

移动式采摘机器人研究现状与进展

方建军

(北方工业大学机电工程学院, 北京 100041)

摘要: 采摘机器人是 21 世纪精准农业的重要装备之一, 是未来智能农业机械的发展方向。移动式采摘机器人由机械手、末端执行器、移动机构、机器视觉系统以及控制系统等构成。机械手的结构形式和自由度直接影响采摘机器人智能控制的复杂性、作业的灵活性和精度。移动机构的自主导航和机器视觉系统解决采摘机器人的自主行走和目标定位, 是整个机器人系统的核心和关键。该文对移动式采摘机器人的研究现状进行综合, 提出目前采摘机器人技术发展中面临的技术难题及相应的对策, 包括采用开放式控制系统。

关键词: 采摘机器人; 机器视觉; 自主导航; 机械手; 末端执行器; 开放式控制系统

中图分类号: S183

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)02-0273-06

0 引言

水果采摘作业是水果生产链中最耗时、最费力的一个环节。与此同时, 采摘作业质量的好坏还直接影响到产品的后续加工和储存。如何以低成本获得高品质的产品是水果生产环节中必须重视和考虑的问题。由于采摘作业的复杂性, 采摘自动化程度仍然很低。目前国内水果采摘作业基本上都是手工进行。随着人口的老龄化和农业劳动力的减少, 农业生产成本也相应提高, 这样会大大降低产品的市场竞争力。在日本和欧美等发达国家, 近 20 年来一直致力于采摘机器人的研究和开发。比较有影响的采摘机器人研究项目有^[1-8]: MA GAL I AU FO (苹果采摘机器人)、C I T R U S (柑桔采摘机器人)、A G R O B O T (西红柿采摘机器人)、日本 N. Kondo 等人研究的西红柿、黄瓜、葡萄采摘机器人。由于采摘对象的复杂性和工作环境的非结构化, 目前市场上仍没有成熟的、商品化的采摘机器人出现。移动式采摘机器人需要解决 3 个方面的技术难题^[9]: 采摘机器人的本体结构设计; 机器人的自主导航; 目标的定位与采摘。采摘机器人通常采用工业机器人的本体结构, 农业工程领域的专家很少对适合生物生长环境下的机器人本体结构进行研究。为了提高采摘机器人的智能化水平, 将研究的重点放在自主导航和水果定位与采摘。

1 采摘机器人的特点

采摘机器人工作在高度非结构化的环境下, 作业对象是有生命的生物体。同工业机器人相比, 采摘机器人具有以下的特点^[10]: 作业对象娇嫩、易脆, 形状复杂且个体之间的差异性大; 采摘对象大多数被树叶、树枝等掩盖, 增大了机器人视觉定位难度, 降低采摘成功率, 同时对机械手的避障提出了更高的要求; 采摘机器人工作在非结构化的环境下, 环境条件随着季节、天

气的变化而发生变化, 环境信息完全是未知的, 开放的, 对机器人的智能控制水平要求高; 采摘对象是有生命的、易脆的生物体, 要求在采摘过程中对果实无任何损伤, 这就要求机器人的末端执行器具有柔顺性、灵巧性;

采摘机器人的价格高, 高智能导致高成本, 并且采摘机器人的使用具有短时间、周期性, 利用率不高, 对于农业生产来讲, 高价格是农民或农业经营者无法接受的, 这也是限制采摘机器人推广使用的重要因素。

2 研究现状与进展

从 1983 年第一台西红柿采摘机器人在美国诞生以来, 采摘机器人的研究和开发已经经历了近 20 年。日本和欧美等发达国家相继立项研究用于采摘苹果、柑桔、西红柿、葡萄等水果的智能机器人。根据对智能机器人的不同理解, 目前采摘机器人的研究朝着人机互助型和自主智能型两种不同的方向发展。

