

基于颜色与面积特征的方格簇蚕茧分割定位算法与试验

刘莫尘^{1,2} 许荣浩¹ 李法德^{1,2} 宋占华^{1,2} 闫银发^{1,2} 韩守强¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 蚕茧上簇多采用纸板方格簇,但纸板方格簇在使用过程中会因扭曲变形导致方格分布不规则,而采茧机械对变形的方格簇进行蚕茧采摘时,会对方格簇造成损伤。为了提高方格簇机械采茧的智能化水平,减少采茧设备对方格簇的损伤,提出一种基于颜色与面积特征的方格簇蚕茧分割定位算法,实现对方格簇中蚕茧的分割、中心点定位和位置坐标的视觉测量。首先采用图像空间的 Brown 畸变模型对方格簇图像进行畸变矫正,减小径向畸变对视觉测量的影响;对矫正后的图像采用 Mean Shift 聚类算法进行预分割,消除光照及图像背景对蚕茧分割的影响;然后对阈值分割和形态学处理后的二值化蚕茧图像进行基于面积特征的连通域标定,得到每个蚕茧中心点位置;将连通域标定得到的蚕茧中心点坐标代入图像坐标系与世界坐标系转换方程,得到每个蚕茧在笛卡尔空间的三维坐标,经过视觉测量确定蚕茧在方格簇中的具体位置,控制蚕茧采摘装置采摘方格簇中的蚕茧。经过试验,该算法对方格簇中的蚕茧检测正确率为 96.88%,蚕茧坐标最大定位偏差小于 6.0 mm,满足采茧装置对蚕茧采摘的定位精度要求。

关键词: 蚕茧分割; 图像处理; 蚕茧采摘; 定位算法; 试验

中图分类号: TP391.41; S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0043-08

Algorithm and Experiment of Cocoon Segmentation and Location Based on Color and Area Feature

LIU Mochen^{1,2} XU Ronghao¹ LI Fade^{1,2} SONG Zhanhua^{1,2} YAN Yinf^{1,2} HAN Shouqiang¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

Abstract: To improve the lower efficiency of silkworm cocoon harvesting, an algorithm of cocoon image segmentation and coordinate location was proposed based on color and area characteristics, and a cocoon harvester was designed based on machine vision. The monocular CMOS camera was firstly used in the algorithm to take image of checker cocooning frame. And the non-measurement distortion correction method was used to correct the image. Secondly, the camera model was calibrated with the internal parameters for the monocular two-dimensional visual measurement system. The image was smoothed via gray and mean shift filter method because the outer floss of the cocoon can cause wrong segmentation of the image in checker cocooning frame image. Then the binary image was obtained by threshold segmentation. Next, the binary image was processed by open operation and area feature extraction method to remove noise region. A part of the smaller noise connected components can be removed by the open operation. The cocoon region can be extracted by the area characteristic when the large area of the connected components can be removed. The center point coordinates of the cocoon region were got by the connected components calibration, and were mapped into the world coordinates through the equation that transformed image coordinates to world coordinates to get the cocoons' positions in the Cartesian space. Finally, the cocoons were harvested by the cocoon harvester. According to the experiment, the algorithm had the accuracy rate of 96.88% for the cocoon detection in the checker cocooning frame and less than

收稿日期: 2017-11-07 修回日期: 2017-12-27

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-18-ZJ0402)、山东省现代农业产业技术体系建设专项(SDAIT-18-06)和山东省“双一流”奖补资金项目(564047)

作者简介: 刘莫尘(1980—),女,讲师,博士,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: liu_mochen@126.com

通信作者: 闫银发(1976—),男,副教授,博士,主要从事机器视觉在现代农业中的应用研究,E-mail: sd28@163.com

6.0 mm for the cocoon coordinate, which satisfied the requirement of the location of cocoon harvesting.

Key words: silkworm cocoon segmentation; image processing; cocoon harvesting; location algorithm; experiment

0 引言

为提高蚕茧质量,我国推广使用方格簇用于蚕虫上簇,方格簇具有孔格数目多、结构合理、吸水性好、保存方便等特点,但我国的方格簇多为纸板方格簇,并且纸质质量良莠不齐,方格簇在使用过程中极易发生扭曲变形,造成方格分布不规则,当采茧机械对变形的方格簇进行蚕茧采摘时,由于挤压会直接导致方格簇破损,因此我国对蚕茧的采摘主要以人工为主,效率低下。我国虽然已有多款蚕茧采摘设备,但是,这些蚕茧采摘设备智能化水平较低,采茧过程中,对变形的方格簇会造成二次损害^[1],使其失去使用价值。

