DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.028

智能移动水果采摘机器人设计与试验*

顾宝兴　姬长英　王海青　田光兆　张高阳　王　玲
(南京农业大学工学院,南京 210031)

【摘要】 设计了一种智能移动水果采摘机器人,该机器人主要由智能移动平台、采摘机械臂、末端执行器、横向滑移机构和控制系统组成。用 VC++语言编写了系统控制程序,开发了人机交互界面。样机在江苏省丰县果园进行了综合试验,结果表明:该机器人能够完成自主导航、自主采摘及自主装箱作业,移动平台、采摘机械臂及末端执行器能够实现智能协调控制。整个系统工作性能稳定,成熟果实的识别正确率为 81.73%,采摘成功率为 86.92%,单个苹果采摘平均耗时 9.50 s。

关键词:水果　采摘机器人　末端执行器　机器视觉　移动平台
中图分类号:TP391.41;TP242.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2012)06-0153-08

Design and Experiment of Intelligent Mobile Fruit Picking Robot

Gu Baoxing　Ji Changying　Wang Haiqing　Tian Guangzhao　Zhang Gaoyang　Wang Ling
(*College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract

A prototype for intelligent fruit picking operation was developed. It mainly consisted of intelligent mobile platform, picking arm, end-effector, transverse sliding institution and control systems. The system control program and human-machine interface were programmed with VC++. The comprehensive experiments of the prototype were carried out in the orchard of Feng county in Jiangsu province. Results revealed that this robot could achieve autonomous navigation, independent picking and autonomous binning operation. The mobile platform, picking arm and end-effector can work coordinately, so the whole system performed very well. The correct rate of ripe fruit recognition and success rate of picking reached to 81.73% and 86.92%, respectively, whereas averagely 9.50 s were required for picking a single apple.

Key words　Fruit, Picking robot, End-effector, Machine vision, Mobile platform

引言

水果采摘是水果生产中最耗时、最费力的环节之一,需投入的劳动力占整个生产过程的 40% 左右[1]。为了使广大果农从繁重的水果采摘作业中解放出来,国内外很多专家和学者致力于水果采摘机器人的研究。

目前,比利时、法国、韩国、美国和日本等国家已取得了一些研究成果[2~3]。其中,比利时的 Baeten 等研发了一种苹果采摘机器人[4],该系统采用工业机器人作为采摘机械臂,整个采摘机械臂及其控制系统安装在拖拉机后端。法国的 Pedenc 和 Motte 等研制了“MAGAL”苹果收获机器人[5],该机器人利用 CCD 摄像机采集果实图像,采摘的果实通过中空的手臂滑落到果实收集箱内。相对于以上这些国家,我国在该领域的研究起步较晚,但发展速度很快。

收稿日期:2012-01-31　修回日期:2012-03-19
*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z259)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(KYZ201006)和南京农业大学青年科技创新基金资助项目(KJ09030)
作者简介:顾宝兴,博士生,主要从事农业机器人、机器视觉和机电一体化研究,E-mail:gbx6454@163.com
通讯作者:姬长英,教授,博士生导师,主要从事机电一体化、农业机器人和土壤机械研究,E-mail:chyji@njau.edu.cn

目前国内不少高校已取得了一些研究成果:赵庆波等设计了一种 5 自由度串联关节型苹果采摘机械臂[6];张志勇等对苹果采摘机器人手臂控制进行了研究[7]。综上所述,国内外科研人员在该领域作了许多研究工作,但水果智能化采摘是极其复杂的系统工程,目前仍有不少难题没有解决。比如以往研究大多集中在水果采摘机械臂、移动平台、末端执行器、传感器系统和图像处理算法等单方面的研究,很少有人将这几部分内容结合在一起深入研究,导致耗费很多人力、物力、财力研究的成果仍无法转换为实际生产力。

为解决以上问题,本文结合果园水果采摘的具体要求,提出一种智能移动水果采摘机器人样机设计方案。该样机将水果采摘机械臂、移动平台、末端执行器、传感器系统和图像处理算法等关键技术融合在一起,实现移动平台导航、采摘机械臂运动、末端执行器抓取及果实装箱等关键动作的智能协调控制,从而实现水果采摘的智能化。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

智能移动水果采摘机器人主要由机械执行系统及其控制系统 2 大部分组成。机械执行系统如图 1 所示,主要包括移动平台、采摘机械臂、末端执行器及横向滑移机构等,其中移动平台包括履带式行走装置、机架、固定平台和减速器等。控制系统主要包括工控机、机械臂控制器、运动控制卡、末端执行器控制器、数据采集卡、双目摄像机、1394 转接卡、GPS、编码器、力传感器、滑觉传感器、电动机驱动器和控制电路等。

