

文章编号: 1004-924X(2016)03-0651-08

基于形态学图像检测的机械手移栽穴苗识别技术

王跃勇^{1,5}, 于海业^{1,2*}, 刘媛媛^{3,4}

(1. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 吉林 长春 130025;

2. 吉林大学生物与农业工程学院, 吉林 长春 130022;

3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012;

4. 吉林农业大学 信息技术学院, 吉林 长春 130118;

5. 长春市农业机械研究院, 吉林 长春 130052)

摘要: 针对机械移栽穴苗过程中如何有效识别出根系受损的幼苗, 进而及时进行分类、补救这一实际问题, 提出一种基于机器视觉的移栽穴苗识别方法。该方法根据机械手移栽穴苗特点, 对比检测图像土壤基质面积与基准面积; 进而通过测定土壤基质完整率, 判断样本合格与否。文中从理论和实际的角度说明了形态学图像处理方法处理穴苗移栽图像特点, 设计了机械手移栽穴苗识别在线测试系统。最后, 对基于形态学图像检测方法的机械手移栽穴苗识别技术和普通图像检测方法进行对比实验。结果表明, 本文提出的形态学检测方法对一个 72 孔穴盘合格检出率提高了 6.6%, 不合格检出率提高了 54.5%。同时, 一个穴苗的平均处理时间约为 1.82 s。结果表明提出的方法可靠, 耗时较短, 能够匹配机械手移栽流水线作业时间上的要求, 并满足实时处理要求。

关键词: 形态学; 图像检测; 机械手移栽; 穴苗

中图分类号: S24; TP751 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20162403.0651

Recognition of seedlings in mechanical transplanting processing by Morphological image detection

WANG Yue-yong^{1,5}, YU Hai-ye^{1,2*}, LIU Yuan-yuan^{3,4}

(1. Key Laboratory of Bionic Engineering of the Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China;

2. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

4. College of Information Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

5. Changchun Agricultural Machinery Institute, Changchun 130052, China)

* Corresponding author, E-mail: haiye@jlu.edu.cn

Abstract: How to discover and remedy the damaged seedlings quickly in batch processing seedlings by automatic transplanting technology was researched. A recognition method of seedlings in mechanical transplanting processing based on machine vision was proposed. Based on the characteristics of mechanical transplanting seedlings, the method was used to measure soil matrix intact rate of seedlings by comparison of the image areas between soil matrix and benchmark. By which the samples were qualified or not could be judged. Then, the image

收稿日期: 2015-10-29; 修订日期: 2015-12-07

基金项目: 国家 836 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA10A506); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61171078, No. 61271315)

characteristics processed by morphological image processing method in mechanical transplanting seedlings were described from the theory and practice and an online testing system for recognition of mechanical transplanting seedlings was designed. Finally, the manipulator transplanting seedling method based on morphological image detection and the common image detection method were compared. Experimental results indicate that the morphological detection method proposed in this paper for a seedling tray containing 72 holes increases the detection rate by 6.6%, and unqualified detection rate by 54.5%. At the same time, the average time that processes one seeding is about 1.82 s. It is shown that the proposed method is reliable, short time-consuming, satisfied with the requirement of real-time processing.

Key words: morphology; image detection; mechanical transplanting; seedling

1 引言

在设施农业中, 移栽是育苗过程的初始环节也是重要环节, 为了减少劳动强度, 提高作业效率, 采用机械手代替人工移栽已逐步普及^[1-6]。移栽机械手指按预定顺序在穴孔中取苗进行移栽时尤其在幼苗生长初期的移栽过程中, 土壤基质松软易碎, 若取苗过程中手指插入角度不理想或穴孔中土壤含水率发生变化会使机械手指取出的包裹在幼苗根系上的土壤掉落, 使得根系裸露, 有时甚至出现机械手指直接夹在幼苗根系上的现象。由于穴盘幼苗根系相当脆弱, 裸露的根系极易遭到外界环境和机械手指夹持力的破坏, 这也将移栽后增加幼苗的缓苗时间, 进而延长作物生长期, 间接加大生产成本。