国外蚕茧采茧机报道较少,只有日本一直推行着省力化蚕茧技术,其采茧机的研制也由来已久,并发展了多种类型的采茧机^[2]。日本的方格簇均为竹制方格簇和硬纸板方格簇,框架比较坚固,不易发生变形,利于机构采收。而我国方格簇多为纸板,且质量差,易发生变形损坏,日本的采茧机械并不适用于我国方格簇。为改善我国蚕茧采摘设备落后,易损伤方格簇的现状,研制一种适用于我国纸制方格簇的蚕茧采摘设备极为重要。

机器视觉作为农业机器人外部传感器最大信息源,是农业机器人研究领域的关键技术之一。但由于农业对象的多样性及作业环境的复杂性,尚未有一种通用的目标识别算法^[3]。近年来,国内学者通过机器视觉对采摘后的蚕茧进行分类,金航峰^[4]通过光谱和高光谱图像技术对蚕茧品质的无损检测进行了研究。宋亚杰等^[5]通过采集单个蚕茧图像并对其进行处理,根据数学形态学的方法,判断蚕茧的质量。周志宇等^[6]对单个蚕茧图像进行采集处理,将蚕茧看成椭圆形从而求其表面积。甘勇^[7]利用光电技术和图像处理技术计算蚕茧干茧壳厚度。乔乐领^[8]通过图像处理技术提出了一种对采摘后的蚕茧进行筛选计数的系统。陈浩等^[9]通过图像处理对蚕茧表面污斑面积进行自动检测,得到了一种智能化的选茧辅助检验方法。

综上所述,目前并未有将机器视觉应用于蚕茧采摘机械中的相关研究。

为提高蚕茧采摘设备的智能化水平,减少采茧设备对方格簇的损伤,探索将机器视觉直接应用于蚕茧采摘中,对方格簇中的蚕茧进行精确定位采摘,

解决变形方格簇蚕茧无法使用机械采茧的难题,本文提出一种基于颜色与面积特征的方格簇蚕茧分割定位算法,直接对方格簇与其中的蚕茧进行分割,并进行视觉测量和蚕茧定位,消除方格簇变形对蚕茧定位的影响。

1 试验工具与图像采集装置

方格簇由山东农业大学马庄蚕桑实验站提供,尺寸为 540 mm × 390 mm,采用 Omnivision 公司的 ov5647 型摄像头,视场角为 160°。在室内自然光下拍摄整张方格簇图像时,摄像头位于方格簇中心上方 75 cm 处,图像分辨率为 640 像素 × 320 像素。用于图像处理的硬件平台为 Raspberry Pi 3b, Raspbian 操作系统,ARM Cortex - A53 1.2 GHz 处理器,软件为 Python2.7 和 OpenCV3.2 机器视觉库。蚕茧采摘设备为直角坐标式方格簇自动采茧机,如图 1 所示。X 轴导轨为 2 个由传动轴连接的同步导轨,长 1 m; Y 轴导轨带有电磁采摘器,长 1 m,于 X 轴导轨上运动。电磁采摘器由一个行程 60 mm、单次往返时间 0.5 s 的电磁铁和一个采茧头组成,用于采摘蚕茧。X 轴导轨、Y 轴导轨和电磁采摘器共同组成直角坐标式蚕茧采摘机构。

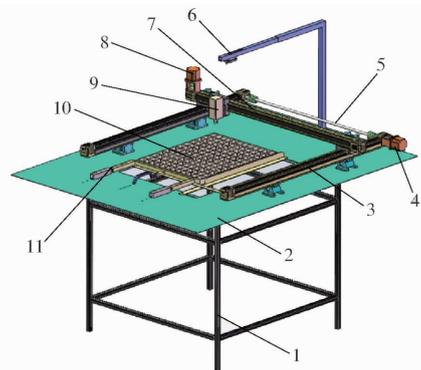


图 1 直角坐标式自动采茧机

Fig. 1 Cartesian coordinate automatic cocoon harvester

1. 机架 2. 工作台 3. X 轴导轨 4. X 轴步进电动机 5. 传动轴
6. 摄像头 7. Y 轴导轨 8. Y 轴步进电动机 9. 电磁采摘器
10. 蚕茧方格簇 11. 方格簇夹持装置

Raspberry Pi 3b 控制摄像头采集方格簇图像,并对图像中方格簇蚕茧进行分割和视觉测量定位,生成方格簇中蚕茧中心点坐标,进而控制 X 轴、Y 轴步进电动机将电磁采摘器定位到蚕茧位置,控制电磁采摘器接通电源,实现电磁采摘器对蚕茧的定位采摘,然后切断电磁采摘器电源,释放电磁采摘器准