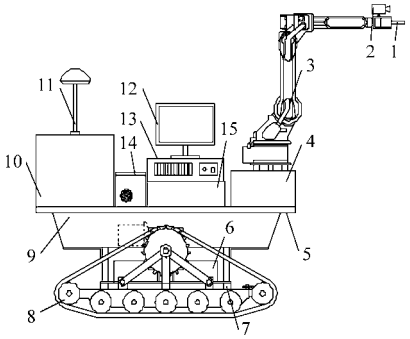


图 1 智能移动水果采摘机器人结构简图

Fig. 1 Structure of intelligent mobile fruit picking robot

1. 末端执行器 2. 双目摄像机 3. 采摘机械臂 4. 水果收集箱 5. 固定平台 6. 锂电池系统 7. 机架 8. 履带式行走装置 9. 后箱体 10. 机械臂控制器 11. GPS 天线 12. 显示器 13. 工控机 14. 电动机驱动器 15. 电气柜

1.2 工作原理

移动平台果园作业时可实现自主导航,当系统检测到移动平台行走至目标果树位置时,上位机向运动控制卡发送移动平台电动机停止转动指令,同时通过 RS232 向采摘机械臂控制器发送控制指令,使机械臂旋转至各个图像采集位姿。完成果树图像采集后,上位机对成熟果实及障碍物进行识别和定位,并根据果实的坐标和障碍物位置对机械臂采摘路径进行规划和运动学求解。当机械臂运动至目标位姿后,上位机通过 RS232 向末端执行器的控制器发送控制指令,末端执行器开始抓取果实。采摘范围内的果实采摘完毕后,机械臂自动旋转至导航初始位姿,继续执行上述移动平台自主导航和果实自主采摘作业。

如果前进过程中双目摄像机检测到障碍物,上位机便将检测的障碍物大小信息、距离障碍物的深度信息、障碍物相对小车的方位信息、路面的环境信息以及 GPS 检测到的移动平台当前位姿信息进行决策处理计算。如果计算结果显示移动平台可以避障,则系统立刻调用避障程序;否则,移动平台立刻停在原地并发出警报。

2 主要工作部件

2.1 履带式移动平台

为了获取准确的行驶路径和障碍物的距离等信息,双目摄像机采集图像时必须尽可能减少移动平台行驶过程中的振动。为此,设计中采用减震性能较好的橡胶履带。为了避免橡胶履带与钢制驱动轮配合造成橡胶履带磨损过快的缺陷,驱动轮采用超高分子聚乙烯材料。

履带式移动平台结构简图如图 1 所示,机械部分主要由驱动轮、导向轮、承重轮、张紧轮、张紧机构、橡胶履带、减速器、安川电动机、机架、固定平台等组成。移动平台的行走装置采用安川电动机来驱动,系统只需改变驱动器设置,便可实现直流和交流供电的切换,大大减少部分果园没有三相交流电的使用限制。

2.2 横向滑移机构

对于无遮挡或有小部分遮挡的果实而言,有 2 种情况易造成果实漏摘:当双目摄像机与果实之间的距离小于 0.85 m 时,双目摄像机不能准确对果实进行立体匹配(摄像机性能参数决定);当果实距离采摘机械臂基坐标系原点大于 1.75 m 时,果实超出机械臂采摘范围。为了减少漏摘,前期采取的方案是调整机械臂位姿,使摄像机远离果树,并采用向下倾斜的姿态采集图像,这样双目摄像机与果实的距离便能大于 0.85 m。研究发现,该方案可解决部分问题,但也容易导致另一个难题的出现:在调整后

的摄像机采集的图像中，果实被更多枝叶遮挡，果实识别难度增大。为此，本研究中采用另一种设计方案：在固定平台前端设计如图 2 所示的横向滑移机构，机械臂底座固定在滑移机构的滑台上。这样双目摄像机与果树之间的距离以及机械臂与果树的距离均能方便调节。因图像采集距离小于 0.85 m 以及果实距离机械臂基坐标系原点大于 1.75 m 造成的漏摘问题均可解决。

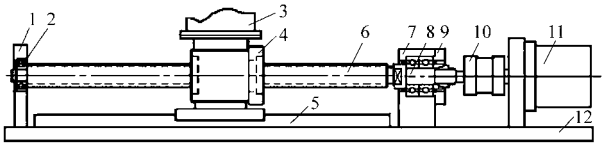


图 2　横向滑移机构结构简图

Fig. 2　Structure sketch of transverse sliding institution

1. 轴承座Ⅰ　2. 轴承Ⅰ　3. 机械臂底座　4. 滑台　5. 导向滑槽　6. 丝杠　7. 轴承座Ⅱ　8. 轴承Ⅱ　9. 轴承盖　10. 联轴器　11. 伺服电动机　12. 固定平台

