

基于双目视觉的球形果实单体采摘终端装置研究

Research on the single spherical fruit picking terminal
device based on a binocular vision

王润涛¹ 李 明¹ 龚振平²

WANG Run-tao¹ LI Ming¹ GONG Zhen-ping²

(1. 岭南师范学院信息工程学院, 广东 湛江 524048; 2. 东北农业大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)
(1. School of Information Engineering, Lingnan Normal University, Guangdong, Zhanjiang 524048, China;
2. Agricultural College, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China)

摘要:设计以球形果实单体为对象的采摘终端装置,该装置主要由双目视觉系统、嵌入式控制核心、机械臂与采摘器组成。对番茄果实图像识别进行了算法设计,提出了约束性 Hough 变换圆形检测算法完成了遮挡果实分割,基于改进 PMF 立体对应点算法实现了果实左右图像的立体匹配,获取果实三维质心坐标。通过对番茄、苹果、柑橘 3 类果实的采摘试验,结果表明:装置各模块能够协调稳定工作,采摘终端对成熟果实的成功识别率达 87.5%;成功采摘率达 85%。

关键词:双目视觉;球形果实;采摘终端;特征提取;立体匹配

Abstract: The terminal device was designed for spherical fruit picking. It was presented the working process and hardware structure of the device, including the binocular vision system, the embedded control core, the mechanical arm and the picker. The proposed algorithm of binding Hough transform circular detection could complete the occlusion fruit segmentation. Based on the improved PMF stereo correspondence point algorithm, the 3D matching of left and right fruit images was realized, and the 3D centered coordinates of fruit were also obtained. The results of the picking experiments on tomato, apple and citrus fruits showed that the module could coordinate and work steadily with 87.5% of successful recognition rate and 85% of picking rate of the mature fruits.

Keywords: binocular vision; the spherical fruit; picking terminal; feature extraction; stereo matching

“及时无损”是果蔬采摘收获的关键,尤其是果蔬进入成

熟期后,需要在短时间内进行采摘处理,且保证果实表面不被损伤,才能实现贮藏时间长、不易腐烂,高效快速的采收方法对果蔬产品贮藏运销有着重要的意义。收获时节,农民采取人工方式进行果蔬采摘收获,需要消耗大量的人力物力,间接增加了果蔬产品的生产成本。果蔬采摘自动化、智能化是农业生产发展的主流趋势,国内外许多专家学者在果蔬采摘机器人方面做出了大量研究,20 世纪 80 年代,日本、美国、荷兰已经致力于收获机器人的研发,随着电子科技的飞速发展,智能收获机器人技术日趋成熟^[1-2]。中国在农用机器人研发方面起步较晚,由于果蔬类别与外形多样性和随机性,要求采摘机器人的设计方案需要根据采摘对象量身定制,葡萄^[3]、荔枝^[4]、香蕉^[5]等串生果实需识别主茎根部,且采摘过程果粒易脱落,自动化采摘难度较大,果蔬中有 80% 是类圆形果实,苹果、柑橘、番茄等果实以单体采摘为主,实现自动化收获具有更大的研发空间。

近年,已有很多以球形果实单体为采摘对象的相关研究,如采摘机械手设计^[6]、果实采摘点识别^[7-8]、采摘臂控制方法^[9-10]等,虽然能够实现高效采摘的目的,但存在机械结构复杂、视频设备昂贵、控制流程冗余的不足。本试验采用经济型摄像机作为视频采集模块对球形果实目标进行三维建模,相较于高光谱设备、近红外分析设备,节约了研发成本;采用数字信号处理器(Digital Signal Processing, DSP)、微处理器(Advanced RISC Machines, ARM)相结合构建核心控制系统,相较于 PC 机减小了体积;采摘终端采用内附缓冲膜的半球形结构,相较复杂的机械手具有结构简单、减小损伤的优势,更易于推广应用。

1 试验装置整体结构

采摘终端的设计目的是完成果实单体采摘,需要安装于可移动云台或自主行走车体,能够实现整体的智能采摘机器人功能,采摘终端模型如图 1 所示,主要由双目视觉定位识

基金项目:中国博士后科学基金(编号:2016M601406);黑龙江省博士后基金(编号:LBH-Z15024);东北农业大学 SIPT 项目(编号:201610224003)

