

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.041

基于改进 SSD 网络的番茄采摘机器人目标识别方法

任笑铭

(秦皇岛市农业综合行政执法支队,河北 秦皇岛 066001)

摘要:为解决番茄采摘目标识别效率低、准确性受限等问题,提出一种基于改进型单镜头多盒检测器网络的番茄采摘机器人目标识别方法。增加感受野模块、排除损失函数和柔化非最大值抑制优化目标检测算法,搭建双目视觉的目标识别系统进行仿真分析。结果表明:改进算法的损失值降低 1.1,检测成熟番茄与未成熟番茄的精确率-召回率曲线下面积分别为 0.945、0.931,平均精度均值为 0.938。所提系统定位单个番茄的绝对误差低于 16 mm,相对误差小于 1.60%,定位多个番茄的绝对误差低于 15 mm,相对误差小于 1.33%。

关键词:番茄采摘;SSD 算法;目标识别;双目视觉;三角测量

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0208-04

Target Recognition Method of Tomato Picking Robot Based on Improved SSD Networking

REN Xiaoming

(Qinhuangdao Agricultural Comprehensive Administrative Law Enforcement Detachment, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: To improve the low efficiency and limited accuracy of tomato picking target recognition, a tomato picking robot target recognition method based on the improved single lens multiple box detector network is proposed. Feeling field module is increased, loss function is eliminated, the maximum suppression optimization target detection algorithm is softened, and binocular visual target recognition system is constructed for simulation analysis. The results show that the loss value of the improved algorithm is reduced by 1.1, the area under the recall curve is 0.945、0.931, with average mean accuracy as 0.938. The absolute error of the proposed system for locating a single tomato is less than 16 mm, while the relative error less than 1.60%, the absolute error of locating multiple tomatoes is lower than 15 mm, and the relative error below 1.33%.

Keywords: tomato picking; SSD algorithm; target recognition; binocular vision; triangulation

0 引言

随着农业现代化的发展,智能采摘机器人被广泛应用于番茄种植,而目标识别技术是提高采摘精度和效率的关键^[1]。面对光照变化、目标遮挡等挑战,传统目标识别算法往往难以满足预期效果。单镜头多盒检测器网络(single shot multi box detector, SSD)能够有效解决问题,但是在复杂环境中的检测性能和鲁棒性有待提高^[2]。因此,本文提出基于改进 SSD 网络的番茄采摘机器人目标识别系统,创新地增加感受野模块(receptive field block, RFB)、排除损失函数和柔化非极大值抑制技术(soft non-maximum suppression, soft-NMS),搭建双目视觉的目标识别系统,期望实现精准、高效的番茄采摘作业,进一步推动农业生产智能化。

1 基于改进 SSD 网络的番茄采摘机器人目标识别系统搭建

1.1 基于改进 SSD 的目标检测算法

SSD 通过多尺度特征提取和卷积层预测实现目标检测,但是对小目标检测和复杂环境的适应性有限^[3]。为此,本文提出一种改进的 SSD 目标检测算法。算法整体流程如图 1 所示。图 1 中,首先对输入图像进行数据预处理,使用 Visual Geometry Group 16(VGGNet-16)网络提取多尺度特征图。同时通过 RFB 模块扩展感受野增强特征信息,接着生成候选边界框,预测目标类别和调整位置^[4]。最终,使用 soft-NMS 筛选并输出高置信度的预测框。