横向滑移机构最大行程为 800 mm，滑台进给速度范围为 0 ~ 200 mm/s，丝杆的螺距为 8 mm，电动机最高转速为 1 500 r/min。

2.3　采摘机械臂与末端执行器

选用日本安川公司的 MOTOMA N－SSF2000 型工业机器人作为采摘机械臂，结构简图如图 1 所示。采摘机械臂额定负载 6 kg，重复精度 ±0.03 mm，采摘半径为 1 378 mm，垂直伸展高度为2 403 mm，机械臂底座距离地面高度为 1 200 mm。以苹果树为例，目前种植的趋势是矮化密植，果树的高度一般在 2.5 m 左右，采摘机器人结构尺寸可以满足采摘要求。采用德国 SCHUNK 公司的 EVG 55 HUB100 型末端执行器，具体结构如图 3 所示。

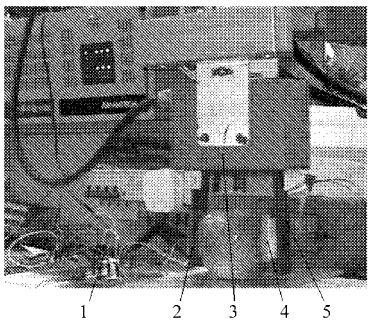


图 3　末端执行器实物图

Fig. 3　Structure of end-effector

1. 信号放大电路　2. 力传感器　3. 末端执行器　4. 滑觉传感器　5. 夹持手指

3　机器视觉系统

3.1　果树图像采集

因摄像机视野所限，只采集 1 幅图像不能覆盖整棵果树，所以采集图像时机械臂需运动至多个不同的采集位姿。不同树龄的果树树冠大小不一样，要覆盖整棵果树所需采集的图像数量也不一样。试验时，根据树冠实际大小由人工控制机械臂到达各个理想的图像采集位姿，并用机械臂示教器读取每个位姿处各关节的脉冲位置参数，然后将其分别赋值给机械臂运动控制函数的各个变量，上位机调用机械臂运动控制函数就可控制摄像机到达人工选定的各个图像采集位姿。对于同一规范种植的果园，果树树龄一般相同且树冠大小差异也很小，所以图像采集位姿只需对第 1 棵果树进行设置，其他果树的图像采集方法参照第 1 棵果树。

采摘机器人的行走路径为果树行中心线，成行的果树与采摘机器人之间的距离变化很小，所以摄像机采集图像时与果树之间的距离变化也很小。另外，由于人工设定位姿时，采集图像能够覆盖整棵果树且留有较大的余量，因此即便是果树树冠大小有所差异，只要差异不是很大，结合所留的余量仍能覆盖整棵果树。

采摘试验表明：所选果园的树龄为 6 年，大部分果树需采集 6 幅图像方可完全覆盖，图 4a 为试验时摄像机所采集图像对果树的覆盖情况。为了防止交界处的果实漏摘，采集图像时在图 4a 中的单向剖面线部分留有重叠区域。对于重叠区域的果实，如果第 1 次就被成功采摘，则在下一幅相邻图像上就不会再出现该果实图像。反之，如果第 1 次采摘不成功，这部分漏摘的果实图像会再次出现在下一幅相邻图像的重叠区域，系统会对这部分漏摘的果实进行补摘。同理，对于图 4a 中双向剖面线部分的果实，系统也能进行补摘。图 4b 为机械臂运动至每个图像采集位姿，摄像机采集图像所覆盖果树的各个区域。

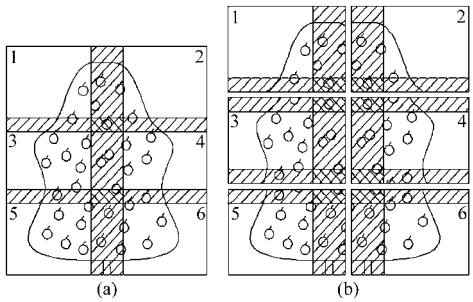


图 4　果树图像分布

Fig. 4　Distribution of fruit tree images

(a) 6 幅图像在果树上的整体分布

(b) 摄像机每个采集位姿处所采集图像的覆盖范围

采摘机器人在果树行间作业时只负责采摘其两侧的果实，如果目标果实与机械臂基坐标系原点的距离超过采摘范围，采摘机器人便会自动放弃该果实的采摘。对于背面的果实在机器人换到另一行时

采摘即可。对于果树侧面的果实,以上采集的 6 幅图像已经覆盖,侧面果实的采摘与正面的采摘方法类似。

系统每采集一幅图像,紧接着就进行果实识别和定位处理,并保存该幅图像中所有成熟果实位姿信息,然后由上位机根据果实位姿信息进行机械臂采摘路径规划。待一幅图像内识别成熟的果实采摘完毕后,机械臂自行运动至另一个图像采集位姿,并重复以上图像采集过程,直至 6 幅图像中的所有被识别的成熟果实采完毕,移动平台才会移动到下一棵果树。