作者简介:王润涛,男,岭南师范学院讲师,博士。

通信作者:李明(1984—),女,岭南师范学院实验师,硕士。

E-mail:601939971@qq.com

收稿日期:2018-03-07

a_i, μ_i, σ_i ——区域 i 的高斯分布参数。

高斯分布的最优参数由最小化适合函数 F 计算:

$$F = \sum_{g \in G} [h_{\text{model}}(g) - h_{\text{region}}(g)]^2. \tag{2}$$

如图 5 所示,最优迭代与自适应阈值结合算法分割结果中包含离散小面积噪声干扰以及大区域内部空洞,会造成特征提取环节的误判,通过计算最大连通区域面积 S ,设定面积阈值为 $S/4$,从而删除掉小于该面积阈值的噪声区域,并通过形态学腐蚀与膨胀运算完成大区域内部空洞填充^[11],处理结果见图 6。



图 5 阈值分割结果

Figure 5 Threshold segmentation



图 6 去噪算法结果

Figure 6 Denoising algorithm

2.2 特征提取

为获取空间坐标数据,有效特征基元的选取是实现立体匹配的基本条件^[12],背景分割后的图像中存在 3 种情况:① 独立完整果实区域;② 独立果实区域部分被叶片遮挡形成缺口;③ 多个果实粘连区域且果实间相互遮挡。图像的立体匹配有基于图像颜色灰度和基于图像形状特征 2 种方式,光照、果实间遮挡造成果实成像后颜色畸变较大,而同一果实在立体成像中有相似的几何特性,本文使用 Hough 变换的圆形检测算法能够实现重叠或部分遮挡物体的分割,根据圆的曲线解析表达式:

$$(X_1 - a)^2 + (X_2 - b)^2 = r^2, \tag{3}$$

式中:

r ——半径,像素;

(a, b) ——圆心位置;

(X_1, X_2) ——对象的轮廓坐标。

以 $a-b-r$ 作为三维空间建立累加器,遍历搜索累加数组,如果点 (a, b) 与点 X 的距离为 r ,累计单元 $A(a, b, r)$ 增大,如果某些潜在的半径 r 的中心 (a, b) 频繁出现,即描述为已知圆。该算法累加器数据量巨大,运算耗时,且仅限于识别正圆形,会导致采摘终端抓取速度下降、对非正圆形果实漏摘的情况,需要针对处理对象进行算法约束以减小数据运算量。对果实区域 F 采取约束性 Hough 变换的总体思

想是:

(1) 利用 LOG 算子^[13]对预处理后得到果实区域进行边缘检测,得到果实区域的有效轮廓 L 。

(2) L 上任取不相邻 3 点拟建立圆,计算半径 r_i 与圆心 (a_i, b_i) 。

(3) 判断 (a_i, b_i) 是否属于果实区域 F ,如果不属于,放弃当前操作,回到(2)重新取点,如果属于,进入(4)。

(4) 圆心 (a_i, b_i) 与半径 r_i 存至累计单元 $A(a, b, r)$,遍历搜索轮廓 L 上的像素点 X_i ,如果点 (a_i, b_i) 与 X_i 的距离为 $r_i \pm \Delta r$,累计单元 $A(a, b, r)$ 增大。

(5) 计算当前 $A(a, b, r)$ 长度 d ,如果 $d > 4/3\pi r$ (即 $2/3$ 倍周长),建立以 (a_i, b_i) 为圆心, $r_i \pm \Delta r$ 为半径的圆环 R_i ,计算面积 S_i ,对应标号记为 i ,存储至累加数组 $B[i, S_i]$ 。

(6) 循环执行(1)~(5),直至轮廓 L 上的点被遍历选取,终止。

采用约束 Hough 变换圆形检测算法,通过边缘检测将累加器尺寸从区域约束为轮廓,缩减了数据量;扩展搜索半径范围 $r_i \pm \Delta r$,兼顾了番茄果实类圆形而非正圆形的特点,以周长比例约束相互遮挡,剔除被遮挡较大的果实,对最优果实进行有效标记。处理结果见图 7。

