

自然场景下苹果采摘机器人视觉系统研究

李娜, 陈宁

(西安工程大学, 陕西 西安 710048)

摘要:随着现代农业智能化技术的飞速开展,智慧农业系统的应用越来越多。农业采摘机器人作为智慧农业的一个新兴领域,成为近年来研究的热点。农业机器人的一个重要组成部分—视觉系统,它的性能好坏将直接影响果实识别和目标定位的准确性,从而影响其采摘效率。面对自然环境中的果实目标,采摘机器人的视觉系统仍然面临着巨大的挑战。首先对智慧农业的研究现状进行分析概括,然后对目前自然场景中的苹果果实采摘现状进行分析,进一步对自然场景中的苹果果实受光照影响、果实重叠、果实相互遮挡、树枝遮挡等现状的识别以及所采用的研究方法进行了分析总结,指出各方面需要改进的问题,最后就自然场景中苹果果实目标的识别及其定位技术进行了展望。

关键词:智慧农业;机器人;视觉系统;果实识别;目标定位

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2018)12-0137-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.12.029

Research on Visual System of Apple Picking Robot in Nature Scene

LI Na, CHEN Ning

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the rapid development of modern agricultural intelligent technology, the application of intelligent agricultural system is more and more. As a new field of intelligent agriculture, agricultural picking robot has become a hot topic in recent years. As an important part of agricultural robot, the performance of vision system will directly affect the accuracy of fruit recognition and target positioning, thus affecting the efficiency of picking. Facing the fruit target in the natural environment, the visual system of picking robot still faces great challenges. We firstly summarize the wisdom agriculture research status. Then we analyze the present situation of apple fruit picking in the natural scene, further summarizing the identification of apple fruit under the influence of light, fruit overlapping, fruit mutual occlusion and tree occlusion in the natural scene and the research methods adopted, pointing out the problem to be improved. Finally, we prospect the identification of fruit target in natural scene and its positioning technology.

Key words: intelligent agriculture; robot; visual system; fruit identification; localization of target

0 引言

智慧农业技术的研究是未来农业发展的新方向。目前,智慧农业技术应用已经深入到农业操作的方方面面,例如将云计算数据应用到农业中,可以实现农业信息共享^[1];物联网技术监测水的质量,可用来预测水产品安全系数^[2];猪脸识别技术的使用可以方便农户对体态相近的猪进行科学化管理。智慧农业作为新兴的一个发展模式,能够改进农业生产和管理效率,减少不必要的人力、物力和财力,其中人工智能技术发挥了至关重要的作用。人工智能技术与农业结合,使得智慧农业系统在农业生产中的应用日益普及。农业机器人作为智慧农业新兴的应用领域,成为近年来研究热

点,在降低人力投入、提高生产效率、改善生产品质等方面发挥着重要的作用。和目前的智慧农业相比,传统农业的信息化程度相对较低,严重阻碍了农业的可持续发展。随着互联网技术的应用,智能化农业脱颖而出,实现果实的自动化采摘对农业发展具有促进作用。果实采摘机器人利用不需要人为辅助的视觉系统对自然环境中生长的果实进行精确识别和定位是实现自动化采摘的关键所在。苹果因其产量高,作业量大,收获时间较为集中等因素而作为文中研究的目标。

1 苹果采摘机器人研究现状

应用机器人技术进行果蔬采摘工作是由美国学者

收稿日期:2018-01-09

修回日期:2018-05-16

网络出版时间:2018-06-29

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2014BAF07B01);中国纺织工业联合会指导项目(2010076)

作者简介:李娜(1993-),女,研究生,通讯作者,研究方向为数字图像处理;陈宁,副教授,研究方向为数字图像处理、模式识别。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180629.1707.066.html>

Schertz 和 Brown 于 20 世纪 60 年代提出的^[3-4]。一个完整的采摘机器人主要由视觉系统、控制系统、机械手、移动机构、末端执行器等构成,主要用于完成果实成熟期的采摘工作。它的使用可以大大减少不必要的损失。而对于苹果采摘机器人的研究,由于其工作效率问题大多还停留在实验室阶段,因此解决苹果采摘机器人的工作效率问题一直是其真正投入实际生产应用的前提。

