

蔬菜嫁接机器人嫁接苗特征参数的视觉测量方法

张 雷, 贺 虎, 武传宇^{*}

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘 要: 嫁接用苗的直径、生长点坐标、苗长等特征信息, 是判断能否嫁接匹配的有效参数特征, 也是迅速获取机器人嫁接位置参数的重要依据。为了提取相关蔬菜嫁接机器人的嫁接用苗特征信息(嫁接苗生长点坐标、砧木苗子叶茎截面的长短轴直径、穗木苗子叶茎截面长短轴直径、砧木苗长度及穗木苗长度等), 该文提出了一种图像处理综合算法。该算法首先确定采集后图像的初步目标范围, 然后进行预处理, 获得单色图像, 利用灰度阶跃变化选定兴趣区域, 而后对图像进行中值滤波和图像增强; 利用基于高斯拟合、求反和基于大津法阈值分割相结合的信息提取方法, 获得生长点横坐标, 结合形态学开闭处理方法及逻辑搜索运算, 引入有效行连续的概念, 剔除强光噪声的干扰, 获得了所需的各长短轴直径图像坐标; 利用标定结果和相机图像到世界坐标转换的对应关系, 获得最终各项指标信息。在自行研发的嫁接机器人样机上, 以葫芦类砧木苗为试验对象, 经过 500 次试验, 与传统手工实际测量值相比, 该算法实测值平均误差小于 0.0053 mm, 直径最大误差小于 0.02 mm, 从而验证了该算法的可行性和有效性。该算法能在线获取嫁接苗特征信息, 满足嫁接实时要求。

关键词: 机器人; 图像处理; 算法; 嫁接; 蔬菜; 机器视觉; 特征参数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.006

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0032-07

张 雷, 贺 虎, 武传宇. 蔬菜嫁接机器人嫁接苗特征参数的视觉测量方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 32—38.

Zhang Lei, He Hu, Wu Chuanyu. Vision method for measuring grafted seedling properties of vegetable grafted robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 32—38. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

蔬菜嫁接栽培是克服瓜菜连茬病害和低温障碍等问题的有效途径, 由于嫁接苗木脆嫩细弱(砧木苗直径 2.5~4 mm, 穗木苗直径 1.5~3 mm), 传统手工嫁接效率低, 成活率受人工熟练程度和作业态度影响, 长时间作业对人健康造成不利, 所以机器人代替人工嫁接操作势在必行, 而嫁接机器人利用机器视觉和图像处理技术获得砧木苗长度以及生长点位置坐标等信息是机器人实现正确嫁接的前提。

在自然光线状态下获取的嫁接砧木图像, 将其背景分割、提取特征点并进行计算是较为常规的研究思路。国内外许多研究将图像分割应用于农作物图像分割及相关特征提取, 如耿楠等^[1]基于水平集和先验信息的模型, 对杂草、小麦、苹果进行分割研究, 迭代求解水平集函数, 得到收敛的目标轮廓曲线, 正确率最高可达到 0.999; 马稚昱等^[2]利用视觉技术对蔬菜幼苗的生长信息进行了

无损检测; 宋怀波等^[3]在 Contourlet 变换 (contourlet transform, CT) 的基础上, 采用适合农作物图像的融合规则进行融合处理, 采用了一种改进的线性加权融合方法选择低频子带系数, 经过 Contourlet 逆变换得到融合图像, 有效提高了图像融合的效果; 吴露露等^[4]根据病斑的形态特点, 提出一种基于边缘检测与改进 Hough 变换的病斑目标检测方法, 采用边缘提取、修复、过滤等方法获取了病斑轮廓, 并对 Hough 变换的应用策略进行改进, 对病斑进行类圆目标检测, 检测圆拟合精度为 87.01%, 圆心定位误差为 4.44%; 吴见等^[5]通过跟踪对象运动矢量方向和速度的连贯性及最小化函数, 从临近位置内存在的多个兴趣点中筛选出目标兴趣点, 采用最小化接近一致性代价幻影点函数的方法, 该算法产生一个帧间幻影点代替因叶片相互遮挡可能丢失的兴趣点, 得到了单目视觉的移栽钵苗叶片朝向的调整策略; 张亚静等^[6]、周天娟等^[7]、赵博等^[8]、关海鹰等^[9-15]分别将亮度和颜色的信息融合 BP 神经网络、遗传模糊神经网络、聚类快速分割和分水岭区域分割、基于微粒群与 K-均值算法的图像分割等方法运用到农业玉米、谷粒、枣叶以及西红柿的图像分割中, 都达到了期望的目标; 孙俊等^[16-18]针对农作物植株病虫害防治, 将机器视觉用于害虫多姿态特征提取和害虫运动轨迹研究; 王传宇等^[19-23]将激光定位和图像分析方法用在机器人的自动采摘和植株特征分析与识别中, 也得到了较好的工程效果。

