湖南农业大学学报(自然科学版) 2019, 45(6):674–678. DOI:10.13331/j.cnki.jhau.2019.06.018
Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)

投稿网址：http://xb.ijournal.cn

基于深度学习的果园道路导航线生成算法研究

王毅[1,2]，刘波[1]，熊龙烨[1]，王卓[1]，杨长辉[1,3*]

(1.重庆理工大学机械工程学院，重庆 400054；2.重庆大学机械工程学院，重庆 400044；3.西安交通大学机械工程学院，陕西 西安 710049)

摘 要：针对目前果园环境视觉导航线提取受光照、杂草干扰，而已有的导航线生成算法过于复杂且适用范围较窄的问题，提出了一种基于深度学习的方法来提取果园道路导航线：采用 YOLOV3 卷积神经网络提取果园道路图像上的特征点，并通过最小二乘法拟合生成导航线。通过采集的 800 张果园道路图片作为训练集，进而在 240 张图片组成的独立测试集上进行测试，总体识别率为 95.37%，在杂草较少、杂草较多、高光照和正常光照的环境下，导航线平均偏差分别为 2.15、2.28、2.32、2.41 像素；平均偏移距离分别为 3.4、3.5、2.7、3.6 cm。

关 键 词：果园环境；图像处理；深度学习；导航线

中图分类号：TP391 文献标志码：A 文章编号：1007–1032(2019)06–0674–05

Research on generating algorithm of orchard road navigation line based on deep learning

WANG Yi[1,2], LIU Bo[1] , XIONG Longye[1],WANG Zhuo[1], YANG Changhui[1,3*]

(1.College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2.College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3.School of Mechanical Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: In view of the fact that the current orchard environment visual navigation line is susceptible to interference from light and weeds, and the existing navigation line generation algorithm is too complicated and has a narrow application range, this paper proposes a method to extract orchard road navigation line based on deep learning. YOLOV3 convolutional neural network is used to extract the feature points on the image and generate the navigation line by least square fitting. 800 pictures of orchard roads collected under different conditions are used as training sets, and then tested on an independent test set consisting of 240 pictures. The overall recognition rate is 95.37%. In the environment with fewer weeds, more weeds, high light and normal light, the mean deviation of navigation line is 2.15 pixels, 2.28 pixels, 2.32 pixels and 2.41 pixels, and the mean deviation distance is 3.4 cm, 3.5 cm, 2.7 cm and 3.6 cm, respectively.

Keywords: orchard environment; image processing; deep learning; navigation line

农业机器人在作业环境中完成耕种、施肥、收获等工作任务，必须具备自主导航功能[1]，而视觉导航的关键在于提取导航信息以及检测导航路径。果园环境容易受到树木生长形态、光线强弱变化、背景多元重叠等因素的影响，而当前针对农业机器人视觉导航的研究主要集中在有比较明显的导航特征的农田环境[2–4]。果园环境下，农业机器人视觉导航研究的关键就是解决果园复杂环境下准确生成导航线算法的问题。

J. RADCLIFFE 等[5]根据天空与果树树冠的不同，提出一种基于果树树冠和天空为背景的图像处理算法，该算法能够快速获取导航线，但是对背景

收稿日期：2019–04–11 修回日期：2019–09–10
基金项目：重庆市科学技术局项目(cstc2015zdcy–ztzx70003，cstc2018jcyjAX0071，cstc2016jcyjA0444)
作者简介：王毅(1981—)，男，河南郑州人，博士研究生，副教授，主要从事智能农业机械研究，wangyi_cqut@163.com; *通信作者，杨长辉，博士研究生，副教授，主要从事机器视觉图像处理研究，yangchanghui@cqut.edu.cn