以往移栽作业的过程均为顺序移栽, 经常出现移栽后幼苗缓苗时间参差不齐的问题, 进而影响作物的自动化移栽效果。因此, 对穴苗识别技术的研究越来越迫切。最基本的穴苗识别方法是通过对比机械手取苗后包裹穴苗土壤基质和穴孔基质重量, 从而间接推算穴苗根系外露的程度^[7]。近年来, 随着工业相机精度的提高、成本降低以及图像处理技术的逐步完善, 机器视觉以其高精度、高效率、低成本、低复杂度等特点越来越多地被应用到生产及实践检测领域中。基于图像检测的穴苗识别研究方法主要有根部特征分析方法^[8], 计算幼苗叶片的面积方法^[9]和分水岭算法^[10]等。与此同时, 数学算法在图像处理中的应用越来越广泛^[11-12], 基于形态学图像处理方法的应用也很广泛^[13-18]。针对图像边缘的检测方法^[19]和将形态特征用于机械手移栽也有所提及^[20]。

本文结合基本对比与图像处理, 提出了一种基于机器视觉的移栽穴苗识别技术, 通过形态学理论对采集的多角度图像进行土壤包裹检测判别,

以及时发现根系受损幼苗并分类后进行有效补救处理, 从而大大提高了作物生长的整齐程度, 提高了自动化移栽的批量处理效率。

2 图像检测方法和检测图像获取

2.1 图像检测方法

因为幼苗期移栽(幼苗出第1对真叶后)要求取苗环节对幼苗根系的损伤越小越好, 即保证包裹在根系上的土壤基质尽量完整, 本文将“土壤完整率(%)作为实验指标”, 其表现为对土壤基质扰动轻、土壤结构破坏力小、取苗时根系周围携带更多土壤基质。结合技术要求, 本文所采用的图像检测方法是: 将速干橡皮泥填充至苗盘穴孔中, 待定型后取出, 将所拍摄的取苗位置图像作为基准面积图像, 通过将采集到的土壤基质图像与基准图像面积进行对比, 来测定土壤完整率^[21-24], 综上所述, 计算土壤完整率可简化为计算采样图像中土壤基质图像与基准图像所对应的有效面积图像的区域像素比值, 如公式(1)所示:

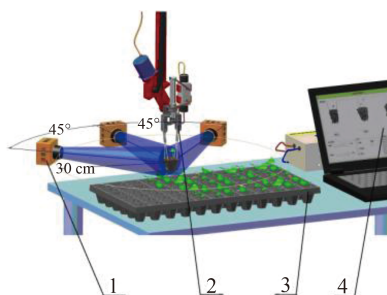
$$\theta = \frac{a_s}{b_s} \times 100\%, \quad (1)$$

其中: θ 为土壤完整率百分比, a_s 为图像中土壤基质面积(单位: Pixel), b_s 为基准面积(单位: Pixel)。

2.2 检测图像获取系统组成

机械手指夹取幼苗及包裹在其根部上的土壤基质, 使其脱离穴孔上方10 cm处悬停, 再移至拍摄点进行拍摄, 选取单色背景以降低算法复杂度。为防止片面性, 将3台工业相机分别固定在拍摄点的正前方、水平左侧45°角和水平右侧45°角位置。拍摄总范围的水平夹角为90°, 3个拍摄点均在以30 cm为半径的水平圆弧上, 并确保镜头焦点在此弧线对应的圆心位置。采集图像时, 3台相机同时拍摄被夹取幼苗的土壤基质, 得到3个角度图像, 并将

图像传给自主开发的计算土壤完整率的穴苗识别系统软件进行在线检测, 系统实验组成如图1所示。



1. 工业相机 2. 取苗执行机构 3. 苗盘 4. 识别系统软件
1. Industrial cameras 2. Manipulators structures
3. Plug tray 4. Recognition system software

图 1 检测系统组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of detection system composition