作者简介:任笑铭(1984—),女,满族,河北青龙人,高级工程师,本科,研究方向为农业工程,15076008763@163.com。

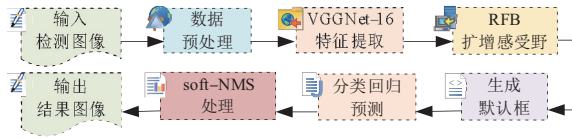


图1 改进 SSD 目标检测算法流程图

为应对番茄采摘环境中光照变化、遮挡及重叠问题,本研究在 VGGNet-16 基础上增加 RFB 模块,提升特征提取和检测性能。RFB 模拟人类视觉系统,通过多分支和扩张卷积层捕捉多尺度信息和上下层级信息,增强特征的可辨识性和稳定性^[5]。为了改善密集目标识别,研究构建结合交并比损失和排除损失的复合函数,降低目标预测的干扰^[6]。交并比计算如式(1)所示。

$$I_{OU} = \frac{A_{rea}(Q \cap G)}{A_{rea}(Q \cup G)} \quad (1)$$

式中: Q 为预测框; G 为真实框; $A_{rea}(Q \cap G)$ 为二者交集面积; $A_{rea}(Q \cup G)$ 为二者并集面积。排除损失函数表达如式(2)所示。

$$L = L_a + \alpha \times L_{Repb} + \beta \times L_{Repc} \quad (2)$$

式中: L_a 为预测框和真实框的回归损失; L_{Repb} 为预测框和周围实物的排除损失; L_{Repc} 为预测框与其他预测框的排除损失。所有 L_{Repb} 值计算如式(3)所示。

$$L_{Repb} = \frac{\sum_{q \in \mu^+} \text{Smooth}_{ln}(I_{OG}(T^q, G_{Rep}^q))}{|\mu^+|} \quad (3)$$

式中: μ^+ 为回归后的预测框集合, $\text{Smooth}_{ln}(x)$ 为优化函数; I_{OG} 为预测框与实物间距; T^q 为预测框; G_{Rep}^q 为匹配预测框的真实框。此外,研究使用 soft-NMS 算法优化预测框选择,通过排序选取高置信度预测框,再基于交并比调整重叠预测框的置信度,迭代确定检测结果^[7]。

1.2 番茄采摘机器人目标识别系统

基于 RFB 模块、排除损失和 soft-NMS 优化算法后,研究结合 INDEMIND M1 双目相机和改进 SSD 算法构建目标识别系统。系统设计如图 2 所示。图 2 中,系统通过双目相机捕获并矫正采摘区域图像^[8]。然后,使用改进的 SSD 模型进行目标检测,通过立体视觉匹配生成视差图,确定番茄中心位置。最后,采取三角测量技术计算输出番茄的三维空间位置^[9]。

为精确获取番茄的位置,研究采用 Bouguet 方法标定双目相机,测定相机的内外参数和畸变参数^[10]。该方法通过棋盘格图像提取特征点,完成双目相机的内部参数和相对位置标定,并进行

立体校正图像^[11]。最后,使用 Levenberg-Marquardt 算法优化参数^[12]。在立体匹配阶段,研究使用归一化交叉算法确定左、右图像的最佳对应点视差^[13-15]。算法公式如式(4)所示。

$$N_{CC}(A, B) = \frac{\sum_{i,j} (A_{i,j} - \bar{A})(B_{i,j} - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i,j} (A_{i,j} - \bar{A})^2 \sum_{i,j} (B_{i,j} - \bar{B})^2}} \quad (4)$$

式中: A 为左图; B 为右图; $A_{i,j}$ 和 $B_{i,j}$ 分别为左图和右图某点像素值; $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 分别为左图和右图亮度均值。为提高视差图质量,研究引入加权最小二乘滤波器,其函数表达如式(5)所示。

$$\min_u = \sum_p [(u_p - g_p)^2 + \lambda (w_{x,p(g)} (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + w_{y,p(g)} (\frac{\partial u}{\partial y})^2)] \quad (5)$$

式中: u 为滤波后的视差图; g 为初始视差图; p 为视差图像素值; w_x 和 w_y 分别为水平、垂直梯度权重; λ 是阻尼因子。系统利用视差图和目标预测图定位番茄中心,并通过三角测量计算番茄的三维坐标位置^[16-18]。