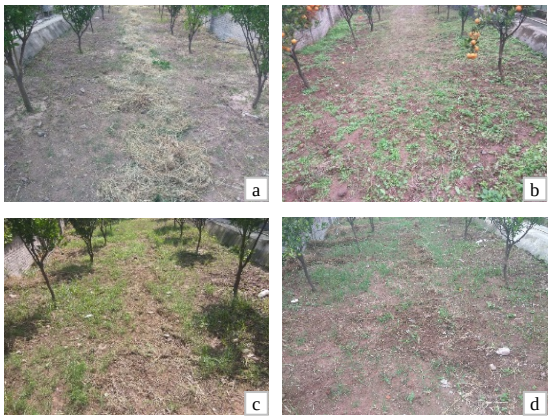
环境要求较高。Åtrand 等[6]采用阈值分割获得二值图像，并通过 Hough 变换获取导航线。MONTALVO 等[7]采用 2 次 Otsu 算法来获取作物行检测的像素，并通过最小二乘法拟合导航线。冯娟等[8]根据果树主干与地面的交点作为特征点来进行导航线的拟合。聂森等[9]在 HSV 色彩空间中利用(H–V)差分量与最大类间方差法增强果树行垄特征，最终通过 Hough 变换以实现导航基准线的提取。宋宇等[10]通过改进 2G–R–B 算法来获取植株绿色特征，并提取根茎的定位点来进行导航线的提取。王新忠等[11]针对室内非结构环境的特点，在 HIS 空间的 I 分量下采用 Otsu 分割算法，获得导航离散点簇，并通过最小二次法拟合导航线。袁池等[12]针对果树空间参差复杂问题，采用了图像透视原理对果树行边界进行了筛选，并通过最小二次法拟合边界直线。王红君等[13]通过将(G–B)、(R–B)差值图像和 H 分量图像进行 Otsu 算法并分割，将分割结果合并和滤波，最后采用改进的 Hough 变换进行导航线的确定。曾勇等[14]在 YUV 色彩空间中实现了水稻列苗的中心线提取。以上这些方法都需通过传统的图形处理算法来获得导航线，适用于特定的环境，在复杂背景的果园环境下通用性不强。

在果园环境下稳定获取导航线的关键在于在复杂背景下实现对目标物的精准识别。笔者以果园不同环境下的图像作为样本，采用基于 VOLOV3 卷积神经网络的深度学习方法，来识别果树的主干，再通过最小二乘法来对导航线进行拟合，试验验证表明，该方法在果园不同环境下具有较好的适应性和稳定性。

1　果园环境图像的采集和标记

1.1　图像的采集

通过 MD–UB300 工业相机，在重庆理工大学分别采集杂草较多、杂草较少、正常光照、高光照柑橘园环境图片共 800 张。果园环境图像如图 1 所示。由于相机安装在采摘机器人正前方，为拍摄到果树树干区域，相机安装角度与地面呈 45°的角，采集图像的格式为 jpg 格式，图像大小设置为 1 024*768 像素。



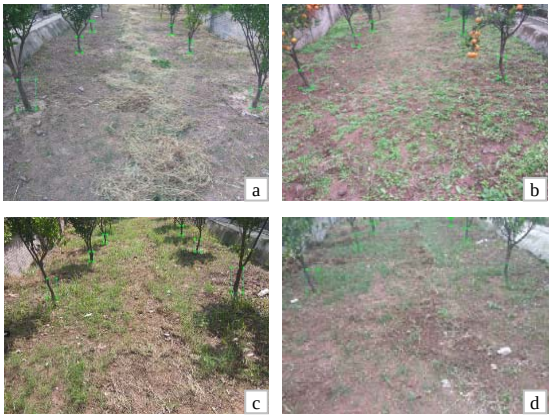
a　杂草较少；b　杂草较多；c　高光照；d　正常光照。

图 1　柑橘园环境图像

Fig.1　Orchard environment picture

1.2　图像的标记

在自然环境下果园的实际情况比较复杂，为了能够提取果树树干的主干，需要对其进行标记，由于相机安装视角被固定，选择果树左右 2 列的前 3 行树干作为标记对象，标记工具采用 Labelimg，样本标记的类别设置为一类，命名为 Branch。采用矩形框对果树树干进行标记；标记范围为树干与地面的交点到主干分支点；保证矩形框完全覆盖果树主干且矩形框底边的中点为主干与地面的交点。标记结果如图 2 所示。