Hough 变换后获取的每个圆环 R_i 对应一个最优果实,实现了互相遮挡果实间的分割,得到了果实的面积特征。针对番茄果实的成像特点,相似大小的果实成像面积无显著差异,不能单纯选择面积作为特征基元,通过进一步对每个圆环 R_i 与轮廓 L 进行乘法运算,可获取每个果实轮廓边缘 L_i ,见图 8。由于距离采摘终端近的果实呈现较为完整的轮廓,且其对后方果实呈现不同程度的遮挡,因此约束性 Hough 变换的标记目标是最前端的类圆形轮廓果实,而后方被遮挡较多的果实作为下一次标记的目标,直至采摘终端所在的位置所有可标记的果实均采摘完毕。因此约束性 Hough 变换每次标记目标如果大于 0 即为有效。

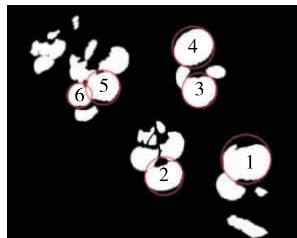


图 7 最优果实标记

Figure 7 Optimal fruit labeling



图 8 最优果实轮廓边缘

Figure 8 Optimal fruit contour edge

2.3 立体定位

精准的立体定位算法是实现采摘终端准确抓取的关键。通过对左右摄像头获取图像分别进行图像处理,获取了最优果实特征,为获取空间坐标数据,对左右图像进行立体匹配。PMF 立体对应点算法,通过对左右图像特征进行极线约束、唯一性约束、视差梯度范围约束抽取能够匹配的点对。PMF 立体对应点算法应用于番茄图像匹配的方法是:

- (1) 左图最优果实标号为 $i(i = 1, 2, \cdots)$ 序列,右图最优果实标号为 $j(j = 1, 2, \cdots)$ 序列,从左图抽取面积 S_i ,右图抽取面积 S_j 。
- (2) 如果 S_j 为空, j 自加,回到(1)抽取下一个 S_j ,如果不为空,计算差值 $\delta_k = S_i - S_j$, j 自加, k 自加,循环至 j 的上限,得到 $\delta[k](k = 1, 2, \cdots)$ 序列。
- (3) 抽取 $\delta[k]$ 中最小差值对应的面积 $S[j]$ 序列,作为与 S_i 的可能匹配,记录其对应的标号 j 。
- (4) 选择左图与 S_i 相对应的轮廓 L_i ,与(3)得到 $S[j]$ (右图)所对应的 $L[j]$ 序列,依次进行 PMF 算法匹配,抽取出与 L_i 相似度最高的 L_j ,标记当前左图标号 i 与右图标号 j 为最佳匹配果实并记入数组 $p[i, j]$, i 自加,同时设置当前右图标号 j 对应的 S_j 、 L_j 为空。
- (5) 循环执行(1)~(4),直至 i 上限,结束。

为求取果实三维质心坐标,双目视觉系统进行立体标定,以黑白方格板为矫正图像,采用 Halcon 视觉处理软件对左右两摄像头的相对位置关系参数进行标定。如图 9 所示,设两摄像头焦距均为 f , $O_i-X_iY_iZ_i$ 与 $O_j-X_jY_jZ_j$ 分别为左右摄像头的相机坐标系,光心间距为基线 b ; $O_i-X_iY_iZ_i$ 与 $O_j-X_jY_jZ_j$ 分别为左右摄像头的成像平面坐标系;空间上点 $P(x, y, z)$ 在左右的成像平面上分别投影成像的像素坐标为 (a_i, b_i) 、 (a_j, b_j) ,利用摄像头的透视投影原理可得出 P 点的空间位置。

抽取匹配数组 $P[i, j]$ 中标号相对应的左图与右图的圆心坐标 (a_i, b_i) 、 (a_j, b_j) ,由三角几何关系,可求取果实空间质心 P 坐标 X 、 Y 、 Z 公式为:

$$\begin{cases} X = \frac{bX_i}{a_i - a_j}; \\ Y = \frac{bY_i}{a_i - a_j}; \\ Z = \frac{bf}{a_j - a_i}。 \end{cases} \tag{4}$$