3.2 果实识别和定位

果实识别采用颜色、面积及形状特征相结合的方法。在果实图像中,苹果的红色分量较高,而背景的绿色分量较高,果实与背景的红绿色差差异明显(图 5a)。为了减少光线的干扰,首先对色差值进行归一化处理,采用 RGB 颜色空间的色差分量 $2R-G$ 对图像进行处理,并用 Ostu 自适应阈值进行分割,具体分割效果如图 5b 所示。接着采用 3×3 的正方形结构元素对图 5b 进行形态学开运算和闭运算各 2 次,去除图像噪声点,然后再用区域标记算法,去除面积小于最大面积 1/5 的噪声点,并对标记后的图像进行区域填充,处理效果如图 5c 所示。最后再用圆形 Hough 变换对部分遮挡的果实图像进行拟合,并算出果实的圆心和半径,其处理效果如图 5d 所示。

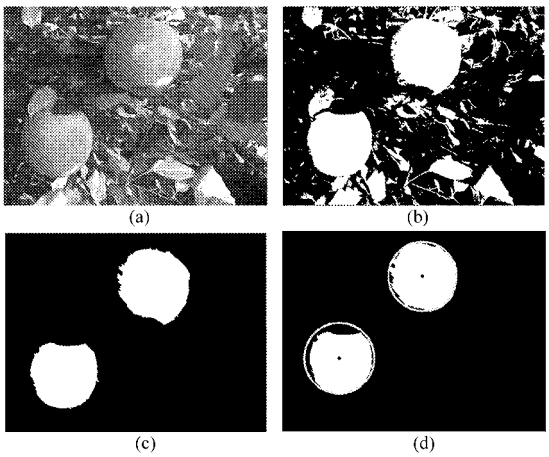


图 5 果实图像识别

Fig. 5 Recognition of fruit image

(a) 原始图像 (b) $2R-G$ 和 Ostu 结合

(c) 形态学运算、区域标记、区域填充 (d) Hough 圆变换

系统采用双目视觉的视差进行果实定位,具体原理详见文献[8~9]。果实的立体匹配采用摄像机处理函数库自带的匹配算法,在程序开发时只需调用 triclopsRCD16ToXYZ (triclops, ty, tx, disparity, &x, &y, &z)函数,便可得到果实在相机坐标系下的坐标值(其中 x、y、z 为返回的果实坐标值)。

4 控制系统设计

4.1 硬件系统设计

智能移动水果采摘机器人的控制系统主要由上位机控制器、下位机控制器和传感器系统等部分组成,硬件结构框图如图 6 所示。

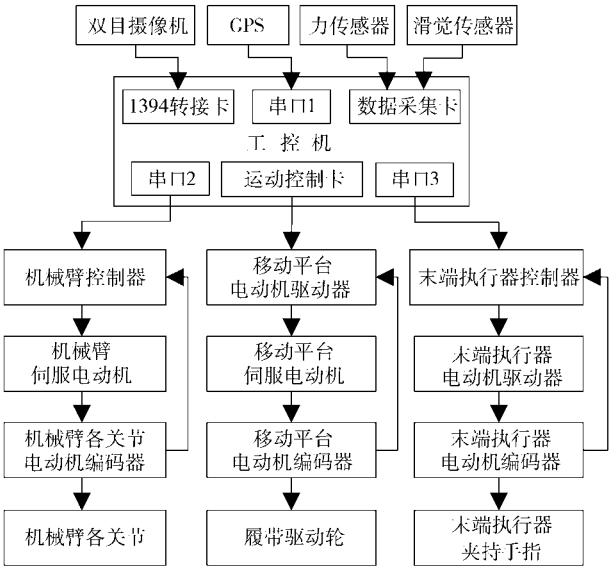


图 6 硬件结构框图

Fig. 6 Diagram of hardware structure

4.1.1 上位机和下位机控制器

整个控制系统采用上位机和下位机两层结构,上位机控制器采用研华 IPC610 - H 型工控机,其 CPU 为 Core2 双核,主频为 2.66 GHz,内存 2 GB。下位机控制器包括:机械臂控制器、末端执行器控制器及移动平台控制器。机械臂控制器通过 RS232 与上位机控制器进行通信。末端执行器的控制器也通过 RS232 与上位机控制器进行通信,该控制器用来控制末端执行器手指闭合和张开的速度与位置。移动平台控制器采用研华 PCI1240U,该控制器通过 PCI 总线与上位机控制器进行通信,该控制器能控制 4 个自由度,移动平台只需使用其中两轴,其他两轴可进行功能拓展。

