·实验技术·

基于 GoogLeNet 卷积神经网络的智能垃圾分类系统设计

赵一璇，原晓楠*，王　戈，丁　颖，刘镒搏

（西安交通大学 电气工程学院，西安 710049）

摘要：针对现有垃圾分类方式存在的分类烦、效率低、监督难等问题，设计基于 GoogLeNet 卷积神经网络的智能垃圾分类系统，从自动识别和投放、操作简单和适应家用等方面弥补市场产品的不足。基于 GoogLeNet 卷积神经网络设计基于垃圾分类的四分类识别分类算法，对采集的垃圾数据集进行微调训练以实现垃圾类型的有效识别。以树莓派为核心控制器，配合 CSI 摄像头获取图像搭载图像识别算法实现垃圾分类，自主设计机械结构及控制单元并结合分类信息完成垃圾的自动投放。通过测试分析表明系统能精准实现垃圾类型识别及投放，有效提升垃圾分类的便捷度和高效性，对用户端垃圾分类落实具有重要意义。

关　键　词：GoogLeNet 卷积神经网络；智能垃圾分类；图像识别算法；机械设计；自动投放

中图分类号：TM930.2　　**文献标志码：**A　　DOI: 10.12179/1672-4550.20240074

Design of an Intelligent Garbage Classification System Based on the GoogLeNet Convolutional Neural Network

ZHAO Yixuan, YUAN Xiaonan*, WANG Ge, DING Ying, LIU Yibo

（School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China）

Abstract: In view of the problems of existing garbage classification methods, such as tedious sorting, low efficiency and supervision difficulties, an intelligent garbage classification system based on the GoogLeNet convolutional neural network is designed to overcome the shortcomings of market products concerning automatic identification and disposal, simple operation and suitability for household use. Based on GoogLeNet convolutional neural network, a four-category recognition classification algorithm based on garbage classification is designed. The collected garbage data set is fine-tuned and trained to achieve effective recognition of garbage types. A Raspberry PI as the core controller is employed in this system, combined with a CSI camera to obtain images and equipped with image recognition algorithm to achieve garbage classification. An independently designed mechanical structure and control unit, integrating classification information, enables automatic garbage disposal. The test analysis shows that the system can accurately perform garbage type identification and disposal, thereby effectively enhancing the convenience and efficiency of garbage classification. This holds great significance for the practical implementation of garbage classification at the user level.

Key words: GoogLeNet convolutional neural network; intelligent garbage classification; image recognition algorithm; mechanical design; automatic disposal

随着国民生活水平的快速提高和城市化进程的加快，我国每年的生活垃圾产量也在不断增加。根据文献 [1] 报道统计，我国生活垃圾年产量超过 1.5 亿吨，并且城市垃圾按照 8%~10% 的年增长率在不断增多。自 2019 年上海市颁布垃圾分类政策法规以来，人们对垃圾分类重要性的认识越来越深入[2]，当今社会对发展的可持续性和资源的再利用越来越重视，如何能实现高效便捷的垃

收稿日期：2024−02−26

基金项目：2022 年西安交通大学课程思政专项研究项目（KCSZ202235）；2023 西安交通大学国家级大学生创新创业训练项目（XJ202310698022）；西安交通大学 2024 年第二批产学合作协同育人项目（24CXHZ031）。

作者简介：赵一璇，本科生，电气工程及其自动化专业。E-mail: zyx2021@stu.xjtu.edu.cn

*** 通信作者：**原晓楠，硕士，工程师，主要从事电工电子技术实验教学研究方面的工作。E-mail: yxn0002017060@xjtu.edu.cn

圾分类，进而回收各类垃圾资源变废为宝，成为重要的研究课题。

目前，我国大部分地区仍然使用传统垃圾桶，多数用户对垃圾分类工作持敷衍态度，存在垃圾不分类和错分类现象。单纯依靠人工识别垃圾种类易出错且工作量巨大，存在垃圾投放时间受限制、效率低等问题[3]。市面上已有的智能分类垃圾站箱体结构复杂、体积大、成本高，投入量产和推广难，且大多面向整个社区，难以进行监督管控。当前市面上逐渐出现的语音式智能垃圾分类站，灵敏度相对较低，对环境处理要求高，无法做到自动识别并自动进行垃圾分类投放的效果。

