

复杂背景下退役圆柱锂电池轮廓精确提取与位姿检测方法^{*}

王 朕 叶文华 陈煜昊 梁睿君

(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘 要:针对退役圆柱动力电池自动化拆解过程中存在的成像环境复杂、电池不规则形变和金属表面不均匀漫反射等复杂情形,现有视觉识别方法无法准确提取轮廓与位姿信息问题,提出基于弗雷歇距离相似函数的轮廓精确提取和基于矩形度与边缘形态特征的位姿检测方法。通过建立圆柱锂电池 Lambert 漫反射模型和运用形态学运算方法得到锂电池粗定位轮廓,并根据弗雷歇距离定义的相似度函数,对粗定位图像内各像素带归类完成轮廓精确提取。随后根据圆柱锂电池正负极端特征,通过自适应阈值分割算法提取正负极端 ROI 区域特征轮廓,最后对比两端区域矩形度数值计算出锂电池位姿信息。实验结果显示:在自建包含形变、腐蚀锈斑和光照不均情形下的退役圆柱锂电池图像数据集中,所提方法对不同型号和位姿下的锂电池识别均有较高精度,其直径长度检测误差小于 3%,位姿检测正确率高于 94%,能够满足实际自动化拆解检测需求。

关键词: 机器视觉; Lambert 漫反射模型; 弗雷歇距离; 轮廓提取; 位姿检测

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 520.6040

Accurate contour extraction and pose detection method for retired cylindrical lithium batteries in complex backgrounds

Wang Zhen Ye Wenhua Chen Yuhao Liang Ruijun

(School of Mechatronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In response to the complex imaging environment, irregular deformation of batteries, and uneven diffuse reflection of metal surfaces encountered during the automated disassembly process of retired cylindrical power lithium batteries, existing visual recognition methods are unable to accurately extract contour and pose information. We propose an accurate contour extraction method based on the Fréchet distance similarity function and a pose detection method based on rectangles and edge morphology features. By establishing a Lambert diffuse reflection model for cylindrical lithium batteries and using morphological operation methods to obtain the rough localization contour of lithium batteries, as well as based on the similarity function defined by the Fréchet distance, the contour is accurately extracted by classifying each pixel band in the rough localization image; Subsequently, utilizing the positive and negative terminal features of cylindrical lithium batteries, feature contours of the positive and negative terminal ROI regions are extracted employing an adaptive threshold segmentation algorithm. Finally, by comparing the rectangular values of the two end regions, the pose information of the lithium battery can be calculated. The experimental results show that in the Self-built retired cylindrical lithium battery image dataset that includes deformation, corrosion rust spots, and uneven lighting conditions, the proposed method has high accuracy in identifying lithium batteries of different models and poses. The diameter length detection error is less than 3%, and the pose detection accuracy is higher than 94%, which can meet the actual needs of automated disassembly and detection.

Keywords: machine vision; Lambert diffuse reflection model; Fréchet distance; contour extraction; pose detection

0 引言

目前,电动汽车动力锂电池迎来“报废潮”,退役动力锂电池电芯富含钴、镍、锂等重要战略资源。但现阶段人工拆卸电池存在一定的安全隐患和成本高等问题,故研究退役动力锂电池的自动拆解技术具有重要意义^[1-2]。其中利用机器视觉技术精确提取电池轮廓与位姿作为实现自动回收利用的前提与关键,其技术实现主要分为传统算法和深度学习方法两类^[3]。但传统的边缘检测算子存在漏检、检测边缘不连续、抗噪能力差等缺点^[4],而基于深度学习的边缘检测方法需要大量注释良好的图像用于模型训练且存在训练时间长、训练设备昂贵和模型通用性差等问题^[5]。并且在圆柱锂电池轮廓提取与位姿检测中还存在如下问题:

1) 圆柱锂电池外壳材料为金属铝合金或不锈钢,其表面存在不均匀漫反射导致图像成像质量不佳。为解决这类问题,国内外有学者进行了相关研究:Yi 等^[6]将物体外观分解为高光、阴影和反照率层,通过构建多视图数据集对图像进行高光去除。杨泽宇等^[7]提出一种用于空间高曲率被测物的均匀化照明光源优化方法,解决被测物表面亮度差异变化过大而导致的图像不能正确显示的问题。郭碧如等^[8]提出双色反射模型来去除工件上高光。这些方法虽然一定程度能去除锂电池漫反射问题,但其包含的滤波操作会模糊锂电池边缘图像,进一步影响轮廓的精确提取。

2) 部分退役锂电池存在凹坑破损等形变,并且当背景图像灰度值与锂电池灰度值相近时传统边缘检测方法难以精确提取锂电池轮廓^[9]。郭绍陶等^[10]通过沿着圆周面轴向提取灰度分布曲线的方法检测出锂电池凹坑形变,苑玮琦等^[11]通过设计灰度差分模型计算灰度分布曲线上的阈值突变,从而实现凹坑的检测,但这些方法均不适用于背景灰度相近情况下的检测。为此 Vysakh 等^[12]通过模板去除背景方法虽然能解决成像背景干扰问题,但工件摆放位置需提前设定。可以看出以上研究虽然在一定程度可以减小电池形变和复杂背景图像干扰,但在实际生产环境中的检测依然存在一定局限性。

3) 为了确定拆解方向与位置,还需准确识别圆柱锂电池的尺寸和正负极位置。针对此问题 Guo 等^[13]提出一种双模板匹配算法以实现每个电池正确定位和分段,Wu 等^[14]提出一种基于 X 射线的圆柱锂电池的极片识别方法。但这些研究只针对在固定位姿下单一型号锂电池识别,当锂电池型号和位姿发生变化时其识别准确率也将随之降低。

针对上述问题,本文提出基于弗雷歇距离相似函数的轮廓精确提取和基于矩形度与边缘形态特征的位姿检

测方法。首先基于 Lambert 漫反射模型将圆柱锂电池灰度图像分为亮区、渐变区和暗区,通过形态学处理获得中间满足 Lambert 漫反射模型区域的亚像素 (eXtended line descriptions, XLD) 轮廓,并对此轮廓扩展完成粗定位。进一步地提取粗定位图像、背景和电池模板图像的像素带灰度分布曲线,通过线相似度匹配的弗雷歇距离算法计算粗定位图像像素带灰度分布曲线与各模板曲线相似度,并对其归类完成轮廓精确提取。最后根据圆柱锂电池两端形态特征,提出一种基于矩形度和边缘轮廓特征判别方法识别圆柱锂电池正负极,实现对不同类型圆柱锂电池任意位置下的位姿检测。