a　杂草较少；b　杂草较多；c　高光照；d　正常光照。

图 2　标记的柑橘园环境图像

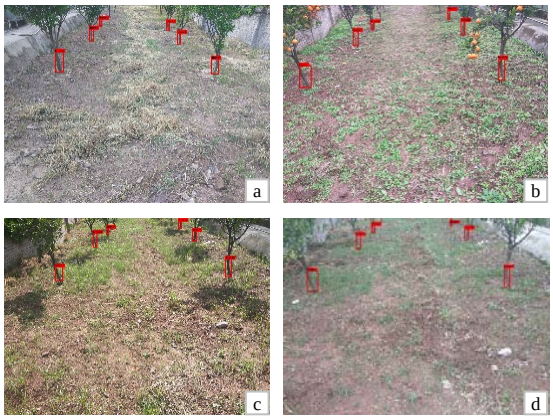
Fig.2　Marking results

1.3　基于 YOLOV3 的树干识别

YOLOV3 卷积神经网络是将整幅图像用作输入，使用二元交叉熵损失函数进行类别预测。将一幅图像分割成 7*7 大小的网格，若某个格子中包含检测目标，则该格子负责检测该目标，并预测边缘框和物体置信度。边缘框的信息为相对该格子位置的偏移宽度和高度，置信度反映是否包含物体以及

包含物体情况下的准确性。

为了验证果树树干的识别成功率，采集了杂草较少、杂草较多、正常光照和高光照条件图片各 60 张，分别用于测试模型的训练效果，识别效果如图 3 所示。从图 3 可以看出，在不同的果园环境下，左右两侧树干的识别效果非常明显。



a 杂草较少；b 杂草较多；c 高光照；d 正常光照。

图 3 识别效果

Fig.3 Recogniton effect diagram

统计结果表明，在杂草较少的果园环境中，树干识别成功率为 96.6%；杂草较多的果园环境中树干的识别成功率为 95%；正常光照的果园环境中树干的识别成功率为 93.3%；在高光照的环境中树干的识别成功率为 96.6%；平均识别率为 95.37%。

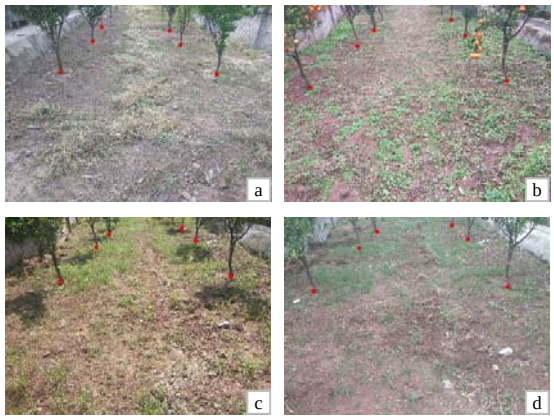
2 导航线的获取

2.1 树干交点坐标的获取

在对果树主干进行标记和大量训练之后，通过训练网络的位置边框回归可以较为准确地获得树干位置边框信息。该位置边框信息包含该边框对角点的坐标值，通过计算可以获取所标记的果树树干的像素坐标，从而计算出树干与地面的交点坐标。设矩形框左上角的坐标为(x_1,y_1)，右下方的坐标为(x_2,y_2)，则矩形框底边中点(树干与地面的交点)的坐标为：

