



专题与述评

农业机器人采摘棉花的前景展望与技术分析

王 玲, 姬长英

(南京农业大学工学院电气工程系, 南京 210031)

摘 要:综合分析了国内外棉花采摘与分级技术的现状,指出农业机器人采摘棉花更适合我国国情。针对采摘机器人的非结构化工作环境和作业对象有生命等技术特点,分析了采摘机器人在自主导航、目标识别与定位和机器人本体结构设计三方面的研究现状。重点讨论了农业机器人采摘棉花的关键技术:一是自然环境下棉花的识别与分类。图像增强、特征提取和图像理解是视觉领域的三个过程,现代数学领域的小波分析、分形几何、模糊与粗糙集理论、人工神经网络和支持向量机等为此提供了有力的工具。二是机器人末端执行器结构的设计。借助多传感器信息融合技术完成棉花与铃壳的分离,实现末端执行器的自适应柔顺控制。随着智能领域的长足发展,采摘机器人代替人类采摘棉花的梦想一定能够实现。

关键词:棉花;采摘;现状;机械式;农业机器人;展望

中图分类号:S562 **文献标识码:**A

文章编号:1002-7807(2006)02-0124-05

Technical Analysis and Expectation for Cotton Harvesting Based on Agricultural Robot

WANG Ling, JI Chang-ying

(Electrical Engineering Faculty of Engineering College, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: Differences of cotton between America and China exist in harvesting and classification were summarized. In America, the characteristics of cotton production have been recognized, such as large scale, single variety, long autumn and mid-long fibre etc. It helps to pick and classify cotton fully by machines. In contrast, in China, the characteristics of cotton production leads to inadaptation for mechanism-based technology. Cotton harvesting mostly performed by hand, mainly restricted by plenty of labor, and the classification that is fulfilled by dint of human sensing. In view of the conjuncture, an assumption for cotton harvesting based on agricultural robot were put forward in this paper.

In China, agricultural robot-based cotton harvesting combines the advantages of the handcraft-based and the mechanism-based, and it has the potential to resolve the conflict between production efficiency and high fiber grade. Comparing with mechanism-harvested cotton, robot-harvested cotton includes the follow advantages: (1) Adapting the variety of cotton. Many qualification of mechanism-based technology for cotton harvesting such as mid-long fibre, short-term autumn, single variety, and poor disease resistance, result in the use of agricultural robot technology for cotton harvesting. Owing to human simulating picker, robot-based technology with programmable feature resolves some problems such as short fibre, long-term autumn, variety because of the special climate and zone. (2) Requesting poor agriculture. In order to control the height along with maturity of cotton plant, and reduce the impurity mixed with leaves, the use of chemicals for pre-harvest cotton will lead to drug-resistance before cotton harvesting. Agriculture robot with spatial freedom has the potential to avoid leaf scrap mixed, reduce cost and ensure sowing of cotton plant. (3) Increasing the yield of high quality cotton.

收稿日期: 2005-10-06 **作者简介:**王玲(1966-),女,在读博士, wangling@pk.njau.edu.cn

基金项目:2005年江苏省农机基金(GXZ05013)

Traditional visual quality inspection performed by human inspectors has the potential to be replaced by computer vision systems for robot-harvested cotton, and a nicer representative sample may meet the classification before cotton harvesting. The quality of classification for cotton harvesting as well as the yield of high quality cotton will be advanced greatly. (4) Reducing production cost. Agricultural robot-harvested ensures high quality and avoids plenty of fee for picking owe to simulating human being's action. Harvesting robot plays some other roles with compact, flexible moving and convenient for remote portage in agricultural production. Hence, cotton harvesting using agriculture robot adapts to the situation of China.

At present, harvest robot with machine vision has been capable of harvesting many fruit and vegetable such as orange, tangerine, tomato, murphy, fungus, cucumber, apple, watermelon, grape. Plenty of experience obtained in terms of harvesting consists of three aspects: (1) robot's self-determination navigation, (2) objective detection, (3) robot's framework.

