncertainty analysis of the rotary-scan method for the measurable dimension of cylindrical workpieces [J]. Instrumentation, 2024, 11(1): 10-17.
[8] 汤志鸿,郑国磊,郑艺玮. 飞机框肋类零件基础特征自动识别与提取算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(4): 811-820.
TANG ZH H, ZHENG G L, ZHENG Y W. Automatic identification and extraction algorithm for basic features of frame rib parts [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(4): 811-820.
[9] 孙小权,邹丽英. 基于 SVM 的图像识别在零件分拣系统中的应用[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1353-1356.
SUN X Q, ZOU L Y. Application of SVM-based image recognition in parts sorting system[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2018, 35(12): 1353-1356.
[10] MEN X N, LI ZH Q, DENG T. Identification method of aircraft sheet metal parts based on cascaded virtual-real fusion [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 40(5): 607-617.
[11] RUIZ L, TORRES M, GÓMEZ A, et al. Detection and classification of aircraft fixation elements during

- manufacturing processes using a convolutional neural network[J]. Applied Science, 2020, 10(9): 6856.
- [12] 罗杭, 杨晔, 陈本永. 基于 SGV-YOLOv8 模型的机械零件智能识别与抓取方法[J/OL]. 中国机械工程, 1-9[2025-07-15].
LUO H, YANG Y, CHEN B Y. Intelligent identification and grasping method of mechanical parts based on SGV-YOLOv8 model[J/OL]. China Mechanical Engineering, 1-9[2025-07-15].
- [13] 余永维, 韩鑫, 杜柳青. 基于 Inception-SSD 算法的零件识别[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(8): 1799-1809.
YU Y W, HAN X, DU L Q. Part recognition based on Inception-SSD algorithm[J]. Optical Precision Engineering, 2020, 28(8): 1799-1809.
- [14] 鲁晟燚, 梁冬泰, 梁丹, 等. 基于 Hu-SIFT 特征匹配与遗传算法的零件视觉分拣方法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 123-126.
LU SH Y, LIANG D T, LIANG D, et al. Visual sorting method of parts based on Hu-SIFT feature matching and genetic algorithm[J]. Sensors and Microsystems, 2020, 39(12): 123-126.
- [15] 段振云, 王宁, 赵文珍, 等. 基于高斯积分曲面拟合的亚像素边缘定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(1): 219-225.
DUAN ZH Y, WANG N, ZHAO W ZH, et al. Subpixel edge localization algorithm based on gaussian integral surface fitting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(1): 219-225.
- [16] 支珊, 赵文珍, 赵文辉, 等. 基于齿轮局部图像的齿距机器视觉测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 225-231.
ZHI SH, ZHAO W ZH, ZHAO W H, et al. Machine vision measurement method of tooth pitch based on local image of gear [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 225-231.
- [17] 郑健红, 鲍官军, 张立彬, 等. 结合深度学习与支持向量机的金属零件识别[J]. 中国图象图形学报, 2019, 24(12): 2233-2242.
ZHENG J H, BAO G J, ZHANG L B, et al. Metal parts recognition combined with deep learning and support vector machine [J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2019, 24(12): 2233-2242.
- [18] 彭刚, 廖金虎. 插件元器件分拣机器人系统设计与实现[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 108-114.
PENG G, LIAO J H. Design and implementation of plug in component sorting robot system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(1): 108-114.

作者简介



支珊(通信作者), 2007 年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 2019 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为辽宁科技学院讲师, 主要研究方向为人工智能与模式识别、精密测量与智能系统、视感新技术。

E-mail: zsl110669654@163.com

Zhi Shan (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2007, and her Ph. D. from Shenyang University of Technology in 2019. She is currently a lecturer at Liaoning Institute of Science and Technology. Her main research interests include artificial intelligence and pattern recognition, precision measurement and intelligent systems, and vision-sensing new technologies.