1 轮廓精确提取与位姿检测方法

1.1 圆柱锂电池粗定位方法

圆柱锂电池表面可以看成 Lambert 反射体^[15],即考虑入射光的方向时,漫反射光的光强与入射光的方向和入射点表面法向夹角余弦成正比。其表面某一点的反射光强规律如式(1)所示。根据反射光强变化规律构造圆柱锂电池漫反射模型,进而将圆柱锂电池表面灰度图像分为亮区、渐变区和暗区,如图 1 所示。

$$I_{ld} = k_d I_l \cos \alpha = k_d I_l \sqrt{1 - \left(\frac{2w}{D}\right)^2} \quad (1)$$

式中: I_l 是入射光强度; I_{ld} 为反射光强; k_d 为材质的反射系数。

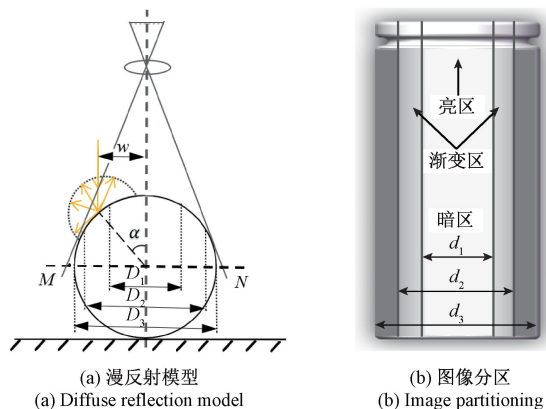


图 1 锂电池 Lambert 漫反射模型及分区

Fig. 1 Lambert diffuse reflection model and partitioning for lithium battery

图 1 中 D_1 、 D_2 、 D_3 分别为电池亮区、渐变区和暗区实际尺寸, d_1 、 d_2 、 d_3 分别为相机图像平面上捕获的电池亮区、渐变区和暗区像素尺寸; MN 为电池测量平面; w 为测量点距锂电池轴线距离; α 为入射光方向与入射点表面法向的夹角。

随后根据大律法 (Otsu) 提取满足 Lambert 漫反射模型区域,即中间亮区的 XLD 轮廓,并对该轮廓扩展完成粗定位。具体为对锂电池高亮区域阈值分割所得 XLD 轮廓 L_1 沿直径 y 方向向两边扩展,轴线 x 方向的轮廓保持不变,扩展后的 XLD 轮廓为 L_1' ,如图 2 所示。其中 y 方向的扩展系数 k 如式 (2) 所示。

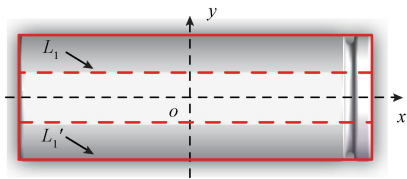


图2 Lambert 模型扩展 XLD 轮廓示意图

Fig. 2 Lambert model extension XLD contour diagram

$$k = D_3/D_1 = d_3/d_1 \quad (2)$$

式中: D_1 、 D_3 分别为电池亮区和暗区实际尺寸, d_1 、 d_3 分别为相机图像平面上捕获的电池亮区和暗区像素尺寸。

1.2 基于弗雷歇距离相似函数的轮廓精定位方法

在实际图像采集过程中,考虑电池出现凹坑破损、腐蚀锈斑和光照不均等因素影响,圆柱锂电池高亮区域并不是沿轴线对称的,扩展后的粗定位图像可能错误地将部分背景区域划分为电池轮廓,进而降低轮廓提取精度。为此本文提出一种基于弗雷歇距离相似函数的圆柱锂电池轮廓精确提取方法,如图 3 所示。

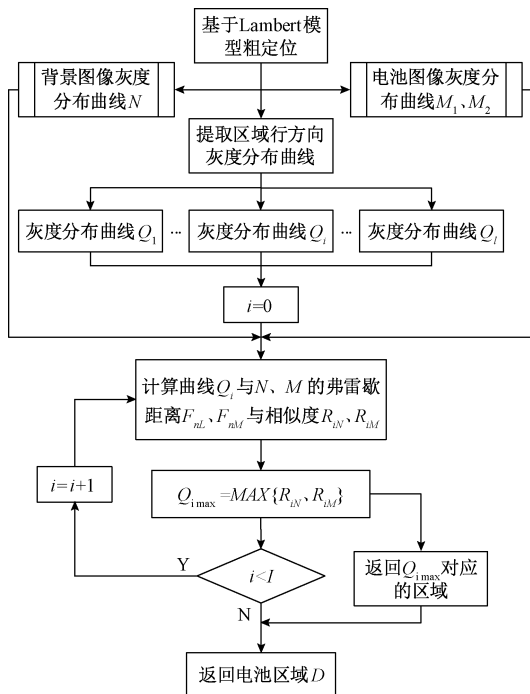


图3 轮廓精确提取流程

Fig. 3 Flow chart of precise contour extraction

本文首先将粗定位图像分成多条平行的像素带,并提取每条像素带的灰度分布曲线作为待识别曲线。其次提取背景图像和电池区域中包含主要特征信息像素带的灰度分布曲线作为模板曲线。然后计算待识别曲线与模板曲线之间的弗雷歇距离,进而得到相似度数值,并根据相似度大小将像素带分类。最终将分类为电池区域的像素带合并完成轮廓精确提取,其具体实现如下:

1) 弗雷歇距离算法

弗雷歇距离是 Maurice René Fréchet 提出的用于描述曲线之间的几何相似性算法^[16],该算法可在两条曲线长度不同时判别两条曲线的形态相似性。其主要实现如下:设 P 、 Q 为度量空间 S 上的两条连续曲线,曲线 P 、 Q 是从单位区间到 S 上的连续映射,即 $P: [0, 1] \rightarrow S$, $Q: [0, 1] \rightarrow S$ 。又设 α 和 β 是单位区间的两个重新参数化函数,即 $\alpha: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, $\beta: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ 。则曲线 P 与 Q 的弗雷歇距离 $F(A, B)$ ^[17]为:

$$F(A, B) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} \{d(P(\alpha(t)), Q(\beta(t)))\} \quad (3)$$

式中: d 是 S 上的度量函数, t 为描述运动位置的连续递增函数。

为便于计算, Eiter T 基于连续弗雷歇距离提出了离散弗雷歇距离概念^[18]。如图 4(a)、(b) 分别为弗雷歇距离与离散弗雷歇距离示意图,当曲线 P 、 Q 所选取离散点足够多时离散弗雷歇距离 p_2O' 近似等于连续弗雷歇距离 p_2O 。

