

棉花采摘机器人红外测距技术研究*

王 玲¹ 邹小昱¹ 刘思瑶¹ 陈兵林² 朱宏超¹ 朱镕杰¹

(1. 南京农业大学江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031;
2. 南京农业大学农业部作物生长调控重点开放实验室, 南京 210095)

摘要: 为定位棉株上的棉花,用红外测距实验装置和计算机图像处理技术结合棉花的农学生长特性测量单朵棉花的距离。在 0.7 ~ 1.6 m 的距离区间内建立红外测距模型,获取了棉株表面点云的距离图像,测量精度达 0.008 5 m。以 0.65 为标准差设计高斯滤波器的尺寸,用 1-D 高斯滤波器平滑棉株图像,用 2-D 高斯滤波器求取其梯度图像,以 0.2 m、0.08 m 为强、弱阈值,基于 Canny 边缘检测算子构建闭环边缘,结合形态学运算提取棉花区域,去除棉枝。用峰点滤波器削弱棉花图像中的粘连重叠现象,基于分水岭算法提取单朵棉花并求取其距离。结果表明,单朵棉花的图像识别率达 91.3%,红外与人工测距结果的相关系数为 0.992 2,为采摘机器人运动轨迹的规划提供了参数。

关键词: 棉花 采摘机器人 红外测距 Canny 算子 峰点滤波 分水岭算法

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)07-0061-06

引言

20 世纪 80 年代以来,我国已经成为世界上棉花生产大国。美国棉花生产具有品种单一、生产规模大、成熟期集中等特点,通常采用大规模机械化采收。我国棉花品种多样化、生产规模多元化、收获期长,常用的人工采收方式劳动强度大、效率低、棉花品质差,严重制约棉花生产规模的进一步扩大;采用机器人收获棉花,实现采棉的自动化和智能化,研究与开发机器人采棉技术对解放劳动力、提高生产效率、降低成本、保证棉花品质等方面都有重要意义^[1]。

棉花的识别与定位是采摘机器人视觉系统的关键技术之一。在国内外研究中,以 CMOS 图像传感器为基础的双目图像采集系统,依据立体视差的关系,对棉花果实的质心平面坐标转换为空间坐标,完成定位^[2];基于双目立体视觉技术的多维视觉系统采用左右相机模仿人眼获取视差,标定、匹配难度较大,实现高精度定位具有一定的困难^[3-8];有关网络系统、小波变换、关联性匹配等图像处理方法可减少噪声干扰,提高棉花图像的识别率,但图像处理算法复杂、实时性不高^[9-11]。

本文结合红外测距传感器^[12-13]与计算机图像

处理技术^[14-16],利用红外测距传感器体积小、功耗低、速度快、抗干扰等特点,提出非接触式红外测量棉株表面的深度信息,并进一步对其进行计算机图像处理,实现棉花的识别与定位,为采摘机器人运动轨迹规划提供参数。

1 材料与方法

1.1 棉株生长特性

棉株上棉铃通常自下而上、由里向外自然吐絮。新疆棉株有 12 台果枝、每台果枝有 4 个果节,按照吐絮时间可将棉株上的果枝和果节分成若干组,简称为圆锥体,圆锥体上相邻果枝以 135°夹角螺旋上升为一个螺旋体,其中,第 1 圆锥体为 1、2、3 果枝的第 1 果节,第 2 圆锥体为 4、5、6 果枝的第 1 果节和 1、2、3 果枝的第 2 果节,依此类推。因而,俯视角度下的果枝是 3/8 叶序(图 1),即第 4 台果枝和第 1 台果枝夹角为 45°,多数横向相邻果枝上的棉花不存在严格意义上的上下遮挡现象,遮挡程度通常不超过一半;第 9 台果枝和第 1 台果枝上下在同一方向上,少数纵向相邻果枝上的棉花有可能上下遮挡,遮挡程度甚至超过一半。此外,如果种植密度过大,棉株之间因交叉生长而易产生上下遮挡现象,因而,农艺上还要求在合适的种植密度下施用催熟剂、脱