Digital image processing performed with a computer to manipulate information within an image makes it useful. Image processing in agricultural applications may consist of three steps: (1) image enhancement, (2) image feature extraction, and (3) image feature classification. The image acquisition board receives imaging data from a CCD camera. Image enhancement procedures such as pixel-to-pixel operations, filters, and morphological operations are generally used to correct some problems such as poor contrast or noise caused by inadequate and non-uniform illumination. Statistical procedures such as mean, standard deviation, variance and principle component analysis can be used to extract cotton features, such as size, shape, shine, color, texture, position, leaf states of cotton. Modern mathematics microscope, wavelet analysis system, can be successfully applied to edge detection due to analyzing locally in time. For the rapid prototype of a machine vision system, artificial intelligence programming can be incorporated into the system. Newer tools such as artificial neural network-Fuzzy/Rough, Fractal Geometry, Support Vector Machine can be applied to enhance the robustness of the classification of the color imaging system through computing connected weights, fraction dimension, sustainable vector, respectively. Further more, a flexible requirement may meet multi-sensors such as approach, touch and force for sensing. Considering the biology feature as well as shape of cotton, robot's end manipulator must be optimally designed structurally when grabbing.

With the quite great development of mathematics along with robot sectors, agricultural industrialization as well as the fall of cost, the use of intelligent robot for harvest cotton has the potential to become routine operations in order to increase the yield of high quality cotton greatly. Extensive cultivation of cotton production will be replaced by intensivism gradually in the future.

Key words: cotton; harvest; present technology; mechanical; agricultural robot; expectation

中国和美国都是产棉大国, 两国的棉花采摘手段和分级方法有很大差异。在美国, 棉花生产集中在少数的农场主手中, 具有生产规模大、品种单一、纤维长、成熟期集中等特点, 其机械化机械采收技术已是世界公认的成熟先进技术; 棉花分级也基本上实现了仪器化、自动化。在我国, 棉花种植地域辽阔, 生产规模呈现多元化格局, 具有品种多、纤维短、收获期长、以人工采摘为主等特点; 常规人工手采棉质量稳定, 市场欢迎, 但由于拾花期短, 劳动强度大, 受拾花工不足的制约; 机械化采摘是发展方向, 但成本太高, 质量无保证, 并且凭人工感官对照标准样品检验棉花品级。面临此尴尬局面, 另辟蹊径, 提出了农业机器人采摘棉花的构想。

1 农业机器人采摘棉花的生产应用价值

农业机器人采棉综合了人工采摘与机械式采摘的优势, 机器人学习棉农采棉专业知识, 可保证棉花的品质, 其高效性可节省大量的人力财力, 从根本上解决棉花采摘的效率与品质之间的矛盾, 具有极其深远的战略意义。与人工和机械式采摘相比, 其生产应用价值主要体现在以下几方面。

1.1 适应棉花品种的多样性

机械式采棉要求棉花品种具备纤维较长、断裂比强度较高、吐絮期集中、抗虫抗病、果枝高度适中、结铃部位集中等特点^[1]。美国陆地棉(中长纤维棉)占美国棉产量的95%以上, 品种单一, 纤

维较长,成熟期集中,虫害少,特别适合于机械式采摘;其机采棉产品最低断裂比强度高于我国最高断裂比强度,且异性纤维少($0.4\text{ g}\cdot\text{t}^{-1}$)。

由于短纤维棉主要在亚洲,而气候、地域等因素也决定了我国棉种多样,吐絮成熟期长,虫害多,机械式采摘势必造成优劣并收的尴尬局面^[2],且我国的机采棉地膜碎片较多。农业机器人模拟人工实时采摘,具有程序性、适应性和通用性的特点,其柔性设计特征可解决我国棉种多,成熟期长的问题。

1.2 对农艺要求不高

机械式采棉必须人工驾驶完成作业,为了使种植期变短且一次收花,要求用化学催熟剂促使棉花集中吐絮,同时施用化学成长控制剂和脱叶剂来限制棉株高度和杂质含量。我国棉花成熟期长,必须分批采摘,而各种化学制剂的使用所引发的耐药性使棉作物的再次脱叶更困难^[3],同时也破坏了土壤的生态平衡。然而,农业机器人可模仿人工采摘时的灵巧动作,采摘的时空自由度大,可克服机械式采棉对农艺要求高的缺点,既可避免叶屑污染、节省化学制剂成本,又可保证棉作物的自然生长、保护土壤环境。

1.3 提高优质棉产量

机械式采棉一般是先采收成包,再对棉包进行抽样分级定品质。在美国,由于棉种单一,成熟期集中且一次收花,机采棉包内棉花品质相当,棉包的抽样分级检验结果具有商业价值。

在我国,由于棉种多、成熟期长且分批收花,机械式采摘势必造成棉包内棉花品质混乱,棉包的抽样分级检验结果不具备价格导向性;此外,国家尚未制定出机采棉的质量和收构标准以及生产棉纱的标准率,致使棉纱厂使用的积极性不高。农业机器人以其智能化自动分级技术边采摘边分级,可提高收获前棉花的分级质量和优质棉的产量。