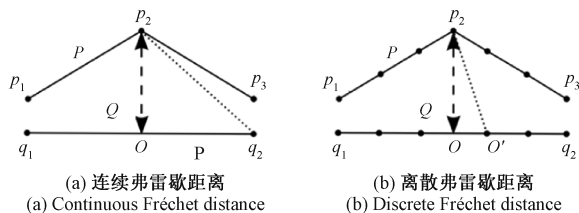


图4 连续弗雷歇距离与离散弗雷歇距离

Fig. 4 Continuous Fréchet distance and discrete Fréchet distance

其中本文模板曲线与待识别曲线选取的离散点较多,故可用离散弗雷歇距离计算相似度,同时图像灰度值范围为 0~255,故本文对弗雷歇距离 F 做归一化处理,并对相似度 R 的定义如下:

$$R = 255/F \quad (4)$$

其中,弗雷歇距离 F 越小,说明两条曲线之间的相似程度越高。弗雷歇距离 F 越大,说明两条曲线之间的相似程度越低。

2) 灰度分布曲线提取

为得到锂电池模板曲线、图像背景模板曲线和粗定位图像待识别曲线。本文设置邻域窗口、粗定位图像窗口、背景和电池模板窗口,提取不同位置像素点的灰度值,并建立以像素个数为 x 轴,灰度值为 y 轴的坐标系作

灰度分布曲线。其中邻域窗口首先在背景模板和电池模板窗口中滑动,提取背景模板和电池模板灰度分布曲线,随后邻域窗口在粗定位图像窗口中滑动提取待识别灰度分布曲线。其主要实现如下。

(1) 背景模板灰度分布曲线 N 提取

如图 5 所示,截取锂电池图像背景并对其灰度化得到背景模板窗口。随后以中心像素点 P 建立宽为 1 pixel,长为锂电池粗定位 XLD 轮廓长度的邻域窗口 n ,并以中心像素点 P 旋转角度 α 得到邻域窗口 n' ,最后提取邻域窗口 n' 各像素点灰度值得到背景模板灰度分布曲线 N 。其中 α 为锂电池粗定位 XLD 轮廓角度。

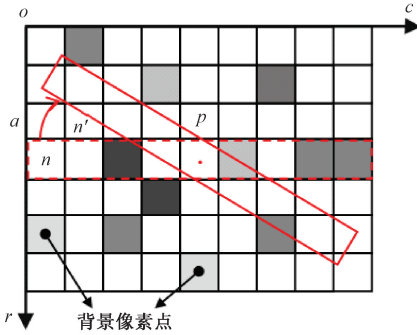


图 5 背景模板灰度分布曲线提取

Fig. 5 Extraction of grayscale distribution curve for background template

此时背景模板灰度分布曲线 N 可表示为:

$$N = \{N'(1), N'(2), \dots, N'(i), \dots, N'(I)\} \quad (5)$$

式中: $N'(i) = (c'_i, r'_i)$; i 为曲线 N 上的采样点的序号, $i = 1$ 为起始采样点, $i = I$ 为末尾采样点; (c'_i, r'_i) 为第 i 个采样点的坐标。

(2) 电池模板灰度分布曲线 M_1 、 M_2 提取

圆柱锂电池表面根据灰度变化可分为亮区、渐变区和暗区。如图 6 所示本文分别做电池亮区和暗区邻域窗口 m_1 、 m_2 。其宽为 1 pixel,长为锂电池粗定位 XLD 轮廓长度,随后提取各像素点灰度值并作电池模板灰度分布曲线 M_1 、 M_2 。其中渐变区中邻域窗口 m_3 可近似看成光强变化的亮区或暗区,无需重复提取其灰度分布曲线。

此时电池模板灰度分布曲线 M_1 、 M_2 可表示为:

$$M_1 = \{M_1(1), M_1(2), \dots, M_1(j), \dots, M_1(J)\} \quad (6)$$

$$M_2 = \{M_2(1), M_2(2), \dots, M_2(k), \dots, M_2(K)\} \quad (7)$$

式中: $M_1(j) = (c_j, r_j)$ 、 $M_2(k) = (c_k, r_k)$; j, k 为曲线 M_1 、 M_2 上的采样点的序号, $j = 1, k = 1$ 为起始采样点, $j = J, k = K$ 为末尾采样点; (c_j, r_j) 为电池暗区灰度分布曲线 M_1 第 j 个采样点的坐标, (c_k, r_k) 为电池亮区灰度分布曲线 M_2 第 k 个采样点的坐标。

(3) 待识别灰度分布曲线 Q 提取

如图 7 所示,截取粗定位图像窗口并以像素原点 O

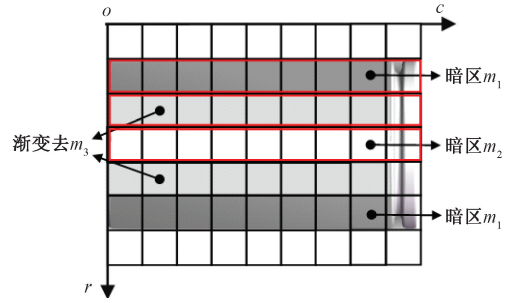


图 6 电池模板灰度分布曲线提取

Fig. 6 Extraction of grayscale distribution curve for battery template

建立宽为 1 pixel,长为锂电池粗定位 XLD 轮廓长度的邻域窗口 q_1 ,并作该像素带灰度分布曲线 Q_1 。随后邻域窗口按行 r 正方向滑动 1 pixel 获得新的邻域窗口 q_2 并提取该像素带灰度分布曲线 Q_2 ,直至遍历粗定位图像全部像素带。

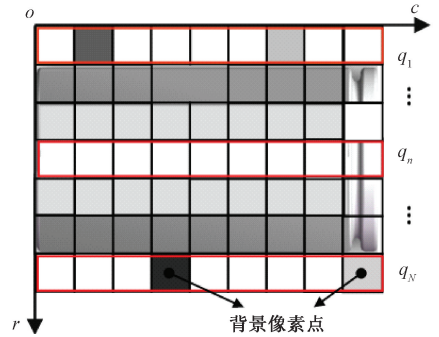


图 7 待识别灰度分布曲线提取

Fig. 7 Extraction of grayscale distribution curve to be identified

此时待识别灰度分布曲线 Q_n 可表示为:

$$Q_n = \{Q_n(1), Q_n(2), \dots, Q_n(l), \dots, Q_n(L)\} \quad (8)$$

式中: $Q_n(l) = (c_l, r_l)$; n 为邻域窗口序号, l 为曲线 Q_n 上的采样点的序号, $l = 1$ 为起始采样点, $l = L$ 为末尾采样点; (c_l, r_l) 为第 l 个采样点的坐标。

