

苹果采摘机器人视觉系统研究进展

王丹丹, 宋怀波, 何东健[※]

(西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 视觉系统是苹果采摘机器人最重要的组成部分之一, 它在一定程度上决定了苹果采摘机器人完成采摘任务的质量及速度。为明确苹果采摘机器人视觉系统所面临的挑战及未来研究方向, 该文首先对世界各国现有苹果采摘机器人的研究情况从视觉传感器类型、视觉系统硬件组成、采摘成功率及作业时间等方面进行了概述, 然后分别对现有苹果采摘机器人视觉系统中苹果图像分割方法、受着色度、光照、表面阴影、振荡、重叠及遮挡等影响下的苹果目标的识别与定位方法、苹果采摘机器人视觉系统对枝干等障碍物的识别方法以及视觉系统中双目视觉技术立体匹配问题进行了综述, 进一步分析了苹果采摘机器人视觉系统中存在的问题, 指出视觉系统结构的优化、视觉系统中智能算法的优化、提高视觉系统的实时性、振荡苹果目标的识别与定位、视觉系统受振动影响时苹果目标的识别与定位及提高视觉系统的性价比等方面将成为未来重点研究方向, 为深入研究苹果采摘机器人视觉系统提供参考。

关键词: 机器人; 图像识别; 机械化; 苹果; 果实识别; 目标定位; 视觉系统

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.008

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-10-0059-12

王丹丹, 宋怀波, 何东健. 苹果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 59-69.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.008 http://www.tcsae.org

Wang Dandan, Song Huaibo, He Dongjian. Research advance on vision system of apple picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 59-69. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.008 http://www.tcsae.org

0 引言

苹果是中国第一大经济水果, 也是中国为数不多的几种具有国际竞争力的果品之一。据统计, 2015 年中国苹果种植面积达 233 万 hm^2 , 总产量约 4 000 万 t, 约占世界苹果总产量的 55%。在整个苹果生产作业中, 成熟果实的及时、无损、高效采收是关键, 直接影响苹果的储藏、运输、加工以及销售等后续环节^[1], 然而由于采摘作业进行时所处生态环境的复杂性, 导致迄今尚无可用于生产实际的苹果采摘智能装备。目前中国苹果采摘依然依靠人工作业, 随着中国城镇化的快速发展, 农业从业人口急剧减少, 人工成本大大增加, 给苹果产业的快速发展带来了不利影响。实现苹果的自动化采摘, 对于解决苹果产业中的劳动力不足、人工劳动强度大、生产成本低、生产效率低等问题以及保证苹果的适时采收、保证采摘品质、提高苹果的市场竞争力等方面均具有重要的意义^[2-6]。

视觉系统是苹果采摘机器人的重要组成部分^[7], 机器人进行采摘任务过程中最关键环节之一是苹果目标的识

别与定位。因此, 苹果采摘机器人必须解决苹果目标的快速识别和准确定位两大难题。该文在论述苹果采摘机器人视觉系统的基础上, 重点对视觉系统中苹果图像分割及苹果目标的识别与定位方法进行总结, 分析了视觉系统中存在的问题, 并指出苹果采摘机器人视觉系统未来重点研究方向。

1 苹果采摘机器人研究现状

苹果采摘机器人一般由移动机构、机械手、控制系统、视觉系统、末端执行器等组成, 主要用于采摘成熟苹果。图 1 为 Zhao 等^[8]设计的苹果采摘机器人, 主要由机械手、末端执行器、视觉系统及由工业计算机和交流伺服电机组成的控制系统等构成, 其视觉传感器和光电位置传感器安装于末端执行器上。部分国家开发的苹果采摘机器人现状如表 1 所示。



图 1 苹果采摘机器人

Fig.1 Apple picking robot

苹果采摘机器人是集机械、电子、信息、智能技术、计算机科学、农业和生物等学科技术于一体的交叉科

收稿日期: 2016-10-09 修订日期: 2017-05-12

基金项目: 陕西省自然科学基金资助 (2014JQ3094); 陕西省农业科技创新与攻关项目 (2016NY-157); 中央高校基本科研业务经费 (2452016077)。

作者简介: 王丹丹, 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士生, 主要从事农业智能化检测方面的研究。杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100。

E-mail: wdd_app@163.com

※通信作者: 何东健, 男, 陕西汉中, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化检测与技术研究。杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100。

Email: hdj168@nwsuaf.edu.cn

学^[1], 部分学者专门针对苹果采摘机器人的各组成部分进行了研究, 如采摘机器人的末端执行器、机械手、视觉系统等。苹果采摘机器人进行采摘作业时, 首先要利用其视觉系统获取苹果目标的数字化图像, 然后将图像中苹果目标与枝、叶、土壤、天空等背景区域分开, 并对

苹果目标的颜色、纹理、形状等特征进行分析, 在识别出苹果目标后确定果实在机器人坐标系中的位置, 然后由机器人驱动其机械手及末端执行器进行采摘。由此可见, 采摘机器人的首要任务是利用视觉系统进行成熟苹果目标的识别与定位。

表 1 部分国家开发苹果采摘机器人现状
Table 1 Current situation of apple picking robot

国家 Country	视觉传感器类型 Type of vision sensor	视觉系统硬件构成 Hardware of vision system	采摘成功率 Success rate in detaching apple/%	作业时间 Run time	备注 Comment
美国 ^[9]	CMOS	1 个 Sony DCR-PC7 摄像机和 PC 机	95.0	—	果园试验阶段
比利时 ^[10]	CCD 与 CMOS 组合	1 个 UI2230-C uEye 摄像机和 PC 机	80.0	8.0~10.0 s/个	果园试验阶段
美国 ^[11]	CCD	1 个摄像机、USB 帧采集装置和 PC 机	>90.0	7.1s/个	果园试验阶段
中国 ^[8]	CCD	1 个摄像机和工业计算机	77.0	15.0s/个	果园试验阶段
中国 ^[12]	CCD	1 个双目摄像机和工业计算机	86.9	9.5s/个	果园试验阶段
中国 ^[13]	CCD	1 个 F-201 B/C 摄像机、1 个 Bumblebee2 BB2-08S2C 摄像机和工业计算机	—	6.6s/个	实验室试验阶段
中国 ^[14]	CCD	2 个摄像机、视频采集卡和 PC 机	—	—	实验室试验阶段
美国 ^[15]	CCD	1 个摄像机和 PC 机	97.9	—	果园试验阶段
美国 ^[16]	CCD	1 个 2 维相机、1 个 3 维相机和 PC 机	84.0	6.1s	果园试验阶段

注: CCD 为电荷耦合元件, CMOS 为互补金属氧化物半导体器件, “—”表示没有试验数据。
Note: CCD is charge-coupled device, CMOS is complementary metal oxide semiconductor, “—” refers to that there had no experimental data.