3 形态学图像检测方法

3.1 图像处理系统概况

通过对采集的图像进行边缘检测分析发现, 主要有三个方面影响检测效果: 第一, 为了增加幼苗土壤基质的透水透气性, 其中珍珠岩比例最高可占30%, 而珍珠岩呈浅灰色, 与土壤颜色形成鲜明对比, 土壤基质中珍珠岩的存在使得主体图像中含有大量“空洞”, 如图2(a)所示。第二, 机械手指、幼苗和其它杂质会影响计算机对土壤基质面积的判定, 如图2(b)所示; 第三, 在拍摄瞬间掉落的土壤基质或外露的根系, 在图像上也会被识别并计算到土壤基质面积中, 如图2(c)所示。这些问题均直接影响按区域计算面积的大小, 扰乱了判别的准确性。

为解决上述问题, 本文提出一种基于形态学的图像检测方法对采集的图像做实时处理, 具体流程如图3所示。

3.2 形态学图像处理原理

3.2.1 膨胀与腐蚀

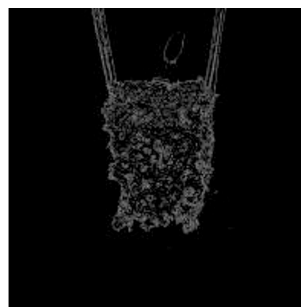
在数学上, 膨胀与腐蚀的定义分别如公式(2)、(3)所示^[25], 具体含义为图像A被结构元素B膨胀或腐蚀。

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \varnothing\}, \quad (2)$$

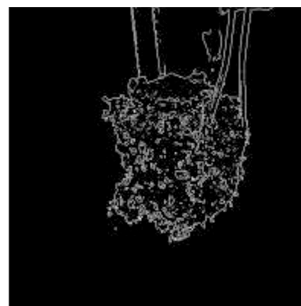
$$A - B = \{z | (B)_z \cap A^c \neq \varnothing\}, \quad (3)$$

3.2.2 开运算与闭运算

开运算与闭运算是膨胀与腐蚀的组合运算, 开



(a) 土壤基质中含有大量珍珠岩的图像
(a) Image of soil matrix with a lot of perlite



(b) 土壤基质中含有机械手指、幼苗和其它杂质的图像
(b) Image of soil matrix with mechanical fingers, seedling, and other impurities



(c) 土壤基质中含有穴苗根系外露的图像
(c) Image of soil matrix with seedling root exposed

图 2 土壤基质中不同影响因素下检测效果的特征图像
Fig. 2 Feature images of detection effects for soil matrix with different influence factors

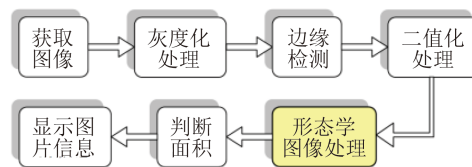


图 3 图像处理系统框图

Fig. 3 Block diagram of image process system

运算定义如公式(4)所示^[25], 含义是图像A被结构元素B腐蚀后再用B来膨胀腐蚀结果, 开运算用于平滑对象轮廓, 断开狭窄的连接和去掉细小的突出部分。

$$A \circ B = (A - B) \oplus B = \cup \{(B)_z | (B)_z \subseteq A\}. \quad (4)$$

闭运算是图像 A 先被结构元素 B 膨胀后再用 B 来腐蚀膨胀结果,定义如公式(5)所示,其将狭窄缺口连接起来形成细长弯口并填充比结构元素小的洞。

$$A \bullet B = (A \oplus B) - B = \cup \{(B)_z | (B)_z \not\subset A\}. \quad (5)$$

