

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.004

## 基于机器视觉的电芯绝缘介质定位算法

陈甦欣, 罗乐文, 赵安宁

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为保证电芯绝缘介质定位的准确性和时效性,文章提出一种基于双线性插值亚像素坐标结合改进随机抽样一致性(random sample consensus,RANSAC)算法的绝缘介质定位算法。对工业采集的图像进行空间滤波、阈值分割等预处理操作,分割出目标并增强特征;运用 Canny 边缘检测算子检测边缘,选取定位轮廓并根据最小外接矩形分离 4 条边缘直线,用双线性插值公式精确定位边缘直线亚像素坐标;采用部分点先验模型约束 RANSAC 算法提取 4 条边缘直线的高质量内点,再用最小二乘法分别拟合 4 条边缘直线并计算出相应偏移量。实验结果表明,该算法能有效保证绝缘介质的定位精度且具有一定的时效性,可以较好地满足实际生产应用的要求。

**关键词:**机器视觉;亚像素边缘;随机抽样一致性(RANSAC);视觉定位;直线拟合

**中图分类号:**TP391.413;TM912.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)04-0452-06

### Location algorithm for battery core insulating medium based on machine vision

CHEN Suxin, LUO Lewen, ZHAO Anning

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to ensure the accuracy and timeliness of insulating medium location of battery core, this paper proposes an insulating medium location algorithm based on bilinear interpolation sub-pixel coordinates and improved random sample consensus(RANSAC) algorithm. Firstly, the industrial images are preprocessed by spatial filtering and threshold segmentation, etc., to segment the target and enhance the features. Secondly, the Canny edge detection operator is used to detect the edge, the locating contour is selected, four edge lines are separated according to the minimum circumscribed rectangle, and the sub-pixel coordinates of the edge lines are accurately located by bilinear interpolation formula. Finally, the high-quality interior points of the four edge lines are extracted by RANSAC algorithm constrained by partial point prior model, and then the four edge lines are fitted by least square method and the corresponding offsets are calculated. The experimental results show that the algorithm can effectively ensure the positioning accuracy of insulating medium and has a certain timeliness, which can better meet the requirements of practical production applications.

**Key words:** machine vision; sub-pixel edge; random sample consensus(RANSAC); visual positioning; line fitting

电芯是新能源汽车动力电池最基本的组成单位,其性能是影响电池使用和安全性能的重要指标。电芯绝缘介质作为电芯壳体的主要保护元件,它的正确安装对电芯的绝缘和保护具有重要作用。工业生产中机械手在安装绝缘介质的过程

中由于物料偏移或抖动等原因使绝缘介质不能准确对齐电芯顶面,需要进行视觉定位。机器视觉检测具有非接触、速度快、精度高等特点,可以在复杂、恶劣的环境下工作<sup>[1]</sup>,可以保证电芯定位的精度和时效性。

收稿日期:2022-12-17;修回日期:2023-04-04

基金项目:安徽省科技重大专项资金资助项目(202103a05020024)

作者简介:陈甦欣(1970—),男,江西宜春人,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

对电芯绝缘介质进行定位的前提条件是视觉系统能够快速准确地提取出绝缘介质的几何特征信息,而根据目标几何特征对目标进行定位一直是机器视觉发展中一个重要的研究方向。文献[2]利用改进后的 Hu 矩拟合工件外轮廓矩形实现定位,增强了轮廓的识别能力,但最小二乘方程拟合的边缘直线稳定性差;文献[3]利用累积霍夫变换检测边缘直线,用 Zernike 矩定位边缘直线亚像素坐标后进行最小二乘拟合,但存在不可避免的误差;文献[4]利用凸包的几何特征和构建偏离直方图提取直线边缘,并通过最小距离直线拟合,但该方法中凸包顶点的选取对噪声比较敏感,而在工业环境下总会存在较多的干扰;文献[5]采用最小外接矩形定位矩形工件轮廓,再采用霍夫变换检测并提取出相互垂直的轮廓直线,但该方法很容易保留干扰点,影响直线拟合效果;文献[6]提出基于工件形状的模版匹配算法,该方法需要提前提取轮廓点集制作模版,可靠性低且算法多应用在复杂轮廓工件;文献[7]使用多条件约束结合改进概率霍夫直线算法,去掉了很多不属于目标工件轮廓的干扰点,这种方式虽然可靠性较高,但过程太复杂,导致效率较低。

