

两类 YOLOv4-tiny 简化网络及其 裂缝检测性能比较

宋立博¹, 费燕琼²

(1. 上海交通大学 学生创新中心, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 面向国内高大建筑物裂缝检测市场实际需求, 考虑现有 YOLOv4-tiny 深度网络结构在树莓派等边缘设备上运行速度慢的缺点, 使用去除第二层残差网络、增加一个 maxpool 池化层及改变最后一个 route 层连接的方法生成 YOLOv4-lite1 和 YOLOv4-lite2 两种新的简化版 YOLOv4-tiny 深度网络结构。使用从百度上搜索的裂缝图片生成裂缝检测的训练集、测试集和验证集数据, 在 Ubuntu16.04 系统上使用 Darknet 深度学习框架进行了训练。同时, 在树莓派 4B 上进行的实际测试表明, YOLOv4-lite1 具有更快运行速度、检出率和稳定性。该研究创新点在于进一步精简了 YOLOv4-tiny 网络结构和最后一层 route 层的连接, 从而获得两种新 YOLOv4-tiny 深度网络结构形式和较佳检测效果。

关键词: 智能检测; 深度学习; 边缘设备; 深度网络

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

training set, the test set, and the verification set data of crack detection were then generated by using the crack pictures downloaded from the internet, and the training is conducted on a 64-bit Ubuntu16.04 system utilizing the Darknet deep learning framework. At the same time, the actual tests on the RaspberryPI 4B show that the YOLOv4-lite1 structure has a faster running speed, detection rate, and stability compared to the YOLOv4-lite2 structure. Finally, the next step of this related work is pointed out. The innovation of this research lies in further simplifying the YOLOv4-tiny network structure and the connection of the last layer route layer, thus obtaining two new YOLOv4-tiny deep network structures and better detection results.

Key words: intelligent detection; deep learning; edge device; deep neural networks

Comparison of Two Types YOLOv4-tiny Simplified Networks and Their Crack Detection Performance

SONG Libo¹, FEI Yanqiong²

(1. Student Innovation Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To meet the demands of crack detection market in domestic tall buildings, taking the shortcomings of the fact that the existing YOLOv4-tiny deep network structure runs slowly on such edge devices as Raspberry Pi into account, two novel simplified YOLOv4-tiny deep network structures, that is, YOLOv4-lite1 and YOLOv4-lite2 were deduced by removing the second residual network, as well as adding a maxpool layer and changing the connection of the last route layer in this paper. The

随着芯片计算能力的快速提高及深度网络技术的成熟, 以深度学习为基础的机器智能时代已经来临。Tensorflow、MXNet、Pytorch 和 Caffe 等开源深度网络尤其是高效的 Darknet 深度网络的推出, 更促进智能技术在语音识别^[1-2]、人脸及姿态识别^[3-5]、电力设备及设施^[6-7]、零件质量及缺陷检测^[8-9]、轮廓检测^[10]、垃圾回收^[11]及农业相关^[12-13]等领域成功工程应用的同时, 也成为国内外学术机构的研究热点之一。

实际工程应用证实了深度网络实现的机器智能的高效性。但这些深度网络普遍运行在 Python 软件上, 普遍存在硬件要求高、环境依赖项多、搭建难度大及对使用者有一定编程基础要求等的缺点。由于算力限制, 深度网络在树莓派等边缘设备上运行速度更慢, 从而限制了其在移动机器人领域的工程应用。本文以上海交通大学研发的裂缝检测机器人为

收稿日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(51875335)

第一作者: 宋立博(1973—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为特种机器人及智能控制。

E-mail: lbsong@sjtu.edu.cn



论文
拓展
介绍

例,研究简化 YOLOv4-tiny 网络及在树莓派上实现裂缝智能检测的方法和技术。

1 Darknet 网络及 YOLOv4-tiny 深度网络结构

目标检测是深度网络及其算法的主要应用领域之一。传统上,物体检测有两阶段(two-stages)和一阶段(one-stage)两种方法。其中,基于候选区域(Region Proposal)的 R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN 等 R-CNN 系算法^[14]就是典型的两阶段方法,其特点是先通过启发式方法或卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)产生一系列候选框,再对这些候选框进行分类与回归。而一阶段方法则是采用不同尺度和长宽比在图片不同位置均匀采样,利用卷积 CNN 提取特征后直接进行分类与回归,将候选框产生与分类过程合二为一,典型的有单发多窗检测器(single shot multibox detector, SSD)^[15-16]和 YOLO(you only look once)两种算法。相比较而言,一阶段方法速度较快、准确度稍低且训练较为困难。