备下一个蚕茧的采摘。其工作流程图如图2所示。

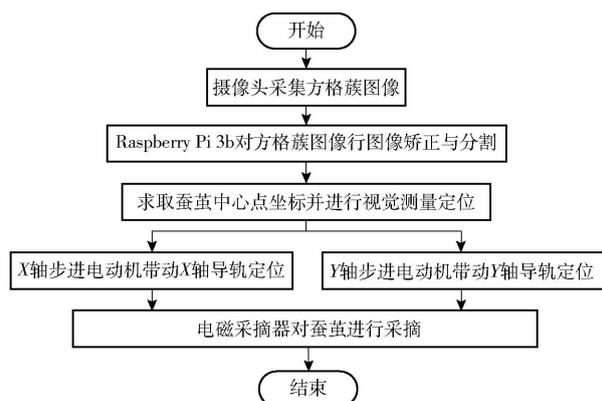


图2 直角坐标式自动采茧机工作流程图

Fig.2 Flow chart of Cartesian coordinate automatic cocoon harvester

2 图像畸变矫正方法

因为需要对蚕茧进行视觉测量定位,而蚕茧在图像上的坐标与蚕茧在笛卡尔空间的三维坐标关系由摄像机成像几何模型决定,该几何模型的参数称为摄像机参数,求取这些几何参数需要通过摄像机标定实现^[10]。摄像机相对于世界坐标系的位置及标定精度直接影响着机器视觉的定位精度。

由于摄像机实际拍摄的图像会存在畸变^[11],而在摄像机镜头具有大畸变时,如果忽略畸变而求取摄像机的内外参数,必然会因为引入畸变系数而使求得的参数存在很大误差。因此可以先进行畸变矫正再标定其他参数。利用图像空间的 Brown 畸变模型的畸变矫正方法^[12]对图像进行矫正,再在无畸变的图像上进行摄像机其他线性参数的标定,这样的标定不需要在线性参数与畸变参数之间进行反复标记,计算量较小,效率较高^[13]。

摄像机镜头的畸变包括径向畸变和切向畸变, Brown 畸变模型考虑了径向畸变和切向畸变。图像空间下的 Brown 畸变模型为

$$\begin{cases} u'_d = u_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1u_dv_d + p_2(r^2 + 2u_d^2) \\ v'_d = v_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_2u_dv_d + p_1(r^2 + 2v_d^2) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} r^2 &= u_d^2 + v_d^2 \\ (u_d, v_d) &= (u, v) - (u_0, v_0) \\ (u'_d, v'_d) &= (u', v') - (u_0, v_0) \end{aligned}$$

式中 (u'_d, v'_d) ——消除畸变后相对参考点的图像坐标

(u_d, v_d) ——畸变图像相对参考点的图像坐标

k_1 ——2 阶径向畸变系数

k_2 ——4 阶径向畸变系数

k_3 ——6 阶径向畸变系数

p_1, p_2 ——切向畸变系数

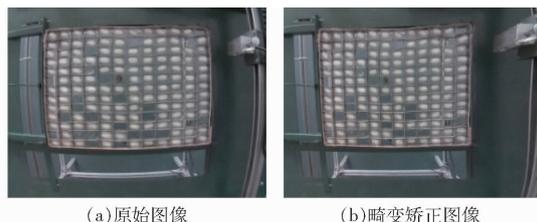
r ——图像到参考点的距离

(u, v) ——实际图像坐标

(u_0, v_0) ——光轴中心点图像坐标

(u', v') ——消除畸变后的图像坐标

图3a为摄像机采集的原始图像,经过矫正后的图像如图3b所示,减小了径向畸变对视觉测量的影响。



(a)原始图像

(b)畸变矫正图像

图3 畸变矫正

Fig.3 Distortion rectifying

3 蚕茧分割及蚕茧视觉测量定位算法

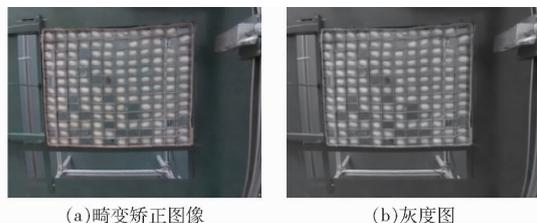
3.1 复杂背景下蚕茧图像分割算法

3.1.1 图像预处理

图像预处理将畸变矫正后的图像灰度化。在数字图像处理中一般先将各种格式的图像转换成灰度图像,以减少处理图像的数据量^[14]。灰度图像的描述与彩色图像一样仍然反映了整幅图像的整体和局部的色度和亮度等级的分布和特征。假设 $f(x, y)$ 代表一幅图像, $Y(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的灰度, $R(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的 R 分量值, $G(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的 G 分量值, $B(x, y)$ 表示点 (x, y) 处的 B 分量值, 则点 (x, y) 处的灰度为