已有学者的研究集中在目标图像边缘检测, 图像融

收稿日期: 2014-09-30 修订日期: 2015-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51175475); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY14E050027)

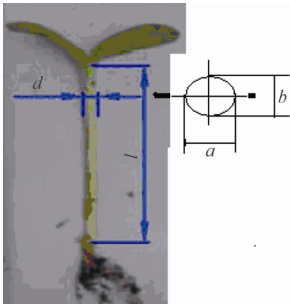
作者简介: 张 雷, 男 (汉族), 山东高唐人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事农业机器人、纺织机械研究。杭州 浙江理工大学机械与自动控制学院, 310018。Email: lzhang@zstu.edu.cn

*通信作者: 武传宇, 男 (汉族), 山东临沂人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事农业机器人装备研究。杭州 浙江理工大学机械与自动控制学院, 310018。Email: cywu@zstu.edu.cn

合及图像分割上，为各种农作物位置判断、病虫害跟踪和农作物采摘提供了大量技术依据。为实现蔬菜嫁接过程的自动上下苗，需要克服图像获取背景复杂，叶片表面叶脉与叶片的色彩差异大，叶子边缘有些地方梯度变化不明显，枝条重叠，甚至有叶片光照不均或者反光现象等困难。本文结合自制机器人系统的实际工况，以葫芦嫁接砧木苗为研究对象，提出了一种能够处理自然条件下所采集彩色图像的算法，能快速实现尺寸信息获取，并将所提出图像处理方法用于嫁接苗的信息获取，实现砧木苗和穗木苗生长点空间位置的自动检测，以便于后续切割机构对待切割位置进行准确定位。同时获取砧木苗、穗木苗相应截面直径尺寸，用以判断是否能用于嫁接匹配。

1 嫁接苗特征参数

为了实现自行研发的蔬菜嫁接机器人自动取苗和在生长点位置准确切除子叶，需要通过视觉采集系统获取苗长、直径以及生长点坐标等信息参数。试验过程中所用嫁接苗为京欣 1 号西瓜穗木苗，砧木苗采用的是浙蒲 2 号，嫁接苗和砧木苗均由浙江省农科院在温室内培育。图像处理需要获得的嫁接苗特征参数如图 1 所示。



注： d 为直径； l 为长度； a 为长轴直径； b 为短轴直径。
Note: d is the diameter; l is the length; a is the long axis radius; b is the short axis radius.

图 1 苗特征示意图

Fig.1 Sketch map of seedling property

生长点为 2 片子叶交汇处，苗长为生长点到根部距离。由于试验中研究对象的轴截面并非正圆，定义沿 2 片子叶分离延展方向为长轴测量方向，垂直于长轴方向为短轴测量方向。首先通过传统人工测试了 500 株砧木苗和穗木苗的信息特征，所得数据如表 1 所示，用于与后续图像处理结果的参考。

表 1 嫁接苗特征的人工试验测试数据

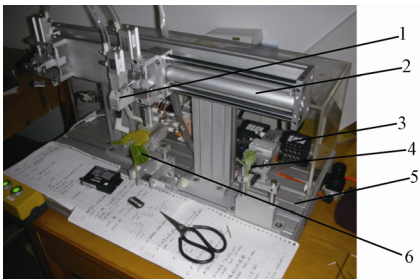
Table 1 Test date for of grafted seedling properties based on manual method

统计量 Statistics	砧木苗 Rootstock/mm			穗木苗 Scion/mm		
	截面 长轴 Long axis radius	截面 短轴 Short axis radius	长度 Length	截面 长轴 Long axis radius	截面 短轴 Short axis radius	长度 Length
最大值 Maximum	4.40	3.83	84.50	3.13	2.67	39.18
最小值 Minimum	3.15	2.81	76.62	2.01	1.18	33.14
平均值 Average	3.5451	3.0012	81.6819	2.77620	2.0513	35.7151
均方差 Standard deviation	0.4489	0.3889	2.0648	0.3653	0.3650	1.7579

由试验结果可以看出，所取试验用样本砧木苗长度基本在 60~84 mm 之间，直径在 2.8~3.5 mm 之间；穗木苗长度基本在 33~40 mm 之间，直径在 1.8~3.2 mm 之间（不同时期和不同生长情况的苗木会有所不同）。