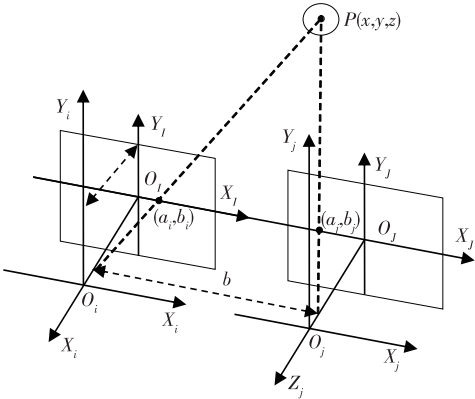


图 9 果实三维质心坐标
Figure 9 The fruit three-dimensional center of mass coordinates

得到最优果实质心坐标见表 1。表 1 中 X 坐标、 Y 坐标的计算值与实测值间相对误差均小于 6%, Z 坐标误差相对较大,但也在 10% 内。根据双目视觉系统与机械臂的位置关系,将最优果实三维质心坐标转换为轴向电机的控制参数,实现采摘终端的采摘动作。

3 采摘作业流程

采摘终端的工作流程见图 10。装置通电,左右摄像头同时采集图像,嵌入式控制核心对采集到的图像进行预处理与立体匹配,获得采摘终端当前可触及范围的最优果实序列,并转换三维质心坐标数据发送触发信号至 3 个活动臂控制电机: Y 轴向电机控制活动臂完成上下移动、 X 轴向电机控制活动臂完成左右移动、 Z 轴向电机控制活动臂完成前后移动,使采摘半球间距中心点与果实质心坐标重合,继而触发电机带动伸缩关节收缩,采摘半球闭合,切刀切断果梗,完成一个果实采摘后,采摘终端恢复原始位置并将果实卸下,控制核心判断是否存在其他最优果实,如果存在重复采摘过程,直至可触及范围内的所有果实采摘完成,发送信号至移动云台,单次采摘动作结束。

4 试验结果分析

2016 年 9 月 28 日~10 月 20 日,在东北农业大学园艺学院试验田进行了室外番茄采摘试验,在电气与信息学院研究室利用仿真枝叶搭建果树模型,并将苹果与柑橘果实样本随机挂放至果树模型,采摘试验时将果树模型移至室外。

表 1 果实质心坐标
Table 1 Fruit centroid

最优果实标号	X 坐标			Y 坐标			Z 坐标		
	计算值	实测值	相对误差/%	计算值	实测值	相对误差/%	计算值	实测值	相对误差/%
1	235	243	3.3	75	79	5.1	53	58	8.6
2	161	170	5.3	61	64	4.7	46	51	9.8
3	190	185	2.7	139	144	3.5	101	111	9.0
4	186	189	1.6	178	169	5.3	114	123	7.3
5	102	106	3.8	141	138	2.2	61	67	9.0
6	81	87	5.8	134	141	5.0	73	80	8.8

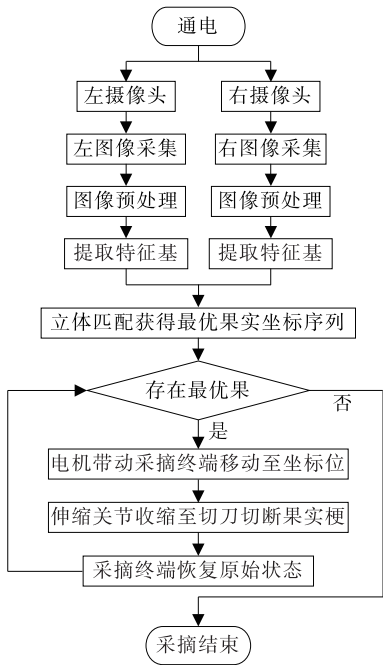


图 10 采摘终端工作流程
Figure 10 Picking terminal process

以同一地块、同一品种番茄为研究对象通过选取不同天气、不同时间点进行试验对采摘终端的田间可靠性进行分析。试验过程中,采摘终端安装于自主行走机器人移动云台上,视频系统采用嵌入式控制核心、机械臂能够协调运行,采摘终端完成当前采摘任务后发出报警信号,机器人移动至下一位置,采摘试验结果见表 2。

表 2 采摘结果
Table 2 Picking result

天气情况	试验时间	成熟果	成功采	视觉系统	机械部分
		实数	摘数	错判次数	故障次数
晴好	8:00~10:00	50	47	3	0
	12:00~14:00	50	44	6	0
	17:30~18:30	50	7	42	2
阴雨天	8:00~10:00	50	35	15	1
	12:00~14:00	50	40	10	0
	17:30~18:00	50	2	44	4