4.1.2 传感器系统

传感器系统主要由双目摄像机、GPS、力传感器和滑觉传感器等组成。采用 Point Grey Research 公司的 bumblebee2 型双目摄像机,其焦距为 3.8 mm,基线长 120 mm。摄像机通过 IEEE - 1394 转接卡与计算机进行数据传输。GPS 采用 JAVAD 公司的产品,接收机型号为 DELTA - G2T 和 DELTAD - G2D,接收机天线型号为 GPS702 - GG。该系统可实现精确定位和测向。差分定位精度为厘米级,航向精度

为(0.2/L)°，L 为天线间距。力与滑觉传感器型号分别为 FSR－402 和 FSR－406。

4.2　软件系统

整个软件系统在 VC＋＋中开发完成，其程序流程图和人机交互界面分别如图 7、8 所示，程序流程简述如下：

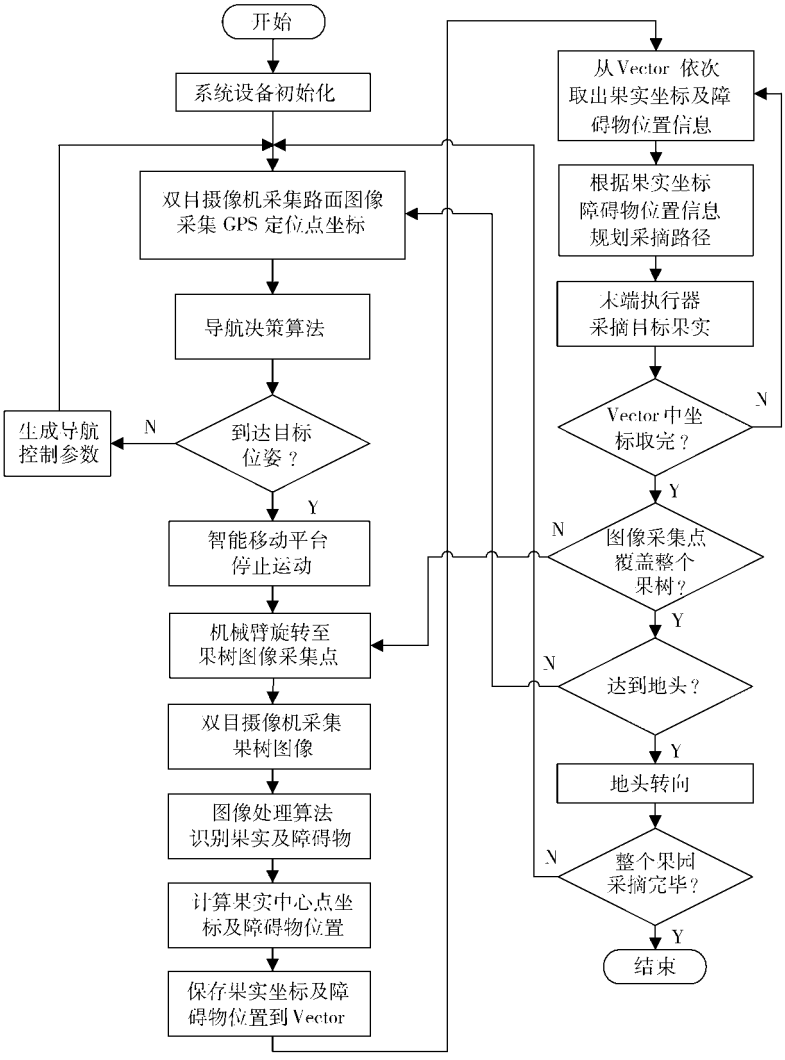


图 7　上位机软件流程图

Fig. 7　Flow chart of software of upper computer

(1)各系统设备初始化。

(2)上位机首先通过 RS232 采集 GPS 的位置坐标及航向信息，通过 IEEE－1394 采集双目摄像机拍摄的路面图像信息，然后再由上位机对所采集数据进行决策分析计算，生成导航控制参数，进而实现移动平台自主导航。

(3)上位机通过 IEEE－1394 采集双目摄像机拍摄的果树图像，对成熟果实及障碍物进行识别和定位，并保存果实中心点坐标及障碍物位置信息。然后再由上位机根据果实中心点坐标及障碍物位置信息对机械臂采摘路径进行规划和运动学求解。

(4)当机械臂运动至目标位姿后，上位机通过 RS232 向末端执行器控制器发送指令，使末端执行器抓取果实，直到机械臂采摘范围内的果实采摘完毕。

(5)机械臂旋转导航初始位姿，并重复以上自主导航和自主采摘过程。当上位机检测到果树行特征逐渐减少至消失，说明移动平台到达地头，上位机调用转向控制函数，移动平台开始地头自动转向。当系统检测到 GPS 坐标值到达终点时，整个采摘任务结束。