收稿日期: 2013-09-16 修回日期: 2013-11-04

* 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(KYZ201325)和江苏省农机基金资助项目(GXZ10007)

作者简介: 王玲,副教授,博士,主要从事图像处理与模式识别技术研究,E-mail: Lingw@njau.edu.cn

叶剂进行规模化采棉。

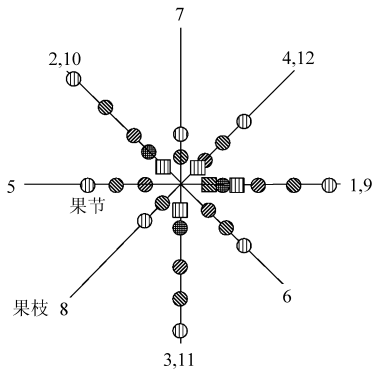


图 1 俯视角度下 4 个圆锥体叠加
Fig. 1 Four cone superposition from top view

1.2 建模实验设计

Sharp 公司生产的 GP2Y0A710K0F 型红外测距传感器由 5 V 电源供电,正常工作时,发射器中的红外二极管发射红外线,遇到障碍物反射时被探测器检测到,传感器利用 CCD 对发射与接收之间的时间差数据进行图像处理,由信号处理器处理后以电压的形式输出,其输出端连接电压计量表。

为了建立该传感器的测距模型,设计如下实验装置,水平安装一个标有刻度的导轨,导轨一端固定一块粘满棉花和棉枝的平板,平板与导轨垂直,将传感器面向平板固定在导轨的滑块上移动(图 2a)。建模时,传感器以距离平板 0.05 m 处为起点开始外移,每移动 0.05 m 采集 1 次电压,总计采集 60 次,总长 5.5 m,以此为基础,建立距离与电压之间的对应关系曲线(图 2b)。由图可知,在 0.7 ~ 1.6 m 的距离区间内,电压(2.92 ~ 1.86 V)的区分度较好,可

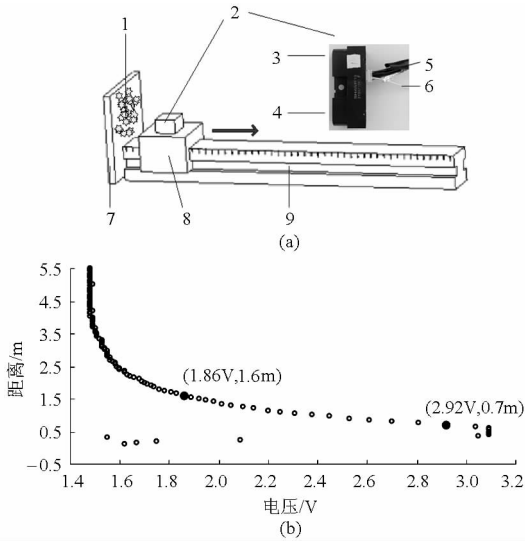


图 2 建模实验设计
Fig. 2 Experiment design for modeling
(a) 实验装置 (b) 电压与距离的对应关系

1. 棉花/枝 2. 红外测距传感器 3. 发射器 4. 探测器 5. 供电电压 5 V 6. 输出电压 1.4 ~ 3.2 V 7. 平板 8. 滑块 9. 导轨

用于设计下一步的棉株测距范围。

1.3 棉株测距实验设计

在 1.55 m 高处安装相互垂直的导轨 A 与 B,固定于导轨 B 滑块上的测距传感器沿着 X 轴移动,固定于导轨 A 滑块上的导轨 B 则沿着 Y 轴移动,向下测量棉株的 Z 轴距离(图 3a)。具体测量步骤为:传感器每隔 0.01 m 沿 Y 轴移动一次,移动总长为 0.67 m;每次移动后再沿 X 轴每隔 0.01 m 移动一次,移动总长为 0.57 m;一共采集 57 × 67 个电压,再利用所建立的红外测距模型将电压转换成距离,获取棉株表面点云的 Z 轴坐标矩阵;将棉株表面点云的 Z 轴坐标矩阵简称为棉株图像,用边缘检测算子结合形态学运算从棉株图像中提取棉花图像,基于分水岭图像分割算法提取单朵棉花并求取其距离。为验证其正确性,采用手工测量方法将皮尺自由落至地面,读取棉花表面至地面的距离(图 3b)。