$$Y(x, y) = 0.299R(x, y) + 0.587G(x, y) + 0.114B(x, y) \quad (2)$$

畸变矫正后的图像如图4a所示,经过灰度变换后的图像如图4b所示。



(a)畸变矫正图像

(b)灰度图

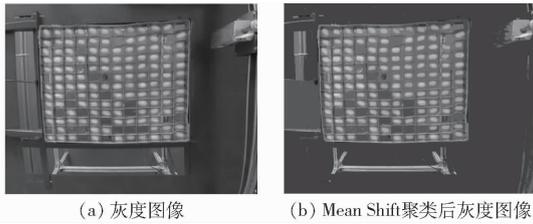
图4 图像预处理

Fig.4 Images preprocessing

3.1.2 图像 Mean Shift 聚类

Mean Shift 是一种基于非参数核函数的密度估计算法^[15],将 Mean Shift 算法应用于图像分割时,灰度图像如图5a所示, Mean Shift 聚类后图像如图5b所示。

假设图像由像素 x 组成,取核函数为 $K(s)$,定



(a) 灰度图像 (b) Mean Shift聚类后灰度图像

图5 Mean Shift 聚类

Fig.5 Mean Shift clustering

义 Mean Shift 偏移向量为

$$m(x) = \frac{\sum_{s \in S} K(s-x)w(s)s}{\sum_{s \in S} K(s-x)w(s)} - x \quad (3)$$

式中 $w(s)$ ——权值函数

S —— x 的子集

对图 5a 灰度图像进行 Mean Shift 聚类后,结果如图 5b 所示,可以看出 Mean Shift 聚类突出了蚕茧区域,保留了蚕茧的基本特征,并消除了光照及图像背景对蚕茧图像的影响。

3.1.3 蚕茧与方格簇阈值分割和形态学处理

对于暗背景上由亮物体组成的图像 $f(x, y)$, 从背景提取目标的方法是选取阈值 T 来分离这 2 类图像^[16]。满足 $f(x, y) \geq T$ 的任何图像点被称为物体点,其他的点称为背景点(在亮背景上的暗物体也一样)。阈值处理后的图像被定义为

$$g(x, y) = \begin{cases} a & (f(x, y) \geq T) \\ b & (f(x, y) < T) \end{cases} \quad (4)$$

式中 a ——目标像素值

b ——背景像素值

为了便于处理,使分割后的图像以白色为目标,黑色为背景,故令 $a = 1$ (白), $b = 0$ (黑), T 为常数^[17]。选取 $T = 135$, 对 Mean Shift 聚类后的灰度图像进行阈值分割,结果如图 6a 所示。



(a) 阈值分割后的图像($T=135$) (b) 开运算图像(3×3)

图6 图像阈值分割及开运算结果

Fig.6 Threshold segmentation and opening operation

对蚕茧图像进行初步阈值分割后,删除了方格簇边框及对蚕茧产生影响的其他区域,只保留了蚕茧区域。因蚕茧区域灰度存在不同,容易对灰度较小的区域造成过分割,故对分割后的二值图像进行一系列形态学操作修饰,以删除过分割的部分,保持蚕茧的基本形状。图像的形态学操作是由一组形态学的代数运算符组成的^[18],基本操作包括膨胀、腐

蚀、开运算和闭运算,其中腐蚀和膨胀是两种最基本也是最重要的形态学运算,开运算与闭运算都是由膨胀和腐蚀复合而成^[19]。本文中,首先对图像进行阈值分割,然后对分割后的二值图像进行开运算,去除噪点并使分割后的蚕茧保持它们的基本形状^[20]。

开运算是先腐蚀后膨胀,使用结构元素 S 对 A 进行开运算,记作 $A \circ S$,可表示为

$$A \circ S = (A \ominus S) \oplus S \quad (5)$$

式中 A ——待处理的图像区域

开运算先用 S 对 A 进行简单的腐蚀操作,然后用 S 对得到的结果进行膨胀操作。

将像素在图像中的整型位置坐标用 $z = (z_1, z_2)$ 表示, $z \in \mathbf{Z}$, 其中 \mathbf{Z} 为二元整数有序偶集合。将一幅图像或者图像中 1 个感兴趣的区域称为集合,用大写字母 A, B, C 等表示。

对于 \mathbf{Z} 上的集合 A 和 S ,使用 S 对 A 进行膨胀,记作

$$A \oplus S = \{(\hat{S})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (6)$$

式中 \hat{S} —— S 相对于其自身原点的映像^[21]