3.3 本文图像处理方法

本文采用形态学图像处理的方法步骤为:第一,将边缘检测后的图像 M 进行 N_1 膨胀处理,即填补其中细小截断的边缘使其连续;第二,经过 N_2 膨胀处理填充边缘内部;第三,采用 O 开运算去除穴苗、机械手指等突出部分;第四,采用 P 闭运算平滑内部开运算可能带来的空洞;第五,采用 Q 腐蚀边缘来缩小膨胀带来的边缘“放大”现象;第六,采用二次 R 开运算滤除细小部分。整体运算过程如(6)所示:

$$\{[(M \oplus N_1 \oplus N_2) \circ O \bullet P] - Q\} \circ R. \quad (6)$$

3.4 形态学图像检测

为验证机械手移栽穴苗识别技术的效果,在实验室条件下用工业相机拍摄的模拟移栽穴苗图像。采用第3节所述的图像处理方法对实验图像进行处理,如图4所示。

图4中样本1是利用形态学的图像检测方法对一台相机采集的机械手夹取完整幼苗土壤基质图像做实时处理的一组图像;同理,样本2是对机械手夹取过程中幼苗土壤基质出现掉落且根系外露的图像做实时处理的一组图像。其中(a)是相机拍摄的RGB原始图像;首先对其进行灰度化处理得到(b);其次经prewitt算子边缘检测得到(c);对(c)的边缘和内部做形态学膨胀处理,得到(d)和(e),处理后的图像(e)能够体现原图的轮廓,并且内部填充完整;然后,利用形态学开运算和闭运算处理方法将机器手指、幼苗、根系以及其它杂质滤除,仅保留土壤基质部分,如(f)和(g)所示,(g)中已经粗略检测出了有效的区域轮廓,但图像(d)的膨胀处理使得边缘加粗,面积随之扩大;因此,需进行腐蚀处理使其收缩,以恢复原图像的真实边界位置,如(h)所示;从样本2(h)可以看出,其机械手一侧手指及幼苗位置仍有留存,同时为解决拍摄瞬间土壤基质掉落等情况引入的影响,再次采用开运算将其去除,最终的处理结果如(i)所示。由图4两个样本的图像处理结果可以看出,基于形态学的图像检测方法能够有效去除机械手指、幼苗、根系及其他杂质等的干扰,保证土壤基质面积计算的准确性。

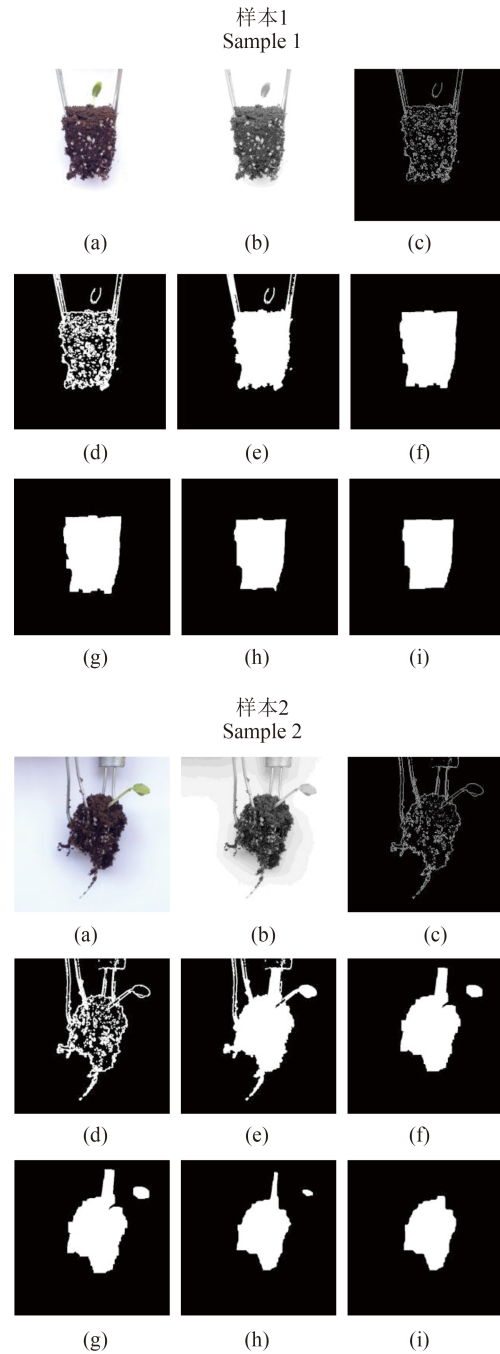


图4 形态学图像检测过程 ((a)RGB原始图像 (b)灰度化处理 (c)边缘检测图像 (d)、(e)膨胀(填补)图像 (f)开运算图像 (g)闭运算图像 (h)腐蚀图像 (i)第二次开运算图像)