针对以上问题[4]，本文进行家庭式垃圾预分类系统研究，基于神经网络技术设计智能垃圾分类系统(以下简称“系统”)，利用图像识别技术、机械设计技术及自动控制技术实现垃圾自动识别及投放，提高垃圾分类准确率和效率，并应用于家庭、办公等环境。智能垃圾分类系统在用户首次投放垃圾时实现垃圾分类，不需要在垃圾站等大型垃圾场所集中投放垃圾后进行二次分类；实体体积小、结构简单，从垃圾投放源头做好垃圾分类，避免垃圾集中投放后二次分类带来的资源浪费。

1　系统设计

系统采用树莓派 4B 作为主控制器模块，配合图像获取模块、图像识别模块[5] 和自动投放模块实现垃圾智能分类投放功能，具体框架如图 1 所示。用户投入垃圾后，图像获取模块采用 CSI 摄像头拍照得到垃圾图像，存储于树莓派中；树莓派调用图像识别模块中设计的卷积神经网络模型，识别垃圾图像得到垃圾所属分类信息并传输给自动投放模块；自动投放模块中的 Arduino 控制板根据相应信息控制舵机转动，带动控制分类转盘将垃圾投放到指定垃圾容纳桶，实现智能分类投放效果。

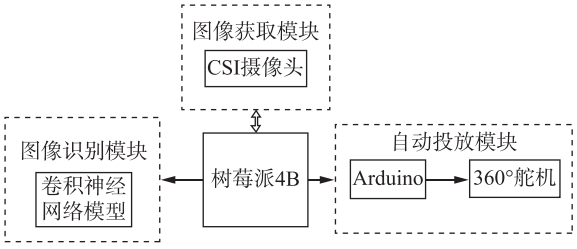


图 1　系统框架图

2　主控制器模块

系统主控制器选用树莓派 4B[6]。树莓派是一款功能强大的微型电脑，其系统基于 Linux，可以通过简单的命令行操作进行配置和管理，易于使用和维护；可以使用 Python、C++等多种编程语言进行编程，灵活性高；可以通过 GPIO 接口连接其他设备，如传感器、执行器等，以实现更多的功能和应用，可拓展性强。相对于其他硬件控制器，树莓派价格较低，对于图像的识别度高，处理能力强大，可以方便地进行图像处理和深度学习等高级应用。

3　图像获取模块

树莓派常采用 CSI 摄像头和 USB 摄像头。通过比较，CSI 摄像头与树莓派兼容性好、运行速度快、帧率高且资源占用率低，因此图像获取模块选用 CSI 摄像头。OpenCV 是一种可跨多平台、具有大量图像处理和计算机视觉算法、性能高效的开源计算机视觉库[7]。基于 OpenCV 的实时目标检测和图像处理功能，使用 Thonny 软件调用 OpenCV 编写 Python 代码，实现用户投入垃圾，垃圾进入摄像头视野范围后，树莓派打开摄像头并拍照，保存垃圾图像及其对应路径的功能。

4　图像识别模块

为了实现垃圾分类，树莓派拍照获得垃圾图像及其对应路径后，建立垃圾数据集并在 PC 端基于卷积神经网络模型进行分类识别训练[8]。通过多轮模型训练提高识别准确率并进行测试，得到垃圾的种类信息。

4.1　垃圾数据集的搭建

搭建四分类垃圾数据集，将垃圾分为可回收垃圾、厨余垃圾、有害垃圾、其他垃圾 4 大类，其中每个大类包含小类，如“厨余垃圾”大类中包含“蔬菜”小类，“蔬菜”小类中有多张不同拍摄环境下和不同形态及种类的蔬菜的图片，部分数据集如表 1 所示。为解决初始数据集过小，模型训练不充分的问题，基于网络爬虫技术通过数据爬取得到大量垃圾实物图片。删除不符合要求的图片后，本数据集共有 40 个垃圾小类，训练集中含 16 177 张图片，测试集中含 800 张图片，

数据集中各类垃圾的数据量较为均衡，多样性好，能够完成网络训练。

表 1 部分四分类垃圾数据集

编号	垃圾种类	垃圾名称
0	其他垃圾	快餐盒
1	其他垃圾	脏塑料
2	其他垃圾	香烟
6	厨余垃圾	饭菜
7	厨余垃圾	骨头
8	厨余垃圾	果皮
14	可回收垃圾	充电宝
15	可回收垃圾	包
16	可回收垃圾	化妆品瓶
37	有害垃圾	干电池
38	有害垃圾	软膏
39	有害垃圾	过期药品