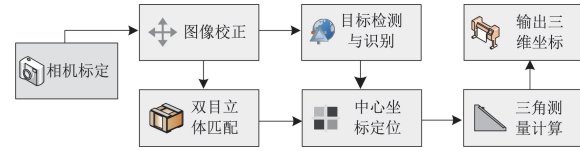


图2 番茄采摘机器人目标识别系统模型图

2 仿真实验分析

2.1 改进 SSD 目标检测算法性能分析

本文为验证算法和系统性能,研究设计了仿真实验。实验采集某温室大棚的 3 000 张番茄图像数据,采用 Windows10 运行系统、Tesla V100 16 G 图像处理器和 Pycharm 编辑器,设图片像素为 450px×450px、批量大小为 8、迭代为 6 000 次,选取损失函数曲线、平均精度均值(mean average precision, MAP)、精确率-召回率曲线(precision-recall, PR)、绝对误差(absolute error, AE)和相对误差(relative error, RE)作为指标。算法损失函数曲线如图 3 所示。图 3 中,改进算法损失值随迭代而减少,其拟合与收敛性能皆优于传统算法,迭代 2 000 次后趋于稳定,损失值降低 1.1。这得益于损失函数和检测框的优化,算法识别和检测性能显著提升。

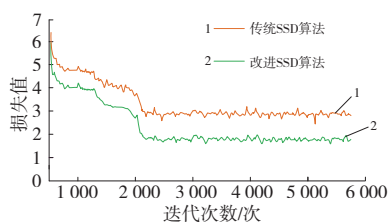


图3 目标检测算法损失函数曲线图

改进 SSD 算法 PR 曲线如图 4 所示。图 4 中,算法检测成熟与未成熟番茄的 PR 曲线下面积分别为 0.945 和 0.931,MAP 数值达 0.938。其中,成熟番茄的 PR 曲线更为平滑、波动较少,说明算法引入的 RFB 模块有效增强了特征表达和识别能力,有助于高效精确的采摘作业。

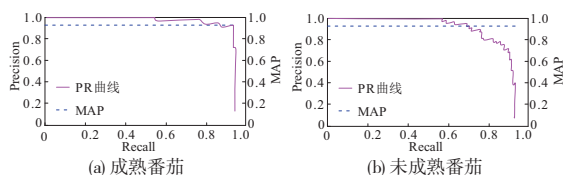


图4 改进 SSD 算法 PR 曲线图

2.2 番茄采摘机器人目标识别系统效能分析

目标识别系统单个番茄的定位结果如图 5 所示。图 5 中,5 张番茄图像的检测距离 AE 皆不超过 16 mm,RE 均小于 1.60%,系统定位识别的准确性较高,鲁棒性较好。

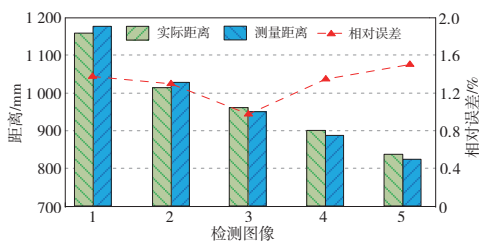


图5 目标识别系统单个番茄定位结果对比图

目标识别系统多个番茄的定位结果如图 6 所示。图 6 中,3 个目标番茄的图像检测距离 AE 最大值分别为 13.6 mm、13.2 mm 和 14.1 mm,均不超过 15 mm,RE 最大值分别为 1.32%、1.25%、1.26%,皆小于 1.33%。可见,通过整合 SSD 和双目视觉,系统处理多目标任务的能力优越。

3 结语

针对传统目标识别方法精度低、效率低等问题,本文提出了基于改进 SSD 算法的番茄采摘机器人目标识别系统。实验结果表明,改进算法损

失值降低 1.1,检测成熟与未成熟番茄 PR 曲线下面积分别为 0.945 和 0.931,MAP 为 0.938。系统定位单目标 AE 低于 16 mm,RE 小于 1.60%;定位多目标 AE 低于 15 mm,RE 小于 1.33%。该系统极大提升了番茄采摘的检测和定位效率与精度。但是在暗光或复杂背景中,系统稳定性和准确度仍然较低。后续将优化目标识别系统的环境噪声过滤,增强其在番茄采摘任务中的实用性。