1.4 降低生产成本

我国以人工采摘为主。棉花采收快慢不仅影响棉花的质量和产量,同时影响秋翻、冬灌等重大农艺技术的实施,这已成为大农业持续发展必须解决的问题。新疆已建成我国最大优质棉基地,兵团农场每人每天平均拾花 50 kg,拾花高峰期每天需 20 万人,农场最高年份支付拾花费 2.6 亿元,其中直接支付给民工的拾花费 1.8 亿元^[4]。

拾花缺少劳动力,棉花吐絮期较短而劳动强度大,确定了机械式采摘的发展方向,采棉机体积

庞大,单价约 130 万元,收获期可采摘 200~400 hm^2 ,即便中型团场(5333 hm^2)一半面积机采也需要 8 台采棉机(需 1040 万元);采棉机采摘价($0.45\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$)约为人工拾花费($0.7\sim 0.85\text{ 元}$)的一半^[4]。尽管采摘效率提高了,由于团场难以承受巨大的投资费用,形成目前机械化采棉推而不广,广而不兴的徘徊局面,严重制约了兵团采棉机械化的发展。

农业机器人模拟人工采摘棉花,可保证采摘质量,同时,它具有体积小、移动灵活、远距离搬运方便的特点,还能扮演其它农业生产工具角色,可一机多用。

2 采摘机器人技术特点与研究现状

2.1 采摘机器人的技术特点

农业机器人具有节约人力,胜任危、难、险、单调、繁琐的工作等优点^[6],主要应用于田间作业、园林生产和在线分级。农业机器人潜在的应用包括果蔬的采摘、林木的修剪等,其技术特点主要有:1)作业对象是有生命的生物体。作业对象娇嫩、形状复杂且个体之间的差异性大,提高采摘成功率、降低果实损伤率是采摘机器人的主要目标。2)采摘环境的非结构化。农作物环境条件随着季节、天气变幻莫测,采摘对象被树叶、树枝等掩盖,要求采摘机器人高度智能化并且能够成功避障。3)采摘机器人的应用推广存在困难。同工业机器人相比,采摘机器人的结构和控制系统相当复杂,具有周期性、短时间和利用率低的特点,要求采用开放式、可重构的机器人系统,一机多用^[7]使机器人具有良好的扩展性、灵活性和可重构性,大幅度提高性价比。

2.2 采摘机器人的研究现状

采摘机器人在高度非结构化环境下工作理论上是完全可以实现的:机器人自主行走、机器视觉对图像的三维深度信息、方位、动态响应和暂不可视信息的获取和解释,机械手和末端执行器对视觉传感器解释信号的理解等。目前,国内外农业机器人采摘技术在自主导航、目标的探测与定位、机器人本体结构设计^[8]三方面已经获得了丰富的经验。

2.2.1 机器人自主导航。农业机器人的自主行走离不开自主导航技术,根据环境信息的完整程度、导航指示信号的类型、导航地域等因素的不同,农业机器人的导航方式有:(1)信标导航:机器人通过自身装置测量其与预先设立的信标之间的距离

以推算自身的位姿;(2)地理信息系统(GIS)和全球定位系统(GPS);(3)视觉导航:机器人用 CCD 传感器获取周边环境及边界信息,完成路径规划,在没有人工干预的情况下自主移动到预定的位置;(4)多传感器导航:利用数据融合方法对多个传感器信息进行综合与决策,形成对环境某一方面特征的综合描述,共同完成路径规划和避障任务。

2.2.2 目标的识别与定位。所谓三维视觉信息包括从摄像机到物体之间的距离、物体的大小和形状、各物体之间的关系等。对于采摘机器人视觉系统而言,在自然光条件下,不仅要探测到目标的存在,还要计算出采摘对象的空间坐标。除可见光光谱以外,也可用不可见光视觉系统来辨识目标,例如紫外光、近红外以及红外线,因此,多光谱或超光谱视觉系统也广泛用于识别目标的品种、成熟度、质量、生长状态、瑕疵以及病虫害等。获取采摘目标三维坐标的方法有^[9]:(1)多目立体视觉:融合多个摄像机观察到的目标特征,重构这些特征的三维原像,并计算出目标的空间坐标;(2)时间差法:利用一台摄像机的多幅连续图像序列实现“从运动得到结构”,由图像匹配估计匹配点的三维坐标;(3)结构光法:选择激光、微波或超声波等光源,采用光栅法、移动投光法获取距离图像和反射图像,经联合分析测出物体的形状和空间分布。(4)传感器融合:由视觉传感器获取原始平面图像,计算其形心坐标,再利用测距传感器测量目标的深度信息。