2.1 人机协作型水果采摘机器人

美国学者 Saridis 认为, 智能控制系统必然是分层的。划分分层递阶结构的原则是随着控制精度的增加而智能能力减弱。根据这一原则, 智能机器人的控制系统可划分为组织级、协调级和控制级或执行级三层。控制级是最低层, 直接控制机器人的硬件系统, 如驱动模块、传感器模块等, 可以达到很高的控制精度, 但智能化程度最低。组织级和协调级主要完成任务规划、推理等高智能任务, 其控制精度较低。移动式采摘机器人工作在非结构化、环境因素未知的作物生长环境, 对智能控制要求很高。根据分层递阶原则, 将采摘机器人寻找、定位待摘果实以及机器人导航任务划归组织级和协调级, 这部分由人来完成; 机器人的运动轨迹规划、关节控制和末端执行器控制等任务划归控制级, 由机器人的控制系统完成。合理的人机分工和协作, 不仅增强了智能机器人处理突发事件的能力和系统的鲁棒性, 还可以在不增加系统复杂程度和成本的前提下, 提高采摘成功率。

基于人机协作思想, 西班牙工业自动化研究所开发了一种人机协作型的采摘机器人 A gri bot, 如图 1 所示^[11]。该机器人由操作台、轮式移动机构、机械手、末端

收稿日期: 2003-09-29

基金项目: 北京市教委科技发展基金项目 (01kj-030)

作者简介: 方建军, 博士, 副教授, 北京市北方工业大学机电工程学院, 100041



执行器、激光测距仪以及机器人控制系统等组成。机器人导航和目标定位由操作人员来完成,机器人的路径规划、关节控制以及采摘机构的控制等,由机器人的控制系统完成。操作人员发现待采摘果实后,利用游戏杆操纵移动/倾斜机构,使激光测距仪的激光束对准果实。图2表示了激光测距仪的原理^[12]。当发射激光束在遇到待采摘果实的表面后,有部分光束返回到激光测距仪。激光测距仪根据发射光束和返回光束的相位差,测出水果中心与测距仪之间的距离。用游戏杆上下、左右操纵移动/倾斜机构时,激光束的角度值也是确定的。这样就获取了待摘果实的球坐标,并将其放入一个动态数据区。机器人控制系统从动态数据区中取出球坐标数据并和机械手末端执行器的当前坐标进行比较,规划出最优的采摘路径。同时,将笛卡尔坐标转换为关节坐标,控制关节轴电机的运动,达到指定的位置。同用机器视觉寻找并定位采摘果实的机器人系统相比,人工定位方法能明显提高采摘成功率和效率。人机协作型采摘机器人将机器人的导航、目标探测和定位等需要高智能的任务剥离出来,由人完成。而机器人控制系统只负责计算并优化采摘路径、控制关节运动、实施采摘任务。人机协作型机器人需要人的参与,同自主型智能机器人相比,其优势表现在系统可靠性高、采摘成功率和采摘效率高。