4.2 图像识别基础网络的选择

为了得到可以实现四分类的图像识别网络，使用 VGG、ResNet、GoogLeNet 等多种图像识别基础网络作为模型结构基础，通过训练各基础网络比对结果，选择最合适的模型作为训练的出发点。

VGG 是一种相对简单而直观的网络结构[9]，它使用多个小卷积核大小为 3×3 的卷积层，通过堆叠多个卷积层来构建深度网络结构，能够捕捉更多的图像细节和复杂特征，适用于小规模数据集，但层数的增加会带来负作用，如梯度消失、梯度爆炸等。ResNet 引入了残差连接，即通过跨层直接连接来解决梯度消失和网络退化问题[10]，适用于大规模数据集和更深网络，具有较浅的路径和深的路径，使得信息可以快速传播到后续层。GoogLeNet 采用 Inception 模块[11]，通过设计稀疏网络结构，产生稠密的数据，网络结构相对较宽，但参数量相对较小，具有较高的计算效率，能够有效地减少计算资源消耗。

基于各图像识别基础网络原理分析，根据数据集的规模、复杂性以及计算资源的限制，对于四分类数据集预先考虑使用 GoogLeNet 模型。同时，通过将各基础网络作为训练基础，对比训练后的相对正确率来确定最终选择模型。

以 VGG、ResNet、GoogLeNet 模型作为训练基础，多轮训练后得到各模型相对正确率，发现对于垃圾分类四分类问题，以 GoogLeNet 为基础网络结构的模型为所得相对正确率最高的模型结构，通过标准化分类相对正确率绘制出图像，如图 2 所示。

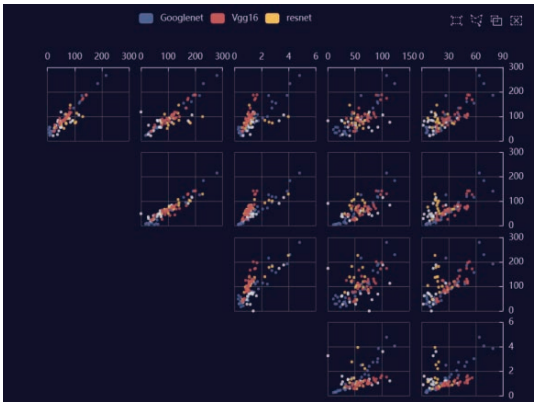


图 2 相对正确率绘制图

4.3 卷积神经网络模型的搭建及训练

卷积神经网络[12]的结构包括输入层、卷积层、激活层、池化层和全连接层。输入层将导入网络的图像转化为像素数据构成输入矩阵，卷积层用于提取图像特征，池化层用于对特征进行压缩，降低数据体的空间尺寸，减小计算量，全连接层用于计算最后分类的评分分数值。基于 GoogLeNet 基础网络搭建卷积神经网络模型结构如图 3 所示，Inception V1 模块[13]结构如图 4 所示。