YOLO 算法建立在华盛顿大学 Redmon J. 团队推出的 Darknet 深度网络框架基础之上,采用 C 语言和 CUDA 编写,无依赖,速度快,可在 Windows 及 Linux 等系统及 CPU 和 GPU 等多种硬件上快速编译和运行。2020 年 4 月,Bochkovskiy 等^[17]在考虑了边框重合度、中心距离和宽高比等尺度信息的完全交并比(complete-intersection-over-union, CIoU)损失函数等基础上推出 YOLOv4 算法, Mosaic 数据增广、DropBlock 正则化等数据增强方法的应用使其在 MS COCO 数据集上的平均精度均值(mean average precision, mAP)提升至 43.5%,性能较其他版本 YOLO 算法有了很大提升。

YOLOv4 具有 162 层网络结构,使用三个特征层进行分类。回归预测骨干网络采用 CSPDarknet53,以空间金字塔池化(spatial pyramid pooling, SPP)和 PANet 为瓶颈(Neck)的附加模块和特征融合模块。相对于一般 PC 和树莓派等算力较弱的计算设备,YOLOv4 运行速度较慢,训练和检测时间较长。2020 年 6 月,Bochkovskiy 团队^[18]在 YOLOv4 网络结构基础之上,推出只有 38 层结构的简化版 YOLOv4,称为 YOLOv4-tiny。与 YOLOv4 相比,YOLOv4-tiny 在主干特征提取网络、瓶颈和头部(head)等方面均做了极大简化。YOLOv4-tiny 主

干特征提取网络采用 CSPDarknet53-tiny,一般以 $416 \times 416 \times 3$ 图像为输入。

2 简化版 YOLOv4-tiny 网络结构

在树莓派等边缘设备上运行时,38 层网络结构的 YOLOv4-tiny 速度依然较慢,简化后再加速就是可能的技术途径了。学术界以 YOLOv4 系列算法为基础进行了改进,主要手段有如下几种。

(1)数据增强。结合采用 Mosaic 和 CutMix 等多种数据增强方法和策略,解决单类检测和小目标检测时正负样本不平衡问题,使用小样本构建具有多种数据特征的数据集^[19];

(2)改进特征融合。结合低层信息丰富特征提取网络层次结构,使用多尺度融合及使用损失函数加权来约束权重和偏置以提高特征利用率。同时,使用 CIoU 等作为边框回归损失函数加快模型收敛速度^[20];

(3)改动网络特征层数量。通过删减或增加网络中相关的特征提取层,以实现网络改进^[21-22];

(4)改进特征提取网络。这是简化结构并提高性能的主要技术手段,主要方法有使用 GhostNet^[23]、逆残差组件(Inverted Residual Unit)^[24]及将 MobileNetV3 作为主干特征提取网络^[25],再结合特征融合层引入跨阶段部分网络(cross stage partial network, CSP)结构、融合卷积层和 BN(batch normalization)层的方法或软性非极大值抑制(soft DIoU-non-maximum suppression, Soft-DIoU-NMS)等算法或 K-means 聚类方法优化锚框选取以提高网络检测能力。

除删减特征提取层外,文献[19-25]所述简化方法依然没有显著减少 CPU 计算量及提高在树莓派上部署的可能性。本文采用的技术方法是删减一个用于特征提取的残差网络结构及改变最后一个 route 层连接的方法,在保证网络参数不变的条件下实现目标特征的尽早前向传播。其算法如图 1 所示。

由此可见,改进 YOLOv4-tiny 算法主要在于残差网络层的删减及特征的后向传递与 route 层连接。作为比较,本文设计了两种简化形式。

2.1 YOLOv4-lite1 网络结构

YOLOv4-lite1 网络结构是第一种简化形式。与标准 YOLOv4-tiny 相比,YOLOv4-lite1 网络有如下几个特点:①去除了第二个残差网络结构,仅使用两个残差网络进行特征提取;②在第 10 层 conv 卷积层和第 11 层 conv 卷积层之间增加了一个 maxpool 池化层以匹配原第三个残差网络结构的输入;③最后一