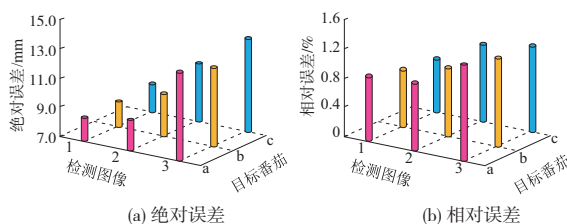


图6 目标识别系统多个番茄定位结果对比图

参考文献:

- [1] 谭荣凯,杨浩秦,王尧尧. 基于双目视觉的绳驱动飞行机械臂目标识别与抓取[J]. 机械制造与自动化, 2024,53(1):191-195.
- [2] 张卫良,陈秀宏. 跨层融合和感受野扩增的 SSD 目标检测算法[J]. 计算机科学,2023,50(3):231-237.
- [3] 李宝奇,黄海宁,刘纪元,等. 基于改进 SSD 的合成孔径声纳图像感兴趣小目标检测方法[J]. 电子学报, 2024,52(3):762-771.
- [4] 罗芳,李家威,何道森. 尺度适应性感受野的船舶目标检测方法[J]. 计算机应用研究, 2024,41(8):2521-2527.
- [5] 周涵,王旭初,袁越. 基于深度交互性多尺度感受野特征学习的三维点云配准网络[J]. 光学学报,2024,44(14):177-188.
- [6] 陈仁祥,邱天然,杨黎霞,等. 改进 YOLOv7 的服务机器人密集遮挡目标识别[J]. 光学精密工程,2024,32(10):1595-1605.
- [7] 赵云龙,田生祥,李岩,等. 基于注意力模型和 Soft-NMS 的输电线路小目标检测方法[J]. 电子科技大学学报,2023,52(6):906-914.
- [8] 李杰,王卫红. 基于双目视觉的输送带表面损伤定量分析方法[J]. 天津工业大学学报,2024,43(4):60-66.
- [9] 赵哲承,朱嘉诚,刘雪峰,等. 用于三角测量大数值孔径双远心光学系统设计[J]. 红外与激光工程,2024,53(7):198-205.
- [10] 赵洪涛,白金国,左金凤. 附加距离约束的导航相机快速标定方法[J]. 遥感信息,2024,39(2):70-78.
- [11] 徐孝彬,曹晨飞,张磊,等. 基于四面体特征的面阵激光雷达与相机标定方法[J]. 光子学报,2024,

- 53(7):168-182.
- [12] 姜玉鑫,孙建锋,侯培培,等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法的旋转双棱镜指向偏差修正[J]. 中国激光,2023,50(6):97-105.
- [13] 蒲宝林,张卫华,蒲亦非. 基于卷积神经网络和 NCC 的两阶段的多尺度高精度定位的模板匹配算法[J]. 四川大学学报(自然科学版),2024,61(4):209-219.
- [14] 李大华,郑文鹏,李璇,等. 基于局部归一化的电力设备红外与可见光图像配准[J]. 激光与光电子学进展,2025,62(6):391-398.
- [15] 张祥银,胡立坤. 基于迭代注意力归一化流的低光图像增强[J]. 激光杂志,2024,45(8):131-137.
- [16] 李莹,董耀,王凯彬,等. 基于三角测量的菠萝外轮廓测量装置设计[J]. 食品与机械,2024,40(9):84-91.
- [17] 成彬,冯勇平,雷华. 基于双目立体视觉的连铸辊尺寸三维测量方法[J]. 电子测量技术,2024,47(3):135-143.
- [18] 李茂,幸小义,钟志文,等. 基于改进 TDOA 与卡尔曼预测模型的目标定位跟踪算法研究[J]. 现代雷达,2024,46(7):62-70.