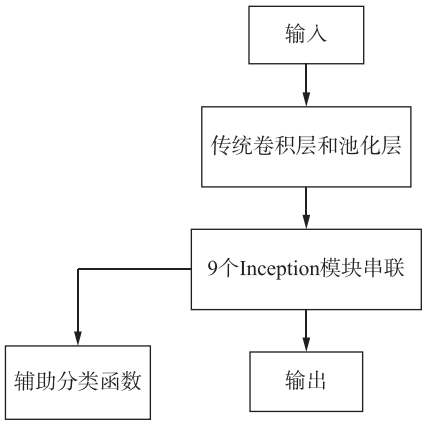


图 3 卷积神经网络模型结构图

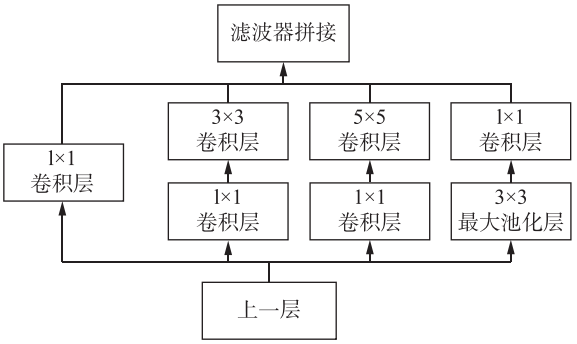
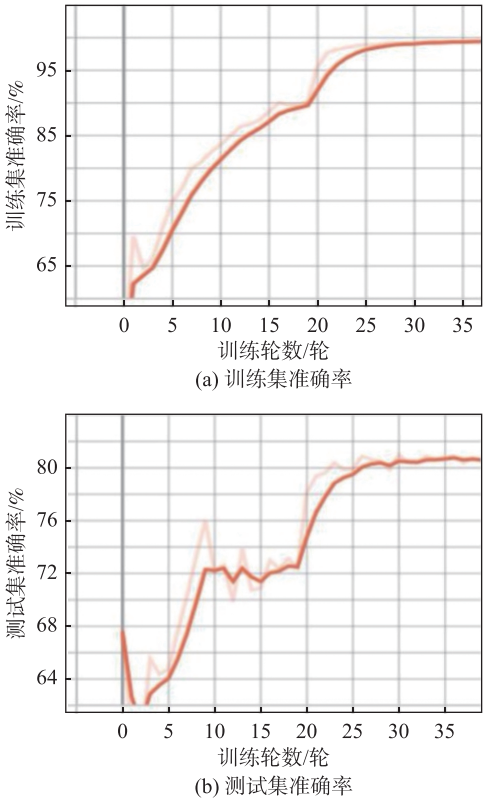


图 4 Inception V1 模块结构图

由于 Inception 模块在网络中间使用更佳，网络前半部分使用传统的卷积层和池化层，然后经过 9 个 Inception 模块串联，对输入的图像进行特征提取。为了避免梯度消失，在网络增加辅助分类函数，用于向前传导梯度。辅助分类函数将中间某一层的输出用作分类，并按一个较小的权重(0.3)加到最终分类结果中，相当于做模型融合，同时给网络增加反向传播的梯度信号，提供额外的正则化，对于整个网络的训练很有裨益。在实际测试时，辅助分类函数会被去掉。在输出时，用平均池化代替全连接层，减少参数数量防止过拟合。

基于 Pytorch 框架编写代码，构建基于 GoogLeNet 基础网络的神经网络模型，对模型完成 100 轮以上的训练，通过 TensorBoard 监控得到对应神经网络的训练数据，如图 5 所示。

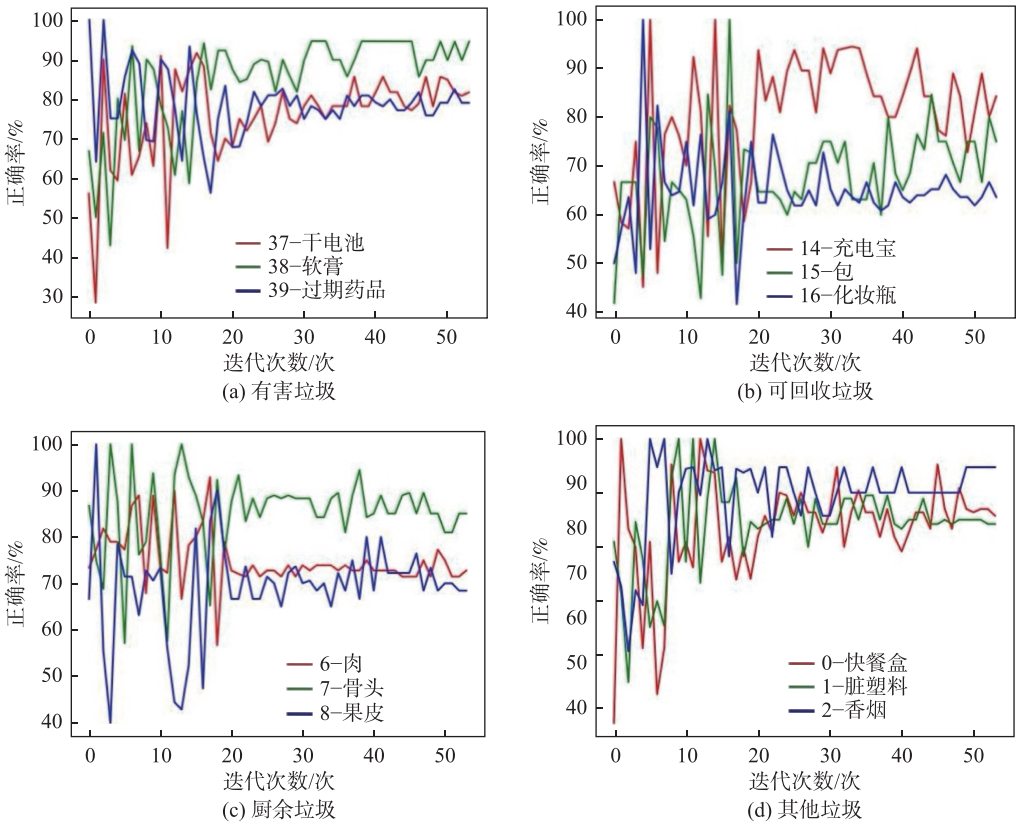
通过实际图片(非训练集与测试集)的正确率测试，特意在所分的四类垃圾中测试对应种类垃圾的分类准确率，在每个大类中随机选中 3 个小类，通过 Seaborn 绘制图像如图 6 所示，得到实际测试正确率已经达到收敛。