2 苹果采摘机器人中的视觉系统

苹果采摘机器人视觉系统一般由图像获取部分、图像处理分析部分以及输出或显示部分组成, 其主要任务是获取苹果的数字化图像、对获取的图像进行图像处理、苹果目标的识别与定位及枝干等障碍物的识别与定位等。

苹果采摘机器人的机器视觉技术可以分为一维成像视觉技术、二维成像视觉技术和三维成像视觉技术^[17]。视觉系统中根据所使用图像传感器个数的不同可分为单目视觉技术、双目视觉技术和多目视觉技术^[18]。视觉检测技术往往结合人工光源或光学滤波器一起使用, 以避免自然光在果实目标表面产生阴影而导致的目标识别不准确等问题。

2.1 苹果采摘机器人中视觉系统硬件研究

自 1968 年美国学者 Schertz 和 Brown^[19]将机器视觉引入到果实目标的识别以来, 众多学者开展了基于机器视觉技术的果蔬目标识别与定位研究。1977 年, Parrish^[20]建立了第一个用于识别苹果的视觉系统, 由此开启了各种识别方法的研究及系统的建立^[21]。

现有苹果采摘机器人视觉系统一般由摄像机及 PC 机构成。Bulanon 等^[22]开发了一套采摘红富士苹果的实时视觉系统, 该视觉系统中使用一个彩色 CCD 摄像机拍摄苹果图像, 并利用 PC 进行图像处理。Zhao 等^[8]、Baeten 等^[9]、Kennedy^[23]、吕继东^[24]同样利用一个摄像机及 PC 机构建了苹果采摘机器人的单目视觉系统。Mao 等^[25]利用 2 个佳能数码相机和 PC 机设计了应用于苹果采摘机器人的双目立体视觉系统, 该系统比常用的数字视频视觉系统具有更高的分辨率及更好的性能。Si 等^[26]、高端等^[27]及 Wang 等^[28]都相继开发了基于双目立体视觉技术的苹

果采摘机器人视觉系统。

为了精确地获得图像中目标的位置, 一些学者在使用摄像机获取目标图像的同时采集其深度图像。王辉等^[29]利用单目、双目视觉组合传感器构建了苹果采摘机器人的视觉系统, 其中单目视觉传感器使用 CCD 摄像头, 双目视觉传感器由彩色视觉传感器和红外视觉传感器组成, 红外视觉传感器采集与彩色图像对应的深度图像。Nguyen 等^[30]利用 CMOS 摄像头、红外图像传感器和用于深度测量的红外光源构建了苹果采摘机器人视觉系统; Silwal 等^[31]设计了安装在拖拉机上的用于获得苹果图像的隧道结构传感器平台, 位于平台纵向中心的 CCD 相机采集的图像可覆盖整个植株, 平台上还装有遮光装置及白色 LED 灯。周薇等^[32]利用彩色相机和深度相机设计了苹果采摘机器人视觉系统, 该系统中利用多源传感器信息融合与互补方法, 实现多目标图像的精确配准。

除了机器视觉系统, 激光视觉系统、三维视觉系统以及机器视觉与其它视觉相结合的视觉系统也用于苹果识别定位。Bulanon 等^[11]设计了机器人和激光结合的视觉系统, 机器视觉系统主要完成苹果二维坐标获取任务, 激光视觉系统用来测量执行末端与苹果目标的距离。Silwal 等^[16]利用二维相机和三维相机实现了苹果目标的识别与定位。刘兆祥等^[33]设计了由信号发射单元、信号接收单元、垂直扫描电机、水平扫描电机和 PC 机组成的三维视觉传感器, 通过利用果树对激光的反射差异实现苹果目标的识别, 并利用三角测量原理实现果实定位。冯娟等^[34]构建了由数据采集、运动控制及数据处理等单元构成的苹果采摘机器人激光视觉系统, 该系统具有对目标的定位不受光线变化的影响等优点。

上述苹果采摘机器人视觉系统大多由 CCD(或 CMOS) 摄像机构成, 然而该种视觉系统易受光照条件的影响。

此外, 对于某些品种的苹果, 如澳洲青苹, 由于其颜色与背景中叶片颜色相近, 利用该视觉系统识别与定位苹果目标存在一定的困难。对于完成苹果目标的三维定位, 利用单个摄像机定位苹果目标, 一般摄像机安装在末端执行器上, 因此定位过程中要不断更新距离信息, 这将影响机器人的采摘效率; 利用双目视觉技术定位, 相机的标定及匹配较为复杂, 尤其是在遮挡场景下, 准确性略低, 在室外环境下存在的问题; 利用激光测距传感器定位, 成本较高且系统的响应较慢; 利用三维相机定位相对准确, 但其成本较高。因此, 综合利用多种传感器有望成为视觉系统的发展方向。

2.2 苹果目标的识别

2.2.1 苹果目标的分割与识别方法

采摘机器人执行采摘任务首先要对获得的苹果图像进行分割识别, 以提取图像中的苹果目标。目前常用的分割识别算法主要有阈值分割法、色差法、*K-means* 聚类算法、区域生长法、人工神经网络 (ANN)、支持向量机 (SVM)、*K* 最近邻法 (KNN) 以及多种算法结合的方法等, 其中阈值分割法一般要配合其它方法一起使用, 为了更准确地识别出图像中的苹果目标, 有时在使用这些算法的同时会结合图像的纹理、形状属性等特征。徐越等^[35]利用 1.5R-G 超红图像进行阈值分割提取图像中的苹果目标。Jiang 等^[36]利用 2R-G-B 色差法和自适应阈值分割算法进行苹果图像的分割。Bulanon 等^[37]先对苹果图像利用红色差进行增强处理, 然后利用阈值分割算法提取苹果目标, 其成功识别率为 88.0%, 然而在逆光条件下误识别率高达 18.0%。Lü 等^[38]利用动态阈值分割算法提取图像中的苹果目标。Wang 等^[39]对原始图像进行形态学开运算处理后, 将图像从 RGB (Red, Green and Blue) 转换到 Lab 颜色空间, 然后用 *K-means* 聚类算法分割图像提取苹果目标。Linker 等^[40]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, 在阳光直射条件下, 可准确识别 85.0% 的绿色苹果目标, 在非阳光直射条件下, 可准确识别 95.0% 的绿色苹果目标。Lak 等^[41]利用苹果的颜色和形状属性识别图像中的苹果目标。司永胜等^[42]综合使用了 *K-means* 算法、R-B 颜色特征和纹理特征进行绿色苹果目标的识别。Bulanon^[43]设计了具有 2 个输入节点和一个输出节点的 ANN 进行苹果目标的识别。Ji 等^[44]研究了基于区域生长和颜色特征的苹果图像分割方法, 在提取图像的颜色特征和形状特征的基础上, 提出基于 SVM 的苹果识别分类算法。Qu 等^[45]提出结合视觉注意机制和种子点生长规律的图像分割方法, 实现了苹果目标的准确提取。Tabb 等^[46]利用全局混合高斯 (global mixture of Gaussians) 算法进行苹果目标的分割识别。Linker 等^[47]利用黑暗中凸状苹果在光源照射下表面会产生亮点的原理进行苹果目标的识别, 可识别出不同颜色的苹果目标, 但无法识别出整个苹果目标区域。为了识别绿色的苹果目标, Levi 等^[48]综合利用了高光光谱成像技术、主成分分析技术 (PCA)、同质对象的提取与分类 (extraction and classification of homogenous objects)、形态学开运算、分水岭算法以及 Blob 分析等算

法。王福杰等^[49]在对图像 R、G、B 分量进行算术运算后, 利用形态学开运算、线性空间滤波以及自动阈值分割算法提取苹果目标。Gongal 等^[50]首先将图像在 HSI (Hue, Saturation and Intensity) 颜色空间进行直方图均衡化处理, 然后转换至 RGB 颜色空间并进行 R-G-B 及 Otsu 阈值分割处理, 最后结合圆形 Hough 变换及 Blob 分析识别图像中的苹果目标。

上述方法虽然能够完成苹果图像的分割, 但准确性仍有待提高, 尤其在复杂的自然果园环境中, 光线变化、果实目标的重叠及被遮挡等因素都严重地影响了果实目标的识别, 因此, 要在改进苹果采摘机器人硬件设备的同时, 进一步完善识别分割算法的性能。

2.2.2 不同影响条件下苹果目标的分割识别

进行采摘作业时, 采摘机器人视觉系统对果实目标的识别受到诸多因素的影响, 主要包括果实本身着色度的影响、自然光线强弱的影响、苹果目标表面阴影部分的影响、振荡的影响及枝、叶、果实等遮挡的影响。为消除上述影响并准确识别苹果目标, 众多学者对各种影响下苹果目标的识别做了大量的研究^[51-58]。