分析表 2 中晴好天气与阴雨天气 3 个时间点的采摘结果,晴好天气上午至正午时间段光线明亮,摄像头可以采集到清晰的图像,视觉系统错判率较低。哈尔滨地区 9、10 月份下午 17:30,太阳已经向西移至地平线,光线渐暗,影响摄像头的清晰度,因此视觉系统不能正常工作。阴雨天受雨水与光线影响,视觉系统也存在较高的错判率。视觉系统的准确性是影响采摘终端稳定性的决定因素,晴好天气、光线充足是视觉系统高效准确的前提条件,如何提高视觉系统在复杂天气大田环境下的优质作业是机器视觉应用的瓶颈,有待更深入的研究。

为确保采摘终端的正常运行,选择晴好天气的 8:00~16:00,对番茄、苹果、柑橘 3 类果实分别进行采摘试验,采摘结果见表 3。

表 3 采摘结果
Table 3 Picking result

样本	图像数目	成熟果实数	最优果实数	成功采摘数	每个果实平均耗时/s
番茄	30	170	154	150	12.0
苹果	30	180	142	136	9.5
柑橘	30	180	168	164	8.2

番茄果实采摘平均耗时相对较大,是由于挤压或碰撞易造成成熟番茄果实表面损伤,番茄采摘试验前,通过设置控制采摘器伸缩关节的电机速度,使得采摘器动作相对缓慢,从而减小对果实的碰撞冲击力。成熟苹果果实与最优果实数量差异较大,是由于成熟的苹果果实并不完全呈现红色,人工肉眼判定的成熟果实数量较多,而视觉系统最优果实的选择依据仍然受果实颜色的制约,识别范围局限于成熟度较高的红色果实。对 3 类共计 530 个果实的采摘试验中,因果实被遮挡造成的漏摘 56 个;因识别定位失误造成的漏摘 10 个;因采摘器尺寸造成的漏摘 4 个;因机械臂移动失误造成的漏摘 10 个;成功识别率 87.5%;成功采摘率 85%。

5 结论

(1) 本研究完成了球形果实单体采摘终端装置模型的设计,试验结果表明:在光线适宜的环境条件下,视觉采集模块、嵌入式核心处理模块、机械臂与采摘器联动执行模块能够协调工作,实现成功采摘,验证了小型化采摘器在农田实际作业的可行性。

(2) 该采摘终端模型具有体积小、生产成本低、安装灵活的优点,相较于价格高昂、结构精密、算法复杂的采摘设备,更易于批量生产、广泛应用,因此,智能化、小型化、节约型是农业机械设备发展的新理念之一。

(3) 采摘终端的对象定向为球形果实单体,对串生及非球形果实的采摘是自动采摘终端研究的难点,也是目前研究的热点问题,如何设计视频采集部分的结构及算法是解决复杂对象自动采摘的关键。

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.
[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.
[3] 罗陆峰,邹湘军,熊俊涛,等. 自然环境下葡萄采摘机器人采摘点的自动定位[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 14-21.
[4] 郭艾侠,彭明明,邢仲璟. 机器视觉技术在荔枝识别与定位研究中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(17): 218-223.
[5] 朱冬云,曲军远,徐略强,等. 导轨移动式香蕉采摘机结构设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 92-94.

机器人各部件之间的运动关系确定约束条件。静平台与大地固定连接,且静平台和 3 个主动臂之间需要添加转动副;主动臂与从动支链间也需要添加转动副。添加完成后,机器人的仿真模型便完成。

接着对机器人进行运动轨迹的规划,由于前文已给出了机械臂运动过程中各个阶段的位移 S_1 、 S_2 、 S_3 和运动时间 T_1 、 T_2 、 T_3 ,可以计算出机器人在整个运动流程中所需的总时间 $T=0.207\text{ s}$,因此在设置仿真时间时填写 0.207 s ,运动步数为 400。以上工作完成后,对机器人进行运动轨迹的仿真试验。