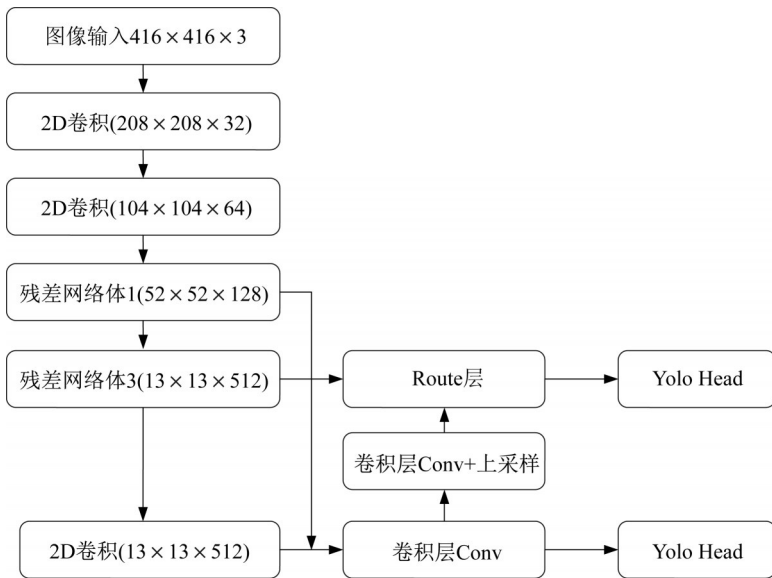


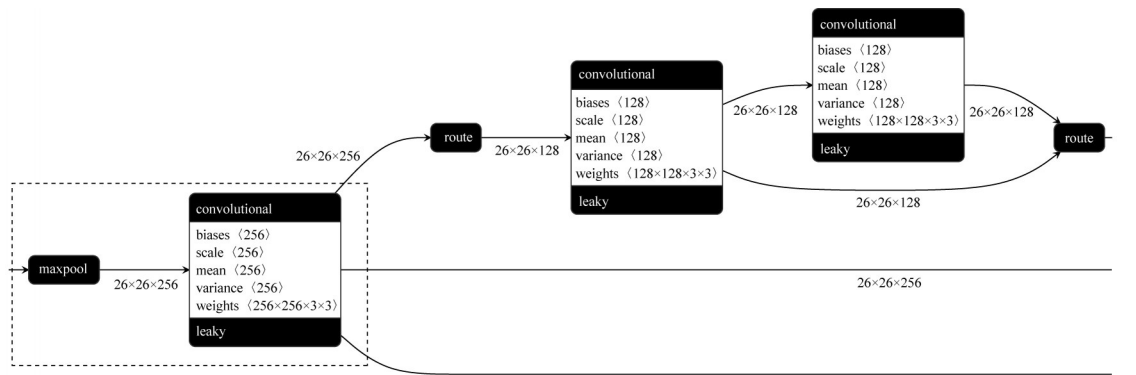
图 1 改进YOLOv4-tiny网络结构

Fig. 1 Improved network structure of YOLOv4-tiny

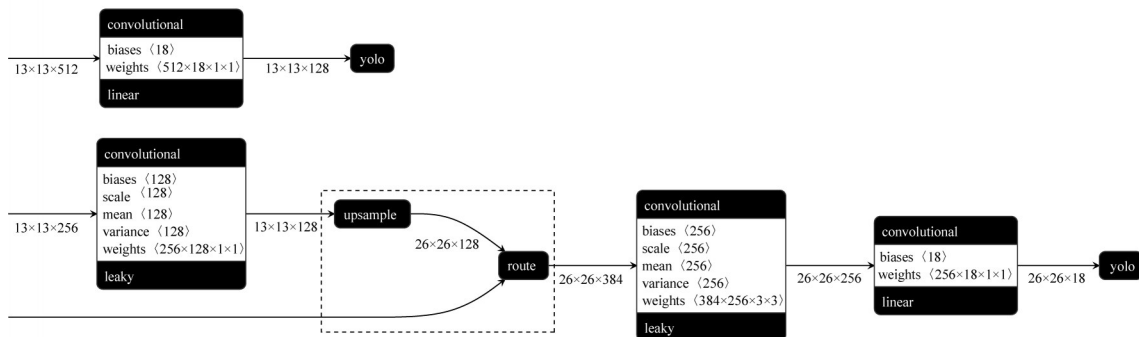
层 route 层与新结构中的第 12 层 conv 卷积层相连, 新网络具有 33 层结构, 未改变标准 YOLOv4-tiny 双 YOLO 头输出形式。

采用 netron 工具表示的 YOLOv4-lite1 网络结构 (部分) 如图 2 所示, 虚线内结构为 YOLOv4-lite1 网

络最大变化。最大变化之一是在原第三层残差网络之前增加一个 maxpool 池化层在降维的同时减少运算量, 第二个变化是第一层残差网络前向传播后再上采样与第一个 YOLO 输出融合, 以用于较小裂缝检测。



a YOLOv4-lite1网络结构(第一部分)



b YOLOv4-lite1网络结构(第二部分)