Fig. 4 Morphological image detection process ((a)RGB original images (b)gray processing (c)Edge detection images (d) and (e) Inflation (fill) images (f)Open operation images (g)Closed operation images (h)Corrosion images (i)The second open operation images)

4 验证实验

4.1 测试系统组成

实验中将取苗执行机构安装在德国KUKA公司

生产的KR5arc型机械臂上, 其工作行程为1 400 mm, 模拟生产线移栽过程中机械手指夹取穴苗与其根系包裹的土壤基质脱离穴盘过程。

实验用计算机软硬件为: CPU Intel(R) Core(TM) i3-2120@ 3.30GHz, 3.17 GB可用内存, Windows7 32-bit操作系统, Visual C++ 2010软件开发环境。通过控制台操纵末端执行机构从育苗盘穴孔内夹取基质进行实验。实验现场如图5所示。



图5 试验现场图

Fig. 5 Test scene graph

在实验室条件下建立测试系统实验装置, 采用大恒图像40万像素USB接口的彩色CMOS工业相机DH-GV400UC, 采集图像大小为490 Pixel×490 Pixel, 将顺序拍摄的样本图像(正前方、左侧45°和右侧45° 3个方向图像)作为测试图像。将采集图像传输至自主开发的计算土壤完整率识别系统软件——穴苗识别系统中, 识别软件首先将得到的图像进行基于形态学的图像检测, 然后计算出各图像中土壤基质图像与基准图像所对应的有效面积图像区域像素比值, 最后判定样本是否合格, 并发送指令给执行机构。其软件处理界面如图6所示。



图6 穴苗识别软件处理界面

Fig. 6 Interface of processing software

识别系统软件中设有 θ_n 和 θ_m 两个参数(图6中参数1和参数2), 且 $\theta_n < \theta_m$, 这两个参数是用于判定样本合格与否。利用图像检测方法对采集的每个样本的3张图像进行处理, 分别得出其正视图、左45°角图和右45°角图的3个土壤完整率值 θ_1 、 θ_2 和 θ_3 , 若有一个或一个以上的 θ 值小于 θ_n , 或者3个 θ 值均介于 θ_n 、 θ_m 之间, 则判定此样本不合格, 否则判定样本合格, 检出率如公式(7)所示:

$$\begin{cases} \eta_T = \frac{N_{TP} \cap N_N}{N_{TP}} \times 100\% \\ \eta_F = \frac{N_{FP} \cap N_T}{N_{FP}} \times 100\% \end{cases}, \quad (7)$$

式中: η_T 为阳性率(合格检出率); N_{TP} 为检测结果合格样本数; N_N 为根系无裸露样本数; η_F 为阴性率(不合格检出率); N_{FP} 为检测结果不合格样本数; N_Y 为根系有裸露样本数。

4.2 实验材料

实验用黄瓜幼苗品种为长春密刺王, 取苗时间为幼苗出第1对真叶后(出苗7~9天), 实验采用长春市农博园育苗基地的基质配方, 草炭和珍珠岩体积比为7:3, 实验所用的苗盘为台州兆鑫72孔的标准通用穴盘, 育苗盘尺寸为54 cm×28 cm, 穴孔横截面呈正方形, 上口径为4 cm, 下口径为2 cm, 高度为4.5 cm, 穴孔内体积约为40 cm³。

4.3 形态学图像检测验证实验

在实验苗盘中随机抽取10个样本的正视图, 通过本文提出的方法计算出测试图像与基准图像的面积比值, 同时通过实测方法验证结果, 实验与实际测量结果如表1所示。由表1可知, 10个样本有9个相对误差在4.1%以内, 1个达到6.1%, 误差均在允许范围内, 可达到检测的目的。