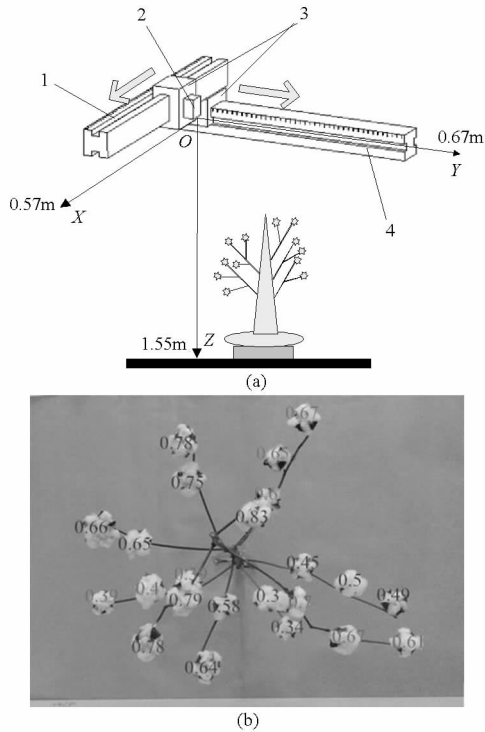


图 3 棉株测距实验设计
Fig. 3 Experiment design for plant measurement
(a) 实验装置 (b) 人工测距结果
1. 导轨 B 2. 红外测距传感器 3. 滑块 4. 导轨 A

2 结果与分析

2.1 棉株测距

由于建模时测距传感器的移动间距达 0.05 m,为了减小电压-距离转换时的误差,需要对 0.7 ~ 1.6 m 距离区间的测距模型曲线进行线性内插值处理,以提高 Z 轴的测距精度。方法是每隔 0.01 V 电压插值 1 次,随着电压由 2.92 V 减小至 1.86 V,插

值点越来越少,获得最终棉株测距模型(图 4a)。由图可知,随着距离的增加,传感器 Z 轴测距间距由 0.004 5 m 变化至 0.016 7 m,其均值 0.008 5 m 为测距精度,传感器在 X、Y 轴上的采样精度为 0.01 m。

在棉株测距实验装置中,采集了 57 × 67 个电压,根据上述棉株测距模型将电压转换为距离,获取棉株表面点云的 Z 轴坐标矩阵,其值域为 0.73 ~ 1.55 m,其中,1.55 m 为地面坐标。该矩阵可视为一幅灰度图(图 4b),简称为棉株图像,距离越小灰度越深,白色背景为地面。