$$\begin{cases} x=\dfrac{x_1+x_2}{2} \\ y=y_2 \end{cases} \tag{1}$$

提取的地面与树干的交点用红色标记点表示，以图 3 为例，提取的交点如图 4 所示。



a 杂草较少；b 杂草较多；c 高光照；d 正常光照。

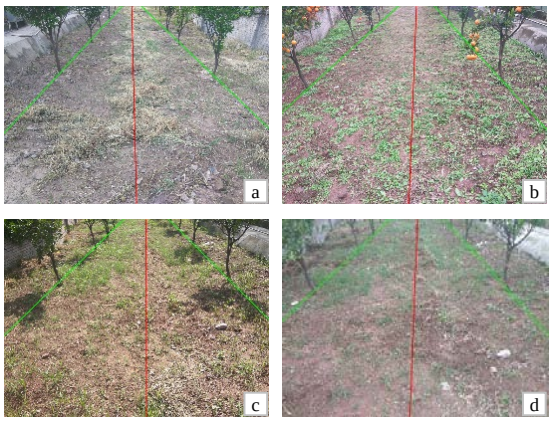
图 4 地面与树干的交点提取

Fig.4 The intersection of the ground and the trunk

2.2 导航线的拟合

获得左右 2 列果树树干与地面的交点后，设左右 2 列的坐标分别记为(x_1,y_1)，l=1,2,3,⋯,m；(x_r,y_r)，r=1,2,3,⋯,n；通过最小二乘法[15]对其进行拟合，则左列拟合直线的表达式为 $L_l(x)=a_1x+b_1$，右列拟合直线的表达式为 $L_r(x)=a_2x+b_2$。

在得到左右两列的直线表达式之后，分别在其中 1 条直线上取 2 个点，坐标为(x_1,y_1)、(x_2,y_2)，将这 2 个坐标点的纵坐标带入到另一条直线的方程中，可以计算出另外 2 个坐标分别为(x_3,y_1)、(x_4,y_2)，利用这 4 个点的坐标可以求取出导航线上的 2 点坐标，分别为 $(\frac{x_1+x_3}{2},y_1)$、$(\frac{x_2+x_4}{2},y_2)$，通过计算这 2 个坐标可计算出导航线的表达式。左右 2 列拟合的直线和求取的导航线如图 5 所示。



a 杂草较少；b 杂草较多；c 高光照；d 正常光照。

图 5 导航线拟合

Fig. 5 Navigation line fitting

2.3　导航线精度的评估

为了验证生成的导航线的偏移误差，采用动态和静态 2 种试验进行验证。

1) 静态试验。通过人工方法来拟合果园道路导航线：通过刻度尺测量左右两列果树之间的距离并记录下 2 株果树之间的中点位置后，通过 1 条直线来拟合出实际的道路导航线。

记录中点位置后，用人工方法进行拟合并和与所建立的导航线生成算法进行对比。

为了验证静态试验所提取的导航线的精度，引入提取的导航线的偏差 D_e 作为评价指标进行评价。$D_e=R_S/L\times100\%$。

式中：R_S 为 2 条导航线之间封闭区域的面积；L为通过人工方法得到的道路导航线的长度。偏差越小说明提取导航线精度越高。

2) 动态试验。通过自行设计的移动机器人在果园环境中以 0.25 m/s 的速度进行导航试验，采用间歇式导航运动，间歇距离设置为 2 m，通过刻度尺记录机器人实际运动的中点到果树两侧的距离来判定实际导航误差。

3　结果及分析

通过人工拟合的导航线与所建立算法生成的导航线的对比如图 6 所示。人工拟合的导航线与算法生成的导航线非常接近，表明拟合效果较好。



人工拟合的导航线



本研究算法得到的导航线

图 6　静态试验结果

Fig. 6　Static experiment result

对杂草较少、杂草较多、正常光照、高光照环境下的果园道路图像各 50 张进行试验，导航线偏差统计曲线如图 7 所示。4 种不同果园道路环境下的导航线偏差分布比较接近，杂草较少、杂草较多、正常光照和高光照 4 种环境下的偏差分别为 2.15 像素、2.28 像素、2.32 像素、2.41 像素，平均偏差为 2.29 像素，说明在样本训练集数量相同的情况下，导航线的偏差与果园道路环境的相关性较小，同时也说明所建立的研究方法能够适应更多复杂工况的果园环境。

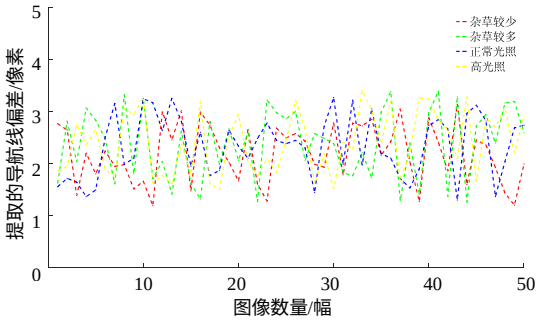


图 7　导航线偏差

Fig.7　Deviation statistical curve of navigation line

移动机器人在 4 种不同的环境下分别进行导航试验，偏移距离统计曲线如图 8 所示。

分析图 8 可知，在杂草较少、杂草较多、正常光照和高光照环境下的平均偏差距离分别为 3.4、3.5、2.7、3.6 cm，进一步说明所建立的方法对不同环境下的导航有较好的适应性。

