

机器视觉在农业工程中的应用

徐天成¹, 吴敏¹, 贺冬仙², 郑志安¹, 徐辉煌¹, 包金青³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083;
3. 北京盛阳谷科技有限公司, 北京 100083)

摘要: 从农作物种子筛选与检测、农作物生长过程中信息检测、病虫害控制、果实无损检测到果实机械化采摘, 整个农业生产过程中机器视觉在农业智能化装备上都有巨大的发展空间和市场前景。介绍了图像采集和处理过程中各种视觉传感器和图像分割算法的适用特点和优势, 提出现有机器视觉技术在农业工程中应用存在的问题及未来发展方向, 为进一步实现精准农业和农业自动化提供借鉴和参考。

关键词: 机器视觉; 农业工程; 图像采集; 图像分割

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-1795(2021)08-0040-09

Application of Machine Vision in Agricultural Engineering

XU Tiancheng¹, WU Min¹, HE Dongxian², ZHENG Zhian¹, XU Huihuang¹, BAO Jinqing³

(1. School of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
3. Beijing Shengyanggu Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In the whole process of agricultural production, machine vision has a huge development space and market prospect in agricultural intelligent equipment, such as crop seed screening and detection, information detection in the process of crop growth, control of diseases, insects and weeds, nondestructive detection of fruits and mechanized picking. Application characteristics and advantages of various vision sensors and image segmentation algorithms in the process of image acquisition and processing were introduced, and existing problems in application of machine vision technology in agricultural engineering and future development direction were put forward, so as to provide reference for further realization of precision agriculture and agricultural automation.

Keywords: machine vision, agricultural engineering, image acquisition, image segmentation

0 引言

我国作为世界上最大的农业国, 截止到2020年已实现粮食产量连续17年增收, 在保障自身粮食安全的前提下, 农产品贸易额达2400亿美元以上。粮食产量持续增收、农业经济稳定增长得益于不断推进的农业现代化, 主要体现在农机装备自动化、智能化程度的不断提高^[1]。近年来, 我国农业耕种收综合机械化率稳步提升, 粮棉油糖产业基本实现农业机械化, 丘陵山区机械化率达55%, 且仍在不断提高, 设施农业、畜牧养殖、水产养殖、农产品初加工总体机械化率达到50%左右^[2]。2021年中央1号文件指出, 必须强化现代科学技术在农业生产过程和农机装备中的支撑作用, 以农业机械智能化改变传统农业发

展方式是未来农业发展的必然趋势^[3]。农机装备自动化和智能化是转变农业发展方式、提高农业生产效率的重要基础, 是实施乡村振兴战略的重要支撑。随着城镇化进程的加速, 农业从业人员逐步实现由传统农民向职业农民的转变, 走上集约化发展路径, 从业人员综合素养的不断提升, 进一步促进了农机装备自动化和智能化的发展^[1]。农机装备进入全程全面、高质高效发展时期, 农机装备智能化实现途径包括感知、决策、控制和执行, 其中智能感知系统设计是关键, 机器视觉技术作为人工智能的重要分支, 是实现智能感知的核心, 是智慧农业发展的必然关键技术之一。

机器视觉起始于20世纪50年代二维图像的统计模式识别, 到80年代不断涌现的新概念、新理论推

收稿日期: 2021-06-04 修回日期: 2021-07-23

基金项目: 国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-21)

作者简介: 徐天成, 硕士生, 主要从事机器视觉技术研究。E-mail: xtc133337666885@163.com

吴敏, 通信作者, 博士, 副教授, 主要从事农业装备工程研究。E-mail: minwu@cau.edu.cn

在线投稿
www.d1ae.com

动机器视觉蓬勃发展，再到现在前沿的人脸识别、无人驾驶技术，机器视觉的快速发展，已经在工业、农业、军事和航天等诸多领域发挥着不可替代的作用。通过视觉传感器——机器视觉的“眼睛”采集到目标对象包括像素点分布、灰度值和亮度等图像信息，计算机将采集到的图像信息转变为数字信号，利用后续软件算法——机器视觉的“大脑”挑选出所需要的特征信息，与预设标准比较做出判断，发出后续动作指令。简而言之，机器视觉系统就是利用机器来代替人眼和大脑进行思考和判断。

机器视觉系统最基本的特点和最大的优势是具有高度的生产灵活性、自动化程度和效率，目前广泛应用于现代农业生产的各个环节。一个完整的机器视觉系统主要由图像采集系统和图像信息处理系统两部分组成。

本文将围绕机器视觉技术在农业工程领域的应用进展进行系统梳理和分析，比较其技术运用特点和适用性，应用在不同工程场景下的技术功能特征，综述图像采集和图像处理两大系统的有效性、经济性及未来发展趋势。

1 图像采集系统

机器视觉获取图像信息的主要方式是依靠视觉传感器，不同的视觉传感器获取到的图像信息各有差异，根据捕捉到图像的维数，主要分为两类：包含形态学特征（颜色、形状和纹理）的二维（2D）图像传感器和以获取三维立体信息、空间坐标为主的三维（3D）图像传感器^[4]。针对不同的农业生产环节、作业对象和工作环境选择最合适的视觉传感器，才能在达到目的效果的同时发挥传感器的最大优势。常用的图像信息获取传感器包括单目视觉、立体双面视觉、激光主动视觉、热成像和光谱成像等。