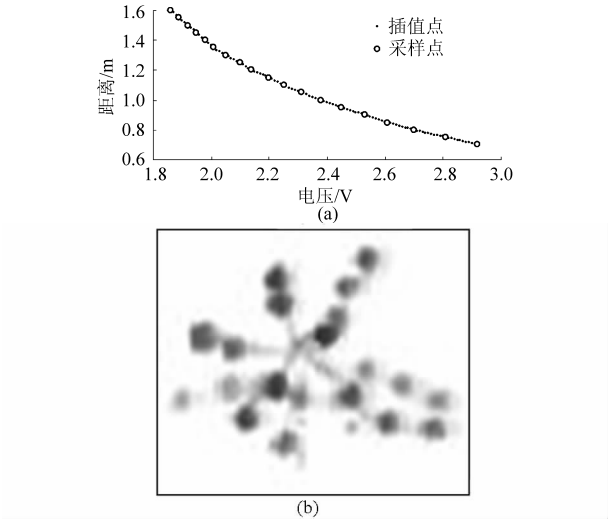


图 4 棉株测量模型与结果

Fig. 4 Model and result of plant measurement
(a) 棉株测距模型 (b) 棉株距离图像

2.2 棉株图像分割

将棉株距离图像转换为棉株到地面之间的距离图像(图 5a),以去除地面背景。观察棉株的形态特

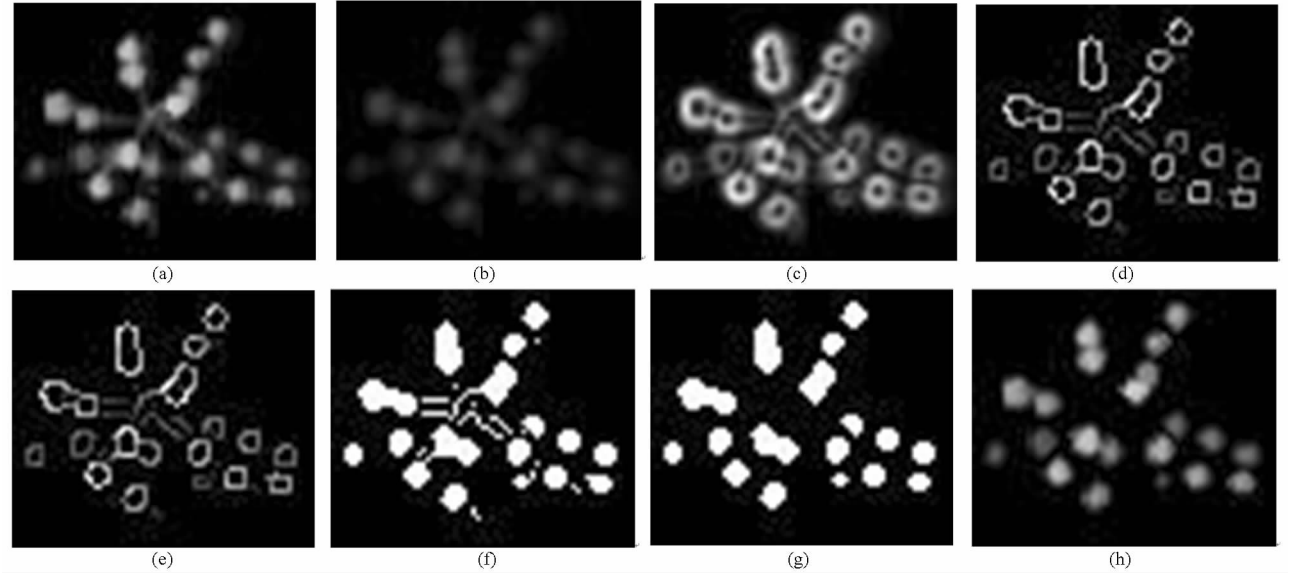


图 5 棉株图像分割过程

Fig. 5 Procedure of plant image segmentation
(a) 棉株图像 (b) 图像平滑 (c) 梯度图像 (d) 局部最大 (e) 闭环 (f) 填充 (g) 去噪 (h) 棉花图像

性,发现棉花边缘呈闭环状且梯度一致,而棉枝边缘呈开环状且梯度渐变,基于这一点,考虑用边缘检测算子分割棉花与棉枝区域。Sobel、Laplace 等常用的边缘检测算子会形成不闭合边界,甚至产生双边界,而 Canny 算子基于最优化逼近准则来获取闭合边界,适用于棉花边界的提取,其实验步骤为:

(1) 基于高斯滤波器的图像平滑与增强

由于 Canny 边缘检测算法基于导数计算图像的梯度及其方向,容易受噪声影响。首先,用一维高斯滤波器 $H(t)$ 和 $H'(t)$ 分别对棉株图像平滑滤波,在降低噪声的同时也导致边缘强度的损失,即 $H(t) = \frac{e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2}$;然后,用二维高斯滤波器 $H(x,y)$ 和 $H'(x,y)$ 分别对平滑后的图像求导,获取图像的梯度幅值和方向,以增强边缘,即 $H(x,y) = \frac{-xe^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}}{\pi\sigma^2}$ 。

由于高斯滤波器的尺寸取决于其标准差 σ ,当 σ 为 0.2 ~ 0.4、0.5 ~ 0.6、0.7 ~ 0.9 时,滤波器尺寸分别为 3 × 3、5 × 5、7 × 7,同时,随着 σ 的增加, $H(t)$ 的极值逐渐减小, $H(x,y)$ 的极值逐渐增大(图 6)。在尽量降低计算开销的前提下,为实现在降低噪声的同时保持边缘的强度,选择 $\sigma = 0.65$,用 5 × 5 的一维滤波器和二维滤波器获取平滑图像(图 5b)和归一化的梯度图像(图 5c)。