根据绝缘介质的几何形状特征,本文提出基于边缘矩形轮廓的定位算法,采用双线性插值亚像素边缘点检测方法对边缘轮廓进行精确定位,通过部分点先验模型约束随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法提取高质量内点,再用最小二乘法拟合轮廓直线,在保证效率的同时提高定位精度和鲁棒性。

### 1 系统方法

视觉系统采集的绝缘介质原图如图 1 所示。

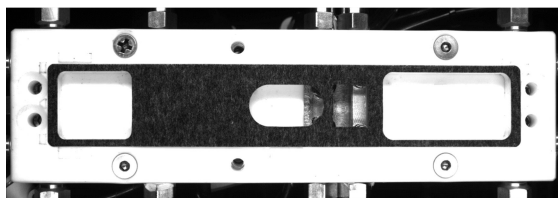


图 1 绝缘介质原图

根据采集图像的过程特点,定位算法流程可以分为 4 个步骤<sup>[8]</sup>,如图 2 所示。

定位算法流程如下。

1) 图像获取。分别采集同一相机不同时间段拍摄的多张图片。

2) 图像预处理。先对图像进行灰度化,再进行滤波消除干扰噪声,通过增强图像突出绝缘介质图像细节信息,分割出目标位置后再进行形态学处理消除图像中的亮点和暗斑。

3) 图像分析。首先检测目标边缘后提取绝缘介质轮廓;然后采用最小外接矩形处理轮廓并分离出 4 条边缘直线;最后提取亚像素坐标分别进行直线拟合。

4) 根据 4 条直线方程计算出绝缘介质中心点  $x$ 、 $y$  方向偏移量及角度  $\theta$  的偏移量并进行定位。

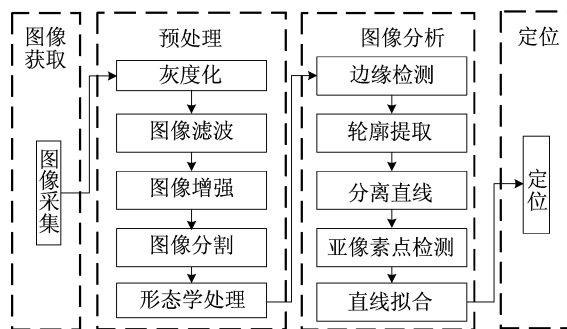


图 2 定位算法流程

## 2 定位方法

### 2.1 图像预处理

对初始采集的图像进行灰度化处理,再采用双边滤波,在消除噪声的同时能有效保留图像边缘特征。为了增加图像细节突出边缘特征,采用伽马变换对图像进行增强变换。通过最大类间方差(Ostu)阈值分割法初步分割出目标区域,淡化背景的干扰。

最后进行形态学操作,采用开/闭运算去除目标区域中的轮廓缺口和黑色空洞等干扰信息后进行连通域处理,提取出最终的目标区域。预处理结果如图 3 所示。



图 3 预处理结果

### 2.2 提取轮廓边缘直线

预处理后目标区域剩下介质的轮廓图像,需要提取轮廓的 4 条边缘直线。提取过程为:对预

处理后的图像采用 Canny 算子检测边缘,根据轮廓面积提取轮廓;然后采用最小外接矩形<sup>[5]</sup>包围轮廓,获取矩形的中心点坐标、长、宽以及旋转角度等信息;通过这些矩形参数生成掩膜,分离出轮廓的 4 条待拟合直线。掩膜及提取结果如图 4 所示。