1.1 单目视觉

单目视觉传感器作为最早使用在机器视觉中的传感器，主要应用于采摘机器人目标果实识别，它由一个单目摄像机构成，一般采用 CCD（Charged Coupled Device）或 CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）两种类型的光学相机^[5]。主要通过颜色和纹理特征来识别目标果实，在黑白相机被彩色相机取代后，有颜色的目标果实更容易被识别，如苹果、柑橘、西红柿等^[4]。此外，基于单目视觉传感器的测距、抓取、无人机避障和地图构建等技术应用都趋于成熟^[6-11]。

由于只有一个单目摄像头，单目视觉系统构成相对简单，经济性较好，但单目相机只能获取目标果实的二维图像信息，不能获取目标对象的三维空间坐标

信息，成像效果也容易受到光照强度和相机拍摄角度等因素的影响。

1.2 立体双目视觉

立体双目视觉传感器是为了获取场景的三维空间坐标和立体图像信息，在单目视觉的基础上增加一个相机，分置在同一垂直光轴上，两个相机利用三角成像原理对同一场景采集不同角度的图像信息^[12]。双目立体视觉系统能有效获取到目标的空间位置信息，解决了单目视觉成像效果受光照变化影响问题，丰富的三维空间信息也使目标果实定位识别更加准确。双目立体视觉提高识别定位成功率的同时，在成簇生长果实、强光下相互粘连目标果实，以及目标果实与枝叶近色系识别难题上发挥出巨大优势，对簇生西红柿的识别率可达 87.9%，同样在测距、导航、避障等领域的应用效果优于单目视觉系统^[13-14]。

与单目视觉一样，双目视觉系统主要依靠颜色和纹理两大特征来识别目标果实，具有效率高、精度合适、系统结构简单和成本低等优点，但对传感器标定精度要求较高，匹配成功率受到相机畸变系数、标定图像数量、标定靶位置的影响^[15]。

1.3 激光主动视觉

激光主动视觉主要由激光发生器和接收器两部分构成。激光从发生器发出后对被测目标进行扫描，随后计算机接收到其反射的光线形成图像，再通过计算机算法对被测目标进行三维形貌构建，从而获取了场景深度的相关信息^[4]。激光主动视觉最大的特点在于可自身发出激光，不依赖于自然光源，立体成像和三维重构不受光线、背景干扰的影响，结合红外光源和线性结构光源，实验室环境下对果柄的识别率高达 97.5%^[16]。对解决非结构化作业环境下目标果实识别难题，精确定位目标果实空间位置和自身大小参数，以及测量采摘机器人末端执行器位置等方面具有巨大优势。由于激光主动视觉在扫描目标果实的同时也会不可避免地引入背景元素，所以对于采摘机器人的目标果实识别还需要充分利用果实的其他相关形貌特征，如形状、纹理等。此外，庞大的图像信息扫描和测量参数对计算机后续处理能力提出更高要求，系统结构过于复杂也限制了激光主动视觉当前的广泛应用。

1.4 热成像

热成像也即红外成像技术，是利用目标对象与背景物理结构、内部构造特性的不同，产生热辐射存在较大差异来识别目标对象^[17-19]。热成像对温度变化尤为敏感，在补充外界光源的条件下，为夜间作业提供了可能^[20]。在农业生产中，热成像方式解决了对被枝叶、树干遮挡环境中的目标果实的识别难题，同

时由于热辐射所形成的热像图也不受颜色的影响,所以在叶片、目标果实同属近色系的识别中也有较好的表现^[21]。

热成像技术还与其他图像信息结合应用,研究发现,将可见光图像与热像图融合,对融合后的图像进行分割处理可以高质量识别出目标果实,其识别率高于单独使用可见光图像和热像图的识别方法。但由于热成像波长较长,导致成像结果对比度低、非均匀性大、空间分辨率差^[22]。此外,热成像的温度传感器也极易受到外界环境温度变化的干扰。

1.5 光谱成像

光谱成像是一种集光谱探测与成像技术于一体的精密光学传感器,利用采集到的同一目标在不同窄光谱带上所辐射的信息得到一系列不同光谱带的图像。光谱相机根据分辨率的不同分为多光谱相机和高光谱相机两种,高光谱可以采集到的光谱波段远远高于多光谱相机采集到的光谱波段。随着光谱成像技术的成熟与发展,多光谱相机作为感知环境的传感器被越来越多的应用到果蔬采摘机器人上。

高光谱相机采集覆盖范围从可见光到近红外,其丰富的光谱信息可以识别被枝叶、树干遮挡的目标果实或者与背景、枝叶颜色相近的目标果实,如青柑橘、黄瓜等^[23-24]。大量的光谱波段信息获取会给后期图像处理带来巨大的挑战,对计算机和算法要求较高,处理大量的信息也非常耗时,不适用于实时识别的场景中。

1.6 视觉传感器应用比较分析

国内外学者对不同视觉传感器的使用特点、适用范围和应用场景进行了大量的研究,主要研究成果如表1所示。

2 图像处理

图像处理系统是整个机器视觉系统的核心,视觉传感器采集到目标对象的图像信息后经过“大脑”的提取、分析、判断发出最终动作指令。图像特征的提取是图像处理过程中最关键的步骤,在复杂的背景中将需要的目标对象分割出来是首要问题。图像分割是根据图像中不同元素间的特征差异(如边缘、颜色、纹理等),它是由图像处理到图像分析的关键步骤,将图像分割成若干个特定具有相同特性的不同区域,不同区域间的像素信息存在明显差异。不同特点的图像分割技术被广泛应用在图像的前期处理中^[35-36]。