2.2.3 采摘机器人本体结构设计。采摘机器人的本体结构^[7]直接影响机器人的作业空间、性能以及控制系统的复杂程度,未来的研究方向应致力于算法的优化设计,增强控制系统的实时性和鲁棒性。

1)行走机构。(1)车轮式行走结构:转弯半径小但转向灵活,对松软的地面适应性较差。(2)履带式行走机构:转弯半径大且转向不灵活,不适合行走空间狭小的场合。(3)人形行走机构:避障功能强,适合行走空间狭小的地面,但其步态规划和维持动态平衡十分复杂,目前仍处在实验研究阶段。

2)机械手结构。(1)直角坐标结构:运动精度高,坐标计算和控制简单;但工作空间较小,在活动范围内存在盲区。(2)极坐标结构:刚度高,抓持重量大;但运动控制比较复杂,运动精度较低。(3)关节型结构:用机器视觉获取对象的位姿,经运动规划和运动学反解,求出关节空间的运动解来控制关

节电机的运动;主要由回转和旋转两自由度组成,具有拟合空间任意曲线的功能;但机械刚度小,运动精度较低、抓持重量小。用多自由度关节型机械手作为采摘机器人的本体结构是最合适的。

3)末端执行器结构。根据不同作业对象的物理特性,应采取不同的抓持专用机构,配置多传感器系统实现末端执行器的柔顺控制。扭断和切割是将果实与果梗分离的常用方法。

3 农业机器人采摘棉花的关键技术

人们致力于研究智能机器人在运动、感知、思维和人机通信等机能的理论与技术,一方面是为了使机器向更高的智能化方向发展,另一方面是为了满足由人类生活环境中所提出的各种不同的需求,其目标是用机器来完全解释、模拟、重现和处理人的视觉^[10]。目前,在园林生产和田间作业中,对于橙、橘、番茄、土豆、蘑菇、黄瓜、苹果、西瓜、葡萄等果蔬的采摘经验,国内外已有相关报道^[6],但尚未有棉花采摘之报道;为了大幅度提高棉花的分级质量和优质棉的产量,实现边采摘边分级,农业机器人采摘棉花技术可以借助已获得的丰富经验,并且应在以下关键技术上做出努力。

3.1 棉花的识别与分类

机器视觉的作用是从三维环境图像中获得所需的信息并构造出观察对象的明确而有意义的描述。视觉包括三个过程:图像增强、特征提取和图像理解。由 CCD 传感器获取数字图像,经图像增强后提取颜色、形状和纹理特征参数对棉花进行分类、识别和描述。

3.1.1 提取特征参数。棉桃通常自下而上螺旋状吐絮,花絮的光泽度、黄度、开合度和吐絮时间的长短可以表达成熟度,其位姿提示棉花的品级和光合作用程度,并与机械手位姿相关,棉叶状态也提示病虫害情况等都是棉花的特征参数。而边缘检测、图像分割是图像处理的重要内容,现代数学显微镜小波分析(Wavelet)具有良好的时频局部化分析特征^[10],信号分析的多分辨率适应非平稳信号,针对图像不同结构边界的性质提供定量的描述,广泛用于农田景物的去噪和边缘检测。

3.1.2 设计分类器。所谓分类器,是根据一些类别已知样本所建立的一个规则,运用这个规则,可以赋予一个类别未知样本相应的类别标号。在视觉领域中,分类器仅仅是一种方法,并非结果,一旦出现了某种更简单、更可靠、更有效的分类技

术,这种技术将立刻得到广泛的应用^[11],模糊集和粗糙集理论、人工神经网络、分形几何、支持向量机就是这类技术。

1)模糊集和粗糙集理论:模糊集使元素对集合的隶属度由原来的取值0和1扩充到可以取 $[0,1]$ 区间中的任一值,在多传感器信息融合时可以用隶属函数表示各传感器信息的不确定性。而粗糙集(Rough set)对不完整、不确定性数据进行分析,为解决传感器数据超载问题以及不完整传感器信息融合提供了方法^[9]。可以对神经网络的大量样本集进行预处理,剔除冗余信息,大大缩短神经网络的学习时间,提高神经网络融合传感器信息的效率。