2 试验装置及原始图像获取

试验主要在课题组自行研制的蔬菜嫁接机上进行，各部分主要结构如图 2。利用 1394b 图像采集卡和 Point grey 公司的 Grasshopper GRAS-50S5C, 2/3”CCD 相机搭建硬件平台。在试验室内自然光条件下，用相机对目标进行垂直拍摄。采集过程未使用任何主动光、滤光片或者遮挡反射装置，所用计算机配置为：Inte(R)Core(2) Duo CPU E7300 @2.60GHz, 2.67GHz, 2G 内存，Window XP 操作系统。算法运行平台为 Matlab7.0。针对图像的实际特点，经过反复改进最终确定在系统中使用白色夹具，该夹具夹苗时与苗颜色反差较大，特别能突出苗的绿色。图 3 即为采集到的原始图像，维数为 2 816 行，2 112 列。



1.机械手 2.导轨 3.电器元件 4.穗木苗 5.底座 6.砧木苗
1. Manipulator 2. Guide 3. Electrical components 4. Scion 5. Base 6. Stock
图 2 蔬菜嫁接样机

Fig. 2 Prototype of vegetable grafted robot

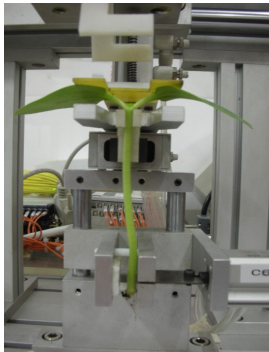


图 3 原始图像采集

Fig.3 Acquisition of original image

根据上述图像，本文提出了一种能够处理自然条件下所采集彩色图像的算法，快速实现尺寸信息获取，实时满足嫁接需要。算法无须使用结构光、滤光片等附属装置，降低了硬件成本。算法同时可以获得生长点处图像坐标值，经过标定和坐标转换，可最终获取在机器人工作坐标系中的相关直径、长度及生长点坐标信息。

3 图像处理算法

3.1 算法处理流程

算法分为原始图像预处理、图像处理和特征信息提取 3 个部分。图像处理算法流程如图 4 所示。

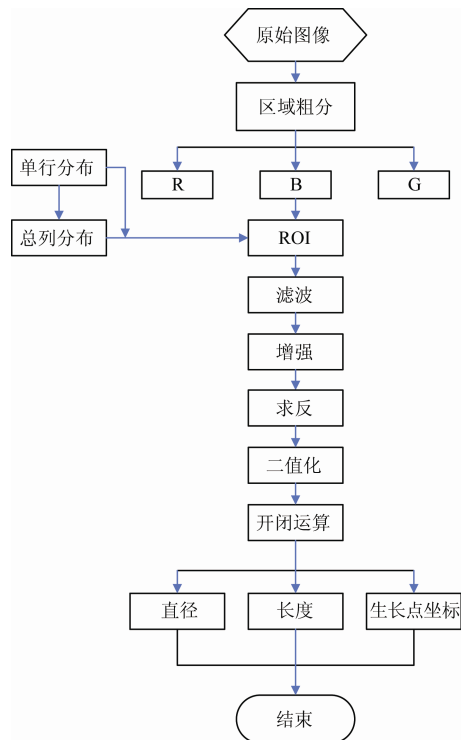


图4 图像处理算法流程图

Fig.4 Algorithm flowchart of image processing

3.2 图像预处理

由于相机和苗位置相对固定，同时苗的长度和直径尺寸基本稳定在一定范围，因此结合摄像机位置和图像区域，可以初步估算出苗在图像中的大体位置，并四周预留一定余量空间以适应个别较大的苗。这一步主要是为后续的初始搜索确定起始行的选择范围。分别提取彩色图像的 R、G、B 分量图像，并进行图像处理的对比，试验表明 B 分量的图像更能够适合后续运算，而不是预期的绿色分量图像。择定步长（例如步长为 100），选取夹具附近位置的若干行图像（图中以 3 行为例），绘制图像灰度分布曲线如图 5 所示。图 5a 中 3 条线分别为第 200 行、300 行和 400 行的确切位置，分别依次代表了生长点之上叶片处位置、具有白色夹具时的位置，和夹具以下的位置。图 5b 画出了所截取的 3 行像素的灰度分布规律特征。可知，在中间苗部分有灰度突变区域（谷底），而且不同行的突变位置有所差异，为此将各列灰度数值累加，获得总的列灰度分布曲线；在总的列灰度分布曲线上，反复试验确定一个合理的突变阈值，求取在该阈值下，左右 2 个突变位置的列坐标，这 2 个列坐标即为后续行搜索的左右初始点（为了鲁棒性需要和克服反光或者噪声影响，同样向左右预留一定余量的列数）。同两列坐标之间的部分即为所求兴趣区域 ROI（range of interest），ROI 的确定可以大大减少后续图像处理像素数目，节省图像处理时间。