2.1 基于边缘的图像分割方法

基于图像边缘的图像分割方法是最简单、最早的图像分割方法之一,主要通过边缘检测算子寻找图像边缘,这些边缘显示了图像在灰度、色彩、纹理等方面不连续的位置,经过后续处理将边缘闭合为完整的边缘链完成分割^[37-38]。边缘检测算子提取出待分割场景不同区域的边界后,对分割边界内的像素进行连通和标注。目前使用率较高的边缘检测算子有Roberts算子、Prewitt算子、Sobel算子和Canny算子,

表1 不同视觉传感器应用研究
Tab.1 Application research of different vision sensors

视觉类型	应用场景	主要识别特征	主要结论	参考文献
单目视觉	柑橘采摘机器人	颜色、轮廓	相机镜头加装滤光片,能更好地从背景中识别柑橘	[20, 21, 23]
	田间菠萝果实识别	颜色、轮廓、纹理	利用高频光源作为补充光源,可以解决单目成像受光线变化影响的问题	[25]
	无人机避障	形状、边线、灰度等	基于单目视觉改进算法的避障准确性、及时性显著提高	[9]
	安全车距预警	白天:纹理 夜间:光斑	基于单目视觉开发的安全车距预警系统具有良好的可靠性和适应性	[26]
双目视觉	黄瓜采摘机器人	颜色、轮廓	根据深度信息可以解决近色系果树识别难题	[27]
	挤奶机自动套杯	场景图像深度信息	以双目视觉系统对奶牛奶头识别定位,实现奶杯自动套杯	[28]
	生猪胴体自动切割	轮廓	实现生猪胴体在不损伤内脏的情况下自动精准切割,提高卫生标准和效率	[29]
激光主动视觉	樱桃外观品质监测	颜色、亮度	模式识别准确率达到85%,在补充主动光源后准确率为93%	[7]
	苹果果柄识别	形状、轮廓、纹理	采用红外与线性结构光结合,通过三维重构技术使果柄识别率高达97.5%	[16]
热成像	肉鸡体温监测	肉鸡头部与腿部温度	红外成像与深度学习相结合实现快速、准确监测肉鸡体温	[30]
	小麦叶锈病监测	小麦叶片平均叶温	基于红外热成像的小麦叶锈病分级方法具有识别率高、实时监测预防等优点	[31]
光谱成像	油茶籽含油率检测	油茶籽漫反射光谱图	基于高光谱成像技术建立油茶籽含油率的回归预测模型	[32]
	农畜产品无损检测	拉曼图像和拉曼光谱	设计了拉曼光谱成像检测系统,检测时间大幅缩短的同时检测效率有效提高	[33]
	肥城桃品质分析	可溶性固形物含量	采用高光谱成像技术对肥城桃硬度等指标可视化分析,实现精准分级	[34]

表 2 不同微分算子特点总结
Tab. 2 Summary of characteristics of different differential operators

微分算子名称	特点	应用场景	主要结论	参考文献
Roberts	定位精度高, 对噪声干扰敏感	牡丹红斑病叶检测 车道线图像检测	病斑边缘平均检出率达 73% 车道线检测结果清晰、完整	[37, 39]
Prewitt	对噪声具有平滑作用	噪声图像边缘检测	利用 8 个不同方向上的模板算子提高其抗噪声性能	[37]
Sobel	检测效果较好, 对噪声具有抑制作用	圣女果表面缺陷检测	基于 Sobel 与分数阶微分的边缘检测, 准确率为 98.4%	[37]
Canny	算法适用性强, 参数可根据要求调整	马铃薯发芽检测	结合多光谱和阈值分割, 准确率可达 87.08%	[37, 40-42]

各算子原理及特点如表 2 所示。其中 Canny 算子被广泛应用到各种场景中。

基于图像边缘的分割算法具有对待分割对象精确定位、计算速度快及算法简单的优点。边缘分割方法局限性主要在于对一些低质量的图像处理时容易产生假边缘和空白, 产生的假边缘很难被边缘分割识别和分类; 对图像中的噪声也较敏感; 边缘检测在大多数情况下会忽略图像中的高阶部分, 这些被忽略的部分依然存在有分析价值的图像信息。

2.2 基于阈值的图像分割方法

阈值分割算法是对图像分割处理的最早研究, 具有原理简单且分割效果好的特点, 根据待分割图像的灰度值确定分割阈值, 对于目标和背景相差较大也即图像信息对比度高的图像分割中优势明显, 效果最好。通常根据确定的分割阈值的个数分为单阈值分割法和多阈值分割法, 结合智能技术的传统阈值分割方法可以得到更加优化的分割效果。阈值分割的核心在于最佳阈值的选取, 主要解决分割阈值如何选择问题的办法分为两类: 确定阈值和自适应阈值^[43]。前者常用有全局阈值、大津法 (Otsu 阈值法) 和迭代式分割法, 如表 3 所示。后者一般适用于待分割图像中有较多杂质和灰度不均匀的情况。

灰度阈值分割算法技术已经成熟稳定, 但仍存在分割复杂图像时计算量大、耗时长等问题。现有阈值分割算法受制于自身性能和适用范畴, 目前尚未有普遍适用性的图像阈值分割算法。充分考虑在确保分割结果清晰准确的前提下减少分割耗时与算法复杂程度, 是未来阈值分割发展和进步的方向。

2.3 基于区域的图像分割方法

基于区域的图像分割方法是通过一定的规则根据颜色、纹理和灰度差异, 将待分割图像中具有相似和

相邻特征进行划分, 划分结果为若干个互不重叠、交叉的图像区域。区域图像分割方法结合像素的相似性及在图像空间中的邻近性两大特点, 解决了其他分割方法导致图像空间不连续的问题, 并且对图像中出现的噪声干扰能够进行有效的去除。