4.4 机械手移栽穴苗识别在线测试实验

将本文提出的形态学图像检测方法与普通图像检测方法的检测效果进行对比。普通图像检测方法的图像获取方式与本文相同, 首先将图像进行灰度化处理, 接着检测灰度处理图像边缘, 然后求出图像轮廓, 最后计算图像轮廓的内面积。取一个有72孔的苗盘进行机械手穴苗移栽实验, 设置参数 $\theta_n=65\%$, $\theta_m=85\%$, 用本文图像检测方法检测出63个合格样本, 其中有1个苗偏有根系裸露, 9个不合格样本中均存在不同程度的根系外露现象;

表1 实验与实际测量结果比较

Tab. 1 Comparison of experimental with actual measurement results

| 样本序号 | 测量比值/(%) | 实验比值/(%) | 相对误差 |
|------|----------|----------|------|
| 1 | 82.3 | 78.4 | +3.9 |
| 2 | 79.6 | 76.8 | +2.8 |
| 3 | 77.5 | 80.3 | -2.8 |
| 4 | 65.4 | 64.1 | +1.3 |
| 5 | 85.5 | 88.1 | -2.6 |
| 6 | 71.2 | 77.3 | -6.1 |
| 7 | 66.1 | 64.8 | +1.3 |
| 8 | 73.2 | 70.7 | +2.5 |
| 9 | 69.2 | 72.3 | -3.1 |
| 10 | 66.2 | 70.3 | -4.1 |

采用普通图像检测方法检测出61个合格样本,检测出不合格样本11个,实验结果如表2所示。由表2可知使用本文形态学图像检测方法的合格检出率 η_T 可达到98.4%,较普通方法提高了6.6%,不合格检出率 η_F 可达到100%,较普通方法提高了54.5%。由上述结果可以看出形态学图像检测方法的检测效果具有明显优势。同时,在4.1节所述的计算机软硬件环境下,从相机获取一个穴苗图像到检测完毕做出判别的整个过程,运用普通方法的平均耗时约为1.16 s,而运用形态学方法的平均耗时约为

表2 形态学图像检测方法与普通图像检测方法比较

Tab. 2 Comparison between morphological image detection method and ordinary image detection method

| 图像检测方法 | η_T /(%) | η_F /(%) | 耗时/s |
|--------|---------------|---------------|------|
| 普通方法 | 91.8 | 45.5 | 1.16 |
| 形态学方法 | 98.4 | 100 | 1.82 |

参考文献:

- [1] FENG Q C, ZHAO C J, JIANG K, et al. Design and test of tray-seedling sorting transplanter[J]. *Int J Agric & Biol En.*, 2015, 8(2): 14-20.
- [2] 刘效亮, 李其昀. 育苗移栽机械化发展方向[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2003, 17(3): 108-110.
- LIU X L, LI Q Y. Development tendency of bowl-rear

1.82 s, 其是普通方法的1.569倍,但从实际应用角度考虑,一个穴苗的判别时间小于2 s能够达到实时处理的目的,是完全可以接受的。

与普通图像检测方法相比,本文提出的方法由于基于形态学理论,故可有效解决检测过程中土壤基质中存在大量的珍珠岩、机械手指、幼苗和其它杂质的穴苗图像识别问题,以及土壤基质掉落或根系外露等对土壤基质面积判定的影响。

5 结论

本文为了有效识别机械移栽过程中根系受损的幼苗,进而及时进行分类这一生产实际问题,提出了一种基于形态学图像检测方法的机械手移栽穴苗识别技术。其通过形态学运算分别对比每个样本的3个角度图像中土壤基质面积与基准面积的比值,该方法简单易行。另外,本文还自行开发了计算土壤完整率的系统软件,用于计算土壤完整率和判断样本合格与否。