针对区域分割后图像，采用 5×5 模板的中值滤波算子进行滤波处理以去除相应噪声影响。由于图像在室内拍摄，利用亮度变换函数的线性映射进行图像的增强，通过反复试验，确定上下阈值分别为 0.45 和 0.65，即将

0.45~0.65 之间的部分映射为 0~1 区域，其他舍弃。通过处理图像明显变亮。图 6a、图 6b 和图 6c 为图像预处理后的各图像。

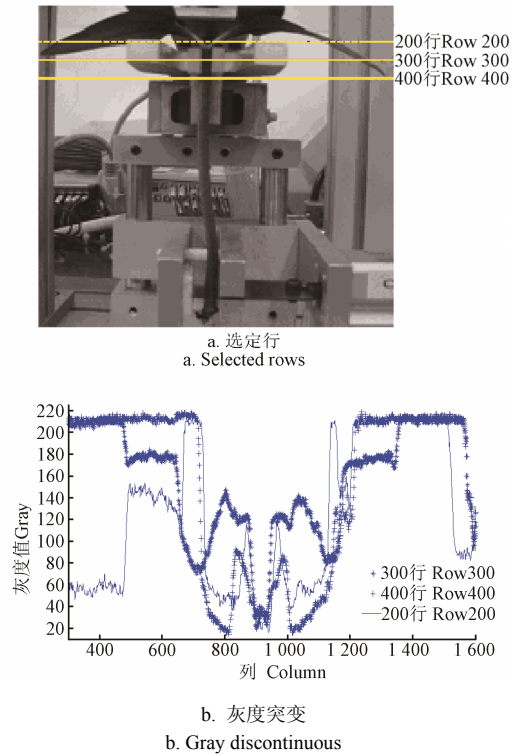


图5 选定行及其灰度突变

Fig.5 Selected rows and its gray discontinuous

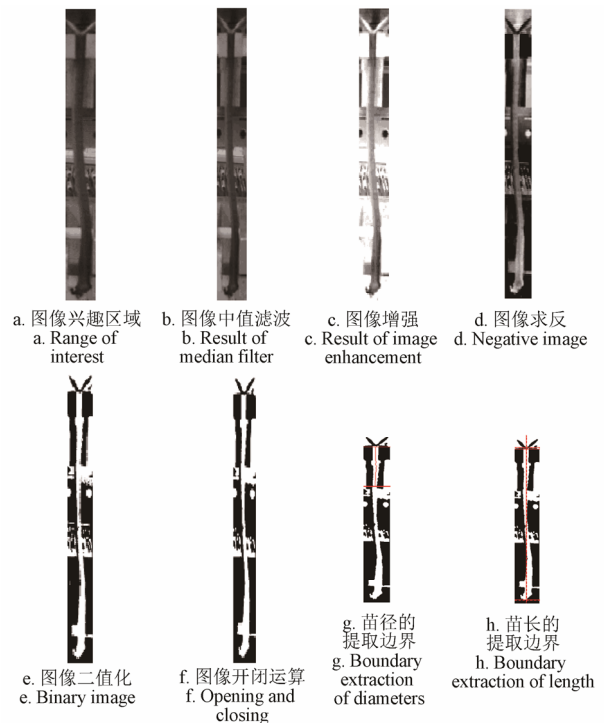


图6 图像预处理、图像处理及有效苗径和苗长的提取边界

Fig.6 Image pre-processing, image processing and boundary extraction of effective diameters and length

3.3 图像处理

为获得生长点处坐标，选取夹具附近的区域作为研

究对象，采用高斯函数去逼近光条的灰度分布，从而计算出光条的中心。高斯函数数学表达式为：

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中： μ 为均值， σ 为标准差。

对式 (1) 两边取对数，将其化为多项式表达式如下：

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (2)$$

式中： $g(x) = \ln G(x)$, $a_0 = \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} - \frac{\mu^2}{2\sigma^2}$, $a_1 = \frac{\mu}{\sigma^2}$, $a_2 = -\frac{1}{2\sigma^2}$

为了求解式 (2) 的 3 个待估计的参数。利用 $2N+1$ 个采样点 $(x_i, G(x_i))$ ，由式 (2) 可求得对应的 $(x_i, g(x_i))$ ，建立如下目标函数：

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=0}^{2N+1} \|g(x) - (a_0 + a_1x + a_2x^2)\| \quad (3)$$

用最小二乘法解估计参数 $[a_0, a_1, a_2]$ ，令

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_0} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_1} = 0, \quad \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_2} = 0,$$