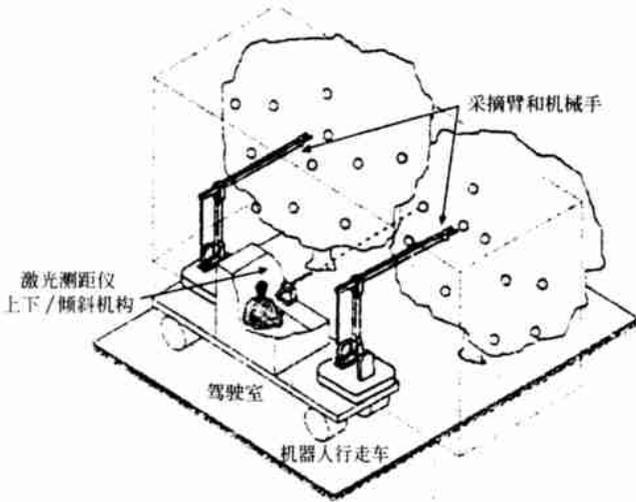


图1 人机协作型采摘机器人
Fig 1 A ided harvesting robot

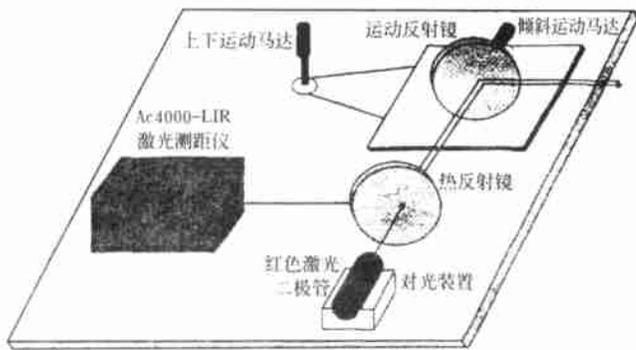


图2 激光测距仪
Fig 2 Laser range-finder sensor

人机协作型研究思想,在充分考虑了现有技术水平的前提下,合理定位采摘机器人的智能化程度。作者认

为,人机协作型采摘机器人的研究具有现实意义。它不仅提高了机器人的采摘效率和成功率,还能大幅度降低系统的成本,有利于尽早实现采摘机器人的产业化。

2.2 自主型智能采摘机器人

农业机器人工作在高度非结构化的生物环境中,实现机器人的智能化操作,需要运用各种先进的智能控制技术。为了实现智能采摘机器人代替人类采摘作业的梦想,农业机器人专家将主要研究精力放在机器视觉和人工智能上,以提高采摘机器人的智能水平。从研究实践看,采摘机器人的本体结构要比普通工业机器人的复杂。采摘机器人机械手的结构形式、自由度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。

2.2.1 机械手

采摘机器人机械手的结构形式和自由度直接影响末端执行器的作业空间、运动精度以及灵活性,影响控制系统的复杂程度。国外研究文献表明,采摘机器人的本体结构研究没有得到足够的重视,直接购买工业机器人的机械手作为采摘机器人的机械本体。从目前发表的采摘机器人样机来看,机械手的结构形式大致有直角坐标结构、极坐标结构和关节型结构3种。

1) 直角坐标结构

采用直角坐标结构的机械手,具有结构简单、运动精度高、坐标计算和控制容易等优点,应用于早期研究的采摘机器人。这种机器人的工作空间较小,末端执行器的活动范围内存在盲区。对于采摘机器人而言,其应用必然受到限制。图3表示了西红柿采摘机器人的原理图^[13]。该机器人具有上下移动、左右旋转、水平伸缩和上下俯仰4个自由度。采用100W,3000 r/min的交流伺服电机和1:125的减速机构驱动4个关节轴。左右旋转、上下移动、上下俯仰和水平伸缩4个自由度的关节速度分别为2.51 rad/s,0.3 m/s,3.14 rad/s和1.8 m/s。关节速度高,影响末端执行器的定位精度,但能够提高采摘的效率。采摘机器人采用交流伺服电机,对于野外作业,电源的提供并不方便。对于移动机器人而言,最好使用蓄电池提供的直流电源。

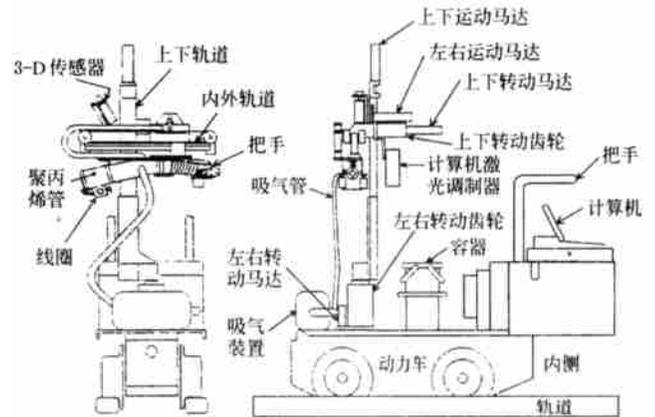


图3 西红柿采摘机器人的原理图

Fig 3 Cherry tomato harvesting robot

2) 极坐标结构

极坐标结构的机械手,其结构刚度高,末端执行器的抓持重量大。目前在葡萄和黄瓜采摘机器人中,尝试

使用 5 个自由度的机械手^[14, 15]。图 4 表示黄瓜采摘机器人中极坐标结构机械手的原理。机械手共有 5 个自由度, 其中 2 个旋转自由度, 2 个回转自由度和 1 个伸缩自由度。伸缩自由度可以使机械手在极坐标方向上的活动空间增大。在机械手的下部还有旋转和伸缩 2 个自由度。其作用在于采摘前使机械手的倾斜角度和培育架的倾斜角度相同。黄瓜采摘机器人 7 个自由度中, 有两个伸缩自由度, 可以使机器人的末端执行器在空间活动范围增大, 灵活性增强。葡萄采摘机器人采用和黄瓜采摘机器人类似的 5 自由度极坐标结构的机械手。极坐标结构的运动控制比较复杂, 运动精度较低。