1) 着色度、光照、表面阴影影响下的识别方法

对于成熟后呈红色的苹果, 自然光照不均可能导致成熟苹果目标表面着色度的变化, 长期未被阳光照射的部分颜色偏绿, 其颜色与背景颜色接近 (图 2), 将影响苹果目标的识别。Zhao 等^[59]为了解决树上红色、绿色苹果目标识别困难问题, 首先利用苹果目标的颜色特征提取 $3R-(G+B)$ 图像, 然后结合图像中苹果目标的纹理识别苹果目标。Rakun 等^[60]提出了结合果实颜色、3D 形状属性和纹理的绿色苹果目标的识别方法。基于颜色特征, Zhou 等^[61]用 $R-B>40$ 识别偏绿的苹果目标, 用 $R-G>0$ 识别红色苹果。对于红色苹果果实, 由于绿色部分不能被识别为苹果目标, 一般用错误分割率来评价识别算法的性能。目前, 此类研究相对较少。

由于天气状况以及太阳高度的影响, 果实表面光照可能存在不均匀的情况 (图 3), 这将导致视觉系统对果实区域光线较暗的部分识别困难。为解决这一问题, Huang 等^[62]首先将图像从 RGB 颜色空间转换至 Lab 颜色空间, 利用基于模糊-2 划分熵算法分割灰度图像以区分苹果目标和背景, 然后利用穷尽搜索法寻找最优阈值, 并用该阈值进行图像分割, 该算法不受光照变化的影响。屠珺等^[63]利用图像的光照无关图提取图像中的苹果目标, 该方法能够有效地消除光照变化的影响。钱建平^[64]提出了基于 R/B 值 (RGB) 和 V 值 (HSV) 的混合颜色空间成熟苹果目标的识别方法, 该算法对于不同光照条件下苹果目标的识别成功率均较高。刘立群等^[65]提出了基于混合蛙跳算法的苹果图像阈值分割算法, 该算法对于较强光、强光、弱光和较弱光 4 种光照条件下的花牛苹果图像均能取得较好的分割结果。冯娟等^[66]设计了应用于苹果采摘机器人的激光视觉系统, 利用该视觉系统扫描果树获得的图像不受光线变化的影响。马晓丹等^[67]利用量子遗传算法与模糊推理神经网络相结合的算法来识别苹果果实, 该算法对于自然光照引起表面颜色不均

的苹果果实有较高的识别正确率。

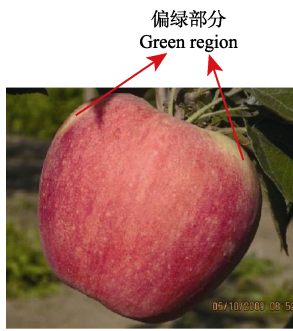


图2 部分偏绿的苹果图像
Fig.2 Partial green apple image



图3 光照不均匀的苹果图像
Fig.3 Apple image uneven illumination

由于受光源、枝、叶等的影响,苹果表面往往会有阴影的存在(图4),阴影作为一种特殊的噪声,增加了目标识别的不确定性。司永胜等^[68]结合使用归一化的红绿色差法和相应的匹配策略,较好地减小了苹果表面阴影对苹果目标定位的影响,实现了双目视觉下果实目标的精确定位。宋怀波等^[69]提出一种基于模糊集理论的苹果表面阴影去除方法,该方法将含阴影的图像作为一个模糊矩阵,并对图像去模糊化处理以削弱苹果表面阴影对目标分割的影响;宋怀波等^[70]利用光照无关图与红色分量图像相加的方法消除阴影,该方法能够有效去除图像中苹果表面的阴影。为了减小阴影对苹果目标识别的影响,赵德安等^[71]采用2盏白炽灯从不同角度照明的方式削弱图像中的阴影。



图4 表面有阴影的苹果图像
Fig.4 Apple image with shadows on surface

2) 振荡果实的识别

苹果树生长在非结构化的自然环境中,风力或采摘中果实与果树分离均会引起果树振动,导致要采摘的目标苹果振荡。为解决这一问题,吕继东等^[72]首先对连续采集的动态图像进行振荡苹果目标的识别及其二维质心坐标的提取,在求取果实的振荡周期及深度距离后,利用采摘机器人的执行末端及时采摘振荡果实;吕继东等^[73]提出了振荡苹果目标的识别算法,在确定出采摘目标果实作为后续匹配识别的模板后,对去均值归一化积相关匹配识别算法进行加速优化,同时对旋转无关匹配识别算法进行抗旋转改进,进而完成振荡苹果目标的识别;李国利等^[74]在对采集的振荡苹果树图像序列进行图像分割及形态学处理后,灰度填充图像果实区域,叠加其结果并求取振荡果实图像运动区域二维平衡位置坐标,然后利用机械手与超声传感器配合完成果实目标的定位及采摘。

3) 重叠及遮挡果实的识别

在影响苹果目标识别与定位的众多因素中,苹果目标被遮挡的影响最为严重。苹果目标被遮挡影响可大致分为4种情况:果实重叠遮挡、苹果被枝条遮挡、被叶片遮挡和枝叶果混合遮挡等。

重叠遮挡果实存在串联重叠(图5a)、并联重叠(图5b)、混联重叠(图5c)等情况,导致其识别难度很大。对于重叠果实,最重要的是进行重叠目标的分割。枝条遮挡苹果目标(图6a)的识别难点在于苹果目标被枝条分成了几个独立部分的情况,可能导致一个果实被误识别为几个果实。叶片遮挡影响下(图6b),一般能够识别出果实的部分轮廓,可利用苹果目标的对称性来解决,故叶片遮挡情况重点研究其定位方法。

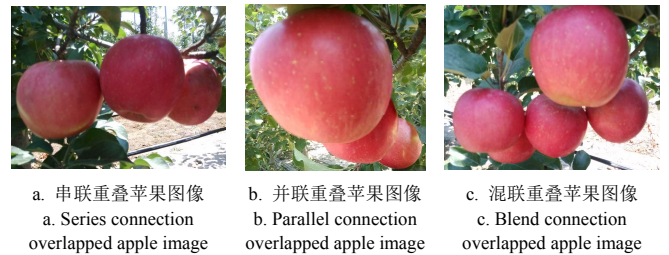


图5 重叠苹果图像
Fig.5 Overlapped apple images



a. 枝条遮挡苹果图像
a. Apple image blocked by branches



b. 叶片遮挡苹果图像
b. Apple image blocked by leaves

图6 遮挡的苹果图像
Fig.6 Occluded apple images

① 重叠苹果目标的识别

基于圆拟合的算法常被用来识别分割重叠苹果目标,如司永胜等^[75]利用基于遗传算法的圆拟合分离重叠苹果目标;马晓丹等^[67]也利用该方法进行重叠苹果目标的分割。

现有重叠苹果目标的分割方法中最直接的是通过寻找到苹果目标重叠部分的有效凹点,利用两凹点连线分割重叠苹果目标,如Feng等^[76]首先提取苹果目标区域的轮廓获得链码信息,然后根据链码差异的变化规律,采用局部最优原则找到有效凹点,并利用有效凹点连线将重叠苹果目标分离;宋怀波等^[77]利用基于凸壳的方法分割重叠苹果目标,该算法中同样利用2个有效凹点的连线分割重叠苹果目标,并利用Spline插值算法对重叠被遮挡苹果目标进行轮廓重建;徐越等^[35]利用角点检测算法寻找重叠苹果目标的真实分割点,然后用真实分割点连线实现重叠苹果目标的分割。