对于苹果采摘机器人的研究,韩国等国已取得了一定的研究成果^[5-6]。Jang 等^[7]研发了一种苹果采摘机器人,该机器人采用三指夹持结构作为采摘执行器,每个手指内侧均分布力感应片,从而减小对苹果的损害;用 CCD 工业摄像机及光电传感器来识别果实,苹果的识别率可以达到 85%。Pedenc 和 Motte 等研制了“MAGAL”苹果采摘机器人,利用 CCD 摄像机捕获苹果果实图像,进而完成识别,机械手采摘的果实可通过上空的手臂凹槽落到果实收集容器中^[8]。

相比国外,国内还处于初级阶段,但是随着信息化、智能化程度的不断提高,发展速度相对提升较快。例如,司永胜等^[9]提出了一种在 RGB 颜色空间下利用色差和色差比相结合的方法,在顺光和逆光的自然环境下完成了对苹果果实的识别;赵庆波等^[10]依据机器人运动学的理论,设计了一种 5 自由度串联关节型苹果采摘机械臂;姬长英等^[11]设计了一种智能水果采摘机器人,可以实现自主导航、自主采摘及自主装箱作业,挪动平台、采摘机械臂及末端执行器能够完成智能协调控制。

以上研究表明,目前苹果采摘机器人的科研成果尚没有一个完整的系统研究架构,不同的学者针对采摘机器人不同的结构组成进行相应的研究,而视觉系统作为机器人的重要一部分,虽然在国内外都取得了一些研究进展,但是仍然有不少难题尚未解决。关于苹果采摘机器人的视觉系统因其面对的自然环境十分复杂,机械臂要避开障碍物驱使机械手准确地采摘树上的果实,视觉系统的识别是实现其功能的前提保障,因此视觉系统也成为了智能机器人研究的重点内容,对视觉系统功能的完善势在必行。

2 苹果采摘机器人视觉系统

赋予智能机器人以人的视觉性能,对于采摘机器人来说至关重要。视觉功能的完善可以更好地提高机器人的采摘效率。自然场景中,机器人视觉系统要面临各种自然环境的干扰,利用其视觉系统获取自然环境中生长的果实,然后有效地将目标果实与天空、树枝、树叶等分割开,以获取目标果实,接着再对目标果实进行空间位置的预估,最后驱动机械手进行目标果

实的采摘。

2.1 苹果果实目标识别研究

2.1.1 自然环境中单个苹果果实目标识别方法

由于自然环境不受人为控制,自然环境中生长的果实背景较为复杂(见图 1),而复杂的背景因素将会影响目标果实的识别速度。



图 1 复杂背景

非实验环境中成熟的苹果果实目标与背景区域的颜色差距较大,为此可选择基于颜色特征的分割识别方法。吕继东等^[12]为了减少机器人采摘识别果实的时间,采用基于 R-G 颜色特征的 OTSU 动态阈值分割方法,对苹果果实目标进行确定,并对其有效性进行了验证。Wang 等^[13]对采集的原始图像进行形态学开运算处理,将处理后的图像从 RGB 颜色空间转换到 Lab 色彩空间,用 K-means 聚类算法分割图像提取苹果目标。付鹏^[14]根据 YCrCb 颜色空间中 Cr 和 Cb 相互独立的特点,结合 Otsu 阈值分割方法对单个果实图像进行分割,然后采用形态学处理方法对分割后图像的孔洞进行填充,结合 Hough 变换提取其边缘,最后完成果实的识别。Linker 等^[15]基于颜色和纹理特征,利用 KNN 及区域生长法实现绿色苹果目标的识别。Xu 等^[16]采用基于 SUSAN 和 PCNN 相结合的方法有效地对苹果目标果实进行快速识别。王津京^[17]采用基于颜色特征和形状特征的 RBF 支持向量机的方法完成苹果的识别实验,相较于只使用向量机或只使用颜色特征其识别效果更好。李大华等^[18]在基于多种图像分割方法的基础上提出一种结合纹理特征和颜色特征的分割算法,经过对灰度图像的纹理特征分析,求出灰度共生矩阵进而提取特征,以支持向量机分割图像,最后结合 HSI 颜色空间的色彩差异特征将目标与背景进行有效分离。