图 2 YOLOv4-lite1 网络结构

Fig. 2 Structure of YOLOv4-lite1

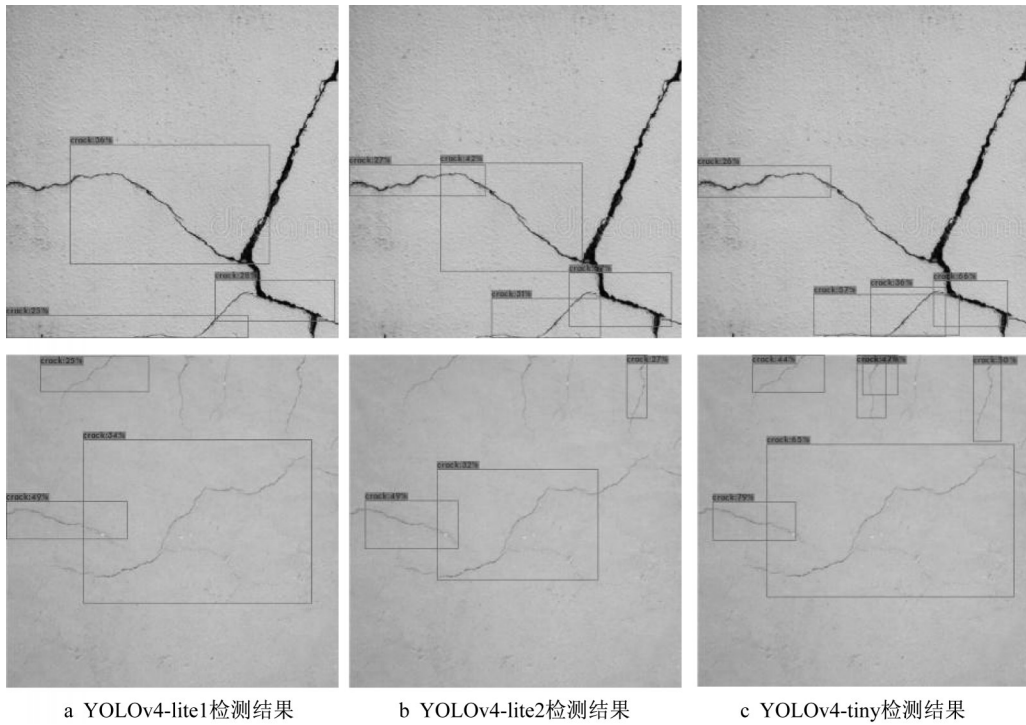


图 4 2 000次迭代周期生成的weights权重文件实验结果
 Fig. 4 Experiment results of the 2000-epoch weights file

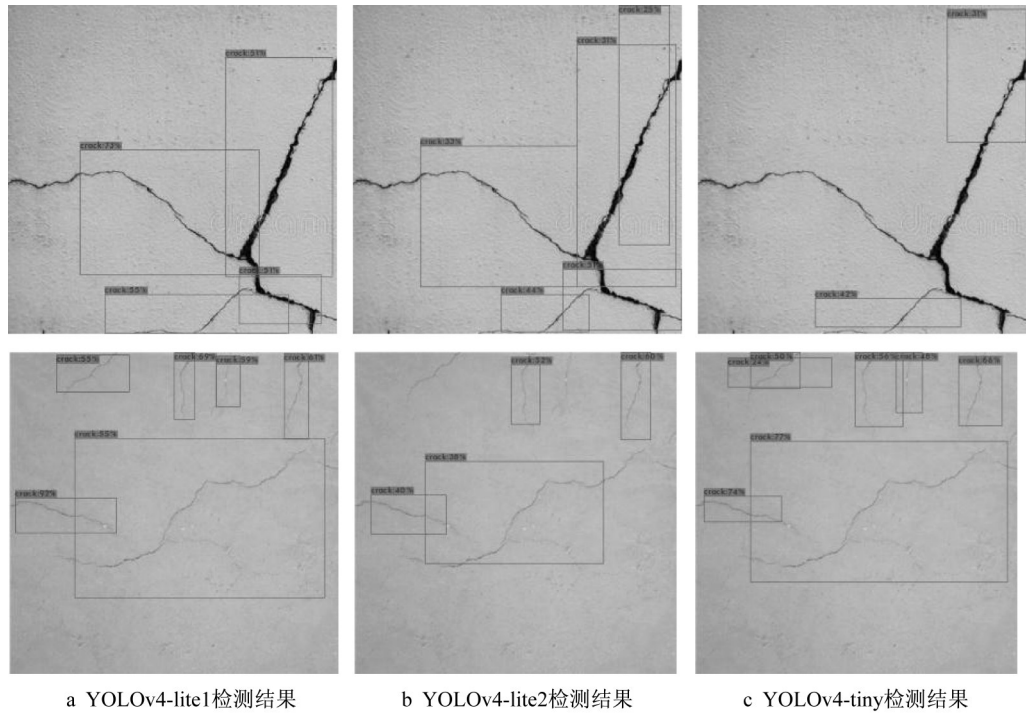


图 5 4 000次迭代周期生成的weights权重文件实验结果
 Fig. 5 Experiment results of the 4000-epoch weights file