对于 \mathbf{Z}_2 上的集合 A 和 S ,使用 S 对 A 进行腐蚀,记作

$$A \ominus S = \{z | (S)_z \subseteq A\} \quad (7)$$

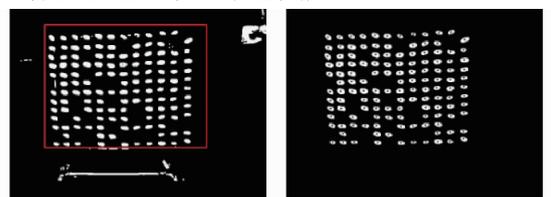
开运算后的图像如图 6b 所示。

3.1.4 基于面积阈值的蚕茧提取

对图像进行开运算处理后,仍有许多像素以噪声的形式存在,主要是目标对象或蚕茧部分被误判为背景而形成的^[22],如图 7a 所示。选择面积法滤波^[23]提取蚕茧,一个连通域的面积定义为连通域中像素的数目,设定面积阈值(m_1, m_2), $m_2 > m_1$, 计算蚕茧区所有白色连通域的面积 M , 则蚕茧面积与噪点面积关系为

$$\begin{cases} m_1 \leq M \leq m_2 & (\text{蚕茧区域}) \\ M < m_1 \text{ 或 } M > m_2 & (\text{噪点区域}) \end{cases} \quad (8)$$

为了更好地消除噪点对蚕茧的影响,经过多次试验,面积阈值选取(100, 600)时,对蚕茧提取效果最好,经过面积法的提取,可以得到提取后的蚕茧图像及各蚕茧连通域的中心点如图 7b 所示。



(a) 蚕茧区 (b) 蚕茧图像及其中心点

图7 图像面积特征提取结果

Fig.7 Feature extraction of image area

3.2 摄像机标定及蚕茧定位算法

3.2.1 摄像机标定方法

视觉系统涉及3个坐标系：世界坐标系(X_w, Y_w, Z_w)，摄像机坐标系(X_c, Y_c, Z_c)，图像坐标系(u, v)^[24]。方格簇固定在工作台上，方格簇垂直方向 Z 的值固定不变，因此蚕茧在方格簇内水平面的位置只由 X, Y 坐标决定，可采用单目二维视觉系统。对于单目二维视距测量，其摄像机垂直于工作台平面安装，摄像机的位置和内外参数^[25]固定。采集原理如图8所示。

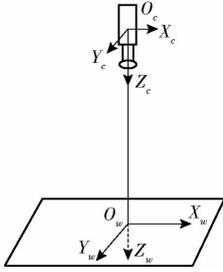


图8 单目二维视觉测量坐标系

Fig.8 Monocular two-dimensional vision measurement coordinate system

世界坐标到图像坐标的转换关系^[26]为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{M}_w \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{M}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$

$\mathbf{t} = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ $\mathbf{n} = [n_x \ n_y \ n_z]^T$

$\mathbf{o} = [o_x \ o_y \ o_z]^T$ $\mathbf{a} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$

式中 \mathbf{n} —— X_w 轴在摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的方向向量

\mathbf{o} —— Y_w 轴在摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的方向向量

\mathbf{a} —— Z_w 轴在摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的方向向量

\mathbf{t} —— $O_w X_w Y_w Z_w$ 的坐标原点在摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 中的位置

对于图8所示的单目二维视觉测量系统，有

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{t} = [0 \ 0 \ d]^T$$

式中 d ——光轴中心点 O_c 到景物中心点 O_w 距离
将 \mathbf{R}, \mathbf{t} 代入式(9)，化简后得

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx}x_w + u_0 d \\ \frac{f}{dy}y_w + v_0 d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 f ——摄像机焦距

内参数采用四参数摄像机模型，对于工作平面上的两点 $P_1(x_{w1}, y_{w1}, 0)$ 和 $P_2(x_{w2}, y_{w2}, 0)$ ，由式(10)可得 P_1 与 P_2 两点图像坐标之间的关系为

$$\begin{cases} u_2 - u_1 = \frac{k_x}{d}(x_{w2} - x_{w1}) \\ v_2 - v_1 = \frac{k_y}{d}(y_{w2} - y_{w1}) \end{cases} \quad (11)$$

式中 k_x —— X 轴方向的放大系数

k_y —— Y 轴方向的放大系数

(u_1, v_1) ——点 P_1 的图像坐标

(u_2, v_2) ——点 P_2 的图像坐标

k_{xd} 与 k_{yd} 的计算公式为

$$\begin{cases} k_{xd} = \frac{u_2 - u_1}{x_{w2} - x_{w1}} \\ k_{yd} = \frac{v_2 - v_1}{y_{w2} - y_{w1}} \end{cases} \quad (12)$$