以上方法虽能有效地将果实目标和背景分割开来,但是对于自然环境中果实的分割仍然存在假阴性或假阳性,这种复杂的环境使得单个果实提取的分割效率较慢,因此在分割性能上还有待提高。

2.1.2 自然光照不均匀影响下果实目标识别方法

在自然光照影响下,苹果果实会有背阳面和向阳

面之分(见图 2)。向阳面成熟果实表面颜色较红,背阳面表面呈现绿色或者近黄色。面对这样的情况,不少学者展开了研究。Zhao 等^[19]为了能识别成熟的红色苹果与未成熟的绿色苹果,首先利用苹果目标的颜色特征提取 $3R-(G+B)$ 图像,然后结合苹果果实目标的纹理特征进行识别。相关研究目前相对较少,还需要进一步深入。



图 2 苹果红绿差异

随着时间的改变,光照区域面积也会随之发生改变。生长在自然环境中的果实,会受到树枝、树叶、果实等的遮挡在果实表面形成较暗区域(见图 3),这种情况下便会影响目标果实的采摘。当目标果实被遮挡的区域比较严重,机器人视觉系统就很有可能对其产生误分割。宋怀波等^[20]利用光照无关图理论完成了苹果果实外表阴影的去除。首先根据光照无关图原理得到阴影苹果图像的光照无关图,其次提取原图像中的红色分量信息,之后与上一步得到的光照无关图进行相加,最后将相加后得到的图像进行自适应阈值分割处理,以完成果实表面的阴影去除。麦春燕等^[21]采用 BPNN 算法构建苹果颜色分割方法,采用 Log 边缘检测算子对苹果区域图像做边缘检测,使用 Hough 算法拟合和提取果实外形,此办法对苹果颜色变异有较好的鲁棒性。钱建平^[22]提出了基于 R/B 值与 v 值相结合的苹果识别方法,虽然未能提高识别成功率,但是大幅降低了误识率。宋怀波等^[23]为了进一步提高阴影影响下的苹果果实提取的准确性,提出了一种基于模糊集理论的苹果果实表面阴影去除方法。该方法将含有阴影的图像作为一个模糊矩阵,使用设计的隶属函数对其进行去模糊化处理,增强图像的信息,以减小苹果外表阴影对目标分割结果的影响。



图 3 光照产生阴影差异

以上研究方法对目标区域果实进行了增强,有效降低了识别错误率,但是在效率上还有待提高。

2.1.3 枝叶遮挡下苹果果实识别方法

在苹果成熟期,果树上的叶子仍然处于繁茂阶段,因此,采摘机器人要想正确识别出果树上的果实,就必须能准确地将枝叶与果实分开。树叶和枝条(见图 4)都将影响果实的识别效率。



图 4 枝叶的影响

为了解决这一难题,不少学者进行了深入研究。贾伟宽等^[24]提出一种基于 K-means 聚类分割和遗传算法(genetic algorithm, GA)、最小均方差算法(least mean square, LMS)优化的径向基(radial basis function, RBF)神经网络相结合的苹果果实识别方法。在训练过程中,苹果果实连同树枝、树叶一块训练;所得模型在识别过程中,可在一定程度上避免枝叶遮挡对果实识别的影响。此外,贾伟宽等^[24]使用 K-means 聚类分割和神经网络相结合的算法实现了遮挡苹果目标较高精度的识别。宋怀波等^[25]对基于 K-means 分割后的图像提取其目标轮廓,并结合凸壳理论将其真实轮廓提取出来,而后联系数学知识中任意不在一条线上的三点确定一个圆,最终将目标果实识别出来。Wang 等^[26]对以上方法进行改进,为了使准确性得到保证,将以上方法重复多次,去除误差较大项,求取平均值以得到准确的目标区域。孙飒爽等^[27]对枝条遮挡下单个苹果果实的识别与重建进行研究,采用基于 Lab 色彩空间的 K-means 聚类算法分割图像,再经过形态学理论对苹果果实轮廓进行提取,依据最小外接矩形法去除目标果实的伪轮廓,接着使用轮廓的曲率法对苹果目标进行重建,其结果有效可行。