5　采摘机械臂路径规划

机械臂路径规划是果实采摘的关键问题之一。本研究针对果树生长状况及果枝分布特点，采用多段路径规划来完成机械臂的运动控制。路径规划的主要任务是使末端执行器运动至适合果实采摘的目标位姿，关于果实姿态的识别详见文献[10～11]。

如图 9 所示，XYZ 为机械臂的基坐标系，O 为坐标原点，F 为果实中心点，F'为果实中心在 XOY 平

图 8 控制系统人机界面

Fig. 8 Human-computer interface of control system

面内的投影。A、B、C、D 分别为机械臂处于不同位姿时其末端执行器的对称中心点。当机械臂处于初始位姿时,其末端执行器的对称中心点为 A;当机械臂处于图像采集位姿时,其末端执行器的对称中心点为 B;当机械臂处于分段路径规划的第 1 个目标位姿时,其末端执行器的对称中心点为 C;当机械臂处于分段路径规划的第 2 个目标位姿时,其末端执行器的对称中心点为 D。

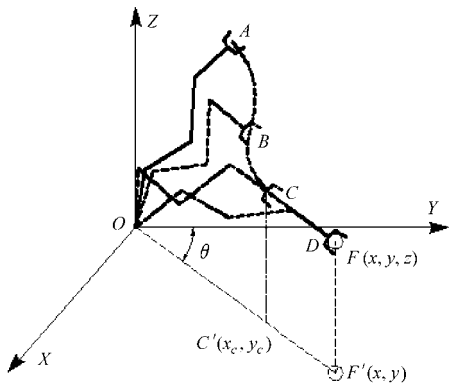


图 9 机械臂路径规划示意图

Fig. 9 Schemes of path planning of picking arm

图像采集位姿在采摘之前就已给定,故点 B 的坐标已知,点 D 的坐标可由双目视觉系统求得,所以要完成整个路径的规划,必须要求出点 C 的坐标,点 C 与点 D 之间的距离设为 L,试验中确定 L 长度为 0.5 m,由以上已知条件可求得 C 点的坐标为

$$\begin{cases} x_c = \dfrac{(\sqrt{x^2+y^2}-L)x}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ y_c = \dfrac{(\sqrt{x^2+y^2}-L)y}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ z_c = z \end{cases} \tag{1}$$

双目摄像机完成图像采集后,机械臂腰关节旋转至与 Y 轴夹角为 θ 处。

$$\theta = \arctan(x/y) \tag{2}$$

水果采摘时,机械臂在以点 FOF' 构成的平面内运动,考虑到机械臂运动的平顺性,A 到 B 及 B 到 C 之间路径均采用 PTP 的圆弧插补方式运动。由于 A 到 B 及 B 到 C 之间路径是针对果园现场采摘环境进行规划的,所以在绝大部分情况下不会与树枝等障碍物发生碰撞。C 到 D 之间路径采用 PTP 的直线插补方式运动,在直线插补过程中,末端执行器的姿态保持不变,只在平面 FOF' 内作直线平移,这就简化了机械臂的运动学求解。同时对应果实的采摘所需空间位置变小,末端执行器碰到果枝等障碍物的几率也大幅降低,从而保证果实采摘的成功率。果实与果枝分离后,先由 D 回到 C,再由 C 回到果实收集箱上方,然后松开末端执行器夹持手指,果实下落到收集箱内。

在采摘试验中发现有部分果实处于错综复杂的果枝内部,对于这部分果实,无论采用什么路径规划和避障手段都无法完成抓取。该问题同样也是国内外很多同行面临的难题之一,到目前为止还没有好的解决办法。张勤等采用采摘机器人与农艺结合的方法及把果树修剪成平面篱笆状,该种方法可降低果枝分布复杂程度,有效地减少机械臂与果枝的碰撞,但这种修剪方法对果树的产量和果品质量是否有影响,还有待后续试验验证。

6 综合试验与结果分析

6.1 试验目的

田间果园试验主要目的有 2 个方面:测定智能移动水果采摘机器人的移动平台、采摘机械臂、末端执行器是否能够完成智能协调控制;测定在不同光照条件下成熟果实的识别正确率、采摘成功率及采摘效率。