为了保留重叠部分未被遮挡苹果目标的轮廓信息,彭辉等^[78]提出了基于视差图像的重叠果实分割算法以解决重叠果实的分割问题;冯娟等^[79]设计了一种基于深度

图像统计特性的逐层图像分割算法, 该算法能够较为准确地识别重叠苹果目标; 王丹丹等^[80]结合利用 *K*-means 聚类算法和 Ncut 谱聚类算法进行重叠苹果目标的分割, 该算法的最大优点在于它能够保留图像中未被遮挡苹果目标的全部轮廓信息, 但仅完成了 2 果重叠苹果目标的分割。赵德安等^[81]提出了快速跟踪识别重叠苹果果实的方法, 该方法某种程度上解决了运动状态下重叠果实的识别问题。

② 遮挡苹果目标的识别

为解决树叶、枝干等遮挡果实的识别, Wachs 等^[82]提出了一种利用红外图像和彩色图像相结合的被遮挡绿色苹果目标的识别定位方法, 该方法首先根据苹果与枝叶温度不同的特性, 在红外图像上寻找苹果目标的位置, 将该结果与彩色图像融合可获得大量苹果目标的信息, 然后将 Haar 特征分别作用于彩色图像和红外图像, 进而对苹果目标进行定位。Silwal 等^[31]使用 Blob 分析识别被遮挡的苹果目标, 对于一个苹果目标被分为多个部分的情况, 使用基于欧式距离原则的聚类算法将其融合, 以提取该苹果目标。Niu 等^[83]在提取遮挡苹果目标的真实轮廓段后, 用 Shape Context 算法进行轮廓段匹配, 提取苹果目标的对称轴, 进而定位遮挡的苹果目标。苟一等^[84]首先建立三层 BP 神经网络进行苹果图像的分割, 然后对被遮挡苹果进行圆拟合, 进而进行目标的定位。为了恢复被枝叶遮挡部分的苹果信息, 陈玉等^[85]通过计算遮挡因子确定枝叶对苹果的遮挡区域, 并利用格子波尔兹曼方法求解各向异性扩散方程, 估计丢失信息, 有效地实现了苹果目标遮挡区域的修复。宋怀波等^[86]在对苹果图像进行 *K*-means 分割后, 提取被遮挡苹果目标的轮廓, 并将其结合凸壳理论提取苹果目标的真实轮廓, 然后在真实轮廓上随机选取 3 个点, 以此确定 1 个圆, 进而定位遮挡的苹果目标, Wang 等^[87]对该方法中候选点选取不同造成定位结果差异较大的问题进行改进, 即随机选取候选点 100 次, 得到 100 个定位圆, 去除过大和过小的圆, 以剩余圆的圆心坐标和半径定位苹果目标, 提高了定位精度。为了对遮挡苹果目标进行精确定位, 李宏利等^[88]提出了基于圆曲率的遮挡苹果目标定位方法, 该方法中综合运用了色差分割算法、形态学处理、轮廓提取法以及最小二乘圆拟合算法, 最终利用拟合圆的圆心坐标和半径定位遮挡苹果目标。贾伟宽等^[89]使用 *K*-means 聚类分割和神经网络相结合的算法进行苹果目标的识别, 该算法可实现遮挡苹果目标较高精度的识别。Lü 等^[38]利用边缘检测和随机 Hough 变换算法实现了被枝叶严重遮挡的苹果目标的重建和识别, 成功识别率为 86.0%。

上述各种影响下苹果目标的识别, 其识别准确率仍需提高。对于光线变化的影响, 在机器人视觉系统中加入遮光装置及可控光源将成为减弱该影响的潜在发展方向。对于遮挡果实的识别, 除了在园艺上改进苹果的种植模式外, 应充分利用苹果目标未被遮挡部分进行苹果目标的重建。

2.3 苹果采摘机器人视觉系统中目标定位方法

完成苹果目标的识别后, 要进行苹果目标的定位,

目前苹果目标的定位方法主要可归纳为以下几种:

1) 利用苹果目标的质心进行定位。如 Feng 等^[76]完成重叠苹果目标的分割后, 利用质心完成各个苹果目标的二维定位。

2) 对苹果目标的轮廓进行圆拟合, 利用拟合圆的圆心坐标和半径定位, 这种定位方法适用于各种影响下的苹果目标。Xiao 等^[90]提出了基于 BP 神经网络和 Hough 变换的苹果目标定位方法, 该算法首先用 BP 神经网络训练苹果颜色识别模型, 在识别出图像中的苹果目标后, 利用形态学运算提取苹果目标的轮廓, 最后利用 Hough 变换算法确定的圆定位苹果目标, 该算法对于不同光照影响、被枝叶遮挡及重叠苹果目标的二维定位均能取得较好的结果。

3) 利用苹果目标的对称轴进行定位。如 Niu 等^[83]利用提取的苹果目标对称轴定位被枝叶遮挡的苹果目标。谢忠红等^[91]融合使用二阶中心矩法、最短距离法、斜率方差法以及三点一线法寻找苹果目标的果轴以进行苹果生长姿势的识别。王丹丹等^[92]提出了单个无遮挡苹果目标的定位算法, 首先利用基于距离测度的算法平滑苹果目标的轮廓以提高定位精度, 然后利用转动惯量算法提取苹果目标的对称轴, 并以完成苹果目标的二维定位。

4) 利用三维位置坐标定位苹果目标; 利用三维位置定位苹果目标所用方法主要有: ① 利用单个摄像机定位苹果目标; 如 Baeten 等^[10]利用单个相机焦距、图像平面内像素大小及苹果目标中心之间的关系计算相机到果实目标的距离。② 利用双目视觉技术定位苹果目标; 如 Kong 等^[93]提出基于双目立体视觉技术和最小二乘支持向量机的算法识别定位苹果目标, 实现苹果目标的三维定位。③ 利用激光测距传感器进行定位; 如 Bulanon 等^[11]利用激光测距传感器完成对苹果目标的三维定位。④ 利用三维相机定位; 如 Silwal 等^[16]利用三维相机采集图像, 并将采集的三维图像映射到二维彩色图像上, 进而获得苹果的空间位置信息, 完成三维定位。

果实定位不准确主要是由果实分割不准确及果实目标被遮挡引起的, 这 2 种情况可以通过改变苹果的种植模式得到改善。在三维定位中, 不准确的距离测量也会导致果实定位的误差, 因此三维位置传感器的选择对于苹果目标的定位至关重要。

2.4 苹果采摘机器人障碍物的识别

在苹果采摘机器人进行采摘作业时, 利用视觉系统有效地进行树枝干等障碍物的识别, 是采摘机器人避免与障碍物发生碰撞及顺利完成采摘任务的关键。目前一些学者针对该问题进行了研究, 并取得了一批研究成果。

吕继东^[24]对全景苹果图像利用剥离分割方法进行图像分割, 在提取了障碍物的中轴线后, 分别用单目和双目视觉技术实现了树枝和树干等障碍的定位, 该方法对枝干等障碍物的检出率达 95.0%。李莹莹^[94]利用逐层去除绿色区域和成熟苹果区域的剥离分割算法及双目立体视觉技术实现了果树枝干的识别及其深度信息的获取。黄铝文^[95]研究了基于模糊二维熵的阈值分割及后处理方

法进行了行走区域、农艺人员和固定障碍物检测,检测成功率达 96.9%。姬伟等^[96]针对苹果树枝干障碍物视觉识别问题,提出基于对比度受限自适应直方图均衡化的苹果树枝迭代阈值分割方法,该方法对树枝等障碍物的识别成功率达 92.0%。顾玉宛^[97]提出了一种基于 Map Reduce 和属性集依赖度的预测模型并行生成算法,可对机器人避障预测中的决策树生成进行并行处理。

2.5 双目视觉立体匹配

在苹果目标及树枝干等障碍物定位过程中,双目立体视觉技术应用较为广泛,双目视觉技术基于视差原理,从两个不同的视点观察同一物体,获取在不同视角下的两幅图像,通过计算两幅图像对应点间的位置偏差获取物体三维几何信息。因此不同图像中相同点的立体匹配是决定目标定位成功与否的关键环节。