根据事先确定好的规则将一个像素点或部分区域, 使周围区域不断聚合的过程称为区域生长, 通过生长准则判断种子点与待生长点是否符合生长条件来扩大区域, 直到生长停止。最终图像分割结果受到种子点的选取、生长条件和停止生长条件的影响, 种子点也需要人为选取, 增加了计算的复杂度。区域分裂合并算法则是先将整幅待分割图像分裂成若干个不同的区域, 再把属于前景的区域按照一定准则合并, 实现目标前景与背景分割。区域生长与区域分割合并属于互逆的两个过程, 实际应用中通常两者结合使用, 在进行复杂场景下分割时以获得更好的分割效果。

2.4 其他图像分割方法

2.4.1 聚类分割

聚类方法的核心思想是将图像信息中具有相似特征的数据以一个特定的中心点进行会聚, 形成类簇, 不同类簇之间存在明显差异^[46]。聚类分析方法适用于灰度图像、彩色图像及纹理图像分割, k-均值聚类是最常见聚类分割方法。

k-均值聚类算法首先随机从图像中选取 k 个初始聚类中心, 然后将图像信息中每个数据分配到与之距离最近的聚类中心形成新的数据簇, 再将该数据簇的平均值作为新的聚类中心迭代, 直至聚类中心不再发生变化为止。k-均值聚类算法在分割彩色图像时, 具有分割精度高、适应性强的特点。但也同样存在分割结果受到初始聚类中心的影响、易出现错分割和过分割等缺陷。李寒等^[47]提出了基于 SOM-k-均值聚类算

表 3 不同阈值分割特点与应用场景
Tab. 3 Different thresholds segmentation characteristics and application scenarios

阈值分割名称	特点	应用场景	参考文献
全局	适用于目标分割对象与背景对比明显的图像	车道线识别	[44]
Otsu	对噪声和目标大小十分敏感, 当目标与背景大小比例悬殊时, 分割效果较差	水下定位与地图导航	[45]
迭代式	在不断的迭代过程中选取新的阈值以达到最佳分割效果	夜间车牌识别	[43]

法的蕃茄果实识别与定位方法,通过聚类将重叠果实的轮廓分开,分别进行拟合,解决了番茄果实重叠粘连难以识别的难题,与传统方法相比准确性更高、鲁棒性更强。李玉功^[48]提出一种基于改进 K-means 预分割和区域合并策略的彩色图像分割方法,重点解决分割数目难以确定、存在过分割和错分割、类簇数目 k 值难以确定,以及聚类结果过分依赖聚类中心的问题,改进后的分割算法得到优于传统算法的分割结果。

2.4.2 分水岭算法

分水岭算法是借助于形态学理论发展起来的一种图像分割方法,图像灰度值对应地形图中的高度值。分水岭分割是一种多阈值自适应分割算法,该算法对图像中细微的灰度变化较为敏感,也因此能在边缘分割时精准定位,并且分割后的区域具有封闭性和连通性。由于分水岭分割方法十分敏感,图像噪声、相关纹理特征和外界干扰等因素会使得结果产生过分割现象。

赵梦琦^[49]提出了利用 SLIC 分割算法预处理来抑制分水岭算法中过分割现象,图像冗余和噪声得到了一定控制和消除。杨家红等^[50]将分水岭算法与区域生长法结合,针对分水岭算法在分割彩色图像时出现的过分割问题做出改进,既能去除图像噪声又保证图像边缘信息,有效利用图像自身特征信息。

2.4.3 深度学习图像分割法

随着深度学习的快速发展,机器视觉领域也因此发生巨大变化,卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)作为一种特征提取方法被引入到图像分割领域,与传统特征提取方法相比具有适应外部条件变化的能力(如识别对象形状、颜色、光照环境等),能提取到更加抽象的特征。深度学习的快速发展,使其在农业中的应用展现出巨大的优势,目前已经在葡萄、蓝莓、草莓、杨梅、苹果、猕猴桃等水果识别中成功应用,其中经典深度学习图像分割模型包括 FCN、PSPNet、DeepLab、Mask R-CNN^[36,51-53]。针对不同的深度学习方法,黄鹏等^[36]采用 3 个深度

学习数据集,对以上 4 种方法进行了比较分析:DeepLab 在所有模型中准确性最高;而 Mask R-CNN 在数据集的优异性能表现在像素精度可达 37.10%。不同图像分割方法的技术特点如表 4 所示。

3 具体应用

3.1 视觉传感器选择原则

单目视觉和双目视觉系统构成相对简单,主要部件仅由相机构成,相机能够获得广阔的视野,因此单目、双目视觉被广泛应用在测距、导航、避障和采摘等需要良好视野的场景下。激光主动视觉由于需要外来激光光源,导致系统设备构成较为复杂,但不受自然光照影响,作业条件要求少。热成像主要利用对温度辐射差异特性来识别目标对象,温度变化大是热成像应用的最大优势,主要集中应用于养殖业中对活体动物体温监测。采集光谱信息需要将被采集对象放入黑箱,导致光谱成像只能在实验室或温室环境中作业,不适用于过于复杂的系统,也不适用于实地生产环境。

3.2 技术应用场景差异分析

单目视觉、双目视觉和激光主动视觉都只能获取到目标对象的二维信息,形状、大小、轮廓等,也就限制了其无法对目标对象内部信息进行采集,只能在空间位置、数量大小对目标对象进行作业。热成像和光谱成像均可以透过目标对象表面,获取到目标对象内部微观信息,但热成像只能测定温度这个单一指标,因此多用于生产过程中的体温监测和病虫害预防。光谱成像在果蔬、农畜产品的无损检测和品质分析上有着天然的优势,在不破坏被检测对象的同时得到可靠准确的检测结果,根据构建好的数据模型还能完成品质分级,光谱技术在农产品后续深加工生产过程中有着十分广阔的应用前景。另外,在研究香菇、菊花干燥过程中物料表面实时起皱和收缩特性时,需要监测整个干燥过程中的物料表面变化,在干燥箱内加装红外相机是最佳解决方案,实现在线实时监测^[54-55]。