在实验环境下模拟机械手移栽过程,将本文方法所得结果和实际测量结果进行对比,面积比值相对误差最大为6.1%。利用普通边缘检测方法和本文提出的形态学图像检测方法分别对穴苗移栽进行检测。结果显示,本文方法的合格检出率 η_T 提高了6.6%,不合格检出率 η_F 提高了54.5%,同时,本文方法判别一个穴苗的平均时间约为1.82 s,处理时间短,准确率高,能够满足机械手移栽流水线作业的实时处理要求。

形态学穴苗识别方法的核心是对包裹在穴苗上的土壤基质的3个方向图像进行面积检测,应用形态学方法理论上可剔除机械手指、穴苗形态等因素的影响。因此本文方法适用于各种品种穴盘苗适栽期机械化移栽的需要,为自动化移栽提出了新方法。下一步工作需要进一步提高穴苗图像检测速度,以更好地实现实时处理。

transplanting mechanization[J]. *Journal of Shandong University of Technology(Sci & Tech)*, 2003, 17(3): 108-110. (in Chinese)

- [3] 潘启明. 国内外移栽机技术现状和发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(31): 12478-12479, 12496.

PAN Q M. Current situation and development trend of domestic and foreign transplanting machine technology

- [J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2013, 41(31): 12478-12479, 12496. (in Chinese)
- [4] CHOI W C, KIM D C, RYU I H, *et al.*. Development of a seedling pick-up device for vegetable transplanters [J]. *Transactions of the Asae*, 2002, 45(1): 13-19.
- [5] 刘 炜, 刘继展. 穴盘苗移栽机器人末端执行器综述[J]. *农机化研究*, 2013, (7): 6-10.
LIU W, LIU J ZH. Review of end-effectors in tray seedlings transplanting robot[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, (7): 6-10. (in Chinese)
- [6] 刘大纹, 肖英奎, 于海业. 运动仿真系统中嵌入式计算机技术应用[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(6): 161-163, 177.
LIU D W, XIAO Y K, YU H Y. Application of the embedded computer technique in motion simulation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2007, 38(6): 161-163, 177. (in Chinese)
- [7] 王跃勇, 于海业. 穴盘幼苗机械手取苗基质完整率影响因素试验与分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(14): 65-71.
WANG Y Y, YU H Y. Experiment and analysis of impact factors for soil matrix intact rate of manipulator for picking-up plug seedlings[J]. *Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(14): 65-71. (in Chinese)
- [8] 董 微, 周增产, 卜云龙, 等. 穴盘苗自动移栽机研发与应用[J]. *农业工程*, 2014, 4(7): 120-124.
DONG W, ZHOU Z H, BU Y L, *et al.*. Research and Application of Potted Tray Seedlings Automatic Transplanting Machine[J]. *Agricultural Engineering*, 2014, 4(7): 120-124. (in Chinese)
- [9] 胡 飞, 尹文庆, 陈彩蓉, 等. 基于机器视觉的穴盘幼苗识别与定位研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(5): 183-188.
HU F, YIN W Q, CHEN C R, *et al.*. Recognition and localization of plug seedling based on machine vision[J]. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2013, 41(5): 183-188. (in Chinese)
- [10] 童俊华. 蔬菜钵苗穴盘间移栽执行器设计、移栽信息监测与路径规划[D]. 杭州: 浙江大学, 2014, 9.
TONG J H. *End-effector Design, Seedling Information Inspection and Path Planning for Transplanting between Vegetable Seedling Trays*. ZheJiang University[D]. HangZhou: Zhejiang University, 2014, 9. (in Chinese)
- [11] STROPPA R G, LEONARDI F FRIGATO R, *et al.*. Cartographic update through image digital processing by Mathematical Morphology techniques [C]. *International Center for Remote Sensing of Environment*, 2009: 1113-1115.
- [12] MOSTAFA K, CHIANG J Y, HER I. Edge-detection method using binary morphology on hexagonal images[J]. *The Imaging Science Journal*, 2015, 63(3): 168-173.
- [13] 张雄美, 易昭湘, 田淞, 等. 结合形态学属性断面与支持向量机的合成孔径雷达图像变化检测[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(10): 2832-2839.
ZHANG X M, YI ZH X, TIAN S, *et al.*. Change detection of SAR images using morphologic attribute profile and support vector machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2832-2839. (in Chinese)
- [14] 王卫星, 田利平, 王悦. 基于改进的图论最小生成树及骨架距离直方图分割细胞图像[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(9): 2464-2472.
WANG W X, TIAN L P, WANG Y. Segmentation of cell images based on improved graph MST and skeleton distance mapping[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2464-2472. (in Chinese)
- [15] 邹北骥, 张思剑, 朱承璋. 彩色眼底图像视盘自动定位与分割[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(4): 1187-1195.
ZOU B J, ZHANG S J, ZHU CH ZH. Automatic localization and segmentation of optic disk in color fundus image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1187-1195. (in Chinese)
- [16] 王灿进, 孙涛, 石宁宁, 等. 基于双隐层BP算法的激光主动成像识别系统[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(6): 1639-1647.
WANG C J, SUN T, SHI N N. *et al.*. Laser active imaging and recognition system based on double hidden layer BP algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1639-1647. (in Chinese)
- [17] 袁祖荣, 陈浩玉, 胡文川, 等. 嵌入式线结构光角度视觉检测及误差补偿[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(10): 2480-2487.
QIU Z R, CHEN H Y, HU W CH. *et al.*. Embedded ankle vision inspection and error compensation for line structured lights[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2480-2487. (in Chinese)
- [18] 韩延祥, 张志胜, 郝 飞, 等. 灰度序列图像中基于纹理特