(a) 掩膜



(b) 分离的直线

图 4 分离边缘直线

### 2.3 亚像素点检测

绝缘介质定位对精度要求较高,应采用亚像素级别的边缘检测,本文条件下数据点集较大,过高追求亚像素精度不仅对实验结果影响不大,反而增加了计算量。综合考虑,本文选用双线性插值法<sup>[9]</sup>。在像素级坐标 $(i, j)$ 的基础上,对原图坐标领域内的点  $P(i, j)$ 、 $P(i+1, j)$ 、 $P(i, j+1)$ 、 $P(i+1, j+1)$  采用双线性插值公式,即

$$G(i+x, j+y) = (1-x)(1-y)P(i, j) + x(1-y)P(i+1, j) + y(1-x)P(i, j+1) + xyP(i+1, j+1) \quad (1)$$

其中,  $x, y$  为  $i, j$  的增量值,以此对坐标四等分细化。对重新得到的图像求出其梯度图像  $R(x, y)$ ,在梯度图像的  $x$  轴方向上取 5 个点,即  $R(i, j)$ 、 $R(i+0.25, j)$ 、 $R(i+0.50, j)$ 、 $R(i+0.75, j)$ 、 $R(i+1, j)$ ,并以这 5 个点的梯度幅值为函数值,以  $i, i+0.25, i+0.50, i+0.75, i+1$  为插值点代入多项式插值公式,即

$$f(x) = \sum_{k=0}^4 \prod_{\substack{z=0 \\ z \neq k}}^4 \frac{x - x_z}{x_k - x_z} y_k \quad (2)$$

令  $df(x)/dx=0$ ,可以计算得到  $x$ 。同理,在  $y$  轴方向取 5 个点  $R(i, j)$ 、 $R(i, j+0.25)$ 、 $R(i, j+0.50)$ 、 $R(i, j+0.75)$ 、 $R(i, j+1)$  计算出  $y$ ,至此得到坐标点的亚像素边缘坐标 $(x, y)$ 。

### 2.4 改进的 RANSAC 算法拟合

为了保证直线边缘的连续性,直线分离阈值通常不会太靠近理论边缘,因此会引进少数离群点,影响直线拟合精度。本文提出一种改进的

RANSAC 算法来拟合边缘直线。

#### 2.4.1 RANSAC 算法原理

RANSAC 算法假设数据集合由内点和外点构成,“内点”是组成模型参数的数据,“外点”是不符合模型参数的数据<sup>[10]</sup>,它通过不断迭代选取内点数据最多的一组数学模型参数。RANSAC 算法关于直线的基本拟合流程如下。

1) 从数据集合中随机选取 2 个样本数据,计算出初始直线模型。

2) 计算出每个数据点相对于该模型的距离误差,误差小于预定的阈值归为内点,否则归为外点。

3) 重复以上步骤,记录内点数最多的模型,达到最大迭代数后返回该模型。

#### 2.4.2 改进的 RANSAC 算法

RANSAC 算法能从具有较多局外点的数据集中估计出高精度的模型参数,具有较强的鲁棒性,但应用在本文条件下存在如下几个问题。

1) 为保证拟合精度,迭代次数需设的足够大,影响算法效率。

2) 若选取的 2 个点距离过近,则易导致直线的斜率偏移真实直线较多,这 2 个点无法代表较远的其他边缘点的情况。

3) 在选出高质量模型或错误模型的情况下依然遍历数据集验证模型,消耗算法总时间<sup>[11]</sup>。

解决上述问题就是要在控制算法迭代次数的条件下使算法依然具有较好的精度和效率。本文从迭代条件出发,引进部分点先验模型<sup>[12]</sup>并结合最小二乘法对 RANSAC 算法做出改进,改进后的算法步骤如下。