则有：

$$\begin{bmatrix} 2N+1 & \sum_{i=1}^{2N+1} x_i & \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^2 \\ \sum_{i=1}^{2N+1} x_i & \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^2 & \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^3 \\ \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^2 & \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^3 & \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{2N+1} g(x_i) \\ \sum_{i=1}^{2N+1} x_i g(x_i) \\ \sum_{i=1}^{2N+1} x_i^2 g(x_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

在上述方程中，系数矩阵具有对称、正定的性质。若权系数已知，则可以采用 Householder 变换法求解此方程。根据求得参数 $[a_0, a_1, a_2]$ ，利用二次函数对称轴位置，计算出苗中心生长点横坐标位置 x_c 。

为了获得嵌入大片黑色区域的白色或者灰色细节效果，对图像二次影射求反，基于大津阈值分割法 (OTSU) 将图像二值化。OTSU 法也称为最大类间方差法或最小类内方差法，思路是基于图像的灰度直方图，以目标和背景类间方差最大或类内方差最小为阈值选取准则。基本流程是：设处理图像由目标和背景组成，目标和背景灰度值不同，基于直方统计图像把灰度划分为 $1 \sim L$ 等级，从中选择阈值等级 K ，将图像分为目标(暗)： $C_0=1 \sim K$ 与背景(亮)： $C_1=K+1 \sim L$ 两类，若两类的类间方差最大，则所求出的 K 为最佳阈值 K 。

最后，利用形态学开闭运算，去除局部的反光以及噪声影响，处理结果如图 6d、图 6e 和图 6f 所示，从图像结果看，这种运算有利于去除细长边缘，小洞及指向内部的尺状边缘。

3.4 特征坐标提取算法

图像处理，有效信息的迅速提取是图像处理最终目标，除了生长点横坐标，生长点纵坐标以及其他参数信息通过基于有效行连续算法进行计算获取。

若一行中除两端个别点外持续为 0，或者从左向右 (或从右向左) 搜索时，存在在下一个搜索点像素变为 1 的点，其八邻域中的右上 (或左上) 邻域点为 0，称这种

情况为有效行连续。

整个搜索算法流程如图 7，提取算法如下：

1) 定义图像上像素点坐标 (i, j) ，通过分别对 i, j 逐次加一实现循环，对已经处理好的图像有效区域进行自上而下的逐行从左向右或从右至左的行搜索；

2) 若不满足有效行连续，则继续搜索。若满足，记下此处的行数 L ；

3) 行数加一，继续进行 1) 中行搜索，若分别存在一个 0 像素的点后连续几个 (为保证判定条件的鲁棒性，必须以连续多个点为 1 作为评判准则) 点像素都为 1 的条件，分别记下该像素点列数 (文中以连续 5 点为 1 作为评判准则) C_L, C_R ；

4) 取 C_L 和 C_R 的平均值作为中线列坐标 M ，同时判断与上一行求得列坐标的误差绝对值是否小于设定的阈值 ε ，若满足则返回步骤 3，若不满足令本次循环所得列坐标值等于上次的 M ；

5) $C = C_R - C_L$ 求得每行处直径的图像尺寸；

6) 联合行数 L 得到生长点坐标 (L, M_1) ；此处 M_1 为第 1 有效连续行的中心列坐标值，为了鲁棒需要，也可取前几行中心列坐标的平均值。

7) 在中心列坐标值所在列，自上向下搜索，求得由持续 1 变为持续 0 的边界行坐标作为苗的根部坐标，减去 L 得苗有效长度 (不考虑苗弯曲因素)。

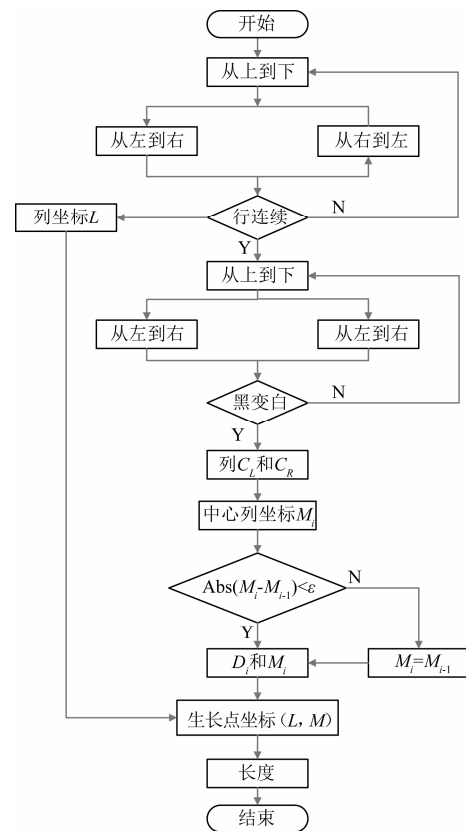


图 7 坐标提取算法流程图

Fig.7 Algorithm flowchart of coordinate extraction

算法提取结果如图 6g 和图 6h 所示。当求解中心位置 (两线相交处) 和直径时，由于光反射，红线下方直

径部分不能正确显示, 算法在计算中将这一部分自动判断并舍弃(图 6g), 由于此处处在夹持部位以下, 所以不影响嫁接机器人抓取指标的确定。图 6h 中所求解的有效苗长度并非苗实际高度, 只计其子叶生长点以下的长度, 子叶本身的高度和嫁接试验无关联。