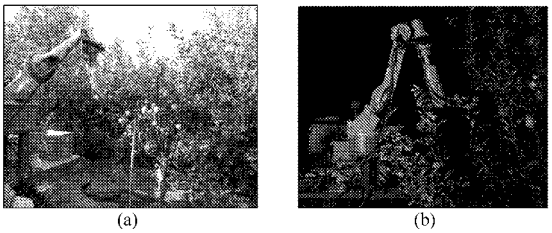
6.2 试验条件

2011 年 10 月 15 ~ 20 日在江苏省徐州市丰县宋楼镇进行了综合试验。试验果树品种为弘前富士,其行距为 4 m,株距为 3.7 m,树龄为 6 年。双目摄像机采集的图像设为 640 × 480 像素,GPS 数据传输速度设为 115 200 b/s。移动平台运动控制、水果采摘机械臂与末端执行器的控制、图像处理的算法实现及传感器系统的信号采集等所有软件程序及人机交互界面的开发均在 VC + +6.0 中进行。

试验样机及场地环境如图 10 所示。试验前,对于部分遮挡严重的果实,做了少量的处理,在没有其他人工干预的条件下,该机器人进行了自主果实采摘试验。

6.3 有风环境下的果实采摘

对于风力小于 4 级的环境,经过大片果园的层层削弱,到达试验果树时,风力影响已变的很微弱,



(a)　(b)

图 10　采摘机器人综合试验

Fig. 10　Comprehensive experiments of picking robot

(a) 白天　(b) 晚间

基本不会影响果实的采摘效果。

对于风力较强环境下的目标果实检测，可采用基于光流场的检测方法，利用运动的目标果实随时间变化的光流场特性，求出图像上每点的光流，再利用光流来恢复目标果实的运动位置。该方法理论上可行，但实际计算非常耗时，很难保证水果采摘的实时性要求。为此，本文采用一种简单易行设计思路：即设计一种随机器人同步移动的挡风屏障，这种挡风屏障不仅可以挡风，而且可用来遮挡强光，提高果实的识别正确率。

6.4　采摘试验及试验结果

人工采摘苹果时，果农一般采用简易的水果采摘机械手，抓住水果后采用一种类似自行车车闸的锁紧装置固定果实，然后将果梗轻轻上抬并加以一定的扭转，由于果梗与果枝连接处为应力集中地带，因此果实与树枝便可轻松分离。基于以上特点，机械臂在采摘果实时，模拟人工使用简易机械手动作的同时，还加入了下拉动作。试验表明该方法效果非常好，完全满足苹果采摘的要求。

果园采摘试验的结果如表 2 所示。试验过程中，水果采摘机器人能够完成自主导航、自主采摘及自主装箱等作业。智能移动平台、水果采摘机械臂及末端执行器能够实现智能协调控制。

6.5　结果分析

试验结束后，根据工控机录制的视频及双目摄像机采集图像时保存的图片，对果实采摘失败的原因进行了分析和统计。统计结果如下：因枝叶过多遮挡造成的失败次数为 101 次，因果实识别和定位造成的失败次数为 63 次，因枝叶与机械臂碰撞导致果实位置偏移造成的失败次数为 46 次，因果实尺寸超过末端执行器夹持手指夹持范围造成的失败次数为 14 次，因末端执行器的滑觉传感器响应速度问题造成的失败次数为 32 次。

表 2　试验结果

Tab. 2　Results of experiment

参数	获取环境条件				总计	平均值
	晴天逆光	晴天顺光	阴天	晚间		
图像数目/幅	50	50	50	30	180	
成熟果实数/个	243	257	236	162	898	
正确识别数/个	182	211	198	143	734	
采摘成功数/个	156	183	172	127	638	
识别正确率/%	74.89	82.10	83.89	88.27		81.73
采摘成功率*/%	85.71	86.73	86.87	88.81		86.92
平均识别时间/s	1.28	1.21	1.18	1.09		1.19
单果采摘平均耗时/s	9.35	9.63	9.53	9.48		9.50

注：* 采摘成功率为果实采摘成功数与正确识别数的比值。

果实识别和定位造成失败的主要原因是逆光采摘时光线干扰太强所致。晴天顺光和阴天光线干扰较弱，果实识别正确率较高。晚间试验使用辅助光源光线干扰最小，果实识别正确率最为理想。

7　结论

(1)根据水果智能化采摘作业要求，开发了智能移动水果采摘机器人的机械本体，该机器人具有结构简单、动作灵活、采摘机械臂能适应高速采摘等优点。

(2)采用色差 $2R-G$ 对图像进行处理，并用 Ostu 自适应阈值分割算法对图像进行分割，然后采用 Hough 圆变换对部分遮挡的果实进行拟合，试验表明，该算法对光线变化环境下的果实识别有较好的适应能力。

(3)在 VC + +6.0 中编写了智能移动水果采摘机器人系统控制程序，开发了人机交互界面。

(4)整个系统将移动平台、水果采摘机械臂、末端执行器、传感器系统和图像处理算法等部分关键技术融合在一起，实现了移动平台导航、采摘机械臂运动、末端执行器抓取及水果装箱等关键动作的智能协调控制，从而真正实现了水果采摘的智能化、无人化。

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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 158 ~ 162. (in Chinese)

2　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.
Tang Xiuying, Zhang Tiezhong. Robotics for fruit and vegetable harvesting: a review[J]. Robot, 2005, 27(1): 90 ~ 96. (in

Chinese)

3 Takashi Kataoka, Akiko Murakami, Duke M Bulanon, et al. Estimating apple fruit locations for manipulation by apple harvesting robot [C]// IFAC Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bio-Production Systems 2000: Proceedings of the 2nd IFAC/CIGR International Workshop, 2000.