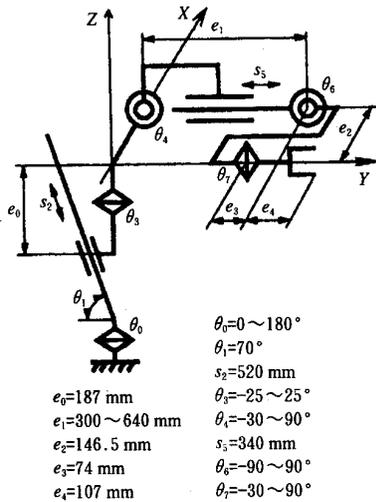


图 4 极坐标结构机械手示意图

Fig 4 Schematic diagram of polar manipulator for cucumber harvesting robot

3) 关节型机械手

关节型机械手具有仿人臂结构, 主要由回转和旋转两种自由度组成。同其它结构形式相比, 关节型结构对于确定三维空间中的任意位置和姿态是最有效的。采摘机器人的作业对象分布在空间的任意位置, 并且其周围存在很多的障碍物。多自由度的关节型机械手具有拟合空间任意曲线的功能。机器人控制系统通过轨迹规划和关节的运动控制, 可以使固定在机械手上的末端执行器在接近采摘目标的路径中, 有效躲避障碍物。因此, 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。图 5 是关节型机械手的结构示意图^[16]。关节用直流伺服电机控制, 每个关节的实际位置由增量式光电编码器返回, 构成闭环控制。机器人控制系统通过机器视觉子系统获取目标的空间坐标, 然后进行运动规划和运动学反解, 求出关节空间的运动解, 进而控制关节电机的运动。关节型机械手的运动规划和轨迹控制需要进行大量的数学运算, 因此对机器人控制系统的实时性要求高。同时, 关节型机械手是开链结构, 其机械刚度小, 运动精度较低, 抓持重量小。尽管如此, 对于高性能的采摘机器人而言, 采用具有冗余自由度的关节型机械手是必要的。目前, 意大利 A GROBOT 机器人采用 6 自由度的关节型机械手。

图 5 关节型机械手示意图

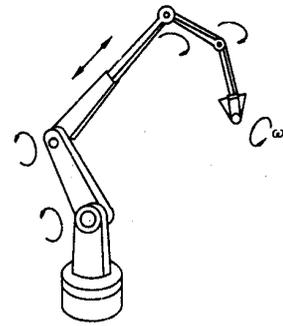


Fig 5 Schematic diagram of Anthropomorphic manipulator

2.2.2 行走机构及其自主导航技术

1) 行走机构

轮式行走机构

移动式采摘机器人的行走机构有车轮式、履带式和人形结构 3 种。车轮式行走机构最简单, 应用也最为广泛。车轮结构有 4 轮和 3 轮两种形式。图 6 表示一种 3 轮结构的行走机构^[17]。车体前面的轮子作为导向和支撑轮, 后面的两个轮子作为动力驱动轮, 通过控制安装在轴上的直流电机转速, 控制车子的行走速度。车轮式行走结构, 转弯半径小, 转向灵活。但轮式结构对松软的地面适应性较差, 对安装在其上的机械手运动精度有较大的影响。

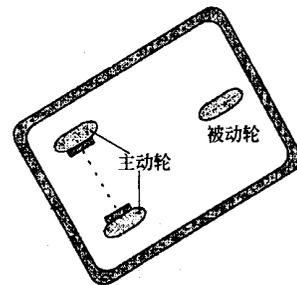


图 6 3 轮行走机构

Fig 6 Three-wheel mobile robot

履带式行走机构

同轮式结构相比, 履带式行走机构对现有地面的适应性好, 但由于转弯半径大, 因此转向不灵活。在行走空间受到限制的场所, 就不能选择这种移动机构。目前只有葡萄采摘机器人使用履带式行走机构。和轮式行走机构一样, 履带行走机构的结构简单、驱动较容易。