平均精度均值 mAP 如表 1 所示。其中, lite1、lite2 及 tiny 分别表示 YOLOv4-lite1、YOLOv4-lite2 和 YOLOv4-tiny 算法。

相应的,各图片裂缝检出数量如表 2 所示,“+”

后面的数字为重复检测或误检数量。

分析如上数据,可得如下结论:

(1)因残差网络结构相同而 route 层连接靠前,在较低迭代周期时 YOLOv4-lite1 网络平均精度均

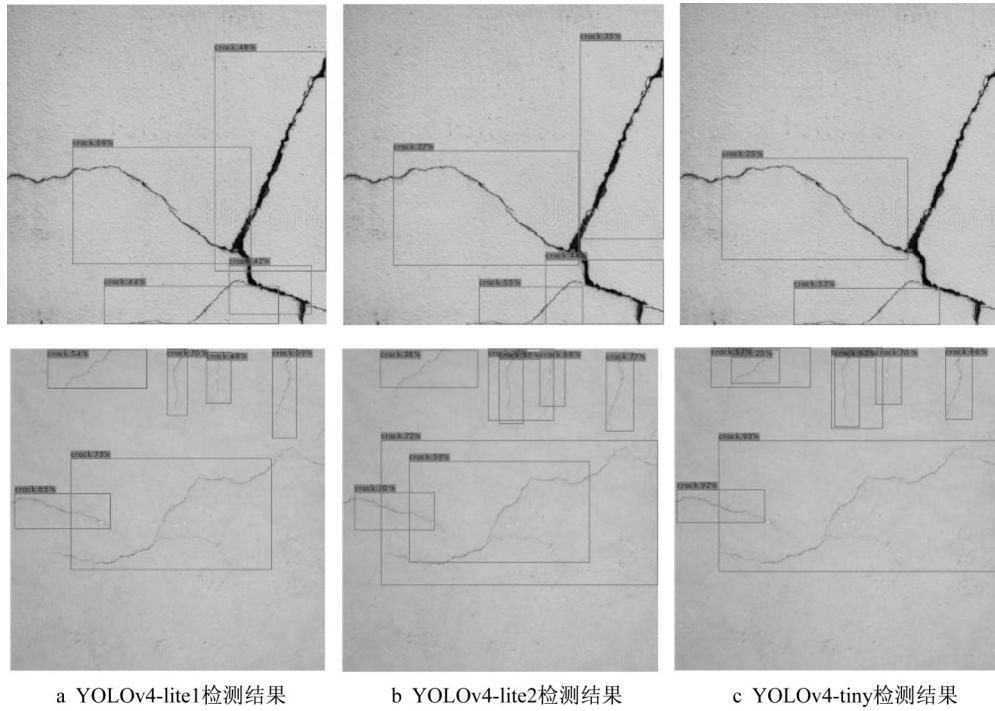


图 6 6 000 次迭代周期生成的 weights 权重文件实验结果
Fig. 6 Experiment results of the 6000-epoch weights file

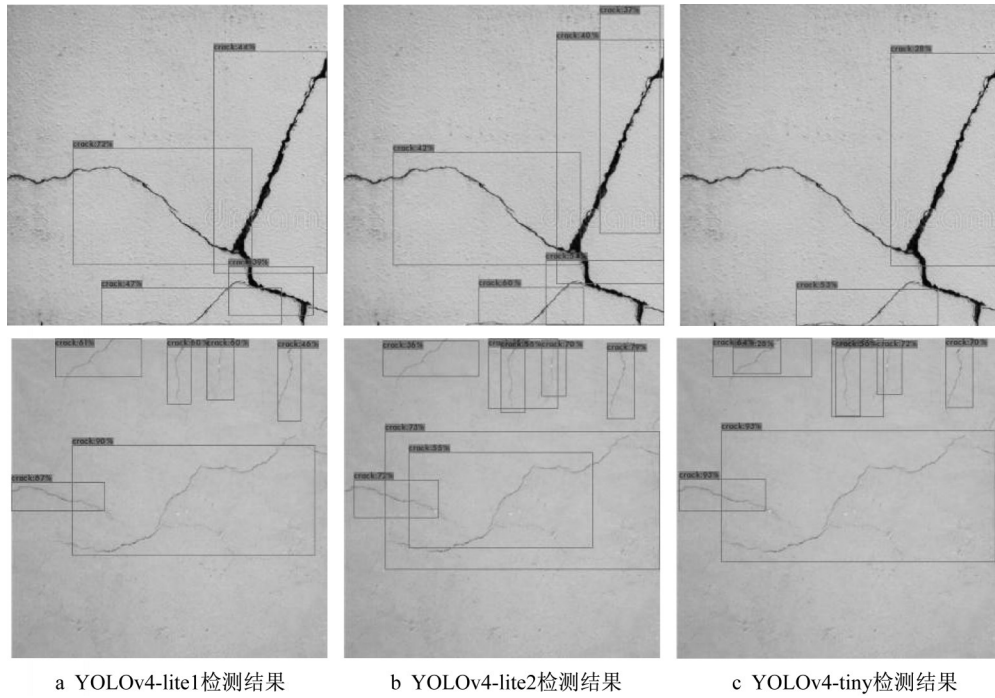


图 7 8 000 次迭代周期生成的 weights 权重文件实验结果
Fig. 7 Experiment results of the 8000-epoch weights file