其中 $k_{xd} = \frac{k_x}{d}$ $k_{yd} = \frac{k_y}{d}$

式中 k_{xd}, k_{yd} ——标定的摄像机参数

因此理论上只需确定两点在世界坐标中的距离和在图像坐标中对应的距离，就可以通过式(12)计算摄像机参数。

为了减小摄像机标定参数的误差，得到更加精确的摄像机参数，可采用取多个点求平均值的方法，来确定摄像机标定参数。方法如下：采集 i 组点，每组点包含2个坐标点 P_{i1} 和 P_{i2} ，其世界坐标为 $(x_{i1}, y_{i1}, 0)$ 和 $(x_{i2}, y_{i2}, 0)$ ，对应的图像坐标为 (u_{i1}, v_{i1}) 和 (u_{i2}, v_{i2}) ，则可由式(12)得到 i 个 k_{xd} 和 i 个 k_{yd} ，则第 i 个 k_{xd} 记作 k_{xdi} ，第 i 个 k_{yd} 记作 k_{ydi} 。则 k_{xd}, k_{yd} 的平均值计算公式为

$$\begin{cases} \bar{k}_{xd} = \frac{\sum_{j=1}^i k_{xdj}}{i} \\ \bar{k}_{yd} = \frac{\sum_{j=1}^i k_{yjd}}{i} \end{cases} \quad (13)$$

3.2.2 蚕茧视觉测量与定位算法

设第 k 个蚕茧中心点图像坐标为 $C_{ck}(u_k, v_k)$ ，世界坐标原点所对应的图像坐标为 $O_c(u_0, v_0)$ ，则第 k 个蚕茧的世界坐标 $C_{wk}(x_{wk}, y_{wk})$ 为

$$\begin{cases} x_{wk} = \bar{k}_{xd}(u_k - u_0) \\ y_{wk} = \bar{k}_{yd}(v_k - v_0) \end{cases} \quad (14)$$

采用特征点的实际坐标与标定坐标之间的欧氏距离作为标定偏差 $D^{[27]}$ 。则标定偏差 D 为

$$D = \sqrt{(X_i - x_i)^2 + (Y_i - y_i)^2} \quad (15)$$

式中 (X_i, Y_i) ——实际坐标值

(x_i, y_i) ——标定坐标值

图像坐标系以图像左上角第一个像素点作为原点,世界坐标系则以图像左上角第一个蚕茧的中心点为原点,在方格簇上寻找 10 个蚕茧中心点作为已知点,使用游标卡尺分别测出 10 个已知蚕茧中心点的空间坐标 (X_i, Y_i) ($i = 1, 2, \dots, 10$)。已知 10 个蚕茧中心点在图像上的坐标 (u_i, v_i) , 通过式 (14) 分别计算得到 10 个已知点的标定坐标 (x_i, y_i) , 通过式 (15) 分别计算 10 个蚕茧中心点标定坐标与世界坐标的标定偏差。得到的蚕茧质心位置坐标信息如表 1 所示。由表 1 可知,蚕茧质心位置坐标标定偏差最大为 6.0 mm。

表 1 蚕茧质心的位置坐标信息

Tab. 1 Location information of centroid of cocoon

目标点	图像坐标	标定坐标	世界坐标	标定偏差/ mm
1	(104, 141)	(0, 92)	(0, 90)	2.0
2	(104, 231)	(0, 212)	(0, 210)	2.0
3	(104, 338)	(0, 355)	(0, 360)	5.0
4	(191, 71)	(131, 0)	(135, 0)	4.0
5	(283, 71)	(269, 0)	(270, 0)	1.0
6	(378, 71)	(405, 0)	(411, 0)	6.0
7	(251, 141)	(225, 90)	(221, 93)	5.0
8	(284, 207)	(270, 180)	(270, 181)	1.0
9	(379, 270)	(408, 268)	(412, 264)	5.6
10	(409, 335)	(455, 355)	(458, 351)	5.0

4 算法性能测试与试验结果分析

通过基于机器视觉的直角坐标式方格簇自动采茧机对算法进行试验测试,采茧机如图 9 所示。

随机选取 10 张方格簇,使用基于颜色与面积特征的方格簇蚕茧分割算法对方格簇内的蚕茧进行识别、定位和采摘试验,并对试验数据进行整理。

4.1 方格簇蚕茧检测正确率

使用检测正确率^[28]衡量蚕茧被识别的程度。检测正确率为单张方格簇中被识别蚕茧数与总蚕茧数之比,计算公式为

$$R_s = \frac{N_s}{N_c} \times 100\% \quad (16)$$



图 9 基于机器视觉的直角坐标式方格簇自动采茧机样机

Fig. 9 Mock-up of Cartesian coordinate automatic cocoon harvester based on machine vision

式中 R_s ——检测正确率

N_s ——单张方格簇中被识别的蚕茧数

N_c ——单张方格簇中的总蚕茧数

检测统计结果如表 2 所示,蚕茧检测正确率为 96.88%,满足蚕茧采摘对蚕茧检测正确率的要求。

表 2 蚕茧检测正确率

Tab. 2 Correct ratio of cocoon detection

测试方格簇序号	识别蚕茧数	蚕茧总数	检测正确率/%
1	88	90	97.78
2	69	73	94.52
3	85	93	91.40
4	85	86	98.84
5	78	78	100
6	112	118	94.92
7	130	130	100
8	119	123	96.75
9	119	121	98.35
10	120	124	96.77