表 4 不同图像分割算法特点比较

Tab. 4 Comparison of features of different image segmentation algorithms

分割算法名称	技术优势	不足	参考文献
边缘	检测速度快、适用于主体和背景有明显差别的图像	对噪声敏感、边缘变化大	[38]
阈值	计算简单、效率高、速度快,一般与其他方法结合使用	对噪声敏感,灰度值重叠区域分割不明显	[45]
区域	连续分割、有较好的区域特征、适合复杂场景下的分割	计算量大、耗时,容易造成过分割现象	[54]
聚类	分割效果好、精度高、适应性强	受参数影响较大、对噪声和灰度不均匀较敏感	[47, 48]
分水岭	获得单一像素分割线、准确定位物体边缘、分割后的区域具有封闭性和连通性	对噪声、纹理等干扰敏感	[49]
深度学习	更好解决复杂背景下的目标对象分割问题,检测和分割重叠目标能力强	深度神经网络计算量大,模型运行速度慢	[51-53]

3.3 面向农业生产环节的技术要求

(1)播种育苗阶段。基于机器视觉实现农作物大粒种子精准播种，由于南瓜、大蒜、甘蔗种苗等大粒农作物种子，具有尺寸、质量大且形状不规则等特点，不适用于一般的精量播种机^[56-59]。此外，种苗生长过程中需要保持正确的生长方向，避免枝叶相互遮蔽、影响生长，因此播种机需要将作物种子按照一定的方向放置到土壤中，才能确保秧苗整齐，方便后续生产过程的机械化作业。

(2)作物生长阶段。基于机器视觉监测作物营养状况和病虫害防治，近地遥感监测系统能全程提供农作物生长信息，并根据掌握的作物长势和营养状态做出诊断，如对玉米不同生长阶段的精准施肥、棉花氮素营养状况监测、树木病虫害防治等^[60-61]。

(3)采收阶段。基于机器视觉实现果蔬机械化采摘、无损检测和自动分级，传统农业生产方式采收后数量巨大的果蔬产品，需要人工进行筛选分级，不仅耗费大量时间和劳动力资源，由于人工筛选分级存在因人为主观评价标准不同导致产品质量参差不齐的问题，结合机器视觉实现采摘、检测、分级流水化生产过程将具有重要意义，现已在荔枝、红枣、苹果等果蔬上投入使用^[62-63]。

3.4 图像分割算法及其适应性研究

对于导航、避障、采摘、分级等不涉及目标对象细节的使用场景，图像处理算法在识别目标对象时，只需识别出轮廓就可以实现动作指令，可适当简化分割算法，避免增加计算量、图像处理耗时，提高即时性；在实现精准采摘、播种时，则需要优化图像分割效果，达到精准度要求。其具体精度要求和及时性要求如表5所示。根据不同应用场景需求结合不同算法自身特点和优势，选择合适分割算法进行图像处理。

3.5 当前技术发展中的挑战

机器视觉技术在农业工程中应用的挑战仍然主要存在于图像的采集和处理两个方面，由于实际作业环

境与设施农业温室大棚存在较大差距，对农作物初期秧苗阶段提出较高要求，反而增加了前期准备工作；现有视觉传感器功能单一，无法做到集多功能于一身；图像后期处理时需要在分割精度和处理时间两者之中有所取舍；识别重叠目标和复杂背景算法过于复杂。

4 结束语

计算机、视觉传感器技术的飞速发展，促进了机器视觉在农业工程领域的广泛应用，传统农业生产中各个环节（如播种、施肥、采收等）都在逐步实现自动化、智能化，机械化作业将进一步解放生产力，提高生产效率，增加产品附加价值。此外，基于机器视觉的无损检测和品质分级必将成为现代农业中重要的一环，机器视觉在农产品后续加工、运输、包装等环节也存在巨大的应用前景。图像处理算法也随着农业生产的高质量发展提出了更高的要求，面对复杂、庞大的图像信息量，如何快速准确地提取出特征信息是后续算法优化的方向，阈值分割作为使用最多、应用最广的图像分割算法，结合去噪、腐蚀、膨胀等处理方法，努力达到在不改变分割效果的前提下提高算法的适用性。

本文综述了机器视觉系统的图像采集和图像处理两大核心构成，针对不同的软、硬件技术特点和适用性分析比较了在不同生产环节、不同应用场景及不同工作要求的應用研究。阐明了机器视觉是未来农业智能化发展的技术支撑，提出了基于多光谱图像的无损检测和品质分析具有十分广阔的研究前景。总结发现，图像信息采集主要以获取目标外部信息和内部深度信息两类为主，后期图像处理中，无论何种算法都应以提高分割效果实现目标对象获取为前提。