3) 轮廓提取

作粗定位图像窗口中各像素带待识别灰度分布曲线 Q_n 后,计算曲线上各采样点与背景模板灰度分布曲线 N 和电池模板灰度分布曲线 M_1 、 M_2 上各采样点间弗雷歇距离,得到距离矩阵 $D_{Q_n N}$ 、 $D_{Q_n M_1}$ 和 $D_{Q_n M_2}$

$$D_{Q_n N} = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1i} & \cdots & d_{1l} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{l1} & \cdots & d_{li} & \cdots & d_{ll} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{L1} & \cdots & d_{Li} & \cdots & d_{Ll} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{D}_{Q_n M_1} = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1j} & \cdots & d_{1L} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{l1} & \cdots & d_{lj} & \cdots & d_{lL} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{L1} & \cdots & d_{Lj} & \cdots & d_{LL} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{D}_{Q_n M_2} = \begin{pmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1k} & \cdots & d_{1K} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{l1} & \cdots & d_{lk} & \cdots & d_{lK} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{L1} & \cdots & d_{LK} & \cdots & d_{LK} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: $d_{li} = \sqrt{(x'_l - x_i)^2 + (y'_l - y_i)^2}$ 表示待识别灰度分布曲线 Q_n 上第 l 个采样点到背景模板灰度分布曲线 N 上第 i 个采样点的距离, $1 \leq l \leq L, 1 \leq i \leq I$ 。同理可得 d_{ij} 与 d_{lk} 定义。

进一步将距离矩阵 $\mathbf{D}_{Q_n N}$ 、 $\mathbf{D}_{Q_n M_1}$ 和 $\mathbf{D}_{Q_n M_2}$ 中的最大值作为弗雷歇距离,同时计算出待识别灰度分布曲线与各模板灰度分布曲线相似度 $R_{Q_n N}$ 、 $R_{Q_n M_1}$ 和 $R_{Q_n M_2}$,随后根据相似度大小对该像素带分类,并依次计算粗定位窗口内的所有灰度分布曲线相似度值。最后按式(12)将像素带归类,进而完成锂电池轮廓精确提取。

$$\begin{cases} R_{Q_n N} > R_{Q_n M_1} \text{ and } R_{Q_n N} > R_{Q_n M_2}, q_n \notin D \\ \text{其他}, q_n \in D \end{cases} \quad (12)$$

式中: q_n 为粗定位图像窗口中的像素带, D 表示电池区域。

1.3 基于矩形度和边缘轮廓特征的正负极判别方法

锂电池轮廓精确提取后可得到其 XLD 轮廓偏转角 α , 即锂电池区域外接矩形与 x 轴正方向的最小角度。但此时偏转角 α 没有区分正负极。如图 8(a)、(b) 中分别为实际方位角 β 与偏转角 α 一致和互补时示意图。

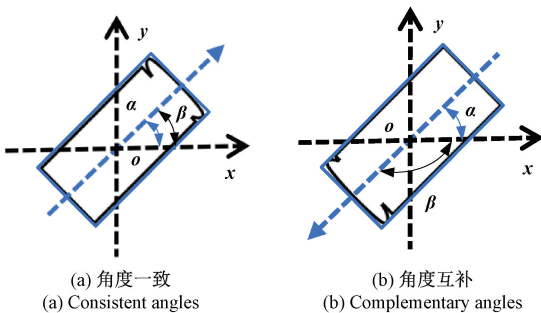


图8 实际方位角 β 与偏转角 α 分类

Fig. 8 Actual azimuth β and deflection angle α classification

为了计算出锂电池正极端与 x 轴的实际方位角 β , 即区分圆柱锂电池正负极。本文引入用于区分形态特征的矩形度概念,其代表图像区域对其外接矩形的充满程

度,反映该区域与矩形的相似程度。其表达式如式(13)所示:

$$R = \frac{S_0}{S_{MER}} \quad (13)$$

式中: S_0 是该区域的面积; S_{MER} 是其最小外接矩形的面积; R 为矩形拟合因子,取值范围为 $0 \sim 1$ 。

如流程图 9 所示,本文所提基于矩形度和边缘轮廓特征的正负极判别方法,具体如下:首先提取精定位后的锂电池图像区域避免背景图像的干扰,通过直方图均衡化方法增强图像减小光强变化对特征区域提取影响。随后根据锂电池精定位 XLD 轮廓计算偏转角 α , 同时针对圆柱锂电池正负极端结构特征,本文分别以精定位轮廓长度的 $1/8$ 设定锂电池两端感兴趣区域 (region of interest, ROI),降低退役锂电池金属表面可能产生的锈斑和凹坑形变干扰。进一步通过自适应阈值分割算法提取 ROI 区域特征轮廓,并计算锂电池左右端矩形度 $Recl$ 、 $Recr$, 如图 10 所示。最后按式(14)计算得到锂电池实际方位角 β 。

$$\beta = \begin{cases} \alpha, Recl > Recr \\ 180^\circ - \alpha, Recl < Recr \end{cases} \quad (14)$$

式中: $Recl$ 、 $Recr$ 分别为锂电池图像左端图像矩形度和右端图像矩形度。其中设定锂电池正极方向绕中心点 O 逆时针旋转为正。

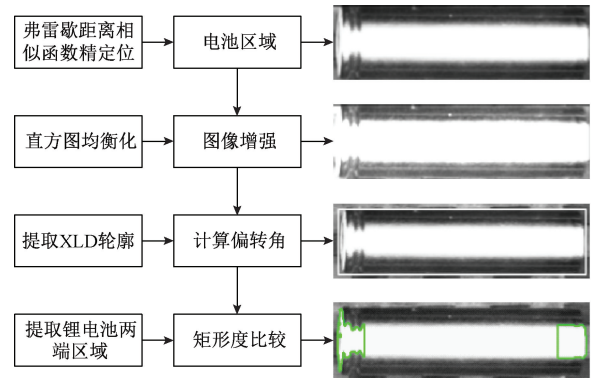


图9 基于矩形度和边缘特征的位姿检测流程

Fig. 9 Flow chart of pose detection based on rectangularity and edge features

2 实验与结果分析

2.1 实验装置与对象

本文使用的实验装置如图 11 所示,包括采用 CCD 传感器的工业数字相机、条形光源和倒三角型 PVC 传送带。其中系统通过相机获取图像,并使用 C#开发的图像处理及测量模块进行处理分析,进而得到圆柱锂电池轮廓尺寸和位姿数据。其中实验相机为大恒图像公司生产