(a) 训练集准确率

(b) 测试集准确率

图 5　训练数据曲线图



(a) 有害垃圾　(b) 可回收垃圾

(c) 厨余垃圾　(d) 其他垃圾

图 6　分类准确率曲线图

总数据集的平均准确率以流式渲染映射数据点图的形式，通过 Echart 绘制图像如图 7 所示，训练得到分类正确率趋向于 80%~90% 之间。

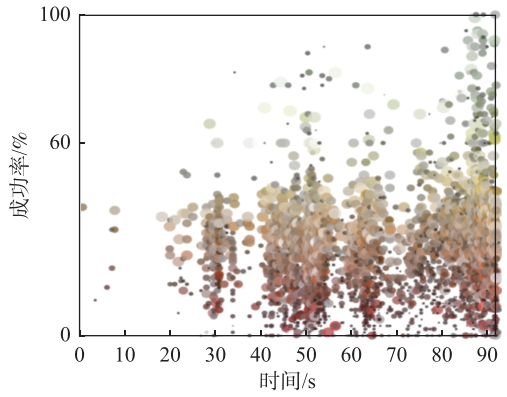


图 7 总数据集平均准确率绘制图

模型训练完成后，通过 Vncviewer 连接 PC 端和树莓派，将训练好的模型文件和权重文件部署在树莓派上，通过树莓派调用 CSI 摄像头拍照，使用 OpenCV 进行图像预处理，并加载模型识别得到图像对应的垃圾种类。网络模型开始运行至识别完成的时长在 5 s 以内，工作效率较高。

5 自动投放模块

系统设计相应的机械结构，以 Arduino 为主控单元，通过与树莓派通信获取相应信息控制机械结构转动实现垃圾种类识别完成后的自动投放[14]。

5.1 机械结构设计

考虑到系统的便捷性及易于清洁性，采用分离式设计方法，将系统设计为：底部转盘机构模块、分类转盘旋转模块、垃圾容纳桶模块和装置外壳 4 个部分[15]，各部件之间以简单结构连接，可以根据需要拆除和组装。底部设有支座、支柱转盘及齿轮传动机构，支座上设置 4 个槽位，负责承载垃圾容纳桶，支柱转盘、转轴和大伞齿轮通过键联结的方式相连，带动转盘转动，且连接支柱底座，起稳定支撑作用。步进电机带动小伞齿轮转动进而带动垃圾容纳桶的旋转；分类转盘旋转模块连接舵机、半圆形垃圾容纳槽和拨板，由舵机驱动容纳槽和拨板旋转至工作位；垃圾容纳桶负责分类与收集废弃物；装置外壳上采取镂空设计，同时为智能识别系统提供工作槽位。系统整体机械结构如图 8 所示。

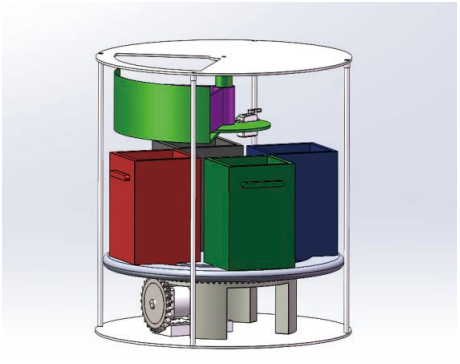


图 8 系统整体机械结构图

5.2 垃圾投放控制

系统选用 DS3230 360°舵机进行转动控制，树莓派作为上位机系统，运行卷积神经网络模型后，将得到的垃圾种类信息通过串口发送给 Arduino。Arduino 根据垃圾种类信息信号实现对电机转动角度的精确控制，电机带动底座转动，将对应垃圾容纳桶转至垃圾容纳槽下方；舵机带动长条拨板转动，将垃圾投入指定垃圾容纳桶，实现垃圾分类投放。