未来机器视觉在农业工程中的应用研究还应从如下4方面持续加强。①视觉传感器在完善所需特征信息采集的同时减少非必要信息的获取以减少后续图像

表5 不同图像分割算法适应性要求

Tab. 5 Adaptability requirements of image segmentation algorithm

应用场景	精度要求	即时性要求	原因	参考文献
无人机避障 机器人导航 安全距离预警	一般	高	导航、避障、安全距离预警等工作场景，工作即时性要求算法计算时间短，在作业车行进过程中存在抖动、角度变化，所以在图像处理中要求算法对模糊图像和尺度变化图像均能保持一定的识别效果。	[9] [39] [6, 26]
机械化采摘 自动分级	中等	中等	采摘、自动分级最主要的识别特征是轮廓和形状大小，此时算法的主要工作是将所需要的目标对象从复杂的背景信息中识别分割出来，对精度和及时性要求都不是太高。	[27] [63, 64]
精准播种 精准采摘	高	一般	播种时对种子朝向有严格要求的作物，图像处理算法必须完整分割出种子真实大小；传统采摘机器臂在夹持草莓过程中难免对果实造成损伤，精准采摘只需夹持草莓果蒂，对图像处理精度要求较高。	[56-59] [65]
无损检测 品质分级	极高	一般	无损检测和品质分级需要结合目标对象外部特征和内部信息综合判断，对目标对象出现的细小霉点、损伤、异常等需要及时反馈，要求算法精度极高，避免出现漏判和误判。	[32-34] [64]

处理的信息量。②在进一步优化分割结果的同时降低图像处理分割算法复杂程度,减少计算机运算量,降低耗时。③提高算法和计算机反应速度,提高即时性,实现手眼协同。④在保证性能效果的前提下简化视觉系统构成,以更好、更快地应用于生产实践。

参考文献

- [1] 国务院关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见[EB/OL]. (2018-12-29). http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-12/29/content_5353308.htm.
- [2] 中共中央 国务院关于全面推进乡村振兴加快农业农村现代化的意见[EB/OL]. (2021-02-21). http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/21/content_5588098.htm.
- [3] 本刊综合. 耕地保护与粮食安全: 中央一号文件中的关键词和硬举措[J]. 中国农业综合开发, 2021, 29(3): 12-16.
- [4] 赵源深. 西红柿采摘机器人目标识别、定位与控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
ZHAO Yuanshen. Research on the technologies of target recognition, localization and control for tomato harvesting robot [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [5] 徐德. 单目视觉伺服研究综述[J]. 自动化学报, 2018, 44(10): 1 729-1 746.
XU De. A tutorial for monocular visual servoing[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(10): 1 729-1 746.
- [6] 刘军, 后士浩, 张凯, 等. 基于单目视觉车辆姿态角估计和逆透视变换的车距测量[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 70-76.
LIU Jun, HOU Shihao, ZHANG Kai, et al. Vehicle distance measurement with implementation of vehicle attitude angle estimation and inverse perspective mapping based on monocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(13): 70-76.
- [7] 王辉. 机器视觉技术在果园自动化中的应用研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2011.
WANG Hui. Applied research of machine vision in orchard automation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2011.
- [8] 冉冉. 基于单目视觉的移动机器人目标识别及抓取系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
RAN Ran. Research on system of object recognition and pickup for mobile robot based on monocular vision[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [9] 马浩森. 基于单目视觉的旋翼无人机避障技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
MA Haosen. Research on obstacle avoidance technology of rotor UAV based on monocular vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [10] 刘浩敏, 章国锋, 鲍虎军. 基于单目视觉的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 855-868.
LIU Haomin, ZHANG Guofeng, BAO Hujun. A survey of monocular simultaneous localization and mapping[J]. Journal of Computer-
- Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 855-868.
- [11] 朱凯, 刘华峰, 夏青元. 基于单目视觉的同时定位与建图算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(1): 1-6.
ZHU Kai, LIU Huafeng, XIA Qingyuan. Survey on monocular visual SLAM algorithms [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(1): 1-6.
- [12] 吴琼, 刘宝龙, 王科, 等. 双目立体视觉技术的实现及其进展[J]. 中国新通信, 2020, 22(2): 166.
- [13] YANG L H. A fruit recognition method for automatic harvesting [D]. Canada: University of Windsor, 2007.
- [14] XIANG Rong, JIANG Huanyu, YING Yibin. Recognition of clustered tomatoes based on binocular stereo vision[J]. Computers and Electronics In Agriculture, 2014, 106: 75-90.
- [15] 李为民, 汪健. 基于双目视觉一维标定算法的研究[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(7): 80-83.
LI Weimin, WANG Jian. Research on one-dimensional calibration algorithm based on binocular vision[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(7): 80-83.
- [16] ZHANG Baohua, HUANG Wenqian, WANG Chaopeng, et al. Computer vision recognition of stem and calyx in apples using near-infrared linear-array structured light and 3D reconstruction[J]. Biosystems Engineering, 2015, 139: 25-34.
- [17] 徐结海. 红外线与红外成像技术的发展应用综述[J]. 中国新技术新产品, 2009(20): 17.
- [18] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3 145-3 153.
FAN Jinxiang, YANG Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3 145-3 153.
- [19] 李相迪, 黄英, 张培晴, 等. 红外成像系统及其应用[J]. 激光与红外, 2014, 44(3): 229-234.
LI Xiangdi, HUANG Ying, ZHANG Peiqing, et al. Infrared imaging system and applications [J]. Laser and Infrared, 2014, 44(3): 229-234.
- [20] XU H R, YING Y B. Detection citrus in a tree canopy using infrared thermal imaging [C]// Conference on Monitoring Food Safety, Agriculture, and Plant Health, Providence, Rhode Island, USA, 2003.
- [21] BULANON D M, BURKS T F, ALCHANATIS V. Study on temporal variation in citrus canopy using thermal imaging for citrus fruit detection [J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2): 161-171.
- [22] 陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311-318.
CHEN Qian. The status and development trend of infrared image processing technology [J]. Infrared Technology, 2013, 35(6): 311-318.
- [23] KANE K E., LEE W S. Multispectral imaging for in-field green citrus identification [C]// Annual International Meeting of The American Society of Agricultural And Biological Engineers, Minneapolis, Minnesota, 2007.
- [24] 周思路. 黄瓜采摘机械手结构优化及其机器视觉研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
ZHOU Xinlu. A study of cucumber picking manipulator on structural optimization and machine vision [D]. Changchun: Jilin Univer-