2.1.4 重叠果实目标识别方法

在自然环境中的众多影响因子下,果实间相互重叠是影响果实识别最为严重的因素,有的果实被长在其上面的果实严重遮挡,有可能只剩下 $1/3$ 的面积(见图 5),有的果实处于轻微被遮挡状态(见图 6)。无论哪种状态,采摘机器人都很难自适应地解决这些问题。对此,王丹丹等^[28]在 K-means 聚类算法的基础上,将 Spline 插值算法与基于 Normalized Cut (Ncut) 谱聚类算法相结合的算法应用在双果重叠苹果果实目标的分割与重建上,并对算法的有效性进行研究,结果显示该算法可以相对精确地对重叠苹果进行分割及被遮挡苹

果目标的轮廓进行重建。徐越等^[29]将 Snake 模型与角点检测相结合的算法应用在重叠苹果目标分割中,首先运用 Snake 模型获取重叠苹果目标果实的轮廓,而后采用距离测度的角点检测算法找出重叠目标果实的角点,针对间隔扰动造成的伪角点的结果,利用3级db1小波变换获取得到不含细节信号的近似距离信号,并通过 Spline 插算法使其复原到原始信号的长度,从而去除伪角点,接着提出一种基于长轴分割准则的分割点选取方法,完成了重叠苹果目标的分割。实验结果表明,角点检测算法与 Snake 模型相结合对于重叠苹果目标分割具有较好的效果。赵德安等^[30]提出了快速跟踪识别重叠苹果果实的方法,为运动状态下球形重叠果实识别奠定了基础。沈甜等^[31]尝试利用非静态识别措施,经过剖析图像序列,获取到果实目标的动态性能,利用亏阿苏生成距离函数法以求取果实圆心,进而确定半径,最后利用亏阿苏归一化匹配算法实现重叠果实的识别性能。胡婵丽等^[32]针对重叠果实无法识别的问题,提出了一种基于极值的重叠苹果识别定位方法。李宏利^[33]提出了基于圆曲率的苹果图像识别与定位算法,可以有效地对严重遮挡下的苹果进行识别和定位。



图5 严重遮挡果实



图6 轻微遮挡果实

针对目前的研究成果,面对自然环境中果实的各种生长状态,已经取得了很大进展,但是在果实的识别效率上还存在缺陷。对于枝叶遮挡现象,目前的实现方法还不能够准确将其分割开来,容易产生误分割现象,也有可能一个果实被分为好几个部分,对于机器人视觉来说容易造成漏识别甚至过识别等问题,并且以上研究大部分只是针对单个果实被遮挡或者双果重叠现象识别效果比较明显。因此,对于机器人识别,

还需提高其识别的准确率以及效率,进而达到快速识别的目的。

2.2 苹果果实目标定位研究

将苹果从复杂的自然环境中识别出来,要完成采摘就需要赋予机器人以苹果目标的位置。为了解决苹果果实目标的定位问题,目前采用的定位方法主要有二维定位法和三维定位法。王丹丹等^[28]采用三点定圆法实现遮挡果实的二维定位,可以解决轮廓不完全对称、遮挡面积超过一半的目标果实的定位问题。宋怀波等^[25]以自然场景下生长的遮挡果实为研究对象,利用其真实的苹果轮廓进行目标参数的估计与目标果实二维定位,并与常用的 Hough 轮廓提取法进行比较,具有较好的实用性。张传栋等^[34]也是以轮廓曲率法为依据抽取光滑的轮廓曲线估计圆心及半径参数,完成果实二维定位。吴庆岗等^[35]提出一种基于梯度 Hough 算法的自然环境下苹果目标的定位算法。沈甜等^[31]根据重叠果实快速识别算法,获得果实的二维信息后,采用双目立体视觉技术实现目标果实的三维位置深度信息。Bulanon 等^[36]利用激光测距传感器实现对苹果目标的三维定位。