值 mAP 高于 YOLOv4-lite2 和 YOLOv4-tiny 网络, 其置信度相对较高; 而随着训练的进行, 较高迭代周期时 YOLOv4-lite2 网络平均精度均值将高于 YOLOv4-lite1 和 YOLOv4-tiny 网络;

(2) 两者权重文件均为 23.7 M, 一般情况下

YOLOv4-lite1 平均运行速度比 YOLOv4-lite2 快 0.86%。二者速度并无本质差别, 但均高于 YOLOv4-tiny 网络;

(3) 以 2 000 次迭代周期为例, 在较少迭代周期时 YOLOv4-lite1 的裂缝检出率较 YOLOv4-lite2 高

表1 各测试图片检测时间表

Tab. 1 Detection time of different weights files and pictures

| 迭代周期 | 图片1 | | | 图片2 | | | 平均精度均值 mAP/% | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|-------|-------|
| | lite1 | lite2 | tiny | lite1 | lite2 | tiny | lite1 | lite2 | tiny |
| | 2 000 | 648.7 | 620.16 | 659.96 | 608.03 | 624.88 | 667.05 | 20.11 | 5.08 |
| 4 000 | 626.88 | 628.82 | 653.75 | 615.01 | 624.19 | 659.75 | 23.48 | 17.06 | 18.68 |
| 6 000 | 621.91 | 631.74 | 681.28 | 616.99 | 634.48 | 653.01 | 25.89 | 33.42 | 30.6 |
| 8 000 | 656.86 | 633.38 | 663.41 | 620.43 | 630.69 | 653.72 | 26.4 | 33.67 | 32.33 |

表2 各测试图片检出数量对比表

Tab. 2 Detection number of different weights files and pictures

| 迭代周期 | 图片1 | | | 图片2 | | |
|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | lite1 | lite2 | tiny | lite1 | lite2 | tiny |
| 2 000 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3+1 | 3+1 |
| 4 000 | 6+1 | 6+2 | 7+1 | 4 | 4+1 | 2 |
| 6 000 | 6+1 | 7+1 | 7+1 | 4 | 3+1 | 2 |
| 8 000 | 7 | 7+1 | 7+1 | 4 | 4+1 | 2 |

约22%;超过4 000个迭代周期后YOLOv4-tiny网络和YOLOv4-lite2网络因过拟合出现大量重复检测,而YOLOv4-lite1网络因较为稳定的平均精度均值表现稳定且效果最好。这就是说,平均精度均值

与检测效果并无必然关系,但过拟合将影响实际检测效果。

需说明的是,裂缝检测数据集较少,训练均不太充分,网络参数也未经完全优化。综合来讲,在使用图例图片检测时YOLOv4-lite1网络较YOLOv4-tiny网络和YOLOv4-lite2网络效果佳,虽然其平均精度均值较YOLOv4-lite2小。进一步的分析、训练和测试表明,增加网络的批量数batch和批次次数subdivision参数确实能在一定程度上提高平均精度均值。例如,YOLOv4-lite1网络在batch=32和subdivision=4及batch=16和subdivision=2时,其平均精度分别如表3所示。

表3 不同参数的平均精度均值对比

Tab. 3 Comparison of mAP with different parameters

| | 平均精度均值 mAP/% | | | | | | | |
|------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 000 | 2 000 | 3 000 | 4 000 | 5 000 | 6 000 | 7 000 | 8 000 |
| batch=32,subdivision=4 | 10.22 | 20.11 | 23.90 | 23.48 | 27.39 | 25.89 | 26.98 | 26.40 |
| batch=16,subdivision=2 | 3.32 | 7.97 | 10.29 | 20.61 | 20.03 | 21.82 | 18.79 | 17.97 |

但在网络滤波因子filter等参数变化的情况下,表3所示结论未必成立。例如,某网络在batch=16和subdivision=2条件下,在迭代周期分别为6 000、7 000和8 000时,其平均精度均值为26.25、24.71和28.91;batch=32和subdivision=4条件下,在迭代周期为6 000、7 000和8 000时,其平均精度均值分别为24.16、24.51和24.58,平均精度均值mAP反而有所降低。