- sity, 2019.
- [25] 李斌, WANG Ning, 汪懋华, 等. 基于单目视觉的田间菠萝果实识别[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 345-349.
LI Bin, WANG Ning, WANG Maohua, et al. In-field pineapple recognition based on monocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 345-349.
- [26] 顾柏园. 基于单目视觉的安全车距预警系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
GU Boyuan. Study on the forward collision warning system based on monocular vision[D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [27] 张帆, 张帅辉, 张俊雄, 等. 温室黄瓜采摘机器人系统设计[J]. 农业工程技术, 2020, 40(25): 16-20.
- [28] 李小明, 杨开锁, 李军辉, 等. 基于双目立体视觉的挤奶机自动奶杯套杯技术研究[J]. 中国奶牛, 2020(12): 42-45.
LI Xiaoming, YANG Kaisuo, LI Junhui, et al. Research on automatic teatcup attaching technology of milking machine based on binocular stereo vision[J]. China Dairy Cattle, 2020(12): 42-45.
- [29] CONG Ming, ZHANG Jiaqi, DU Yu, et al. A porcine abdomen cutting robot system using binocular vision techniques based on kernel principal component analysis[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 101(4). <https://doi.org/10.1007/s10846-020-01280-3>.
- [30] 沈明霞, 陆鹏宇, 刘龙申, 等. 基于红外热成像的白羽肉鸡体温检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 222-229.
SHEN Mingxia, LU Pengyu, LIU Longshen, et al. Body temperature detection method of ross broiler based on infrared thermography[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 222-229.
- [31] 朱文静, 陈华, 李林, 等. 基于红外热成像边缘检测算法的小麦叶锈病分级研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 36-41.
ZHU Wenjing, CHEN Hua, LI Lin, et al. Grading of wheat leaf rust based on edge detection of infrared thermal imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 36-41.
- [32] 周宏平, 胡逸磊, 姜洪喆, 等. 基于高光谱成像的油茶籽含油率检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 308-315.
ZHOU Hongping, HU Yilei, JIANG Hongzhe, et al. Detection method of oil content of camellia oleifera seed based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 308-315.
- [33] 翟晨, 彭彦昆, CHAO Kuanglin, 等. 农畜产品安全无损检测扫描式拉曼光谱成像系统设计[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 279-284.
ZHAI Chen, PENG Yankun, CHAO kuanglin, et al. Design of line-scan raman imaging system for nondestructive detection of agricultural and livestock products safety[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 279-284.
- [34] 邵园园, 王永贤, 玄冠涛, 等. 基于高光谱成像的肥城桃品质可视化分析与成熟度检测[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 344-350.
SHAO Yuanyuan, WANG Yongxian, XUAN Guantao, et al. Visual detection of SSC and firmness and maturity prediction for Feicheng peach by using hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 344-350.
- [35] 祁明, 祝典, 邹武星. 图像处理技术综述[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(2): 57-59.
QI Ming, ZHU Dian, ZOU Wuxing. Overview of image processing technology[J]. Digital Technology and Application, 2020, 38(2): 57-59.
- [36] 黄鹏, 郑淇, 梁超. 图像分割方法综述[J]. 武汉大学学报(理学版), 2020, 66(6): 519-531.
HUANG Peng, ZHENG Qi, LIANG Chao. Overview of image segmentation methods[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2020, 66(6): 519-531.
- [37] 向方, 王宏福. 图像边缘分割算法的优化研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2011, 28(8): 280-283.
XIANG Fang, WANG Hongfu. The optimization of image edge segmentation algorithm research and simulation[J]. Computer Simulation, 2011, 28(8): 280-283.
- [38] 黄时杰, 曾建华. 图像边缘检测与分割的 MATLAB 实现[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(9): 47-49.
HUANG Shijie, ZENG Jianhua. Implementation of image edge detection and segmentation based on MATLAB[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2019, 35(9): 47-49.
- [39] 唐阳山, 徐忠帅, 黄贤丞, 等. 基于 Roberts 算子的车道线图像的边缘检测研究[J]. 辽宁工业大学学报: 自然科学版, 2017, 37(6): 383-386.
TANG Yangshan, XU Zhongshuai, HUANG Xiancheng, et al. Research on edge detection for the lane line image based on roberts operator[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 37(6): 383-386.
- [40] 李祥健, 朱家明, 徐婷宜. 基于改进 Canny 算子的双水平集医学图像分割[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(2): 226-231.
LI Xiangjian, ZHU Jiaming, XU Tingyi. Bilevel set medical image segmentation based on improved canny operator[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(2): 226-231.
- [41] YANG Yu, ZHAO Xin, HUANG Min, et al. Multispectral image based germination detection of potato by using supervised multiple threshold segmentation model and Canny edge detector[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106 041.
- [42] 段晓宇. 圆检测中 Canny 算子的改进及应用研究[D]. 开封: 河南大学, 2018.
DUAN Xiaoyu. Research on the improvement and application of Canny operator in circle detection [D]. Kaifeng: Henan University, 2018.
- [43] 刘硕. 阈值分割技术发展现状综述[J]. 科技创新与应用, 2020(24): 129-130.
- [44] 张瑞合, 姬长英, 沈明霞, 等. 计算机视觉技术在番茄收获中的应用[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 50-52.
ZHANG Ruihe, JI Changying, SHEN Mingxia, et al. Application of computer vision to tomato harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 50-52.
- [45] YUAN Xin, MARTÍNEZ José-Fernán, ECKERT Martina, et al. An improved OTSU threshold segmentation method for underwater simultaneous localization and mapping-based navigation[J]. Sensors, 2016, 16(7): 1 148.
- [46] 纪汉霖, 李兆信. 多种聚类算法性能的比较分析[J]. 计算机