收稿日期:2024-09-06

(上接第 129 页)

1) 利用 CLPSO 算法对 BP 神经网络进行改进,可以提高航空发动机轴承故障诊断的分类准确率。CLPSO-BP 算法相比标准 BP 算法,准确率提高 3 个百分点以上;

2) 基于 CLPSO-BP 神经网络算法设计的轴承故障诊断软件,实现了对时域信号和频域信号的分析以及故障预测诊断等功能;

3) 故障诊断软件具备高效提取复杂故障信号特征的能力,能够精准地识别各种不同故障模式。

本文提出的基于 CLPSO-BP 神经网络算法的航空发动机轴承故障诊断软件,实现了航空发动机复杂故障信号的有效分析处理、信号特征提取和故障预测识别,软件整体故障识别效率良好。本故障诊断软件的设计研究在理论和应用上均有一定的创新性和借鉴意义。

参考文献:

- [1] LI Y J, HAN D. Diagnosis of incipient faults in wind turbine bearings based on ICEEMDAN - IMCKD[J]. International Journal of Mechanical System Dynamics, 2024,4(4):472-486.
- [2] LI Y. A review of wind turbine bearing fault diagnosis[J]. World Scientific Research Journal, 2024,10(2):1-9.
- [3] 郭瑛,李燕军,闫胜杰,等. 风电机组齿轮啮合强度的仿真分析与研究[J]. 自动化仪表,2025,46(2):40-44.
- [4] 李燕军. 弹性支撑下风力发电机振动分析及试验[J]. 电力安全技术,2024,26(11):52-55.
- [5] 樊怀聪,田禾,冯明文,等. 基于粒子群算法优化 BP 神经网络的轴承故障诊断[J]. 机械制造与自动化,2024,53(3):45-49.
- [6] 李燕军. 基于 NRBO-1DCNN-SVM 的滚动轴承故障诊断[J]. 装备机械,2025(1):49-59.
- [7] 闫绘宇,张超. 基于 Transformer 和卷积神经网络的齿轮故障诊断方法[J]. 机电工程,2024,41(3):409-417.
- [8] 陈剑,许畅,徐庭亮. 基于位错叠加法和改进概率神经网络的离心泵故障诊断方法[J]. 中国机械工程,2023,34(23):2854-2861.
- [9] 张玺君,尚继洋. 采用多尺度自适应选择卷积神经网络的轴承故障诊断研究[J]. 西安交通大学学报,2024,58(2):127-135.
- [10] LIU P F, ZHANG W. A fault diagnosis intelligent algorithm based on improved BP neural network[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence,2019,33(9):1959028.
- [11] XING S, WANG J R, HAN B K, et al. A novel collaborative bearing fault diagnosis method based on multi-scale dynamic fusion network under speed fluctuating condition[J]. Measurement Science and Technology,2024,35(1):015126.
- [12] 谢东东,沈艳霞. 基于 CLPSO-IDBN 的风电机组轴承故障诊断[J]. 组合机床与自动化加工技术,2023(10):109-113,119.
- [13] 张赞,王永华,唐岩辉,等. 低信噪比下的滚动轴承早期微弱故障识别[J]. 振动·测试与诊断,2023,43(6):1158-1163,1246.
- [14] 郑少帅,熊炘. 基于 LabVIEW 的滚动轴承故障诊断方法[J]. 计量与测试技术,2021,48(8):95-99.
- [15] 沙云东,赵俊豪,栾孝驰等. 基于阈值参数判决筛选的航空发动机主轴轴承故障特征提取方法[J]. 航空动力学报,2025,(40)3:284-295.
- [16] 贺玆睿,周兵,林宏. 基于 C++跨平台的云笔记设计与实现[J]. 无线互联科技,2022,19(16):109-111.

收稿日期:2023-11-01