目标果实的采摘工作是实现自动化的前提,科学技术的飞速发展使得定位技术的改进也日益深入,不少学者已经实现了二维定位到三维定位技术的突破,使得定位精度更加准确。但是在三维空间中距目标果实的距离仍然存在误差,这将会导致定位精度的下降,不能较好地应用于农业采摘。

3 视觉系统目前需要解决的问题

随着智慧农业的提出,对于农业机器人,不少科研工作者已进入研究阶段,而其重要组成部分之一视觉系统的研究则更为深入。能让机器人像人一样快速识别树上的果实,以及让机器人知道树上果实的准确位置成为视觉系统研究的重中之重。国内外许多研究者在这一方面也取得了不少的成果,但是由于视觉系统仍然存在一些问题,目前的工作大多停留在实验室环境中。

目前的视觉系统还需要解决以下问题:

(1) 识别和定位的精度有待提高。

生长在自然环境中的果实,不可避免地会受到外界环境的影响,树枝、树叶、天空、果实等背景成为其识别率低下的主要原因,苹果生长状态不均匀也会导致机器人不能正确识别出目标果实。

(2) 识别和定位的实时性有待提高。

现有的识别和定位算法大多集好几种算法于一身,增加了算法的复杂度,而基础的算法又不能较好地完成果实目标的识别与定位,因此需要在算法的有效

性上进行改进,提高算法的计算效率,也可引入硬件设备,使得硬件与软件相结合^[37],为果实的实时采摘提供基础条件。以上研究结果表明,大多数算法对于单果的识别效率比较高,但是自然环境并非受人为干扰,更需要在多果的情况下研究更合适的算法,也可将硬件技术应用其中以提高效率。

4 结束语

苹果作为国内第一大经济水果,其产量较大,并且需要在一定的时间内完成采摘工作,因此,实现苹果的自动化采摘必不可少。随着智慧农业的引入,越来越多的采摘机器人必将会应用到农业生产作业中。而国内外的采摘机器人因其现有的研究技术还不够成熟,目前只是处于研究阶段,并且研究一个完整的机器人所需的费用较大,在视觉系统这方面工作还不太成熟,要能够快速地将其应用到农业中还需一段时间。机器人要能够处理复杂的自然环境,视觉系统的识别和定位精度还需进一步改进,采摘机器人的其他组成部分也需更进一步研究。随着智能信息化的突飞猛进,对采摘机器人的研究不仅具有巨大的使用价值,更具有深远的理论意义。

参考文献:

- [1] 马彦图. 云计算技术在农业信息共享服务平台中的应用[J]. 西安工程大学学报, 2016, 30(4): 494-497.
- [2] 黄雅玉, 鄂旭, 杨芳, 等. 水产养殖物联网系统集成与安全预警研究[J]. 计算机技术与发展, 2017, 27(9): 201-204.
- [3] 付中军. 果蔬采摘机器人视觉技术研究及系统构建[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [4] SCHERTZ C E, BROWN G K. Basic considerations in mechanizing citrus harvest[J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(3): 343-346.
- [5] 汤修映, 张铁中. 果蔬收获机器人研究综述[J]. 机器人, 2005, 27(1): 90-96.
- [6] KATAOKA T, MURAKAMI A, BULANON D M, et al. Estimating apple fruit locations for manipulation by apple harvesting robot[C]//Proceedings of the 2nd IFAC/CIGR international workshop on IFAC bio-robotics, information technology and intelligent control for bio-production systems. [s. l.]: [s. n.], 2000.
- [7] 何蓓, 刘刚. 果树采摘机器人研究综述[C]//中国农业工程学会会议论文集. 出版地不详: 出版者不详, 2007: 148-152.
- [8] 杨文亮. 苹果采摘机器人机械手结构设计与分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [9] 司永胜, 乔军, 刘刚, 等. 苹果采摘机器人果实识别与定位方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 148-153.
- [10] 赵庆波. 果树采摘机器人控制与避障技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [11] 顾宝兴, 姬长英, 王海青, 等. 智能移动水果采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 153-160.
- [12] 吕继东, 赵德安, 姬伟. 苹果采摘机器人目标果实快速跟踪识别方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 65-72.
- [13] WANG Dandan, SONG Huaibo, YU Xiuli, et al. An improved contour symmetry axes extraction algorithm and its application in the location of picking points of apples[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(1): e02-005, 13.
- [14] 付鹏. 基于机器视觉的苹果检测与识别关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [15] LINKER R, COHEN O, NAOR A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 81: 45-57.
- [16] XU Liming, LV Jidong. Recognition method for apple fruit based on SUSAN and PCNN[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(6): 7205-7219.
- [17] 王津京. 基于支持向量机苹果采摘机器人视觉系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.
- [18] 李大华, 赵相飞, 许亮, 等. 基于纹理特征与 HSI 空间的苹果识别与标定[J]. 图学学报, 2016, 37(5): 688-693.
- [19] ZHAO J, TOW J, KATUPITIYA J. On-tree fruit recognition using texture properties and color data[C]//IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Edmonton, Alta, Canada: IEEE, 2005: 263-268.
- [20] 宋怀波, 屈卫锋, 王丹丹, 等. 基于光照无关图理论的苹果表面阴影去除方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 168-176.
- [21] 麦春燕, 郑立华, 肖昌一, 等. 自然光照条件下苹果识别方法对比研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(11): 43-50.
- [22] 钱建平, 杨信延, 吴晓明, 等. 自然场景下基于混合颜色空间的成熟期苹果识别方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 137-142.
- [23] 宋怀波, 张卫园, 张欣欣, 等. 基于模糊集理论的苹果表面阴影去除方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 135-141.
- [24] 贾伟宽, 赵德安, 刘晓洋, 等. 机器人采摘苹果果实的 K-means 和 GA-RBF-LMS 神经网络识别[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 175-183.
- [25] 宋怀波, 何东健, 潘景朋. 基于凸壳理论的遮挡苹果目标识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 174-180.
- [26] WANG Dandan, SONG Huaibo, TIE Zhihui, et al. Recognition and localization of occluded apples using K-means clustering algorithm and convex hull theory: a comparison[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75(6): 3177-3198.

(下转第 146 页)

5 结束语

针对树状结构物体,由于 Kinect 深度相机测量的深度数据存在大量的噪声与数据的丢失问题,文中提出一种彩色图像优化深度数据的方法,能够解决边界的噪声问题,同时对枝干连接处丢失的数据进行修复,提高数据的完整性。

由于树状结构形状相似,应用传统的方法提取特征困难,文中提出将边界点作为特征点,使用曲率等属性信息进行特征点匹配,提高了粗配准的精度,进而提高精确配准精度。但是该算法运行时间较长,后续研究将集中在提高重建的时间效率上,应用 GPU 的并行运算来提高重建的速度。

参考文献:

- [1] MARTIN W N, AGGARWAL J K. Volumetric descriptions of objects from multiple views[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(2): 150-158.
- [2] AKIMOTO T, SUENAGA Y, WALLACE R S. Automatic creation of 3D facial models[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1993, 13(5): 16-22.
- [3] ADHIKARI B, KARKEE M. 3D reconstruction of apple trees for mechanical pruning[C]//2011 ASABE Annual Meeting. [s. l.]: [s. n.], 2011.
- [4] 于明, 齐菲菲, 于洋, 等. 基于立体视觉的三维重建算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(2): 730-733.
- [5] FLEISHMAN S, DRORI I, COHEN-OR D. Bilateral mesh denoising[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 950-953.
- [6] 曹爽, 岳建平, 马文. 基于特征选择的双边滤波点云去噪算法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43: 351-354.
- [7] 李鹏飞, 吴海娥, 景军锋, 等. 点云模型的噪声分类去噪算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(20): 188-192.
- [8] 何东健, 邵小宁, 王丹, 等. Kinect 获取植物三维点云数据的去噪方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 331-336.
- [9] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [10] 杨现辉, 王惠南. ICP 算法在 3D 点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 235-238.
- [11] 杨红娟, 陈继文, 张运楚, 等. 基于 SIFT 特征的低区分度点云数据匹配[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(3): 498-504.
- [12] 严剑锋, 邓喀中. 基于特征点提取和匹配的点云配准算法[J]. 测绘通报, 2013(9): 62-65.
- [13] 杨小青, 杨秋翔, 杨剑. 基于法向量改进的 ICP 算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(1): 169-173.
- [14] 郑立华, 麦春艳, 廖巍, 等. 基于 Kinect 相机的苹果树三维点云配准[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 9-14.
- [15] 邵小宁. 基于 Kinect 的植物三维点云获取与重建方法研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
- [16] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. Grab Cut: interactive foreground extraction using iterated graph cuts[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 309-314.
- [17] 李诗锐, 李琪, 李海洋, 等. 基于 Kinect v2 的实时精确三维重建系统[J]. 软件学报, 2016, 27(10): 2519-2529.
- [18] LEE K H, WOO H, SUK T. Point data reduction using 3D grids[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(3): 201-210.
- [19] 李宏利, 何东健. 图像中被遮挡苹果的还原及定位技术研究[J]. 农机化研究, 2013(9): 20-23.
- [20] 张传栋, 徐汉飞, 陈弘毅, 等. 基于超红图像与轮廓曲率的苹果目标识别与定位方法研究[J]. 软件, 2015, 36(5): 30-35.
- [21] 吴庆岗, 张卫国, 常化文, 等. 基于梯度 Hough 变换的遮挡苹果目标定位[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(6): 1009-1016.
- [22] BULANON D M, KATAOKA T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International: The CIGR E-journal, 2010, 12(1): 203-210.
- [23] 朱高中. 基于 DSP 蔬菜大棚环境远程监测系统的研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(8): 187-190.
- [24] 孙飒爽, 吴倩, 谭建昌, 等. 枝条遮挡下苹果目标识别与重建方法的研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(11): 138-146.
- [25] 王丹丹. 重叠及遮挡影响下的苹果目标识别与定位方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [26] 徐越, 李盈慧, 宋怀波, 等. 基于 Snake 模型与角点检测的双果重叠苹果目标分割方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 196-203.
- [27] 赵德安, 沈甜, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人快速跟踪识别重叠果实[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 22-28.
- [28] 沈甜. 苹果采摘机器人重叠果实快速动态识别及定位研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [29] 胡婵莉, 赵德安, 赵宇艳, 等. 基于极值的重叠苹果识别方法研究[J]. 农机化研究, 2016(3): 42-46.

(上接第 141 页)

- [27] 孙飒爽, 吴倩, 谭建昌, 等. 枝条遮挡下苹果目标识别与重建方法的研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(11): 138-146.
- [28] 王丹丹. 重叠及遮挡影响下的苹果目标识别与定位方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [29] 徐越, 李盈慧, 宋怀波, 等. 基于 Snake 模型与角点检测的双果重叠苹果目标分割方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 196-203.
- [30] 赵德安, 沈甜, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人快速跟踪识别重叠果实[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 22-28.
- [31] 沈甜. 苹果采摘机器人重叠果实快速动态识别及定位研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [32] 胡婵莉, 赵德安, 赵宇艳, 等. 基于极值的重叠苹果识别方法研究[J]. 农机化研究, 2016(3): 42-46.

- [33] 李宏利, 何东健. 图像中被遮挡苹果的还原及定位技术研究[J]. 农机化研究, 2013(9): 20-23.
- [34] 张传栋, 徐汉飞, 陈弘毅, 等. 基于超红图像与轮廓曲率的苹果目标识别与定位方法研究[J]. 软件, 2015, 36(5): 30-35.
- [35] 吴庆岗, 张卫国, 常化文, 等. 基于梯度 Hough 变换的遮挡苹果目标定位[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(6): 1009-1016.
- [36] BULANON D M, KATAOKA T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International: The CIGR E-journal, 2010, 12(1): 203-210.
- [37] 朱高中. 基于 DSP 蔬菜大棚环境远程监测系统的研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(8): 187-190.