2.3 轨迹仿真结果分析

袋装食品装箱机器人的机械臂在 X、Y、Z 3 个方向上运动位移随时间变化曲线见图 4,在 X、Y 2 个方向上运动速度随时间变化曲线见图 5。

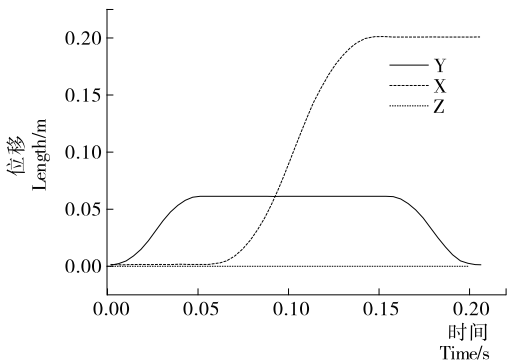


图 4 机械臂位移随时间变化曲线

Figure 4 Time change curve of the displacement of the manipulator

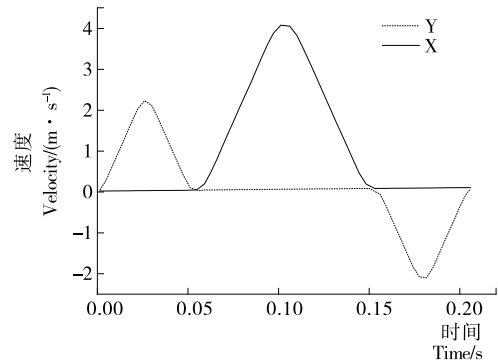


图 5 机械臂速度随时间变化曲线

Figure 5 The curve of the speed of the manipulator with time

从图 4 可以看到,机械臂行走的轨道为预先设定好的 3 段路径,并且运动的曲线平滑,运动稳定。从图 5 中可以看到,机械臂的运行速度完全按照预先设定的修正梯形模式在变化,并且在拐点处过度平滑,没有突兀变化。

从图 4 中还可以看出,机械臂沿 X 轴方向的最大速度为 4.1 m/s ,沿 Y 轴最大速度为 2.3 m/s ,与期初设定的最大允许速度 5 m/s 相比,均小于最大允许速度。也就是说,在设定和路径规划的情况下,袋装食品装箱机器人的机械臂在

完整的运动过程中均表现良好,运行稳定、精确且几乎无振动,满足设计要求。

3 结语

设计的袋装食品自动装箱机器人结构合理,可以准确快速地完成抓取、移动与放置等工作,满足预期要求。相对于串联型机器人提高了其运动精度与速度,但该研究目前仅停留在样机阶段,接下来应进一步研究机电耦合特性对控制系统的影响,从而提高控制系统与机械系统的配合精度,完善四自由度并联机器人的操控性,以期得到大规模的生产应用。

参考文献

[1] 裴学胜,程超然. 工业设计在食品机械中的应用[J]. 食品工业, 2015(5): 198-200.

[2] 倪鹤鹏,刘亚男,张承瑞,等. 基于机器视觉的 Delta 机器人分拣系统算法[J]. 机器人, 2016, 38(1): 49-55.

[3] 高骏,王攀峰. 一种新型 4 自由度高速并联机器人设计方法[J]. 机械设计, 2017(8): 6-12.

[4] 孟维健,张艳伟,程建豪,等. 一种装箱作业并联机器人机构的运动性能[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 72-77.

[5] 李渊,余跃庆. 柔顺关节并联机器人动力学模型[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 345-353.

[6] 盛连超,李威,刘玉飞,等. 基于 Pro/E 和 ADAMS 的 3-RRR 并联平台运动学与动力学研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(6): 5-7.

[7] 徐官南,张中辉,夏庆观. Delta 并联机器人运动学分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 160-162.

[8] 马志燕. 基于 Pro/E 骨架模型的工件抓取输送机构运动分析及优化[J]. 机械与电子, 2015(8): 10-13.

(上接第 97 页)

[6] 王宜磊,陈霖,易柳舟,等. 猕猴桃采摘机械手末端执行机构的设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 89-92.

[7] 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.

[8] LI Bin, WANG Hai-feng, HUANG Wen-qian, et al. Construction and in-field experiment of low-cost binocular vision platform for pineapple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (Supp. 2): 188-192.

[9] 蒋恩臣,孟醒,权龙哲,等. 推送自锁式肩关节机构的研究设计与试验分析[J]. 东北农业大学学报, 2014, 45(2): 89-93.

[10] 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.

[11] 麦春艳,郑立华,肖昌一,等. 一种基于信息融合苹果果实世界定位方法[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(1): 74-80.

[12] 陈爱华,高诚辉,何炳蔚. 立体视觉中的图像立体匹配方法[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(3): 194-198.

[13] 蒋恩臣,侯杰,权龙哲,等. 基于图像处理技术的玉米秸秆弹性模量研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 75-78.