人形行走机构

机器人采用两条腿行走, 一直是人类的梦想。两条腿行走, 对地面环境的适应性以及躲避障碍物的能力强, 是轮式、履带结构所无法比拟的。在某些采摘作业场合, 如采摘西瓜, 作物的藤茎匍匐在地面上, 行走空间狭小, 使用轮式和履带式行走机构显然不合适。为此, 日本 Ogasawara 和他的研究小组尝试将人形机器人引入到移动式采摘机器人中。图 7 表示人形行走机构的简图^[18]。人形行走机构在静态时是平衡的, 但在步行时, 整个质心会发生偏移而产生动不平衡。如果不能维持动态不平衡, 机器人会倾倒。人形行走机构的步态规划和维持动不平衡是十分复杂的, 目前仍处在实验研究阶段。对于松软的地面而言, 维持动不平衡将更加困难。可

以相信,随着智能控制技术的进步,人形机器人将会得到广泛的应用。但在采摘机器人中的应用,目前技术上并不成熟且成本太高。

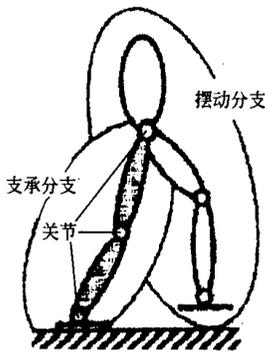


图7 人形行走结构

Fig 7 Schematic diagram of Biped robot

2) 移动采摘机器人的自主导航

无论采用何种移动机构,都存在移动机器人的自主导航。移动机器人有多种导航方式,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,可以分为基于地图导航、基于信标导航、基于GPS和视觉导航以及基于感知器导航等^[19]。基于地图的导航方式,事先要将机器人的作业环境输入控制系统内,形成电子地图。在结构化、环境条件已知的情况下,可以采用此种方法。基于信标导航,需要在作业环境的确定位置设立信标。机器人通过安装在身体上的测量装置检测其与信标的相互关系,推算自身的位姿。这种方式下,机器人的定位误差只取决于机器人与各信标的相对位置,在工业自动导引小车中用到这种方法。采摘机器人的作业环境复杂,需要机器人根据环境的变化自行确定行走的方向。因此,视觉导航成为采摘机器人自主导航的首选方法。

视觉导航技术的基本原理是,利用黑白或彩色 CCD 摄像机作为感知元件,获取周边环境的图像。经过图像二值化、滤波等处理后,利用 Hough 变换等技术提取边界信息。根据模式识别技术,确定障碍物的方位和机器人的行走路线。控制器经过路径规划、优化,控制移动机构左右两轮的电机,指挥机器人在无人干涉情况下自主移动到预定的位置。视觉导航需要处理大量的图像数据,需要采用专用的图像处理卡。目前,利用 DSP 芯片可以实现图像数据的采集、数字化转换、分析和处理的全部功能,直接将处理结果传送给主机。这样,控制系统的实时性大大增强,系统的鲁棒性也提高了。

由于仅通过单幅图像信息来判断障碍物的距离和速度是不准确的,因此在实际应用中可使用多台摄像机^[20]或是利用一台摄像机的多幅连续图像序列来计算目标的距离和速度,还可采用 SSD 算法,根据一台摄像机的连续画面来计算机器人与目标的相对位移,并用自适应滤波对测量数据进行处理,以减小环境的不稳定性造成的测量误差^[21]。采用多种传感器获取环境信息,然后利用多传感器信息融合方法,如贝叶斯分类法、神经网络法等,进行障碍物判别,成为目前移动式机器人自

主导航的主流技术。在移动式采摘机器人中,将视觉传感器和红外或超声波测距传感器结合,共同获取环境信息,然后利用数据融合方法进行信息综合与决策,共同完成路径规划和避障任务。

2.2.3 末端执行器

采摘机器人的末端执行器根据不同作业对象的物理特性,采取不同的专用机构。采摘机器人的工作对象是有生命的生物体,为了保证采摘水果不受损伤,末端执行器应具有力或力矩传感器,实现末端执行器的柔顺控制。末端执行器在抓持物体后,需要将果实与果梗分离。目前采用的方法有两种,一种是扭断果梗,另一种是切割果梗。图8是 R. Ceres 等人设计的末端执行器^[22]。该装置主要由 V 形定位机构、气体吸盘、压力传感器、红外传感器 IR 和锯条组成。V 形定位机构和互相交叉安装的 IR 传感器一起将水果的果梗定位,气体吸盘和压力传感器将果实固定,避免在切割果梗时碰伤果实。对于采摘机器人而言,末端执行器的柔顺控制是发展方向,其设计是复杂而重要的。