根据匹配基元的不同,立体匹配算法一般可分为 2 类:基于特征的匹配和基于区域的匹配^[98]。Si 等^[26]通过利用基于面积特征和极线的匹配算法实现了苹果目标的定位。吕继东^[24]采用基于极线和保序性约束的特征匹配方法进行立体匹配以定位树枝干等障碍物,该算法对光照变化具有极好的适应能力。丁乙^[99]利用提取的苹果目标的圆心作为特征点进行双目匹配实现苹果目标的定位。王晋^[100]选取果实中心作为双目图像匹配的特征点,采用唯一性和顺序一致性的约束条件完成左右目苹果图像的匹配。张颖^[98]利用基于 SIFT (scale invariant feature transform) 特征描述子的区域立体匹配算法对树枝进行匹配。高瑞等^[26]采用基于 SSD (sum of squared differences) 描述子的灰度区域立体匹配算法准确地获得了苹果目标的空间位置信息。李莹莹^[94]通过对比 SIFT 匹配算法、SUFR (speed up robust features) 算法以及 Harris 算法后,选用 Harris 角点检测匹配算法进行苹果树枝干图像的匹配。

3 现有视觉系统中存在的问题

国内外众多学者对苹果采摘机器人视觉系统进行了研究,并取得了大量的研究成果,但视觉系统仍处于研究阶段,尚不能广泛应用,主要存在以下几方面的问题:

3.1 识别定位算法的准确性与实时性

目前,苹果目标的识别方法主要依据苹果目标的颜色、形状、纹理等特征,但由于苹果生长环境的复杂性,导致采集的图像中存在各种干扰信息和噪声,为了准确地识别出苹果目标,一些算法增加引入的参数,因此算法的复杂度也会相应的提高,现有的算法不能在识别精度、参数的自适应选取以及运行时间 3 者之间取得很好的平衡。此外,自然环境中障碍物的存在具有随机性和复杂性,障碍物的准确识别是采摘机器人避免与障碍物发生碰撞的关键,障碍物的识别与定位的准确性与稳定性尚需进一步提高。

3.2 识别定位算法的有效性

苹果生长的自然环境十分复杂,光照条件的不确定性、生长环境中与果实颜色相近的背景因素、果实被遮挡以及果实重叠均增加了果实目标的识别和定位难度,现有的各种影响下苹果目标识别定位算法实用性、实

时性和算法的稳定性等均亟待提高,尤其对于多个果实重叠、遮挡面积过大及被枝叶遮挡的重叠果实等,其识别与定位精度尚需提高。

3.3 识别定位算法的普遍适用性

现有的果实目标识别算法,大多只针对某种特定情况的苹果目标进行研究,如王丹丹等^[92]完成了单个无遮挡苹果目标的定位,赵德安等^[81]进行了重叠苹果目标的识别,Silwal 等^[31]进行了遮挡苹果目标的识别定位研究等,然而自然环境中,光照不确定、果实重叠和被遮挡等情况是并存的,因此算法的普遍适用性仍需提高。

4 前景与展望

4.1 视觉系统结构优化

为了更好地减少采摘过程中对苹果的损坏,苹果采摘机器人视觉系统对精度要求非常严格。由于苹果采摘机器人的工作环境中存在自然光照变化、图像采集时的顺光逆光、阴天晴天、枝叶等物体在苹果表面形成阴影等情况,造成自然光线下单纯利用视觉系统识别苹果目标比较困难。因此,借鉴医学上的无影灯原理,在视觉系统中加入主动光源和遮光装置有望减少上述情况产生的影响。

4.2 智能算法的优化

苹果采摘机器人视觉系统中现有的枝干等障碍物和苹果目标分割、识别、定位算法的准确性还有待提高,枝干等障碍物及各种天气、不同光照条件以及颜色不均匀、阴影、振荡、重叠、遮挡等影响下的果实目标智能识别定位算法还需要进一步优化。视觉注意机制具有对局部突出的图像特征进行关注的特点^[101],将视觉注意机制应用到苹果图像处理中,可只保留图像中的重要信息(如苹果目标),并进行处理,有望大大提高图像分析处理的效率和准确度。另外,深度学习是建立、模拟人脑进行分析学习的神经网络,模仿人脑的机制来解释图像等数据^[102],深度学习理论为重叠及遮挡影响下苹果目标的识别定位提供了方向。

4.3 视觉系统的实时性

现有苹果采摘机器人视觉系统的实时性略低,苹果采摘机器人的工作效率对整个苹果产业有着至关重要的影响,然而视觉系统的实时性是制约采摘机器人工作效率的重要因素,故提高实时性应为今后的主要研究内容之一。

4.4 振荡苹果目标的识别与定位

采摘机器人在果园进行苹果采摘时,风力或果实的采摘作业都会引起苹果目标的振荡,由于果实目标振荡的随机性与复杂性,导致现有振荡苹果目标的识别与定位算法的准确性与稳定性略低,如何快速、准确地对振荡影响下的苹果目标进行识别与定位亦是今后的主要研究内容。

4.5 视觉系统受振动影响下苹果目标的识别与定位

采摘机器人在果园进行实际采摘作业时,由于果园的地面不平,采摘机器人在行走时,视觉系统往往会受到振动等干扰,目前大多数视觉系统中均用图像处理算

法进行分析,然而在视觉系统受振动影响的情况下,利用采集的图像序列是否能够准确地进行苹果目标的识别与定位尚待进一步研究。

4.6 性能与成本

目前苹果采摘机器人尚未进入实用化阶段,考虑到苹果采摘机器人的最终用户是集约化经营的农户,综合考虑农民的经济实力和苹果产业的经济效益等实际问题,苹果采摘机器人应在满足预期功能的前提下尽可能降低生产成本。随着硬件技术的不断发展,图像采集传感器、深度传感器等组建视觉系统所用硬件设备的性价比逐渐提高,因此可选用价格较低、性能较高的视觉元件组建视觉系统,这样可大大降低构建视觉系统的成本。

从目前国内外苹果采摘机器人的发展现状来看,苹果采摘机器人仍处于研究阶段,要实现苹果采摘机器人的商品化仍需更深入的研究。采摘机器人视觉系统在完成任务的效率、精度以及降低成本等方面需要进一步提高,研究出在复杂生态环境中工作的苹果采摘机器人不仅具有重大的应用价值,而且具有深远的理论意义。