1) 设定合适的迭代次数  $K$ 、邻近误差阈值  $T$  以及数据点距离阈值  $D$ ,从初始数据集合中随机选取 2 个点  $P_i, P_j$ ,若 2 个点距离小于阈值  $D$  则重新选取。

2) 以  $P_i, P_j$  构成直线  $L_{ij}$ ,在  $P_i, P_j$  之间任意选取 2 个点,若这 2 个点离直线  $L_{ij}$  的距离都小于阈值  $T$ ,则令这条直线为候选直线,否则直接放弃并进行下一轮迭代。

3) 重复迭代直到达到最大迭代次数  $K$  或模型的支持量达到点集大小 95% 以上,返回最优模型的 2 个点,并将此模型的所有内点保存至新点集。

4) 采用最小二乘法重新拟合新点集并获取最终结果。

改进的 RANSAC 算法流程如图 5 所示。

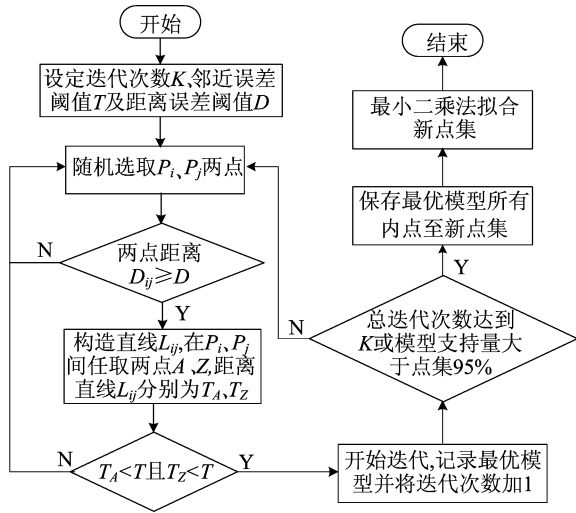


图5 改进的拟合算法流程

改进的 RANSAC 算法通过减少迭代次数、限制随机点距离和使用部分点先检验模型的方法及时返回高质量模型,且有效避免了该算法在错误模型上的过多消耗,有效剔除了外点。最小二乘法对于内点分布较为规律的数据集合具有较好的精度且时效性好<sup>[13]</sup>。对最后的点集采用最小二乘法拟合可以达到很好的效果,能提升算法的整体效率。

### 3 定位原理

为了准确定位出绝缘介质的坐标,需要根据之前直线拟合得到的绝缘介质边缘 4 条轮廓直线的几何位置关系,计算出绝缘介质中心点  $x, y$  方向偏移量及角度  $\theta$  的偏移量并进行校正。绝缘介质定位示意图如图 6 所示。

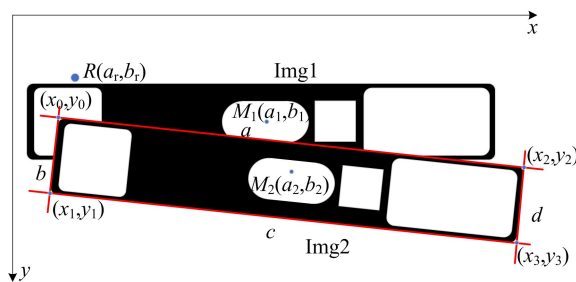


图6 绝缘介质定位示意图

图 6 中:Img1、Img2 分别为标准位置和存在偏移需要定位的绝缘介质图像;  $R(a_r, b_r)$  为机械手的旋转中心;  $M_1, M_2$  分别为 Img1、Img2 的中心点;  $a, b, c, d$  代表算法拟合出的 4 条直线, 它们的交点分别为  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 。Img2 与  $x$  轴的夹角用  $\theta$  表示, 标准位置下  $\theta = 0$ 。

设拟合出直线  $a, b, c, d$  的方程为:

$$\begin{cases} y = k_0x + b_0, \\ y = k_1x + b_1, \\ y = k_2x + b_2, \\ y = k_3x + b_3 \end{cases} \quad (3)$$