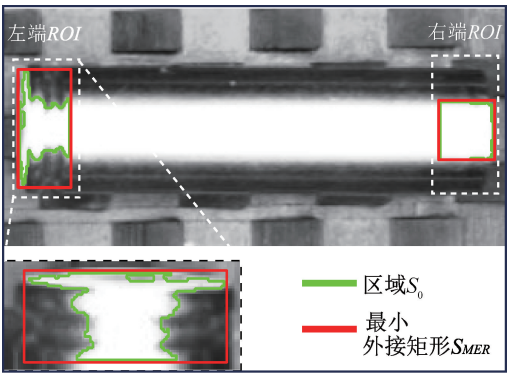


图 10 锂电池左右端区域轮廓与外接矩形提取
Fig. 10 Extract the contour and external rectangle for the left and right ends of lithium battery

的 MER-131-210U3M/C 型 CMOS 面阵相机,详细参数如表 1 所示。

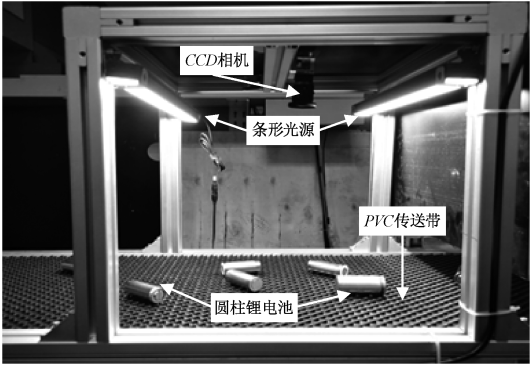


图 11 实验装置
Fig. 11 Experimental device

表 1 相机参数
Table 1 Camera parameters

参数	取值
型号	MER-131-210U3M/C
接口类型	USB3.0
感光芯片类型	CMOS
分辨率	1 280(H)×1 024(V)
帧率	210 fps
焦距	5 mm
靶面尺寸	1/2"
像素尺寸	4.8 μm×4.8 μm
像素深度	8 bit, 10 bit
曝光时间	20 μs~1 s

2.2 系统标定

将锂电池轮廓的单位由像素个数转化为长度单位,需要得到像素当量,即每个像素间距代表实际的物理尺寸大小。但由于相机制造误差,拍摄的图像会存在一定的畸变,为此本文采用张正友标定法消除图像畸变影响。

具体而言,通过拍摄 20 张不同角度下的 7×9 的棋盘方格图片进行标定,每个方格的尺寸为 2.5 cm×2.5 cm,如图 12(a)所示。

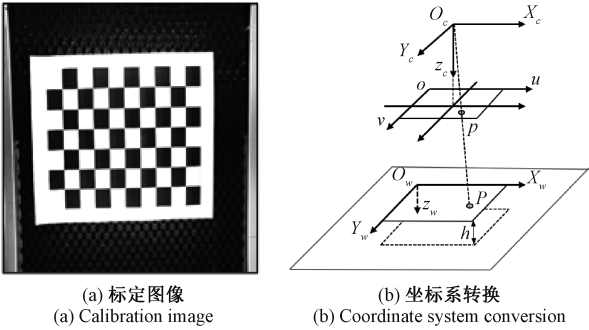


图 12 系统标定
Fig. 12 System calibration

通过拍摄标定板图像,得到标定板每一小格实际长度 l 所占的像素个数 q ,则像素当量 γ 按式(15)计算。

$$\gamma = l/q \tag{15}$$

其中,标定平面一般选择距离传送带表面一个电池半径高度,而汽车退役锂电池主要集中在 32650、26650、22650 和 18650 这 4 种型号,其不同型号的锂电池半径差远小于标定平面与相机成像平面间距离,标定高度差影响的标定当量变化较小。为此本文将标定高度 h 设为 4 种类型圆柱锂电池半径均值(12.25 mm),如图 12(b)所示。图中: $O_c - X_c Y_c Z_c$ 为相机坐标系, $o - uv$ 为像素坐标系, $O - XY$ 为图像坐标系, $O_w - X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系。 P 为世界坐标系中即标定平面一点, p 为其在像素坐标系中的对应点。经标定得到每个像素代表的实际长度为 0.347 mm。通过将像素当量和测得的锂电池轮廓像素数相乘,可以得到圆柱锂电池的实际尺寸,实现像素坐标和世界坐标间的转换。

2.3 图像预处理及粗定位

为分割出锂电池中间高亮区域,减小明暗交错的图像背景干扰。如图 13 检测锂电池和背景图像不同区域灰度值。其结果如表 2 所示,锂电池图像中亮区 A_1 与渐变区 A_2 、暗区 A_3 的灰度值相差较大,而背景区域 B_1 、 B_2 的灰度值与电池渐变区 A_2 、暗区 A_3 的灰度值存在部分重合。

表 2 电池及背景区域灰度值

Table 2 Grayscale value of battery and background area

序号	区域	灰度值/pixel
1	亮区 A_1	180~255
2	渐变区 A_2	43~168
3	暗区 A_3	39~90
4	传送带区域 B_1	160~176
5	传送带区域 B_2	35~53

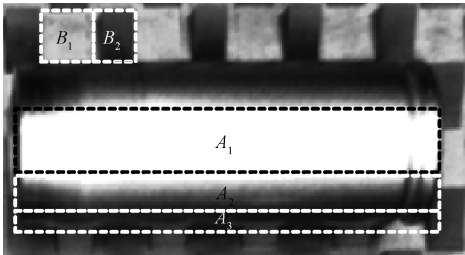


图 13 锂电池图像区域划分

Fig. 13 Lithium battery image region division

随后根据 Otsu 算法阈值分割出亮区 A_1 的 XLD 轮廓,并基于 Lambert 模型扩展完成锂电池粗定位。扩展前后的 XLD 轮廓如图 14(a)、(b)所示。经扩展后的 XLD 轮廓较为精确的提取出了锂电池区域。但当圆柱锂电池表面存在凹坑形变、锈斑和光照不均等情况,如图 14(c)、(d)所示。锂电池高亮区域并不沿轴线对称,此时扩展的粗定位 XLD 轮廓会出现包含背景图像或电池区域丢失问题,如图 14(e)、(f)所示。