4.2 蚕茧定位精度

使用整体最大偏差衡量定位精度,整体最大偏差定义为所有方格簇标定偏差的最大值

$$E_r = \max(e_{r_1}, e_{r_2}, \dots, e_{r_N}) \quad (17)$$

式中 E_r ——整体最大偏差

N ——方格簇个数

e_r ——某张方格簇的最大定位偏差

本文随机选取 10 张方格簇,故 $N = 10$ 。计算统计结果如表 3 所示,10 张方格簇中蚕茧定位坐标的最大偏差为 6.0 mm,满足蚕茧采摘定位精度的要求。

4.3 蚕茧采摘结果分析

对选取的 10 张方格簇蚕茧进行采摘试验,试验

表3 整体最大偏差

Tab.3 Overall maximum deviation

测试方格簇序号	偏差/mm
1	5.0
2	4.5
3	5.5
4	6.0
5	5.8
6	4.6
7	5.1
8	4.2
9	4.0
10	5.7

过程中,样机运行平稳,能够有效地完成蚕茧定位采摘。试验结果如表4所示,效果如图10所示。

表4 试验结果

Tab.4 Test results

参数	数值
平均识别率/%	96.88
最大定位偏差/mm	6.0
单张蚕茧采摘时间/s	≤50

在蚕茧采摘过程中,对蚕茧检测正确率可达96.88%,蚕茧位置坐标最大定位误差为6.0 mm,满足蚕茧采摘精度要求。采摘一张方格簇所需时间小于等于50 s,比人工采茧效率提高4~5倍。



(a) 采摘前的方格簇

(b) 采摘后的方格簇

图10 蚕茧采摘效果图

Fig.10 Picking effect images

5 结论

(1) 提出的基于颜色与面积特征的方格簇蚕茧分割算法,消除方格簇变形对蚕茧定位的影响。通过 Brown 畸变模型对采集到的原始图像进行畸变矫正,然后采用 Mean Shift 聚类、阈值分割、形态学处理及面积阈值法对矫正后的图像进行处理,对复杂背景下的方格簇和蚕茧进行有效分割,满足将蚕茧从变形方格簇中分割的要求。

(2) 提出的蚕茧视觉测量及定位算法,通过摄像机标定及取多个点求平均值方法,对蚕茧进行定位,定位准确,定位误差小于6.0 mm,可用于蚕茧采摘机械对蚕茧进行定点采摘。

(3) 随机选取10张方格簇,通过基于机器视觉的直角坐标式方格簇自动采茧机对方格簇中的蚕茧进行分割与定位试验,蚕茧分割检测正确率为96.88%,蚕茧位置坐标最大定位误差为6.0 mm,满足蚕茧采摘机械对蚕茧进行定位采摘的精度要求。

参 考 文 献

- 1 陈超科. 方格簇自动采茧机的研制[D]. 泰安:山东农业大学,2017.
- 2 川名茂,沈云岳. 全自动选茧机的开发[J]. 丝绸,1988(11): 44-45.
- 3 蔡健荣,周小军,李玉良,等. 基于机器视觉自然场景下成熟柑橘识别[J]. 农业工程学报,2008, 24(1): 175-178. CAI Jianrong, ZHOU Xiaojun, LI Yuliang, et al. Recognition of mature orange in natural scene based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 175-178. (in Chinese)
- 4 金航峰. 基于光谱和高光谱图像技术的蚕茧品质无损检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- 5 宋亚杰,谢守勇,冉瑞龙. 机器视觉技术在蚕茧无损检测中的应用研究[J]. 现代农业装备,2006(9): 48-51. SONG Yajie, XIE Shouyong, RAN Ruilong. Applied research on machine vision technology in non-destructive test of cocoon [J]. Modern Agricultural Equipments, 2006(9): 48-51. (in Chinese)
- 6 周志宇,刘喜昂,杨东鹤. 机器视觉在蚕茧表面积测量中的应用[J]. 纺织学报,2006, 27(12): 29-31. ZHOU Zhiyu, LIU Xi'ang, YANG Donghe. Application of machine vision in measurement of cocoon superficial area[J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(12): 29-31. (in Chinese)
- 7 甘勇. 基于图像处理技术的干茧壳厚度计算方法[J]. 丝绸,2006(11): 46-48. GAN Yong. Calculation method for shell thickness of dried cocoon based on image processing[J]. Journal of Silk, 2006(11): 46-48. (in Chinese)
- 8 乔乐领. 基于图像处理的蚕茧自动计数系统的研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2013.
- 9 陈浩,杨峥,刘霞,等. 基于MATLAB的桑蚕茧选茧辅助检验方法的研究[J]. 丝绸,2016(3): 32-36. CHEN Hao, YANG Zheng, LIU Xia, et al. Study on auxiliary testing method for mulberry silkworm cocoon sorting based on MATLAB[J]. Journal of Silk, 2016(3): 32-36. (in Chinese)
- 10 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998:52.
- 11 CHATTERJEE C, ROYCHOWDHURY V P. Algorithms for coplanar camera calibration[J]. Machine Vision and Applications, 2000, 12(2): 84-97.