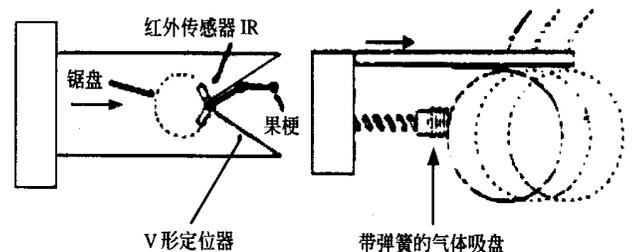


图8 末端执行器的结构

Fig 8 Configuration of end-effector

2.2.4 目标探测与定位

采摘机器人的机器视觉系统采用黑白 CCD 或彩色 CCD 作为视觉传感器。为了增强检测对象与背景的对比度,减少太阳阴影等干扰,通常采用人工光照或在 CCD 镜头前加装不同波长的滤镜。利用视觉传感器,可以获取 2 种不同类型的图像:灰度图像和彩色图像。利用 B/W CCD 能获得与检测对象颜色无关的灰度图像,而彩色 CCD 或 B/W CCD 加上某种波长的滤镜则可获得彩色图像。无论灰度图像还是彩色图像,所包含的信息都是二维的。对于采摘机器人视觉系统而言,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。获取检测目标三维坐标的方法大致有 3 种办法。

1) 视觉传感器和测距传感器结合,探测目标的空间位置。用黑白 CCD 或彩色 CCD 只能获取检测目标的平面图像,而丢失了深度信息。原始图像经图像增强、图像分割、边缘检测等处理后,计算出其形心坐标。然后利用超声波或激光测距传感器测量目标的深度信息,即 Z 坐标。1987 年,Whittaker 开发了检测和定位西红柿的视觉系统。该系统采用 B/W CCD 在自然光照条件下采集西红柿的 256 色灰度图像。图像经 Sobel 算子处理后,采用优化的圆弧 Hough 变换,将检测目标从背景中分割出来。进而能够计算出如圆心坐标等的几何信息。灰度图像中并不包含距离信息,机械手末端执行器就沿

着视觉轴缓慢接近目标, 由测距传感器实时探测深度信息, 直到接近目标。利用视觉轴探测距离的原理如图 9 所示^[23]。

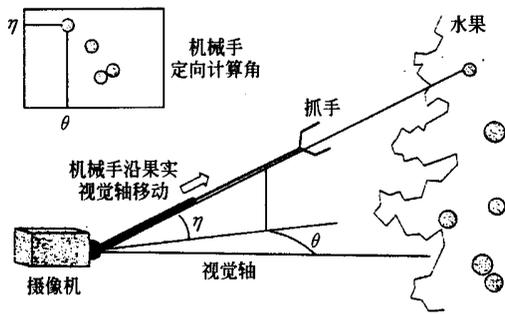


图 9 深度坐标检测原理

Fig 9 Measurement of Z coordinate

2) 双目立体视觉法 立体视觉法采用两个 CCD 作为视觉传感器。两个传感器在空间上间隔一定距离并且视觉轴聚焦于同一场景。左、右两个 CCD 分别获取同一场景的平面图像, 根据立体视觉原理重构 3 维图像, 从而计算出目标的空间坐标。Kassay 在 AUFO 采摘机器人中采用立体视觉方法来获取探测目标的 3 维坐标。两个彩色 CCD 固定在机器人的末端执行器上, 分别获取同一场景的 RGB 图像, 经过域值化处理得到二值图像。二值图像经平滑、边缘检测, 利用圆弧 Hough 变换得到圆弧的中心坐标。通过两幅图像中的特征匹配, 测量出探测目标的 3 维坐标^[24]。

3) 用激光测距仪或 PSD 直接获取三维图像 用激光测距仪或 PSD 可以得到距离图像和反射图像。距离图像和反射图像联合分析, 不仅可以找出物体的形状, 而且还能测出物体的空间分布^[25]。