参 考 文 献

- [1] 宋健,张铁中,徐丽明,等. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 158—162.
Song Jian, Zhang Tiezhong, Xu Liming, et al. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAM, 2006, 37(5): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐丽明,张铁中. 果蔬果实收获机器人的研究现状及关键问题和对策[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 38—42.
Xu Liming, Zhang Tiezhong. Present situation of fruit and vegetable harvesting robot and its key problems and measures in application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 38—42. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张铁中,杨丽,陈兵旗,等. 农业机器人技术研究进展[J]. 中国科学: 信息科学(中国科学F辑), 2010, 40(增刊): 71—87.
Zhang Tiezhong, Yang Li, Chen Bingqi, et al. Research progress of agricultural robot technology[J]. Chinese Science: Information Science (F), 2010, 40(S): 71—87. (in Chinese with English abstract)
- [4] 卢军,王贤锋,后德家. 水果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(21): 4705—4708.
Lu Jun, Wang Xianfeng, Hou Dejia. Development of machine vision system for fruit harvesting robots[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(21): 4705—4708. (in Chinese with English abstract)
- [5] Gongal A, Amatya S, Karkee M, et al. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 116(C): 8—19.
- [6] 张俊雄,何芬. 设施农业采摘机器人研究进展[J]. 农业工程技术·温室园艺, 2015, (9): 31—35.
- [7] Wei X, Jia K, Lan J, et al. Automatic method of fruit object extraction under complex agricultural background for vision system of fruit picking robot[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(19): 5684—5689.
- [8] Zhao D A, Lü J D, Ji W, et al. Design and control of an apple harvesting robot[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(2): 112—122.
- [9] Peterson D L, Bennedsen B S, Anger W C, et al. A systems approach to robotic bulk harvesting of apples [J]. Transaction of the ASAE, 1999, 42(4): 871—876.
- [10] Baeten J, Donné K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2007, 42: 531—539.
- [11] 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.
- [12] 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.
Gu Baoxing, Ji Changying, Wang Haiqing, et al. Design and experiment of intelligent mobile fruit picking robot [J]. Transactions of CSAM, 2012, 43(6): 153—160. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张杰,姬长英,顾宝兴,等. 三自由度苹果采摘机器人本体设计[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(23): 251—257.
Zhang Jie, Ji Changying, Gu Baoxing, et al. Body design of 3-DOF apple picking robot[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(23): 251—257. (in Chinese with English abstract)
- [14] Luo H F, Wei G W. System design and implementation of a novel robot for apple harvest[J]. INMATEH- Agricultural Engineering, 2015, 46(2): 85—94.
- [15] Silwal A, Karkee M, Zhang Q. A hierarchical approach of apple identification for robotic harvesting[C]// ASABE International Meeting. 2015.
- [16] Silwal A, Davidson J, Karkee M, et al. Effort towards robotic apple harvesting in Washington State[C]// ASABE International Meeting. 2016.
- [17] 吕宏明,姬长英. 视觉技术在农业采摘机器人中的应用及发展[J]. 江西农业学报, 2008, 20(2): 79—80.
Lü Hongming, Ji Changying. Application and development of visual technology in agricultural picking robot [J]. Jiangxi Agricultural Journal, 2008, 20(2): 79—80. (in Chinese with English abstract)
- [18] 吕学智. 基于双目视觉的爬壁机器人环境检测技术研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
Lü Xuezhì. Research on Wall-climbing Robot's Technique for Environment Detection Based on Binocular Stereo Vision[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [19] Schertz C E, Brown G K. Basic considerations in mechanizing citrus harvest[J]. Transactions of the ASAE, 1968, 11(3): 343—346.
- [20] Parrish E A. Pictorial pattern recognition applied fruit harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20: 822—827.
- [21] D'Esnon A G, Rabatel G, Pellenc R, et al. Magali: A self-propelled robot to pick apples[J]. American Society of Agricultural Engineers, 1987.
- [22] Bulanon D M, Kataoka T, Okamoto H, et al. Development of a real-time machine vision system for the apple harvesting robot[C]// Sice 2004 Conference. IEEE, 2004, 1: 595—598.
- [23] Kennedy T. Optimal Thresholding for the Automatic Recognition of Apple Fruits[C]// 2001 Sacramento, CA July 29-August 1, 2001.
- [24] 吕继东. 苹果采摘机器人视觉测量与避障控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
Lü Jidong. Research on Visual Measurement and Obstacle Avoidance Control of Apple Harvesting Robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [25] Mao W, Ji B, Zhan J, et al. Apple location method for the apple harvesting robot[C]// International Congress on Image and Signal Processing. 2009: 1-5.

- [26] Si Y, Liu G, Feng J. Location of apples in trees using stereoscopic vision[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 112 (C): 68—74.
- [27] 高瑞, 刘刚, 司永胜, 等. 苹果采摘机器人视觉系统研究[C]//纪念中国农业工程学会成立三十周年暨中国农业工程学会 2009 年学术年会. 2009.
- Gao Rui, Liu Gang, Si Yongsheng, et al. Study on the vision system of apple picking robot[C]// Academic Annual Meeting of the Chinese Academy of Agricultural Engineering in 2009, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [28] Wang Q, Nuske S, Bergeman M, et al. Automated crop yield estimation for apple orchards[J]. In *Proc. International Symposium on Experimental Robotics*, 2012.
- [29] 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 CSAM*, 2012, 43(12): 165—170. (in Chinese with English abstract)
- [30] Nguyen T T, Vandevorode K, Kayacan E, et al. Apple detection algorithm for robotic harvesting using a rgb-d camera[C]// *International Conference of Agricultural Engineering*, Zurich, Switzerland. 2014.
- [31] Silwal A, Gongal A, Karkee M. Identification of red apples in field environment with over the row machine vision system[J]. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal*, 2014, 16(4): 66—75.
- [32] 周薇, 冯娟, 刘刚, 等. 苹果采摘机器人中的图像配准技术[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(11): 20—26.
- Zhou Wei, Feng Juan, Liu Gang, et al. Application of image registration technology in apple harvest robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(11): 20—26. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘兆祥, 刘刚, 乔军. 苹果采摘机器人三维视觉传感器设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(2): 171—175.
- Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Qiao Jun. Development of a 3-dimension vision sensor in apple harvesting robot [J]. *Transactions of the CSAM*, 2010, 41(2): 171—175. (in Chinese with English abstract)
- [34] 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 苹果采摘机器人激光视觉系统的构建[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(增刊): 32—37.
- Feng Juan, Liu Gang, Si Yongsheng, et al. Construction of laser vision system for apple harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(S): 32—37. (in Chinese with English abstract)
- [35] 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.
- Xu Yue, Li Yinghui, Song Huaibo, et al. Segmentation method of overlapped double apples based on Snake model and corner detectors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(1): 196—203. (in Chinese with English abstract)
- [36] Jiang G Q, Zhao C J. Apple recognition based on machine vision[C]// *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2012: 1148—1151.
- [37] Bulanon D M, Kataoka T, Ota Y, et al. A segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest[J]. *Biosystems Engineering*, 2003, 83(4): 405—412.
- [38] Lü J D, Zhao D A, Ji W, et al. Recognition of apple fruit in natural environment[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(3): 1354—1362
- [39] Wang D D, Song H B, Yu X L, 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): e0205.
- [40] Linker R, Cohen O, Naor A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2012, 81(1): 45—57.
- [41] Lak M B, Minaei S, Amiriparian J, et al. Apple fruits recognition under natural luminance using machine vision [J]. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2010, 2(6): 325—327.
- [42] 司永胜, 刘刚, 高瑞. 基于 K -均值聚类的绿色苹果识别技术[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 100—104.
- Si Yongsheng, Liu Gang, Gao Rui. Segmentation algorithm for green apples recognition based on K -means algorithm[J]. *Transactions of the CSAM*, 2009, 40(S): 100—104. (in Chinese with English abstract)
- [43] Bulanon D M, Kataoka T, Okamoto H, et al. Determining the 3-D location of the apple fruit during harvest [C]// *Automation Technology for Off-Road Equipment Proceedings of the 2004 Conference*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2004: 91.
- [44] Ji W, Zhao D, Cheng F, et al. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot [J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2012, 38(5): 1186—1195.
- [45] Qu W F, Shang W J, Shao Y H, et al. Segmentation of foreground apple targets by fusing visual attention mechanism and growth rules of seed points[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2015, 13(3).
- [46] Tabb A L, Peterson D L, Park J. Segmentation of apple fruit from video via background modeling[C]// 2006 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006: 1.
- [47] Linker R, Kelman E. Apple detection in nighttime tree images using the geometry of light patches around highlights[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 114: 154—162.
- [48] Levi O. Detection of green apples in hyperspectral images of apple-tree foliage using machine vision[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(6): 2303—2313.
- [49] 王福杰, 饶秀勤, 应义斌. 苹果图像的背景分割与目标提取[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 196—199.
- Wang Fujie, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Background segmentation and object extraction of apples images [J]. *Transactions of the CSAM*, 2013, 44(1): 196—199. (in Chinese with English abstract)
- [50] Gongal A, Silwal A, Amatya S, et al. Apple crop-load estimation with over-the-row machine vision system[J]. *Computers & Electronics in agriculture*, 2016, 120: 26—35.
- [51] Stajanko D, Lakota M, Hočevár M. Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2004, 42(1): 31—42.
- [52] Seng W C, Mirisae S H. A new method for fruits recognition system[C]// *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, 2009: 130—134.
- [53] Wachs J P, Stern H I, Burks T, et al. Low and high-level visual feature-based apple detection from multi-modal images [J]. *Precision Agriculture*, 2010, 11(6): 717—735.
- [54] Sharma D J, Kaur J. Robotic apple harvesting using computer vision based on shape & colour analysis and