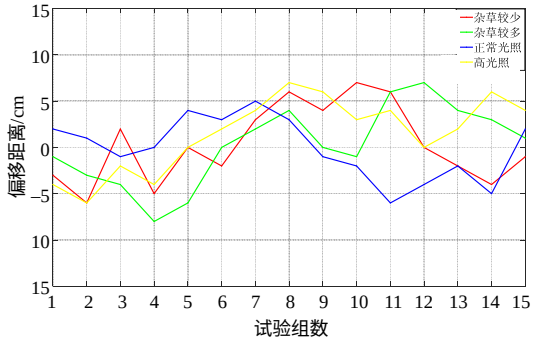


图 8　导航线偏移距离

Fig.8　The offset distance statistical curve of navigation line

4　结论

为了实现在不同果园环境下的导航线的稳定提取，提出了一种基于深度学习来识别果树树干的检测方法。利用 YOLOV3 卷积神经网络对采集的 800 张不同果园环境下的图片进行训练，并用 240 张图片进行测试，模型的平均识别成功率 95.37%，通过提取模型中检测出的特征点用来拟合导航线，所提出的导航线生成方法对不同果园环境具有较强的适应性，导航线的平均偏差为 2.29 像素，平均偏差距

离为 3.3 cm，可满足导航需要。

参考文献：

[1] 蒋浩然，陈军，王虎，等．移动机器人自动导航技术研究进展[J]．西北农林科技大学学报(自然科学版)，2011，39(12)：207–213．

[2] CHEN J，JIANG G，DU S，et al．Crop rows detetion based on parallel characteristic of crop rows using visual navigation[J]．Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2009，25(12)：107–113．

[3] ROMEO J，PAJARES G，MONTALVO M，et al．Crop row detection in maize fields inspired on the human visual perception[J]．The Scientific World Journal，2012，2012：1–10．

[4] GOTTSCHALK R，BURGOS-ARTIZZU X P，RIBEIRO A，et al．Real-time image processing for the guidance of a small agricultural field inspection vehicle[J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications，2010，8(1)：434 – 443．

[5] RADCLIFFE J，COX J，BULANON D M．Machine vision for orchard navigation[J]．Computers in Industry，2018，98：165–171．

[6] BJÖRN Åstrand，BAERVELDT A J．A vision based row-following system for agricultural field machinery[J]. Mechatronics，2006，15(2)：251–269．

[7] MONTALVO M，PAJARES G，GUERRERO J M，et al. Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure[J]．Expert Systems with Applications，2012，39(15)：11889–11897．

[8] 冯娟，刘刚，司永胜，等．果园视觉导航基准线生成算法[J]．农业机械学报，2012，43(7)：185–189．

[9] 聂森，王丙龙，郝欢欢，等．基于机器视觉的果园导航中线提取算法研究[J]．农机化研究，2016，38(12)：86–89．

[10] 宋宇，刘永博，刘路，等．基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J]．农业机械学报，2017，48(2)：38–44．

[11] 王新忠，韩旭，毛罕平，等．基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J]．农业机械学报，2012，43(6)：161–166．

[12] 袁池，陈军，武涛，等．基于机器视觉的果树行中心线检测算法研究[J]．农机化研究，2013，35(3)：37–39，45．

[13] 王红君，陈慧，岳有军，等．基于多颜色空间分割的温室环境视觉导航路径信息提取[J]．江苏农业科学，2017，45(16)：202–206．

[14] 曾勇，熊瑛，向阳，等．基于机器视觉的田间水稻苗列识别算法的研究[J]．湖南农业大学学报(自然科学版)，2018，44(3)：320–325．

[15] 刘兆祥，陈艳，籍颖，等．基于机器视觉的农业车辆路径跟踪[J]．农业机械学报，2009，40(增刊 1)：18–22．

责任编辑：罗慧敏
英文编辑：吴志立