4 试验验证

采集图像后用上述方法求得直径为 57.8667 像素, 有效长度为 1 478 像素, 生长点图像坐标值(127, 116), 通过对相机进行标定, 将其转换为实际单位(mm)。相机标定采用常规黑白标靶进行, 标定相机后求得文中样本苗直径为 3.704 mm, 长度为 81.792 mm, 长轴直径为 3.97 mm, 短轴直径为 3.42 mm。

利用所述视觉和图像处理算法反复试验 500 次, 获得试验部分数据如表 2(由于相机和夹具相对位置固定, 试验中的生长点横坐标变化不大, 而纵坐标取决于苗长以及夹持位置, 所以在试验中直接通过苗长度来反映)所示。

表 2 嫁接苗特征的视觉试验测试数据

Table 2 Test date of grafted seedling properties based on vision method

统计量 Statistics	砧木苗 Rootstock/mm			穗木苗 Scion /mm		
	截面 长轴 Long axis radius	截面 短轴 Short axis radius	长度 Length	截面 长轴 Long axis radius	截面 短轴 Short axis radius	长度 Length
最大值 Maximum	4.45	3.53	84.46	3.16	2.59	39.23
最小值 Minimum	3.21	2.82	76.51	1.99	1.63	33.69
平均值 Average	3.5528	2.9973	81.6876	2.7803	2.0595	35.7214
均方差 Standard deviation	0.4024	0.3933	2.1597	0.3691	0.3482	1.7495

试验数据处理后得到本批砧木苗长短轴和穗木苗茎横截面长短轴直径平均值分别为 3.5459、3.0008、2.7762 和 2.0515 mm; 砧木苗和接穗苗生长点到根系高度平均值分别为 81.6812 和 35.7143 mm, 与人工测量的数值相比, 平均测量误差小于 0.0053 mm, 直径因素最大误差为 0.02 mm, 长度因素的最大误差值为 0.04 mm。造成误差的主要原因: 1) 同一株苗不同部分直径不同而且植物横截面并非正圆, 测量结果与夹持苗和摄像机的方位有关; 2) 由于试验室光线条件等光噪声影响。长度提取误差值比直径提取误差值大的原因主要是人工测量时由于苗比较软, 存在变形和弯曲。试验结果在允许误差范围之内, 能够满足嫁接条件需要(试验样机的嫁接速度要求为 12 株/min)。单纯一幅图像的处理时间为 0.31 s 左右, 满足在线的嫁接时间要求。

5 结 论

1) 结合自制样机提出了一种基于图像处理, 获得嫁接苗特征的算法, 处理时间约 0.31 s, 试验表明能在线满足嫁接需要(嫁接试验速度 12 株/min)。

2) 针对自制蔬菜嫁接机器人, 使用瓜类和葫芦类嫁接苗, 基于高斯平均和 OSTU 法, 提出了一种图像处理方法求解生长点横坐标, 直接对于自然条件下采集的彩色图像进行处理, 在工程试验中较为简单易行。考虑了夹具等附属件与苗的颜色对比, 能处理自然光采集下的彩色图像, 并能节省有效的图像处理时间。

3) 图像处理方法误差满足嫁接需求, 并能获得苗茎长短轴直径长度, 生长点坐标, 从而为机械手提供正确的抓取高度信息和夹具夹紧程度信息。以视觉和图像处理的方法确定控制信息有利于全自动蔬菜嫁接机器人的进一步后续研制。

利用视觉和图像处理的方法在线获取嫁接苗有用信息是实现嫁接机器人自动上苗和嫁接的关键前提, 后续工作将以此算法为基础, 围绕嫁接机器人自动上下苗和自动匹配, 自动嫁接试验展开, 并试图提高嫁接速度。

[参 考 文 献]