- 技术与发展, 2020, 30(8): 14-21.
- Ji Hanlin, LI Zhaoxin. Comparative analysis of performance of multiple clustering algorithms[J]. Computer Technology and Development, 2020, 30(8): 14-21.
- [47] 李寒, 陶涵斌, 崔立昊, 等. 基于 SOM-K-means 算法的番茄果实识别与定位方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 23-29.
- LI Han, TAO Hanjuan, CUI Lihao, et al. Recognition and localization method of tomato based on SOM-K-means algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 23-29.
- [48] 李玉功. K-means 聚类算法的改进及其在彩色图像分割中的应用[D]. 安徽: 安徽大学, 2018.
- LI Yugong. Improvement of K-means clustering algorithm and its application in color image segmentation[D]. Anhui: Anhui University, 2018.
- [49] 赵梦琦. 基于分水岭算法的图像分割算法研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2020.
- ZHAO Mengqi. Research on image segmentation algorithm based on watershed algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [50] 杨家红, 刘杰, 钟坚成, 等. 结合分水岭与自动种子区域生长的彩色图像分割算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(1): 63-68.
- YANG Jiahong, LIU Jie, ZHONG Jiancheng, et al. A color image segmentation algorithm by integrating watershed with automatic seeded region growing[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(1): 63-68.
- [51] 雷旺雄, 卢军. 基于全卷积网络与凹点搜索的重叠葡萄分割算法[J]. 光电子·激光, 2021, 32(3): 231-240.
- LEI Wangxiong, LU Jun. Overlapping grape segmentation algorithm based on full convolutional network and concave point search[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2021, 32(3): 231-240.
- [52] JIA Weikuan, TIAN Yuyu, LUO Rong, et al. Detection and segmentation of overlapped fruits based on optimized mask R-CNN application in apple harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 172: 105380.
- [53] 傅隆生, 冯亚利, ELKAMIL Tola, 等. 基于卷积神经网络的田间多簇猕猴桃图像识别方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 205-211.
- FU Longsheng, FENG Yali, ELKAMIL Tola, et al. Image recognition method of multi-cluster kiwifruit in field based on convolutional neural networks[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 205-211.
- [54] LI Xingyi, LIU Yanhong, GAO Zhenjiang, et al. Computer vision online measurement of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) surface wrinkling and shrinkage during hot air drying with humidity control[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 292: 110253.
- [55] LIU Chunlin, LU Weiyang, GAO Boyan, et al. Rapid identification of chrysanthemum teas by computer vision and deep learning[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(4): 1968-1977.
- [56] LI Yuhua, WU Yanqiang, LI Tianhua, et al. Design and experiment of adjustment device based on machine vision for garlic clove direction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174: 105513.
- [57] 杨清明. 基于图像处理的大蒜播种机排序机构设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- YANG Qingming. Design of garlic planting sorting mechanism based on image processing[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
- [58] 黄亦其, 乔曦, 唐书喜, 等. 基于 Matlab 的甘蔗茎节特征分布定位与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 93-97.
- HUANG Yiqi, QIAO Xi, TANG Shuxi, et al. Localization and test of characteristics distribution for sugarcane internode based on Matlab[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 93-97.
- [59] 陈同. 大粒种子定向定位精量播种装置关键技术的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- CHEN Tong. Key technologies of directing and positioning precision seeding device for large cucurbitaceous seeds[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2015.
- [60] 贾彪, 马富裕. 基于机器视觉的棉花氮素营养诊断系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 305-310.
- JIA Biao, MA Fuyu. Design and experiment of nitrogen nutrition diagnosis system of cotton based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 305-310.
- [61] 葛玉峰. 基于机器视觉的室内模拟农药精确对靶施用系统研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
- GE Yufeng. Indoor pesticide smart-targeting application simulation system based on machine vision[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2003.
- [62] 孙宝霞, 汤林越, 何志良, 等. 基于机器视觉的采后荔枝表皮微损伤实时检测[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 35-41.
- SUN Baoxia, TANG Linyue, HE Zhiliang, et al. Real-time detection of micro-damage on peel of postharvest litchi based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 35-41.
- [63] 王松磊, 刘民法, 何建国, 等. 红枣自动快速无损检测分级机研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 79-83.
- WANG Songlei, LIU Minfa, HE Jianguo, et al. Study of rapid and automatic non-destructive testing grader for red jujubes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 79-83.
- [64] 杜永忠, 平雪良, 何佳唯. 圣女果表面缺陷检测与分级系统研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 194-199.
- DU Yongzhong, PING Xueliang, HE Jiawei. Surface defect detection and classification system for cherry tomatoes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(S1): 194-199.
- [65] ANJOM F K, VOUGIOUKAS S G, SLAUGHTER DC. Development and application of a strawberry yield-monitoring picking cart[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 400-411.
- [66] 王辉, 毛文华, 刘刚, 等. 基于视觉组合的苹果作业机器人识别与定位[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 165-170.
- WANG Hui, MAO Wenhua, LIU Gang, et al. Identification and location system of multi-operation apple robot based on vision combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 165-170.