6 系统测试

在垃圾投放口投入干电池，干电池落入垃圾容纳槽，树莓派启动 CSI 摄像头拍照，图片导入卷积神经网络模型进行识别，识别结果如图 9 所示。得到垃圾种类为有害垃圾，识别正确，Arduino 根据树莓派传输信息控制电机使有害垃圾容纳桶转至垃圾容纳槽下方，舵机带动长条拨板转动，将垃圾拨入垃圾容纳桶内，投放结果如图 10 所示，实现垃圾自动识别及投放全过程。

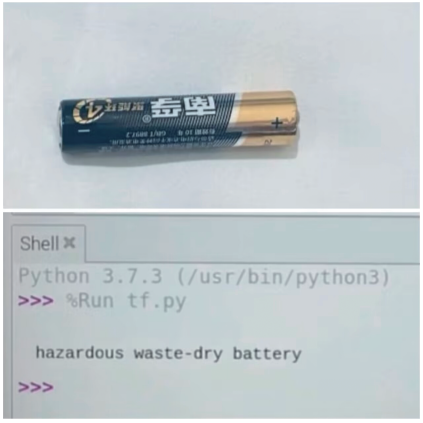


图 9 识别结果显示图



图 10　投放结果显示图

7　结束语

本文基于 GoogLeNet 卷积神经网络模型进行了图像识别算法设计，通过多轮训练后有效解决垃圾分类四分类问题，实现较高准确率的垃圾分类识别功能，以树莓派为主控单元从图像采集、分类识别、信息传输到系统控制实现垃圾自动投放，实现了高效便捷的智能垃圾分类系统设计。系统综合应用卷积神经网络模型和 OpenCV 等多种算法技术，自主设计机械结构，有效实现了智能垃圾分类识别及投递，从垃圾投放源头进行分类，有效解决垃圾集中投放前分类问题，避免垃圾二次分类造成的资源浪费，解决了用户垃圾分类难、分类烦的问题。系统结构紧凑简单，装配便捷，便于维护与更换，适用于各种场合，响应国家促进构建资源节约型社会的政策号召，帮助推动垃圾分类政策的落实。

参 考 文 献

[1] 沈颖青. 我国垃圾分类现状及对策建议[J]. 北方环境, 2011, 23(8): 13−14.

[2] 杜欢政, 聂雨晴, 陆莎, 等. 上海垃圾分类资源化利用的现状、问题与实践路径[J]. 中国环境管理, 2022, 14(2): 13−18.

[3] 董丽丽. 北京垃圾分类工作现存问题与对策建议[J]. 再生资源与循环经济, 2021, 14(2): 19−21.

[4] 徐玥, 赵心怡, 尹雅雯. 智能垃圾桶推广困境及解决方案[J]. 合作经济与科技, 2021(1): 80−81.

[5] 莫庆炜, 李宏顺, 张成发, 等. 基于树莓派 Raspberry Pi 的智能垃圾分类设计[J]. 电子制作, 2023, 31(5): 71−74.

[6] 廖旭, 张文普, 彭烟, 等. 基于嵌入式 Linux 的视频图像采集与传输[J]. 微计算机信息, 2010, 26(2): 68−70.

[7] TSO F P, WHITE D R, JOUET S, et al. The Glasgow raspberry pi cloud: A scale model for cloud computing infrastructures[C]//2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. Philadelphia: IEEE, 2013: 108−112.

[8] 吴碧程, 邓祥恩, 张子憧, 等. 基于卷积神经网络的智能垃圾分类系统[J]. 物理实验, 2019, 39(11): 44−49.

[9] 吴怡啄, 杨定礼, 周辉, 等. 基于改进 VGG 网络的面部表情识别方法[J]. 电子器件, 2023, 46(4): 1062−1069.

[10] 胡聪, 吴小俊, 舒振球, 等. 拉普拉斯阶梯网络[J]. 软件学报, 2020, 31(5): 1525−1535.

[11] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y Q, et al. Going deeper with convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston: IEEE, 2015: 1−9.

[12] 李炳臻, 刘克, 顾佼佼, 等. 卷积神经网络研究综述[J]. 计算机时代, 2021(4): 8−12.

[13] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J/OL]. Computer Science, 2014: 1409.1556. https://arxiv.org/abs/1409.1556v6.

[14] 王蓉蓉. 基于机器学习的垃圾识别与分类研究[D]. 兰州：兰州理工大学, 2021.

[15] 吕汝金, 苏庚辰, 徐永博. 一种智能分类垃圾桶的设计研究[J]. 机械设计与制造, 2022, 377(7): 232−234.

编辑　葛晋