- object positioning[J]. Digital Signal Processing, 2014, 6(7).
- [55] Kelman E, Linker R. Vision-based localisation of mature apples in tree images using convexity[J]. Biosystems Engineering, 2014, 118(118): 174—185.
- [56] Jia W K, Zhao D A, Hu C, et al. Fast recognition of overlapping fruit based on maximum optimisation for apple harvesting robot[J]. International Journal of Collaborative Intelligence, 2015, 1(2): 124—136.
- [57] Nguyen T T, Vandevoorde K, Wouters N, et al. Detection of red and bicoloured apples on tree with an RGB-D camera[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 33—44.
- [58] 姬伟, 吕兴琴, 赵德安, 等. 苹果采摘机器人夜间图像边缘保持的Retinex增强算法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 189—196.
- Ji Wei, Lü Xingqin, Zhao De'an, et al. Edge-preserving Retinex enhancement algorithm of night vision image for apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(6): 189—196. (in Chinese with English abstract)
- [59] 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. IEEE, 2005: 263—268.
- [60] Rakun J, Stajnko D, Zazula D. Detecting fruits in natural scenes by using spatial-frequency based texture analysis and multiview geometry[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 76(1): 80—88.
- [61] Zhou R, Damerow L, Sun Y, et al. Using colour features of cv. 'Gala' apple fruits in an orchard in image processing to predict yield[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(5): 568—580.
- [62] Huang L W, He D J. Apple recognition in natural tree canopy based on fuzzy 2-partition entropy[J]. International Journal of Digital Content Technology & Its Applications, 2013, 7(1): 107—115.
- [63] 屠珺, 刘成良, 李彦明, 等. 基于光照无关图的苹果图像识别方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(14): 26—31.
- Tu Jun, Liu Chengliang, Li Yanming, et al. Apple recognition method based on illumination invariant graph [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(14): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [64] 钱建平, 杨信廷, 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.
- Qian Jianping, Yang Xinting, Wu Xiaoming, et al. Mature apple recognition based on hybrid color space in natural scene[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(17): 137—142. (in Chinese with English abstract)
- [65] 刘立群, 火久元, 王联合国. 基于改进混合蛙跳算法的图像阈值分割算法[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(5): 212—215.
- Liu Liqun, Huo Jiuyuan, Wang Lianguo. Image threshold segmentation algorithm based on improved shuffled frog leaping algorithm[J]. Computer Applications and Software, 2015, 32(5): 212—215. (in Chinese with English abstract)
- [66] 冯娟, 刘刚, 司永胜, 等. 基于激光扫描三维图像的树上苹果识别算法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 217—222.
- Feng Juan, Liu Gang, Si Yongsheng, et al. Apple fruit recognition algorithm based on laser scanning 3D image [J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(4): 217—222. (in Chinese with English abstract)
- [67] 马晓丹, 刘刚, 周薇, 等. 基于量子遗传模糊神经网络的苹果果实识别[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 227—232.
- Ma Xiaodan, Liu Gang, Zhou Wei, et al. Apple recognition based on fuzzy neural network and quantum genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(12): 227—232. (in Chinese with English abstract)
- [68] 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.
- Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and location of fruits for apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAM, 2010, 41(9): 148—153. (in Chinese with English abstract)
- [69] 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.
- Song Huaibo, Zhang Weiyuan, Zhang Xinxin, et al. Shadow removal method of apples based on fuzzy set theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 135—141. (in Chinese with English abstract)
- [70] 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.
- Song Huaibo, Qu Weifeng, Wang Dandan, et al. Shadow removal method of apples based on illumination invariant image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(24): 168—176. (in Chinese with English abstract)
- [71] 赵德安, 刘晓洋, 陈玉, 等. 苹果采摘机器人夜间识别方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 15—22.
- Zhao De'an, Liu Xiaoyang, Chen Yu, et al. Image recognition at night for apple picking robot[J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(3): 15—22. (in Chinese with English abstract)
- [72] 吕继东, 赵德安, 姬伟, 等. 苹果采摘机器人对振荡果实的快速定位采摘方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 48—53.
- Lü Jidong, Zhao De'an, Ji Wei, et al. Fast positioning method of apple harvesting robot for oscillating fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 48—53. (in Chinese with English abstract)
- [73] 吕继东, 赵德安, 姬伟. 采摘机器人振荡果实匹配动态识别[J]. 农业工程学报, 2013, 29(20): 32—39.
- Lü Jidong, Zhao De'an, Ji Wei. Research on matching recognition method of oscillating fruit for harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(20): 32—39. (in Chinese with English abstract)
- [74] 李国利, 姬长英, 顾宝兴. 基于单目视觉与超声检测的振荡果实采摘识别与定位[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 1—8.
- Li Guoli, Ji Changyin, Gu Baoxing. Recognition and location of oscillating fruit based on monocular vision and ultrasonic testing [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46(11): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [75] 司永胜, 乔军, 刘刚, 等. 基于机器视觉的苹果识别和形状特征提取[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 161—165.
- Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and Shape Features Extraction of Apples Based on Machine Vision[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(8): 161—165. (in Chinese with English abstract)