- [1] 耿楠, 于伟, 宁纪锋. 基于水平集和先验信息的农业图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 167—172.
Geng Nan, Yu Wei, Ning Jifeng. Segmentation of agricultural images using level set and prior information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 167—172. (in Chinese with English abstract)
- [2] 马稚昱, 罗锡文, 辜松. 嫁接用苗生长状态无损测量技术的研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(增刊): 117—124.
Ma Zhiyu, Luo Xiwen, Gu Song. Study on non-destructive measurement of vegetable grafting seeding growth on machine vision[J]. Science China Information Science. 2010, 40(Suppl.): 117—124. (in Chinese with English abstract)
- [3] 宋怀波, 何东健, 龚柳明. 不同光照条件下农作物图像 Contourlet 域融合方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 173—179.
Song Huaibo, He Dongjian, Gong Liuming. Crops image fusion in different light conditions based on Contourlet Transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(11): 173—179. (in Chinese with English abstract)
- [4] 吴露露, 马旭, 齐龙, 等. 改进 Hough 变换的农作物病斑目标检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 152—159.
Wu Lulu, Ma Xu, Qi Long, et al. A method of target detection for crop disease spots by improved Hough transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(10): 152—159. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吴见, 侯兰功, 王栋. 基于 Hyperion 影像的玉米冠层叶绿素含量估算[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 116—123.
Wu Jian, Hou Langong, Wang Dong. Estimation of chlorophyll content of corn canopy based on Hyperion image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(6): 116—123. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张亚静, 李民赞, 刘刚, 等. 基于机器视觉和信息融合的邻接苹果分割算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 180—183.

- Zhang Yajing, Li Minzan, Liu Gang, et al. Separating adjoined apples based on machine vision and information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 180—183. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周天娟, 张铁中, 杨丽, 等. 基于数学形态学的相接触草莓果实的分割方法及比较研究[J]. 农业工程学报, 2007, 3(9): 164—168.
- Zhou Tianjuan, Zhang Tiezhong, Yang Li, et al. Comparison of two algorithms based on mathematical morphology for segmentation of touching strawberry fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 3(9): 164—168. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵博, 宋正河, 毛文华, 等. 基于 PSO 与 K-均值算法的农业超绿图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 166—169.
- Zhao Bo, Song Zhenghe, Mao Wenhua, et al. Agriculture extra-green image segmentation based on particle swarm optimization and K-means clustering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 166—169. (in Chinese with English abstract)
- [9] 关海鸥, 许少华, 谭峰. 基于遗传模糊神经网络的植物病斑区域图像分割模型[J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 163—167.
- Guan Haiou, Xu Shaohua, Tan Feng. Image segmentation model of plant lesion based on genetic algorithm and fuzzy neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 163—167. (in Chinese with English abstract)
- [10] Chiu Y C, Chang M Y, Wu G J, et al. Development of an automatic outward-features properties measurement system for grafted tomato seedlings[J]. Applied Engineering In Agriculture, 2008, 24(1): 101—113.
- [11] 苟一, 鲍官军, 杨庆华, 等. 粘连玉米籽粒图像的自动分割方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 163—167.
- Xun Yi, Bao Guanjun, Yang Qinghua, et al. Automatic segmentation of touching corn kernels in digital image[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 163—167. (in Chinese with English abstract)
- [12] 凌云, 王一鸣, 孙明, 等. 基于流域算法的谷物籽粒图像分割技术[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 95—98.
- Ling Yun, Wang Yiming, Sun Ming, et al. Application of watershed algorithm to paddy image segmentation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [13] 董金勇, 王建仑, 李道亮, 等. 田间枣树叶片复杂目标图像综合分割方法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 165—170.
- Dong Jinyong, Wang Jianlun, Li Daoliang, et al. Complex target image of field jujube leaf segmentation based on integrated technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 165—170. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨振宇, 张文强, 李伟, 等. 基于单目视觉的移栽钵苗叶片朝向的调整方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 26—33.
- Yang Zhenyu, Zhang Wenqiang, Li Wei, et al. Monocular vision-based method for direction adjustment of transplanting potted-seedling leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 26—33. (in Chinese with English abstract)
- [15] 邹修国, 丁为民, 陈彩蓉, 等. 基于改进灰度共生矩阵和粒子群算法的稻飞虱分类[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 138—144.
- Zou Xiuguo, Ding Weimin, Chen Cairong, et al. Classification of rice planthopper based on improved gray level co-occurrence matrix and particle swarm algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(10): 138—144. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙俊, 金夏明, 毛罕平, 等. 基于高光谱图像光谱与纹理信息的生菜氮素含量检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 167—173.
- Sun Jun, Jin Xiaming, Mao Hanping, et al. Detection of nitrogen content in lettuce leaves based on spectroscopy and texture using hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(10): 167—173. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李文勇, 李明, 陈梅香, 等. 基于机器视觉的作物多姿态害虫特征提取与分类方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 154—162.
- Li Wenyong, Li Ming, Chen Meixiang, et al. Feature extraction and classification method of multi-pose pests using machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 154—162. (in Chinese with English abstract)
- [18] 文韬, 洪添胜, 李立君, 等. 基于卡尔曼滤波的橘小实蝇成虫运动轨迹优化跟踪[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 197—205.
- Wen Tao, Hong Tiansheng, Li Lijun, et al. Moving trace optimization tracking for adult of Bactrocera Dorsalis (Hendel) based on Kalman filter algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 197—205. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王传宇, 郭新宇, 肖伯祥, 等. 基于图像拼接的苗期玉米植株缺失数量自动测量方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 148—153.
- Wang Chuanyu, Guo Xinyu, Xiao Boxiang, et al. Automatic measurement of numbers of maize seedlings based on mosaic imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 148—153. (in Chinese with English abstract)
- [20] 钱燕, 尹文庆, 林相泽, 等. 基于序列图像三维重建的稻种品种识别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 190—196.
- Qian Yan, Yin Wenqing, Lin Xiangze, et al. Variety identification of rice seed based on three-dimensional