3 移动式采摘机器人存在的技术难题与对策

采摘机器人要真正达到代替人类完成采摘任务, 并且实用化、普及化, 需要解决如下的技术难题: 采摘环境的非结构化, 要求采摘机器人具有相当高的智能水平、柔性和灵巧性。从目前智能控制理论水平来看, 还不能满足采摘机器人所要求智能程度。采摘机器人的机械手和末端执行器需要具有相当高的柔性和灵巧性, 帮助机器人成功实现避障, 提高采摘的成功率, 降低果实的损伤率。采摘机器人的目标探测和定位, 视觉传感器是采摘机器人用于探测、定位果实的重要手段。目前的采摘机器人视觉传感器大多采用 B/W 或彩色 CCD 作为传感元件, 在自然光或人工光照条件下, 获取采摘对象的图像并进行图像分析和模式识别。由于采摘对象通常掩藏在树叶、树枝中间, 并且果实之间存在相互重叠, 自然光照强度变化和阴影等都对于图像获取和图像分析带来了困难, 影响采摘成功率。采摘机器人的商品化和推广应用存在困难。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, 成本高。采摘机器人的工作具有周期性、短时间等特点, 设备利用率低。对于采摘机器人这样复杂的光机电一体化产品而言, 设备的使用和维护都需要相当高的技术水平。因此, 在目前的条

件下, 农业生产单位是不愿购买采摘机器人。

采摘机器人存在的技术难题, 需要农业工程领域从事采摘机器人研究的专家去思考、重新调整研究思路。针对以上列举的技术难题以及目前采摘机器人的研究现状, 作者认为今后采摘机器人的研究和开发应从下面的几个方向进行努力。

1) 重新认识和定位采摘机器人的智能化程度。对采摘机器人的智能化程度期望过高, 除了增加系统的复杂性和成本外, 对提高采摘成功率毫无益处。在目前技术条件下, 采用人机协作模式的机器人系统是明智之举。这种模式的采摘机器人系统, 符合智能控制的分层递阶原则。对于象发现和定位采摘目标、机器人导航这样复杂的任务, 由人来完成; 对于运动轨迹规划、机械手和末端执行器等控制任务, 由机器人来完成。人的参与, 增强了采摘机器人处理突发事件和不精确事件的能力。采用人机协作模式的采摘机器人, 在不增加系统成本的前提下就大大提高了采摘成功率。

2) 改变作物培育模式。日本在黄瓜采摘机器人研究项目中, 采用倾斜的培育系统, 将黄瓜和叶、茎分开, 便于采摘机器人的视觉定位和采摘。通过降低作物生长环境的非结构化和复杂性, 提高采摘成功率。葡萄种植中也采用了类似的培育系统。

3) 采用开放式控制系统。目前采摘机器人, 甚至整个农业机器人的研究都是沿袭工业机器人的研究思路。机器人采用专用的控制系统, 专用的编程语言和专用的机械结构。专用控制系统基本上是封闭式的, 这种控制系统使机器人的可扩展性、灵活性都受到很大的限制。采摘机器人采用开放式控制系统, 使机器人具有良好的可扩展性、灵活性和可重构性。机器人的标准化和模块化, 不仅可以迅速构建新的机器人系统, 减少开发时间和成本, 还可以减少对用户的培训。

4) 机械结构的可重构性。采摘机器人的作业具有周期性、短时间的特点, 利用率低。机构的可重构性, 使得同一台机器人可以完成不同的作业任务, 达到一机多用。开放式控制系统为机构的重构提供了条件。日本 N. Kondo 等人开发的葡萄采摘机器人就是一种多用途的智能机器人。通过更换不同的末端执行器, 能够完成葡萄枝修剪、套袋、药物喷洒和采摘四种作业。

4 结 语

随着农业工厂化经营模式的推广和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水果生产中。农业生产环境的非结构化、作业对象的生物特性以及农产品的价格因素等, 要求合理定位采摘机器人的智能化程度。采用开放式、可变结构的机器人系统是未来采摘机器人的发展方向。

[参 考 文 献]

- [1] D'Esnon A G, Rabatel G, Pellenc R, Magali A self-propelled robot to pick apples[J]. ASAE Paper No. 87-1037, 1987.
- [2] Buemi F, Massa M, Sandini G. A robot: a robotic sys-