5 结语

在标准YOLOv4-tiny网络结构基础上,简化出两种YOLOv4-lite新网络结构。以裂缝检测为例,训练后在树莓派4B上进行了实际检测实验。结果表明,YOLOv4-lite1较YOLOv4-tiny和YOLOv4-lite2有更好的检出效果、稳定性和更快的运行速度。下一步作者将建立实际的远程图像采集和传输系统,并在裂缝检测机器人上进行实际测试。同时,采

集更多实际裂缝图像扩大图像集数量和类型,进一步提高实际检测效果。

作者贡献声明:

宋立博:设计YOLOv4-lite1比YOLOv4-lite2新网络结构,训练网络并进行测试。

费燕琼:网络上下载裂缝图片,处理并形成裂缝数据集。

参考文献:

- [1] 蔡青竹. 基于人工智能的语音识别分析[J]. 集成电路应用, 2020,37(9): 6.
CAI Qingzhu. Speech recognition based on artificial intelligence [J]. Application of IC, 2020, 37(9): 6.
- [2] 房爱东,张志伟,崔琳,等. 基于人工智能的语音识别系统及应用研究[J]. 宿州学院学报,2019,34(8): 62.
FANG Aidong, ZHANG Zhiwei, CUI Lin, et al. Research on speech recognition system based on artificial intelligence and its application [J]. Journal of Suzhou University, 2019,34(8): 62.
- [3] 傅山,王嘉义,宁华,等. 基于人工智能的人脸识别技术与评估体系研究[J]. 信息通信技术与政策,2021,47(4):71.

- FU Shan, WANG Jiayi, NING Hua, *et al.* Research on Face Recognition technology and evaluation system based on AI[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021,47(4):71.
- [4] 冯文宇,朱洪堃,殷佳炜,等.无人CT智能姿态识别算法研究[J].仪器仪表学报,2020,41(8):188.
- FENG Wenyu, ZHU Hhongkun, YIN Jiawei, *et al.* Research on intelligent posture recognition algorithm of unmanned CT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8):188.
- [5] 张欣,齐华.基于YOLOv4的人体异常行为检测算法研究[J].计算机与数字工程,2021,49(4):791.
- ZHANG Xin, QI Hua. Research on human abnormal behavior detection algorithm based on YOLOv4[J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(4):791.
- [6] 王曼然.基于红外热像图的变电设备故障检测与识别研究[D].恩施:湖北民族大学,2020.
- WANG Manran. Study of substation equipment fault detection and recognition based on infrared thermal image [D]. Enshi: Hubei Minzu University, 2020.
- [7] 孙兴达,郝赫,刘远,等.YOLOv4在电力巡检目标检测中的应用[J].现代信息科技,2020,4(20):115.
- SUN Xingda, HAO He, LIU Yuan, *et al.* Application of YOLOv4 in power inspection target detection [J]. Modern Information Technology, 2020, 4(20):115.
- [8] 袁纵青.基于机器视觉的汽车零部件字符检测系统设计与实现[D].徐州:中国矿业大学,2020.
- YUAN Zongqing. Design and implementation of character detection system for auto parts based on machine vision [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [9] 唐小煜,黄进波,冯洁文,等.基于U-net和YOLOv4的绝缘子图像分割与缺陷检测[J].华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(6):15.
- TANG Xiaoyu, HUANG Jinbo, FENG Jiewen, *et al.* Image segmentation and defect detection of insulators based on U-net and YOLOv4 [J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(6):15.
- [10] 张明琦,范影乐,武薇.基于初级视通路视觉感知机制的轮廓检测方法[J].自动化学报,2020,46(2):264.
- ZHANG Mingqi, FAN Yingle, WU Wei. A contour detection method based on visual perception mechanism in primary visual pathway[J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(2):264.
- [11] 王伟杰,姚建涛,张敏燕,等.基于YOLOV4的智能垃圾分类回收机器人[J].智能计算机与应用,2020,10(11):182.
- WANG Weijie, YAO Jiantao, ZHANG Minyan, *et al.* Intelligent garbage sorting and recycling robot based on YOLOV4[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(11):182.
- [12] 王淑青,黄剑锋,张鹏飞,等.基于YOLOv4神经网络的小龙虾质量检测方法[J].食品与机械,2021,37(3):120.
- WANG Shuqing, HUANG Jianfeng, ZHANG Pengfei, *et al.* Crayfish quality detection method based on YOLOv4[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3):120.
- [13] 席芮,姜凯,张万枝,等.基于改进Faster R-CNN的马铃薯芽眼识别方法[J].农业机械学报,2020,51(4):216.
- XI Rui, JIANG Kai, ZHANG Wanzhi, *et al.* Recognition method for potato buds based on improved faster R-CNN[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):216.
- [14] 钟嘉俊,贺德强,苗剑,等.基于改进Faster R-CNN的地铁车辆焊缝缺陷检测[J].铁道科学与工程学报,2020,17(4):996.
- ZHONG Jiajun, HE Deqiang, MIAO Jian, *et al.* Weld defect detection of metro vehicle based on improved faster R-CNN[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(4):996.
- [15] 张骏,朱标,吉涛.基于MobileNet-SSD的红外人脸检测算法[J].激光与红外,2021,51(1):107.
- ZHANG Jun, ZHU Biao, JI Tao. Infrared face detection algorithm based on MobileNet-SSD [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(1):107.
- [16] 王焕民,张建柏,裴华艳,等.基于MobileNet-SSD的铁路信号灯检测识别[J].兰州交通大学学报,2020,39(4):66.
- WANG Huanmin, ZHANG Jianbai, PEI Huayan, *et al.* Research on railway signal lamp detection based on mobileNet-SSD [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, 39(4):66.
- [17] Bochkovskiy A, WAND C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection [EB/OL]. [2020-04-23].<https://arxiv.org/abs/2004.10934>.
- [18] WAND C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. Scaled-YOLOv4: Scaling cross stage partial network [EB/OL]. [2020-11-16].<https://arxiv.org/abs/2011.08036>.
- [19] 万卓,叶明,刘凯.基于改进YOLOv4的电机端盖缺陷检测[J].计算机系统应用,2021,30(3):79.
- WAN Zhuo, YE Ming, LIU Kai. Defect detection of motor cover based on improved YOLOv4 [J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(3):79.
- [20] 王兵,乐红霞,李文璟,等.改进YOLO轻量化网络的口罩检测算法[J].计算机工程与应用,2021,57(8):62.
- WANG Bing, LE Hongxia, LI Wenjing, *et al.* Mask detection algorithm based on improved YOLO lightweight network[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(8):62.
- [21] 解尧婷,张丕状.基于改进的YOLOv4输电线路小目标检测[J].国外电子测量技术,2021,40(2):47.
- XIE Yaoting, ZHANG Pizhuang. Small target detection of transmission line based on improved YOLOv4 [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(2):47.
- [22] 王昕,寇云峰,辛浪,等.手机拍摄行为智能识别优化研究[J].通信技术,2021,54(1):244.
- WANG Xin, KOU Yunfeng, XIN Lang, *et al.* Intelligent recognition and optimization of mobile phone photography[J]. Communications Technology, 2021, 54(1):244.
- [23] 符惠桐,王鹏,李晓艳,等.面向移动目标识别的轻量化网络模型[J].西安交通大学学报,2021,55(7):124.
- FU Huitong, WANG Peng, LI Xiaoyan, *et al.* Lightweight network model for moving object recognition [J]. Journal of

- Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(7):124.
- [24] 蔡舒平,孙仲鸣,刘慧,等.基于改进型YOLOv4的果园障碍物实时检测方法[J].农业工程学报,2021,37(2):36.
CAI Shuping, SUN Zhongming, LIU Hui, *et al.* Real-time detection methodology for obstacles in orchards using improved YOLOv4 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2):36.
- [25] 张凯,罗欣,孙志刚,等.基于轻量化YOLOv4的发电机定子表面缺陷检测算法[J].计算机与数字工程,2021,49(4):686.
ZHANG Kai, LUO Xin, SUN Zhigang, *et al.* Generator stator surface defect detection algorithm based on lightweight YOLOv4 [J]. Computer & Digital Engineering, 2021, 49(4):686.

(上接第128页)

- [17] SABIO N, KOSTIN A, GUILLEN G G, *et al.* Holistic minimization of the life cycle environmental impact of hydrogen infrastructures using multi-objective optimization and principal component analysis [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 5385.
- [18] ALMARAZ S D L, AZZARO P C, MONTASTRUC L, *et al.* Assessment of mono and multi-objective optimization to design a hydrogen supply chain [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(33): 14121.
- [19] LI L, MANIER H, MANIER M A. Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 342.
- [20] LI L, MANIER H, MANIER M A. Integrated optimization model for hydrogen supply chain network design and hydrogen fueling station planning [J]. Computers & Chemical Engineering, 2020, 134(C): 106683.
- [21] LIN R H, YE Z Z, GUO Z Y, *et al.* Hydrogen station location optimization based on multiple data sources [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(17): 10270.
- [22] 孙浩然.基于全生命周期的加氢站选址定容优化[D].成都:西南交通大学,2018.
SUN Haoran. Life-cycle based optimization of hydrogen refueling station siting and sizing [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.