- [76] Feng J, Wang S, Liu G, et al. A separating method of adjacent apples based on machine vision and chain code information[C]// Computer and Computing Technologies in Agriculture V, 2012: 258—267.
- [77] 宋怀波, 张传栋, 潘景朋, 等. 基于凸壳的重叠苹果目标分割与重建算法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 163—168.
Song Huaibo, Zhang Chuandong, Pan Jingpeng, et al. Segmentation and reconstruction of overlapped apple images based on convex hull [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(3): 163—168. (in Chinese with English abstract)
- [78] 彭辉, 吴鹏飞, 翟瑞芳, 等. 基于视差图像的重叠果实图像分割算法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 167—173.
Peng Hui, Wu Pengfei, Zhai Ruifang, et al. Image segmentation algorithm for overlapping fruits based on disparity map[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(6): 167—173. (in Chinese with English abstract)
- [79] 冯娟, 曾立华, 刘刚, 等. 融合多源图像信息的果实识别方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 73—80.
Feng Juan, Zeng Lihua, Liu Gang, et al. Fruit recognition algorithm based on multi-source images fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 73—80. (in Chinese with English abstract)
- [80] 王丹丹, 徐越, 宋怀波, 等. 融合 K-means 与 Ncut 算法的无遮挡双重叠苹果目标分割与重建[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 227—234.
Wang Dandan, Xu Yue, Song Huaibo, et al. Fusion of K-means and Ncut algorithm to realize segmentation and reconstruction of two overlapped apples without blocking by branches and leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(10): 227—234. (in Chinese with English abstract)
- [81] 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.
Zhao De'an, Shen Tian, Chen Yu, et al. Fast tracking and recognition of overlapping fruit for apple harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 22—28. (in Chinese with English abstract)
- [82] Wachs J P, Stern H I, Burks T, et al. Apple detection in natural tree canopies from multimodal images[C]// In Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen, The Netherlands, 2009, 68: 293—302.
- [83] Niu L L, Zhou W C, Wang D D, et al. Extracting the symmetry axes of partially occluded singleapples in natural scene using convex hull theory and shape context algorithm[J]. Multimedia Tools and Applications, 2016.
- [84] 荀一, 陈晓, 李伟, 等. 基于轮廓曲率的树上苹果自动识别[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2007, 28(6): 461—464.
Xun Yi, Chen Xiao, Li Wei, et al. Automatic recognition of on-tree apples based on contour curvatur[J]. Journal of Jiangsu university (Natural science edition), 2007, 28(6): 461—464. (in Chinese with English abstract)
- [85] 陈玉, 赵德安. 基于 LBM 的苹果采摘机器人视觉图像自动修复算法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 153—157.
Chen Yu, Zhao De'an. Automatic image inpainting algorithm for apple harvesting robot's vision system based on LBM [J]. Transactions of CSAM, 2010, 41(11): 153—157. (in Chinese with English abstract)
- [86] 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.
Song Huaibo, He Dongjian, Pan Jingming. Recognition and localization methods of occluded apples based on convex hull theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(22): 174—180. (in Chinese with English abstract)
- [87] Wang D D, Song H B, Tie Z H, 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.
- [88] 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, 35(9): 20—23.
Li Hongli, He Dongjian. Study on technology of restore and location of apples uander occluded[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(9): 20—23. (in Chinese with English abstract)
- [89] 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.
Jia Weikuan, Zhao De'an, Liu Xiaoyang, et al. Apple recognition based on K-means and GA-RBF-LMS neural network applicated in harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 175—183. (in Chinese with English abstract)
- [90] Xiao C, Zheng L, Li M, et al. Apple detection from apple tree image based on BP neural network and Hough transform[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2015, 8(6): 46—53.
- [91] 谢忠红, 徐莹, 姬长英, 等. 基于计算机视觉的苹果生长姿态估算多方法融合[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 154—157.
Xie zhonghong, Xu Ying, Ji Changying, et al. Estimation method of apple growing attitude based on computer vision[J]. Transactions of the CSAM, 2011, 42(11): 154—157. (in Chinese with English abstract)
- [92] 王丹丹, 徐越, 宋怀波, 等. 基于平滑轮廓对称轴法的苹果目标采摘点定位方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 167—174.
Wang Dandan, Xu Yue, Song Huaibo, et al. Localization method of picking point of apple target based on smoothing contour symmetry axis algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 167—174. (in Chinese with English abstract)
- [93] Kong D Y, Zhao D A, Zhang Y, et al. Research of apple harvesting robot based on least square support vector machine[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering. IEEE, 2010: 1590—1599
- [94] 李莹莹. 苹果收获机器人果树枝干信息获取技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
Li Yingying. Research on Tree Branches Information Acquisition for Apple Harvesting Robot[D]. Nan Jing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [95] 黄铅文. 苹果采摘机器人视觉识别与路径规划方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
Huang Lüwen. Approach of Visual Identification and Path Planning for Apple-picking-robot[D]. Yang Ling: Northwest Agricultural and Forestry University, 2013. (in Chinese

- with English abstract)
- [96] 姬伟, 陶云, 赵德安, 等. 基于 CLAHE 的苹果树树枝迭代阈值分割方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 69-75.
Ji Wei, Tao Yun, Zhao De'an, et al. Fast Recognition of Multiple Color Targets of Litchi Image in Field Environment Based on Double Otsu Algorithm[J]. Transactions of CSAM, 2014, 45(4):69-75. (in Chinese with English abstract)
- [97] 顾玉宛. 基于并行计算的苹果采摘机器人关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
Gu Yuwan. The Key Technology Based on Parallel Computing Application in Apple Harvesting Robot[D]. Zhen Jiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [98] 张颖. 苹果采摘机器人双目视觉系统的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
Zhang Ying. Research on Binocular Vision System of Apple Picking Robot[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [99] 丁乙. 苹果采摘机器人视觉系统技术基础研究[D]. 燕山: 燕山大学, 2014.
- [100] Ding Yi. Research on the Technology of Apple Picking Robot Vision System[D]. Yan Shan: Yanshan University. 2014. (in Chinese with English abstract)
- [101] 王晋. 自然环境下苹果采摘机器人视觉系统的关键技术研究[D]. 燕山: 燕山大学, 2014.
Wang Jin. Research of the Vision System for Apple Harvesting Robot Working in Natural Environment[D]. Yan Shan: Yanshan University. 2014. (in Chinese with English abstract)
- [102] 孟球. 基于视觉注意机制的彩色图像显著性区域提取[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(10): 3159-3161.
Meng Lu. Saliency detection for color image based on visual attention mechanism[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(10): 3159-3161. (in Chinese with English abstract)
- [103] 郑胤, 陈权崎, 章毓晋. 深度学习及其在目标和行为识别中的新进展[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(2): 175-184.
Zheng Yin, Chen Quanqi, Zhang Yujin. Deep learning and its new progress in object and behavior recognition[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(2): 175-184. (in Chinese with English abstract)

Research advance on vision system of apple picking robot

Wang Dandan, Song Huaibo, He Dongjian^{*}

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Vision system is one of the most important parts of apple picking robot, which, to some extent, determines the quality and the speed of picking task implemented by apple picking robot. In this review, we enumerated the existing apple picking robots. Some information, such as type of visual sensors, hardware of vision system, success rate of harvesting and run time, was illustrated in details. Meanwhile, on the basis of discussing the vision system of apple picking robot, we focused on summarizing hardware structure of existing vision systems and apple image segmentation methods as well as apple recognition and localization methods applied in vision systems. The vision system of apple picking robot mainly includes machine vision system, laser vision system, three-dimensional vision system and vision system formed by machine vision and other vision system. And the machine vision system can be classified into 3 types according to the number of image sensors used, that is, monocular vision system, binocular vision system and multi vision system. The recognition and localization of apple target is the first step of the implementation of the picking task for picking robot. The currently used apple segmentation and recognition methods include threshold segmentation algorithm, chromatic aberration based algorithm, K-mean clustering algorithm, region growing algorithm, segmentation method combining 2 or more algorithms, and so on. There are 4 methods that are commonly used in the localization of apple target. They are the methods based on centroid, fitting circle, symmetry axes, and three-dimensional coordinates, respectively. In natural scene, the recognition and localization of apple target may be affected by many factors. Hence, recognition and localization of apple target under different conditions, such as color nonuniformity, different illumination, shadow on the surface, oscillation, overlapping and occlusion, was reviewed and analyzed. Among all these conditions, occlusion can be regarded as the most serious factor. The condition of occlusion can be roughly divided into 4 kinds, i.e. apple target blocked by other apple, by branches, by leaves and by branches, leaves and other apple simultaneously. As for apple targets blocked by branches, one apple may be separated by branches, thus causing that an apple may be recognized as several apples. For the apple targets blocked by leaves, the symmetry of apple can be utilized to localize apple targets. The apple targets blocked by other apple can be considered as overlapping. There are overlapped apples with series connection, parallel connection, and blend connection. Because of the complexity of overlapping, the recognition and localization of apple targets blocked by other apple target is a little more difficult. In addition, the detection of obstacles like tree trunk and branches in apple orchard is important for apple picking robots to avoid obstacles, and thus obstacles detection methods were summarized in this review. In the process of target recognition and localization, binocular vision technology was commonly used in vision system. The key point of binocular vision technology is stereo matching. Therefore, stereo matching was then reviewed, and the image matching methods in existence can generally be divided into 2 categories, i.e. region-based image matching method and feature-based image matching method. What's more, the problems exist in recognition and localization methods used in the vision system of apple picking robot, including accuracy, effectiveness, character of real-time and universal applicability, were analyzed. Further study will concentrate on optimizing the structure of vision system, optimizing the intelligent algorithms used in the vision system, improving the real-time capability, recognizing and locating apple targets when the apple targets and vision systems are influenced by oscillation, and improving cost performance. The paper has summarized and analyzed vision system of apple picking robot comprehensively, which can provide reference for future research.

Keywords: robots; image recognition; mechanization; apple; fruit recognition; target localization; vision system