- 12 高瞻宇,顾营迎,刘宇航,等. 采用简化 Brown 模型及改进 BFGS 法的相机自标定[J]. 光学精密工程,2017, 25(9):2532 - 2540.
GAO Zhanyu, GU Yingying, LIU Yuhang, et al. Self-calibration based on simplified Brown non-linear camera model and modified BFGS algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(9): 2532 - 2540. (in Chinese)
- 13 XU D, LI Y F, TAN M. A method for calibration cameras with large distortion in lens[J]. Optical Engineering, 2006, 45(4): 0436021 - 0436028.
- 14 吕朝辉,陈晓光,吴文福,等. 基于双目立体视觉的秧苗直立度自动测定系统[J]. 农业机械学报,2002, 33(1): 60 - 62.
LÜ Chaohui, CHEN Xiaoguang, WU Wenfu, et al. Automatic measuring system of seeding perpendicularity based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(1): 60 - 62. (in Chinese)
- 15 CONMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603 - 619.
- 16 胡炼,罗锡文,曾山,等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报,2013,29(10): 12 - 18.
HU Lian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12 - 18. (in Chinese)
- 17 丁为民,赵思琪,赵三秦,等. 基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(6): 1 - 10.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160601&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.001.
DING Weimin, ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, et al. Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 1 - 10. (in Chinese)
- 18 MARAGOS P. Differential morphology and image processing[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(6): 922 - 937.
- 19 李冠林,马占鸿,王海光. 基于支持向量机的小麦条锈病和叶锈病图像识别[J]. 中国农业大学学报,2012,17(2): 72 - 79.
LI Guanlin, MA Zhanhong, WANG Haiguang. Image recognition of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on support vector machine[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(2): 72 - 79. (in Chinese)
- 20 宋宇,刘永博,刘路,等. 基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2): 38 - 44.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.005.
SONG Yu, LIU Yongbo, LIU Lu, et al. Extraction method of navigation baseline of corn roots based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 38 - 44. (in Chinese)
- 21 GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译. 2版. 北京:电子工业出版社,2003:423 - 424.
- 22 蒋焕煜,彭永石,申川,等. 基于双目立体视觉技术的成熟番茄识别与定位[J]. 农业工程学报,2008, 24(8): 279 - 283.
JIANG Huanyu, PENG Yongshi, SHEN Chuan, et al. Recognizing and locating ripe tomatoes based on binocular stereo vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 279 - 283. (in Chinese)
- 23 沈宝国,陈树人,尹建军,等. 基于颜色特征的棉田绿色杂草图像识别方法[J]. 农业工程学报,2009, 25(6): 163 - 167.
SHEN Baoguo, CHEN Shuren, YIN Jianjun, et al. Image recognition of green weeds in cotton fields based on color feature[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6): 163 - 167. (in Chinese)
- 24 SUN Qiucheng, HOU Yueqian, TAN Qingchang. A new method of camera calibration based on segmentation model[J]. Optik, 2013, 124(24): 6991 - 6995.
- 25 汤一平,王伟羊,朱威,等. 基于机器视觉的茶陇识别与采茶机导航方法[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(1): 45 - 50.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160107&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.007.
TANG Yiping, WANG Weiyang, ZHU Wei, et al. Tea ridge identification and navigation method for tea-plucking machine based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 45 - 50. (in Chinese)
- 26 王跃勇,于海业,刘媛媛. 基于双目立体视觉的机械手移栽穴盘定位方法[J]. 农业工程学报,2016, 32(5): 43 - 49.
WANG Yueyong, YU Haiye, LIU Yuanyuan. Mechanical transplanting plug tray localization method based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 43 - 49. (in Chinese)
- 27 尹建军,沈宝国,陈树人,等. 基于机器视觉的田间杂草定位技术[J]. 农业机械学报,2010,41(6): 163 - 166.
YIN Jianjun, SHEN Baoguo, CHEN Shuren, et al. Position technology of field weed based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 163 - 166. (in Chinese)
- 28 黄福珍,苏剑波. 人脸检测[M]. 上海:上海交通大学出版社,2006:12.