- 征的移动阴影检测[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2931-2942.
- HAN Y X, ZHANG ZH SH, HAO F. *et al.*. Shadow detection based on texture features in gray sequence images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2931-2942. (in Chinese)
- [19] 余金栋, 张宪民. 用于线纹显微图像的边缘检测算法[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 271-281.
- YU J D, ZHANG X M. Edge detection algorithm for lines on microscopic image[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 271-281. (in Chinese)
- [20] 刘明峰, 胡先朋, 廖宜涛, 等. 不同油菜品种适栽期机械化移栽植株形态特征研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增1): 79-88.
- LIU M F, HU X P, LIAO Y T, *et al.*. Morphological parameters characteristics of mechanically transplanted plant in suitable transplanting period for different rape varieties[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(Supp1): 79-88. (in Chinese)
- [21] AN D K, LI M Z, ZHANG L. Measurement of tomato leaf area using computer image processing technology [J]. *SENSOR LETTERS*, 2010, 8(10): 56-60.
- [22] QI L, MA X, LIAO X L, *et al.*. An easy measurement method of foliar morphological parameters using image processing technique [C]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2011(5): 4075-4082.
- [23] XUE T, LIU X W, JIN Y X, *et al.*. Bubbles image processing and parameters measurement based on the high-speed photography[C]. *International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, Li jiang, China, (ISPEMI)*, 2011: 8321.
- [24] ZENG D M, CUI W, LIANG L J. An image processing based system for leaf parameter measuring[C]. *International Symposium on Photonics and Optoelectronics*, 2012: 1-4.
- [25] RAFAEL C. GONZALEZ, RICHARD E. *et al.*. *Digital Image Processing Using MATLAB*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2009.

作者简介:



王跃勇 (1987-), 男, 吉林长春人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事智能系统、生物环境与能源工程方面的研究。Email: yueyong10@mails.jlu.edu.cn



刘媛媛 (1980-), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 讲师, 主要从事图像和视频处理、视频编码方面的研究。E-mail: yuanyuan10@mails.jlu.edu.cn

导师简介:



于海业 (1963-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 1991年于吉林工业大学获得博士学位, 现任吉林大学生物与农业工程学院副院长, 主要从事模式识别与智能系统、生物环境与能源工程方面的研究。E-mail: haiye@jlu.edu.cn