- reconstruction method of sequence images[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 190–196. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王献锋, 张善文, 王震, 等. 基于叶片图像和环境信息的黄瓜病害识别方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 148–153. Wang Xianfeng, Zhang Shanwen, Wang Zhen, et al. Recognition of cucumber diseases based on leaf image and environmental information[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 148–153. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王玲, 刘思瑶, 卢伟, 等. 面向采摘机器人的棉花激光定位算法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 42–48. Wang Ling, Liu Siyao, Lu Wei, et al. Laser detection method for cotton orientation in robotic cotton picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 42–48. (in Chinese with English abstract)
- [23] 马晓丹, 孟庆宽, 张丽娇, 等. 图像拼接重建苹果树冠层器官三维形态[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 154–162. Ma Xiaodan, Meng Qingkuan, Zhang Lijiao, et al. Image mosaics reconstruction of canopy organ morphology of apple trees[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(12): 154–162. (in Chinese with English abstract)

Vision method for measuring grafted seedling properties of vegetable grafted robot

Zhang Lei, He Hu, Wu Chuanyu^{*}

(College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The diameter of the seedlings, the growing point coordinates and the seedling length are not only key parameters of grafting robot for judging whether it can successfully graft, but also the important basis for the robot to estimate motion parameters and spatial position of an object. With the aim to achieve feature (the coordinate of growth point of grafted seedling, the long and short axis radius of the seedlings of rootstocks' cotyledon, the long and short axis radius of the seedlings of scion' cotyledon, the length of the seedlings of rootstocks and the seedlings of scion) measurement of grafted seedling for vegetable grafting robot, an algorithm of integrated technology was proposed based on machine vision and image processing. The several grafting seedling properties can be obtained on-line. The flowchart of the algorithm was given. There were three mainly steps included in the algorithm. Firstly, the image was preprocessed to find the target area by adjusting the camera focal length, setting the relative position between the camera and the seedling. Then, the seedling color image obtained by camera in experiment was transformed into a monochromatic image. Secondly, the target area was segmented by discontinuous gray for building the range of interesting. A Gauss average method was used to extract mid-line for the x -coordinate of the growth point of grafting seedling. An order statistics filtering with a 5×5 median mask was used to reduce the random noise. In order to increase the dynamic range of the gray levels in the seedling image being processed, a contrast stretching transformation was obtained and its the minimum and maximum gray levels was respectively 0.45 and 0.65. Image complement and threshold segmented based on OTSU were acquired. Finally, the algorithm was made with morphological methods and logical calculation to obtain the image coordinates of the long and the short axis radius of the seedlings of rootstock and scion. A manual measurement method was carried before the method based vision and image processing was done. The result of grafted seedling diameter and length based on artificial measurement provided a data comparison basis for the image processing method. Then, the diameters and length of grafted seedling were measured based on the machine vision and image processing method, and some raw results were acquired. Experimental results of grafted gourd seedling image showed that this algorithm was feasible and effective. Compared with the method of manual measurement, the maximum error of seedling length was about 0.02 mm and the maximum error of seedling diameter was about 0.04 mm. The average error was no more than 0.0053 mm. One main reason of causing errors was that diameter of a given seedling varied in different parts, and the cross section of the seedling stem was not a perfect circle. The other main reason was that the seedling became short and bending because the seedling stem was quite soft when it was caught in the middle of the caliper. The research results showed that it took 0.31 s to process a single image, which met the requirements of the design (at the speed of 12 trees per minutes). The experiment verified the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm. It provided a technological support for the optimum design and development of the robot for grafting. It also can meet the real-time requirements of grafting.

Key words: robots; image processing; algorithms; grafting; vegetable; machine vision; properties parameters