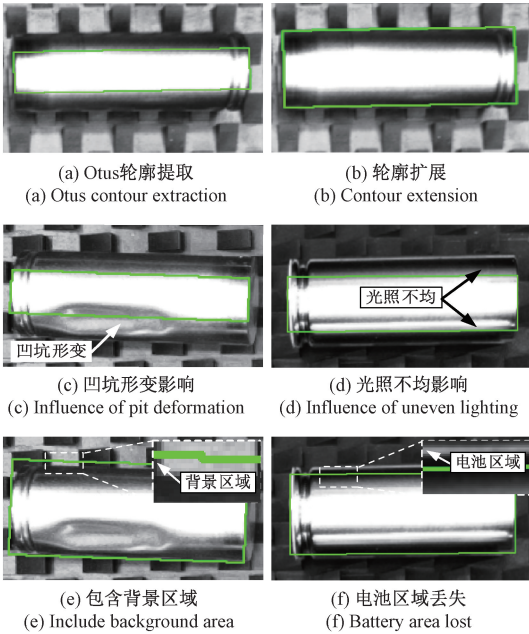


图 14 不同情形锂电池轮廓粗定位

Fig. 14 Rough positioning of lithium battery contours in different situations

2.4 轮廓精确提取

设置长度为锂电池粗定位轮廓长,宽度为 1 像素,角度为 XLD 轮廓偏转角 α 的邻域窗口,并依次按行方向滑动遍历粗定位图像窗口内所有像素带,如图 15 所示。根据圆柱锂电池图像灰度值,将粗定位图像窗口区域分为亮区 q_1 、渐变区 q_2 、暗区 q_3 和背景区 q_4 ,随后提取区域 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 中邻域窗口内像素带的灰度分布曲线 Q_1 、

Q_2 、 Q_3 、 Q_4 ,计算其与电池模板灰度分布曲线 M_1 、 M_2 和背景模板灰度分布曲线 N 的相似度。

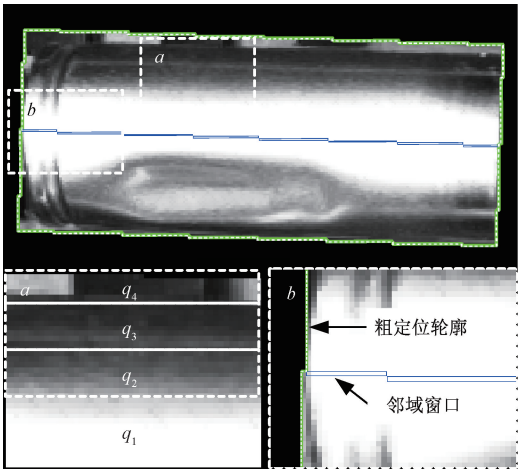


图 15 锂电池区域分布

Fig. 15 Regional distribution of lithium batteries

如图 16(a)、(b)、(c)、(d)分别为锂电池亮区 q_1 、渐变区 q_2 、暗区 q_3 和背景区 q_4 中邻域窗口内像素带灰度分布曲线与模板灰度分布曲线图。其中,横坐标为像素个数,纵坐标为灰度值。曲线 N 代表背景模板曲线,曲线 M_1 代表电池暗区模板曲线,曲线 M_2 代表电池亮区模板曲线,曲线 Q_i 代表待识别灰度分布曲线。随后计算曲线上各采样点到背景模板灰度分布曲线 N 和电池模板灰度分布曲线 M_1 、 M_2 上采样点之间的弗雷歇距离和相似度值。如表 3 所示,所选取待识别灰度分布曲线 Q_1 、 Q_3 、 Q_4 依据相似度值大小分别判断为电池亮区、电池暗区和背景区。其中渐变区 q_2 可以看作电池暗区图像因光强增强后的灰度变化图像,其邻域窗口内所提灰度分布曲线 Q_2 依据相似度值被判断为电池暗区,可以看出本文所提精定位方法能有效区分出电池与背景区域。

表 3 灰度分布曲线的相似度计算结果

Table 3 Similarity calculation results of grayscale distribution curves

待识别灰度分布曲线	模板灰度分布曲线	相似度
Q_1	电池暗区 M_1	1.474
	电池亮区 M_2	12.143
	背景 N	1.545
Q_2	电池暗区 M_1	4.397
	电池亮区 M_2	1.154
	背景 N	2.297
Q_3	电池暗区 M_1	5
	电池亮区 M_2	1.209
	背景 N	2.297
Q_4	电池暗区 M_1	2.237
	电池亮区 M_2	1.186
	背景 N	3.072

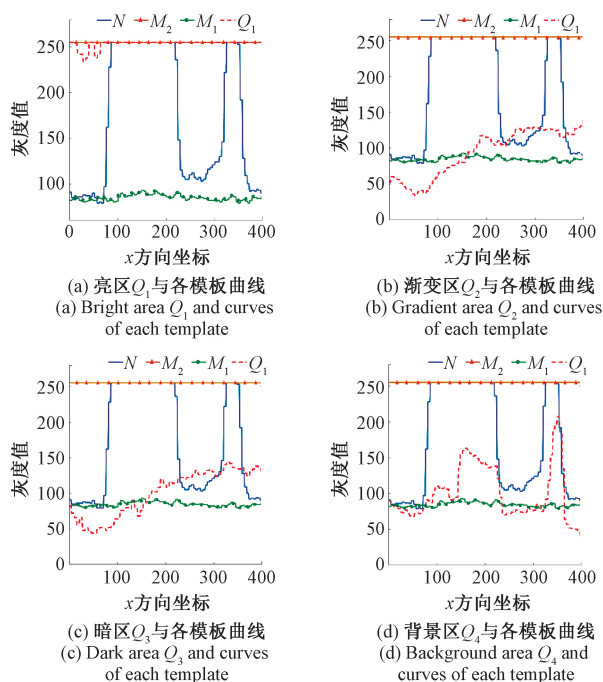


图16 粗定位图像各区域模板灰度分布曲线

Fig. 16 Grayscale distribution curves of templates in different regions of rough localization image

为验证本文算法检测效果,选取图17(a)中圆柱锂电池灰度图像,通过实验对比 Canny 算法、Sobel 算法、文献[19]算法和文献[20]算法的锂电池轮廓提取。结果表明传统经典算法因对灰度值敏感无法滤去背景图像,所提取的轮廓较为模糊,文献[19]基于 Otus 和 8 邻域像素均值方法和文献[20]基于 Canny-Zernike 矩阵方法由于包含的滤波、平滑等处理方法使最后提取出的边缘轮廓不连续。而本文先基于 Lambert 模型扩展,再通过弗雷歇距离函数的精定位方法很好的滤去背景图像并提取出锂电池边缘轮廓,如图17(f)所示。为进一步验证所提圆柱锂电池轮廓精确提取算法的有效性和准确性,本文基于锂电池拆解环境建立了一个由 800 幅图像组成的数据集,其中每张图片分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$ pixels。同时为了保证实验样本的可靠性和真实性,每张图片内的圆柱锂电池位置任意,并且包含凹坑形变、光照不均和表面锈蚀等情况,如图18所示。