可以求出交点  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  坐标并计算出中心点  $M_2(a_2, b_2)$  坐标为:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{x_0 + x_1 + x_2 + x_3}{4}, \\ b_2 = \frac{y_0 + y_1 + y_2 + y_3}{4} \end{cases} \quad (4)$$

偏移角度  $\theta$  为:

$$\theta = \begin{cases} (\arctan k_0 + \arctan k_2 + \arctan k_1 + \arctan k_3 + \pi)/4, & k_1, k_3 < 0; \\ (\arctan k_0 + \arctan k_2 + \arctan k_1 + \arctan k_3 - \pi)/4, & k_1, k_3 > 0; \\ (\arctan k_0 + \arctan k_2 + \arctan k_1 + \arctan k_3)/4, & k_1, k_3 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

为了将偏移的 Img2 移动回到标准位置,需要先控制机械手以旋转中心  $R$  旋转  $\theta$  角度,使得 Img1 和 Img2 保持一致的角度方向,旋转后再进行坐标移动。设旋转后 Img2 的中心点坐标  $M_3(a_3, b_3)$  为:

$$\begin{cases} a_3 = L \cos\left(\arccos\left(\frac{a_2 - a_r}{L}\right) - \theta\right) + a_r, \\ b_3 = L \sin\left(\arcsin\left(\frac{b_2 - b_r}{L}\right) - \theta\right) + b_r \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $L$  为  $R$  与  $M_2$  两点之间的像素距离。由此可以算出绝缘介质在  $x, y$  轴方向需要移动的距离  $\Delta x, \Delta y$  为:

$$\begin{cases} \Delta x = a_3 - a_1, \\ \Delta y = b_3 - b_1 \end{cases} \quad (7)$$

综上所述,想要获取绝缘介质的偏移信息,只需要检测出绝缘介质中心点  $M_2$  坐标及偏移角  $\theta$  即可实现定位。

### 4 实验验证

本文算法采用 C++ 编程语言并调用 OpenCV 库函数实现,测试环境为 Ubuntu18.04, Intel Core i7 处理器,运行内存为 12 GiB,实验平台采用 Visual Studio 2019。将文献[8]算法、RANSAC 算法与本文算法进行对比实验。实验图片来自某公司电芯自动装配生产线上的视觉定位系统,由于实际情况下绝缘介质偏角在  $-2^\circ \sim$

2°之间,为减少随机性带来的误差以及提供同一个对比标准值,选择多组标准位置下拍摄的图片进行对比实验。在定位过程中,4 条边缘直线的拟合精度将直接影响算法的定位结果,因此需要保证一定的拟合精度,从而来保证算法的整体精度。

本文算法下边缘直线拟合效果如图 7 中黄线所示。



图 7 直线拟合结果

从图 7 可看出,本文算法拟合出的直线与边缘直线有效重合,有较好的拟合效果,其中 4 条拟合直线方程对应的参数见表 1 所列。

表 1 直线方程参数

直线	斜率	截距	角度/(°)
a	0.006 309	479.319 762	0.360 958
b	472.213 348	-170 594.137 000	89.878 670
c	0.000 884	1 215.424 211	0.050 669
d	243.217 041	-1 096 138.584 000	89.764 430

从表 1 可以看出,水平线 a、c 和竖直线 b、d 拟合出的直线角度误差都在 0.5°以内,拟合精度得到保证。

为体现上述 2 种算法与本文算法的对比结果,分别采用 3 种算法对绝缘介质进行拟合定位实验,实验结果中的 3 组见表 2 所列。

表 2 实验结果

组别	算法	绝缘介质中心 像素坐标	偏移角/(°)	时间/ms
1	文献[8]	(2 436.67,856.38)	-0.013 70	17
	RANSAC	(2 436.71,856.26)	-0.001 10	321
	本文	(2 436.72,856.13)	0.000 96	180
2	文献[8]	(2 436.96,856.03)	-0.016 50	18
	RANSAC	(2 436.68,856.24)	-0.001 26	329
	本文	(2 436.82,856.25)	-0.001 05	183
3	文献[8]	(2 436.32,856.28)	0.010 20	21
	RANSAC	(2 436.76,856.20)	0.001 05	318
	本文	(2 436.74,856.17)	-0.001 13	186