4 Baeten J, Donne K, Boedrij S, et al. Autonomous fruit picking machine: a robotic apple harvester [M]. Christian Laugier, Roland Siegwart. Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR): Field and Service Robotics, 2008, 42: 531 ~539.

5 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.
Yang Wenliang. Design and analysis of apple harvesting robot's manipulator [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)

6 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.
Zhao Qingbo. Research on control and obstacle avoidance technologies of fruit harvesting robot [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)

7 张志勇,何东健,张建锋,等. 苹果采摘机器人手臂控制研究[J]. 中国农业大学学报,2008,13(2):78 ~82.
Zhang Zhiyong, He Dongjian, Zhang Jianfeng, et al. Research on controlled system of apple picking robot arm[J]. Journal of China Agricultural University, 2008, 13(2): 78 ~82. (in Chinese)

8 蔡健荣, 李玉良,范军,等. 成熟柑橘的图像识别及空间定位研究[J]. 微计算机信息,2007,23(12):224 ~225,314.
Cai Jianrong, Li Yuliang, Fan Jun, et al. Image recognition and three-dimensional location of mature oranges from nature scene[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(12): 224 ~225, 314. (in Chinese)

9 郑小东,赵杰文,刘木华. 基于双目立体视觉的番茄识别与定位技术[J]. 计算机工程,2004,30(22):115 ~116,171.
Zheng Xiaodong, Zhao Jiewen, Liu Muhua. Tomatoes recognition and location from nature background based on binocular stereo vision[J]. Computer Engineering, 2004, 30(22): 115 ~116, 171. (in Chinese)

10 周俊,张高阳,刘锐,等. 基于粒子滤波的苹果采摘机器人目标姿态估算[J]. 农业机械学报,2011,42(3):161 ~165.
Zhou Jun, Zhang Gaoyang, Liu Rui, et al. Apple attitude estimation based on particle filter for harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 161 ~165. (in Chinese)

11 谢忠红,徐莹,姬长英,等. 基于机器视觉的苹果生长姿态估算识别多方法融合[J]. 农业机械学报,2011,42(11):155 ~157,153.
Xie Zhonghong, Xu Ying, Ji Changying, et al. Estimation method of apple growing attitude based on computer vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 155 ~157, 153. (in Chinese)

(上接第 41 页)

10 贾洪雷. 东北垄作蓄水保墒耕作技术及其配套的联合少耕机具研究[D]. 长春:吉林大学,2005.
Jia Honglei. Study on ridge cultivation and matching combined minimum tillage implements for soil water storage and preservation in Northeastern China[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)

11 贾洪雷,汲文峰,韩伟峰,等. 旋耕-碎茬通用刀片结构参数优化试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):45 ~50.
Jia Honglei, Ji Wenfeng, Han Weifeng, et al. Optimization experiment of structure parameters of rototilling and stubble breaking universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 45 ~50. (in Chinese)

12 贾洪雷,黄东岩,刘晓亮,等. 耕作刀片在刀辊上的多头螺旋线对称排列法[J]. 农业工程学报,2011,27(4):111 ~116.
Jia Honglei, Huang Dongyan, Liu Xiaoliang, et al. Symmetrical multi-spiral arrangement of tillage blades on rotor [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 111 ~116. (in Chinese)

13 韩伟峰. 仿生智能耕地机通用刀辊设计与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
Han Weifeng. Design and experimental research of universal knife roller for bionic intelligent soil preparation machine[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)

14 吉林大学. 仿生旋耕碎茬通用刀片:中国, ZL200610163206. 1[P]. 2009 - 12 - 16.

15 汲文峰,贾洪雷,佟金,等. 通用刀片功率消耗影响因素分析与田间试验[J]. 农业机械学报,2010,41(2):35 ~41.
Ji Wenfeng, Jia Honglei, Tong Jin, et al. Analysis of influencing factors on power consumption and field test of universal blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 35 ~41. (in Chinese)

16 庄维林. 行间耕整机通用刀辊设计与试验[D]. 长春:吉林大学,2011.
Zhuang Weilin. Design and experimental research of universal blade rotor for inter-row rototilling machine[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

17 李发美. 分析化学[M]. 北京:人民卫生出版社,1986.