由于锂电池长度固定,并且锂电池表面凹坑形变、锈蚀缺陷、光照变化等因素主要影响直径方向轮廓检测精度,故本文实验主要对比锂电池直径方向检测误差,结果如表4所示。不同型号和情形下的圆柱锂电池直径轮廓检测平均误差不超过 2.5%。同时当光照度从 400 Lux 减弱到 300 Lux 后,检测误差波动较小。表明本文所提方法对光强并不十分敏感,光强在一定范围内变化依然能较为精确的提取锂电池轮廓,具有较好的稳定性。需

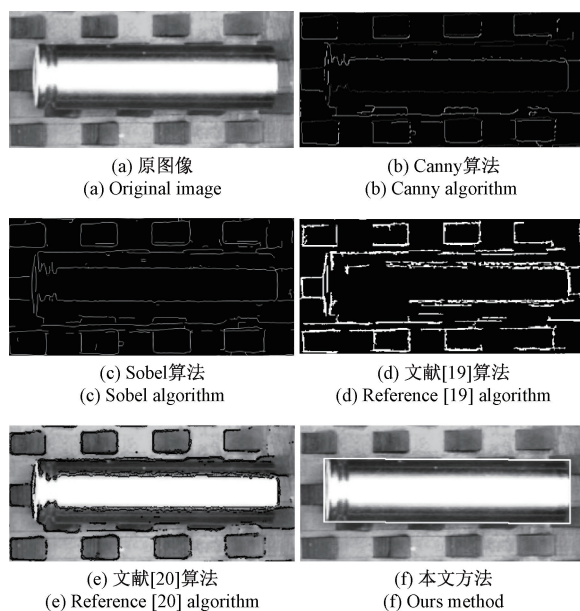


图17 不同边缘检测算法对比

Fig. 17 Comparison of different edge detection algorithms

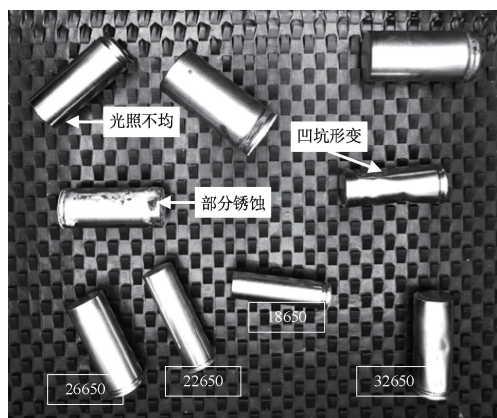


图18 锂电池样本图像

Fig. 18 Image of lithium battery sample

要说明的是由于部分圆柱锂电池处于相机拍摄和光照区边缘,所拍摄的锂电池图像表面存在部分背光区,致使该部分像素带会有一定的判别误差。当锂电池直径的减小时,匹配错误的像素带占比即误差率 ε 会存在较小规律性增长。当锂电池位于相机正常拍摄范围和使用分辨率较高的相机时,可消除该部分误差和减小误差增长的趋势,轮廓检测精度可进一步提升。

2.5 位姿检测

精确提取圆柱锂电池轮廓后,通过所提基于矩形度和边缘轮廓特征的判别方法识别圆柱锂电池正负极并提取方位角 β 。如图19所示,划分电池两端 ROI 区域后,根据自适应阈值分割算法提取区域内特征轮廓。随后对比锂电池两端特征轮廓矩形度数值,计算出锂电池实际

表 4 各类型锂电池测量结果比较

Table 4 Comparison of measurement results for various types of lithium batteries

	电池型号							
	32650		26650		22650		18650	
实际直径 d/mm	32.0		26.0		22.0		18.0	
光照度 E/Lux	400	300	400	300	400	300	400	300
测量次数	426	418	424	430	428	420	424	416
最大直径 d/mm	32.377	32.435	26.493	26.377	22.464	22.406	18.377	18.464
最小直径 d/mm	31.826	31.884	25.768	25.478	21.71	21.478	17.739	17.826
误差 $\varepsilon/\%$	± 1.18	± 1.36	± 1.90	± 2.01	± 2.11	± 2.37	± 2.09	± 2.58
平均误差 $\bar{\varepsilon}/\%$	± 1.27		± 1.955		± 2.24		± 2.335	

方位角 β 进而得到精定位轮廓区域中心坐标 O 。图 19(a)、(b)、(c)、(d) 分别为正常情况、凹坑形变、腐蚀锈斑和光照不均影响下的锂电池位姿检测,其结果正确的判别出锂电池正负极端并计算出方位角 β ,验证了所提正负极判别即位姿检测算法的有效性和准确性。随后对四种规格的圆柱锂电池分别以锈斑、凹坑和光照不均 3 种情况进行多组实验,其结果如表 5 所示。各类型电池平均识别正确率均在 94% 以上,其中 32650 型圆柱电池的识别平均正确率最高为 95.7%,细小型的 18650 型电池由于 ROI 区域小使得两端矩形度差异较小,故识别平均正确率低于其他类型锂电池。但依然可以看出本文提出的正负极判别即位姿检测方法对不同类型和干扰情形下的圆柱锂电池均有较高的识别正确率。

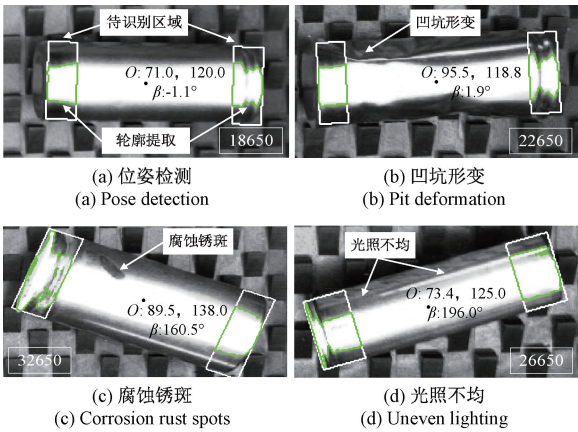


图 19 锂电池位姿检测

Fig. 19 Lithium battery pose detection

表 5 各类型锂电池位姿检测结果比较

Table 5 Comparison of pose detection results for various types of lithium batteries

电池型号	测量次数			正确次数			正确率 $x/\%$			平均正确率 $\bar{x}/\%$
	锈斑	凹坑	光照不均	锈斑	凹坑	光照不均	锈斑	凹坑	光照不均	
32650	160	165	162	151	158	157	94.4	95.8	96.9	95.7
26650	158	165	162	147	157	157	93.0	95.2	96.9	95.0
22650	155	162	165	144	154	159	92.9	95.1	96.4	94.8
18650	159	162	162	147	153	155	92.5	94.4	95.7	94.2