- tem for greenhouse operations [A]. 4th Workshop on robotics in Agriculture[C]. IARP, Toulouse, pages 172-184, 1995.
- [3] Kondo N, et al. Control method for 7DOF robot to harvest tomato [A]. Proceedings of Asian Control Conference [C], 1994, 1-4.
- [4] Kondo N, et al. Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 39(6): 2331-2338.
- [5] Pla F, Juste F, Ferri F. Feature extraction of spherical objects in image analysis: an application to robotic citrus harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1993, 8: 57-72.
- [6] Benady M, Miles G. Locating melons for robotic harvesting using structured light[J]. ASAE Paper, 1992, 92-7021.
- [7] Arima S, et al. Studies on cucumber harvesting robot (Part 1)[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1994, 56(1): 55-64.
- [8] Kondo N, et al. Basic studies on robot to work in vineyard (Part 1)[J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 1993, 55(6): 85-94.
- [9] 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.
- [10] 冈本嗣男. 生物农业智能机器人[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- [11] Ceres R, Pons J L, et al. Design and implementation of an aided fruit-harvesting robot (A gribot) [J]. Industrial robot, 1998, 25(5): 337-346.
- [12] Jimenez A R, Ceres R, Pons J L. A Machine Vision System Using a Laser Radar Applied to Robotic Fruit Harvesting[Z].
- [13] I D. M. スブテタ, 藤蒲建史等. 三次元视觉・センサーを用いたミニトマト収穫ロボット(第2報)——ロボットの構成と収穫実験[J]. 农业机械学会志, 1998, 60(1): 59-68.
- [14] Seiichi Arima, Naoshi Kondo. Cucumber harvesting robot and plant training system [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1999, 11(3).
- [15] Monta M, Kondo N, Shibano Y. Agricultural robot in grape production system [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1995, 2504-2509.
- [16] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000, 76.
- [17] Júlio R C S, Hemery E M. Adaptive control of mobile robots using a neural network [J]. International Journal of Neural Systems, 2001, 11(3): 211-218.
- [18] Ken'ichi Ogasawara, Masaki Arao, Shigeyasu Kawaji. Intelligent algorithm for biped robot for harvesting watermelons [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 1999, 11(3): 183-192.
- [19] 冯建农, 柳明, 吴捷. 自主移动机器人智能导航研究进展[J]. 机器人, 1997, 19(6): 468-478.
- [20] Joris W M Van Dam, Ben J A Kroese, Franciscus C A Groen. Transforming the Ego-centered Internal Representation of an Autonomous Robot with the Cascaded Neural Network (M F 94). [Z].
- [21] Christopher E Smith, Scott A Brandt, Nikolaos P Papanikolopoulos. Vision Sensing for Intelligent Vehicle and Highway Systems (M F 94). [Z].
- [22] Whittaker A D, Miles G E, Mitchell O R, et al. Fruit location in a partially occluded image [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3): 591-597.
- [23] Levi P, Falla R, Pappalardo R. Image controlled robotics applied to citrus fruit harvesting [J]. In Proceedings ROV ISEC- V II, 1988, Zurich.
- [24] Kassay L. Hungarian robotic apple harvester [H]. ASAE Paper, 1992, 92-7042.
- [25] Jimenez A R, Ceres R, Pons J L. A vision system based on a laser range-finder applied to robotic fruit harvesting [J]. Machine Vision and Application, 2000, 11: 321-329.

Present situation and development of mobile harvesting robot

Fang Jianjun

(Electromechanical Engineering College, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract Fruit-harvesting robot is the vital important equipment of precision agriculture in the 21st century and future trend of intelligent agricultural machinery. A mobile harvesting robot consists of manipulator, end-effector, mobile wheels, machine vision and control system and so on. Configuration and degree-of-freedom of manipulator have an effect on intelligent control complexity, operation agility and accuracy of harvesting robot. Auto-navigation of mobile wheel and machine vision system, which are key parts of harvesting robot, were in charge of self-navigation and fruits localization respectively. This paper outlined present research situations of mobile harvesting robot and pointed out technical problems confronting harvesting robot. Solutions including open architecture control system were presented.

Key words: harvesting robot; machine vision; auto-navigation; manipulator; end-effector; open architecture control system