2)人工神经网络(ANN)。通过对大量复杂的输入、输出数据进行学习训练来定义输入与输出之间的映射关系,常用的误差反向传播算法通过反复迭代来修改各层神经元的连接权值,当输出误差信号最小时获得的一组连接权值就是训练好的神经网络模型^[9]。应用于棉花采摘过程中,以棉花的颜色、形状和纹理等特征作为网络的输入参数,以棉花吐絮时间长短为输出参数,可以训练网络判别棉花在最佳采摘期内收获的能力,进而提高优质棉的识别能力。

3)分形几何(Fractal)。用来描述自然界中传统欧氏几何所不能描述的一切复杂而无规则的几何现象,研究对象的内部结构、规律以及物理、化学性质与分形维数的关系,可以构造从植物到星系的物理结构的精确模型。在棉花采摘过程中,利用维数可以定量描述棉花随机分形边界的统计自相似特性,选用盒维数和结构步测技术测量其分维数,寻找分维数与棉花品质特征参数的对应关系,实现棉花的分类。

4)支持向量机(Support Vector Machine)。两类分界面的超平面(决策面),由训练样本集合中的一小部分样本决定;训练支持向量机就是寻找这一小部分样本,使得两类样本到决策面的最小距离都尽可能大^[11]。应用于棉花采摘过程中,可以棉花的颜色、形状、纹理等为特征训练支持向量机,寻找辨别棉花品质的分类点,即代表支持向量的那一小部分样本的特征值,完成棉花的分类。

3.2 机器人末端执行器结构的设计

机器人接近觉能防止机械手抓取时速度过快冲击目标物,实现手爪的柔顺接触;触觉能感觉目标物的表面性能和物理特性:柔软性、硬度、弹性、

粗糙度、导热性等;而力传感器则实现握力的柔顺控制。针对棉花柔软、易脱落、尺寸小、重量轻等特点,应采用多传感器融合系统实现棉花的自适应抓取。棉花的生物特性、形状分布与其它果蔬不同,吐絮的棉花通常由3~5瓣组成,各棉瓣独立依附于棉壳上,采摘头必须同时抓持住每一个棉瓣进行夹持式采摘,因此,末端执行器结构的设计尤为重要。

4 结语

近代数学领域里,随着小波分析、模糊集与粗糙集、人工神经网络、分形几何、支持向量机等理论的问世以及模式识别、人工智能的长足发展,农业机器人必将迎来一个高速发展的空间。随着棉花生产农场化经营模式的推广和开放式、可变结构采摘机器人成本的降低,相信采摘机器人将在21世纪越来越多地应用于棉花生产中,大幅度提高优质棉的产量和农业智能化水平,最终实现棉花生产由粗放型经济向集约型经济的转变。

参考文献:

- [1] 沈家涛. 新疆兵团机采棉技术推广存在的问题及原因分析[J]. 中国棉花, 2005, 32(3): 42-43.
- [2] 李伟明, 林永增. 采摘时间对中长绒棉纤维品质的影响[J]. 河北农业科学, 2004, 8(1): 117-118.
- [3] 许建, 丁志毅. 棉花化学脱叶催熟效果及其对棉子质量影响初报[J]. 新疆农业科学, 2003, 40(2): 116-118.
- [4] 沈玲凤. 兵团农场采棉机械化发展的制约因素及对策[J]. 新疆农机化, 2004(4): 46-47.
- [5] 冯绍斌, 谷成超. 棉花采摘新概念: “人工快采+机器清花”[J]. 新疆农垦经济, 2002(4): 51-52.
- [6] 方如明, 蔡健荣. 计算机图像处理技术及其在农业工程中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 25-26.
- [7] 方建军. 移动式采摘机器人研究现状与进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 273-278.
- [8] JIMENEZ A R, Ceres R, Pons J L. A survey of computer vision methods for locating fruit on trees [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1911-1920.
- [9] 罗志增, 蒋静坪. 机器人感觉与多信息融合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 120-133.
- [10] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 49, 78, 130, 169, 192.
- [11] DAVID A F, Jean P. Computer Vision: A Modern Approach [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 451-454.