3 结 论

本文针对退役圆柱锂电池轮廓检测中存在的深度学习方法模型训练时间长、通用型差,传统算法因对灰度值敏感无法滤去复杂背景干扰问题提出一种新的轮廓精确提取与位姿检测方法。首先建立圆柱锂电池 Lambert 漫反射模型并通过 Otsu 算法提取其 XLD 轮廓,随后根据所提弗雷歇距离相似函数方法计算待识别灰度分布曲线与模板灰度分布曲线间的相似度大小完成轮廓精确提取。最后设计一种基于矩形度和边缘轮廓特征的正负极判别方法提取圆柱锂电池位姿。经实验验证,在 32650、26650、22650 和 18650 这 4 种型号的圆柱锂电池多轮次识别中,其直径方向长度识别误差小于 3%,位姿检测正

确率在 94% 以上。同时在光强变化、锂电池表面存在凹坑形变和锈斑情况下,所提方法依然能准确提取出圆柱锂电池轮廓和位姿,表明该方法具有良好的稳定性和鲁棒性。

参考文献

[1] XIAO J, JIANG C, WANG B. A review on dynamic recycling of electric vehicle battery: Disassembly and echelon utilization [J]. Batteries (Basel), 2023, 9(1):57.

[2] BLANKEMEYER S, WIENS D, WIESE T, et al. Investigation of the potential for an automated disassembly process of BEV batteries[J]. Procedia CIRP, 2021,98: 559-564.

[3] YANG D, PENG B, AL-HUDA Z, et al. An overview of

- edge and object contour detection[J]. *Neurocomputing* (Amsterdam), 2022,488:470-493.
- [4] DONG Y, WANG Z, GUO W. Overview of edge detection algorithms based on mathematical morphology[C]. 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2022: 1321-1326.
- [5] TIAN B, WEI W. Research overview on edge detection algorithms based on deep learning and image fusion[J]. *Security and Communication Networks*, 2022.
- [6] YI R, TAN P, LIN S. Leveraging multi-view image sets for unsupervised intrinsic image decomposition and highlight separation[C]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2020:12685-12692.
- [7] 杨泽宇, 叶一青, 蒋威, 等. 空间高曲率金属线表面均匀化照明[J]. *激光与光电子学进展*, 2023,60(6): 272-280.
- YANG Z Y, YE Y Q, JIANG W, et al. Surface homogenization illumination of spatial high curvature metal wire[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(6): 272-280.
- [8] 郭碧茹, 孔韦韦, 陈斌. 导向滤波的高光去除改进算法[J]. *计算机工程与应用*, 2021,57(20):229-235.
- GUO B R, KONG W W, CHEN B. Improved algorithm for removing highlights with guided filtering[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(20): 229-235.
- [9] 陶静, 汪俊亮, 徐楚桥, 等. 基于视觉校准的环锭纺细纱条干特征在线提取方法[J]. *纺织学报*, 2023, 44(4): 70-77.
- TAO J, WANG J L, XU CH Q, et al. Feature extraction method for ring-spun-yarn evenness online detection based on visual calibration[J]. *Journal of Textile Research*, 2023, 44(4): 70-77.
- [10] 郭绍陶, 苑玮琦. 基于双高斯纹理滤波模板和极值点韦伯对比度的圆柱锂电池凹坑缺陷检测[J]. *电子学报*, 2022,50(3):637-642.
- GUO SH, YUAN W Q. Pit defect detection of cylindrical lithium battery based on double gaussian texture filtering template and extreme point weber contrast[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(3): 637-642.
- [11] 苑玮琦, 郭绍陶. 圆柱型覆膜锂电池圆周面凹坑检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020,41(2):146-156.
- YUAN W Q, GUO SH T. Research on the detection method of pit on the cylindrical surface of cylindrical coated lithium battery[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 146-156.
- [12] VYSKAKH S, SURENDRAN K N, UDUPA G. Evaluation of roundness error for cylindrical surfaces using vision system[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 4807-4811.
- [13] GUO X, LIU X, GUPTA M K, et al. Machine vision-based intelligent manufacturing using a novel dual-template matching: A case study for lithium battery positioning[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 116(7-8): 2531-2551.
- [14] WU Y, YANG M, WANG Y, et al. Pole-piece position distance identification of cylindrical lithium-ion battery through X-ray testing technology[J]. *Measurement Science & Technology*, 2021, 32(4): 45405.
- [15] OREN M, NAYAR S. Generalization of Lambert's reflectance model, 1994[C]. *ACM*, 1994.
- [16] JIANG F, ZHOU Y, QIN M, et al. A trajectory compression method based on Fréchet distance[J]. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 2021, 693(1): 12091.
- [17] 黄世泽, 陈威, 张帆, 等. 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(12): 1690-1695.
- HUANG SH Z, CHEN W, ZHANG F, et al. Method of turnout fault diagnosis based on Frechet distance[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(12): 1690-1695.
- [18] TANG B, YIU M L, MOURATIDIS K, et al. On discovering motifs and frequent patterns in spatial trajectories with discrete Fréchet distance[J]. *GeoInformatica*, 2022, 26(1): 29-66.
- [19] 叶婷, 赵立宏, 李明, 等. 光器件金线图像高光区域的检测与去除[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(2): 146-152.
- YE T, ZHAO L H, LI M, et al. Detection and removal of highlight area in metal wire image of optical device[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(2): 146-152.
- [20] HUANG C, JIN W, XU Q, et al. Sub-pixel edge detection algorithm based on canny-zernike moment method[J]. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 2020, 29(15): 2050238.

作者简介



王朕, 2022 年于安徽工业大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉、智能制造技术等。

E-mail: wangzhen20000201@163.com

Wang Zhen received his B. Sc. degree from Anhui University of Technology in 2022.

Now he is a M. Sc. candidate in Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics. His main research interests include machine vision, intelligent manufacturing technology, etc.



叶文华, 1985 年于南京航空学院获得学士学位, 1988 年于南京航空学院获得硕士学位, 1991 年于南京航空学院获得博士学位, 现为南京航空航天大学教授, 主要研究方向为智能制造、数控装备、固废资源化装备技术等。

E-mail: whye@nuaa.edu.cn

Ye Wenhua received his B. Sc. degree from Nanjing Aeronautical Institute in 1985, M. Sc. degree from Nanjing Aeronautical Institute in 1988, and Ph. D. degree from Nanjing Aeronautical Institute in 1991, respectively. Now he is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include intelligent manufacturing, CNC equipment, solid waste resource utilization equipment technology, etc.