取图像中介质中心点 x、y 方向坐标误差最大值绝对值、角度偏差绝对值以及时间作为评判算法综合性能的标准。10 组实验结果如图 8

所示。

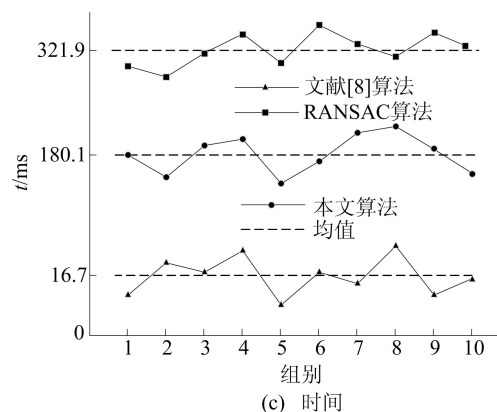
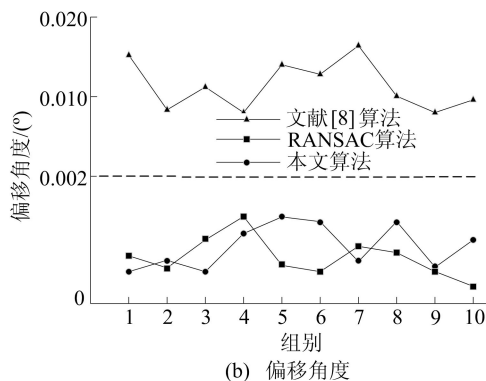
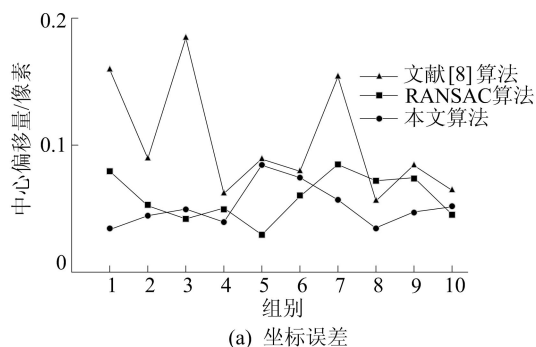


图 8 误差、偏移角度和时间分布

实验结果表明:文献[8]算法虽然拟合速度较快,但是误差波动较大且精度较低,平均偏移角度高于其他 2 种算法 1 个数量级以上;RANSAC 算法拟合精度较高,但是较高的迭代次数以及错误模型的消耗影响了算法的整体运行时间;得益于亚像素边缘的高精度与改进 RANSAC 算法的稳定性,本文算法在直线拟合与中心定位上表现出了良好的综合性能,整体满足工业生产的实际要求。

### 5 结 论

工业生产中对电芯绝缘介质的定位不仅要求具有高精度,还应具有一定的时效性。为保证绝缘

介质定位的综合性能,本文提出一种基于双线性插值亚像素坐标结合改进 RANSAC 算法的定位算法。首先,经过一系列预处理操作准确提取出绝缘介质区域;然后,用 Canny 算子提取边缘后选用最小外接矩形分离直线轮廓,以双线性插值提取高精度的亚像素坐标,并采用改进的 RANSAC 算法分别拟合直线;最后,根据 4 条直线方程计算出绝缘介质的中心点坐标和角度的偏移量,以实现精确定位。实验结果表明,本文算法兼具有一定的精度和时效性,满足实际工业生产的要求。

### [参 考 文 献]

- [1] 丁凌,黄家才,陈田,等. 基于机器视觉的软包电池尺寸测量方法[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2021, 19(1): 1-6.
- [2] 寸毛毛,卢军. 基于改进 Hu 矩和矩形拟合的芯片识别定位算法[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 151-156.
- [3] 韩进宇. 基于视觉的卡钳毛刺检测和定位方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [4] 齐敏,牛贝乐. 三角环工业标志符快速高精度定位算法[J]. 数据采集与处理, 2021, 36(4): 789-798.
- [5] 黄超,茅健,徐斌,等. 基于最小外接矩形和 Hough 变换的定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8): 66-71.
- [6] 吴云飞. 基于机器视觉的工件识别与定位方法研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.
- [7] 张伟. 基于机器视觉的大尺寸电视机背板的定位算法研究及应用[D]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [8] 李执,闫坤,傅琪,等. 基于机器视觉的金属工件尺寸测量[J]. 仪表技术与传感器, 2022(3): 92-97.
- [9] 任永强,涂德,江韩暑. 基于机器视觉的柴油机缸套尺寸测量[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(9): 151-153.
- [10] SHO N G, ICHIRO Y, KAITO O, et al. Acceleration of surface roughness evaluation using RANSAC and least squares method for running-in wear process analysis of plateau surface[J]. Measurement, 2022, 203: 1-10.
- [11] 张丹,李长安,逯海滨,等. 基于轴线局部搜索的曲轴轴径视觉测量方法[J]. 机电工程, 2022(12): 1-8.
- [12] 刘阳,刘超,许宝卉. 视觉技术在圆孔识别定位中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2021(7): 108-111, 116.
- [13] 黄菁菁. 基于机器视觉的小型零件轮廓尺寸测量算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [14] 李建豹,黄贤金,揣小伟,等. 长三角地区碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1486-1496.
- [15] YAN H M, GUO X, ZHAO S Q, et al. Variation of net carbon emissions from land use change in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1990—2020[J]. Land, 2022, 11(7): 997.
- [16] ZHANG H, SUN X, WANG W. Study on the spatial and temporal differentiation and influencing factors of carbon emissions in Shandong province[J]. Nat Hazards, 2017, 87: 973-988.
- [17] 关敏捷,袁艳红,冉木希,等. 基于 STIRPAT 模型的山西省能源碳排放影响因素及峰值预测[J]. 中国煤炭, 2021, 47(9): 48-55.
- [18] 杨皓然,吴群. 基于系统 GMM 面板模型的土地利用碳排放效应研究: 以中国省际面板数据为例[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 541-549.
- [19] 胡孟然. 中国县域碳排放空间格局及影响因素研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [20] MA J J, GUO J Y, AHMAD S, et al. Constructing a new inter-calibration method for DMSP-OLS and NPP-VIIRS nighttime light[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 937.
- [21] 全国国土资源标准化技术委员会. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 2-6.
- [22] 袁壮壮. 南昌市土地利用碳排放变化特征及低碳优化研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2021.
- [23] 苏雅丽,张艳芳. 陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 152-156.
- [24] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804-812.
- [25] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 394-401.
- [26] 石洪昕,穆兴民,张应龙,等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 101-106.
- [27] 孙赫,梁红梅,常学礼,等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(3): 154-162.
- [28] 王雅晴,谭德明,张佳田,等. 我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7897-7907.
- [29] 苏泳娴,陈修治,叶玉瑶,等. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [30] 施开放. 多尺度视角下的中国碳排放时空格局动态及影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [31] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [32] 安徽省人民政府. 安徽省人民政府办公厅关于印发安徽省 2014—2015 年节能减排低碳发展行动方案的通知[EB/OL]. (2014-12-09)[2023-12-03]. <https://www.ah.gov.cn/szf/zfgb/8128171.html>.

(责任编辑 胡亚敏)

(责任编辑 吴亮)

### (上接第 440 页)