5 × 5 一维滤波器为

$$H(t) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.003\ 3 & 0.115\ 4 & 0.376\ 7 & 0.115\ 4 & 0.003\ 3 \end{bmatrix}$$

其中 $t = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}$

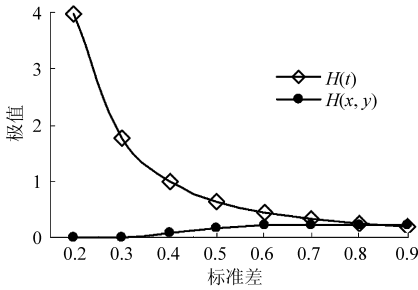


图 6 高斯滤波器的极值与标准差的关系
Fig. 6 Relationship of Gaussian filter extreme and standard deviation

5 × 5 二维滤波器为

$$H(x,y) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.000\ 1 & 0.002\ 0 & 0 & -0.002\ 0 & -0.000\ 1 \\ 0.004\ 1 & 0.070\ 6 & 0 & -0.070\ 6 & -0.004\ 1 \\ 0.013\ 3 & 0.230\ 7 & 0 & -0.230\ 7 & -0.013\ 3 \\ 0.004\ 1 & 0.070\ 6 & 0 & -0.070\ 6 & -0.004\ 1 \\ 0.000\ 1 & 0.002\ 0 & 0 & -0.002\ 0 & -0.000\ 1 \end{bmatrix}$$

其中 $x = y'$ $y = [t' \ t' \ t' \ t' \ t']$

(2) 基于局部最大准则追踪边缘的顶部

仅仅得到全局的梯度并不足以确定边缘,还必须进一步保留局部梯度最大的点,方法是在 4 个梯度方向上逼近局部梯度最大的点,构成初始边缘(图 5d)。

(3) 基于双阈值法构建闭环边缘

梯度较大的点并不一定是边缘,需要设置阈值来判定。为了获取棉花的闭环边缘,以区分开环的棉枝边缘,采用双阈值法来判定边缘点。由手工测量结果可知,棉花到地面的最短距离为 0.30 m,因而,选择 0.20 m 为强阈值,0.20 m × 0.4 为弱阈值,在选取高于强阈值的边缘点的同时移除低于弱阈值的边缘点,对于 0.08 ~ 0.20 m 之间的弱边缘点,倘若其 8 邻域内出现强边缘点,则保留该弱边缘点,以此闭合棉花边缘(图 5e)。

(4) 基于形态学运算分割棉花与棉枝

对上述边缘检测结果进行二值化处理,继而进行形态学细化和填充运算(图 5f),进一步以半径为 1 的结构元素进行形态学开运算(图 5g),去除棉枝噪声,提取棉花距离图像(图 5h)。

2.3 棉花图像分割

观察棉花的距离图像可知,需要进一步分割才能获得单朵棉花的距离。根据棉株的生长特性,同一棉枝上相邻果节上的 2 朵棉花可能粘连,夹角为 45°的棉枝上邻近的 2 朵棉花可能因上下遮挡而重叠,这些粘连重叠的棉花通常不会超过一半。观察棉花距离的三维图像(图 7)可知,棉花表面点云的灰度呈圆锥体状,适合用分水岭算法分割粘连重叠

的棉花,实验步骤为:

(1) 基于峰点滤波的距离变换。对棉花图像进行二值化处理,在二值图上进行距离变换,获取每个像素到最近零值像素的距离(图 8),为下一步应用分水岭算法做准备。由图 8 可知,很难分割粘连重叠的棉花。为了解决这一难题,用模板对棉花图像进行峰点滤波,即 $\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$,增强了峰点,削弱甚至滤去了粘连重叠棉花之间的谷点(图 9a);对峰点滤波后的二值图(图 9b)进行距离变换(图 9c),有望进一步有效分割粘连重叠的棉花。

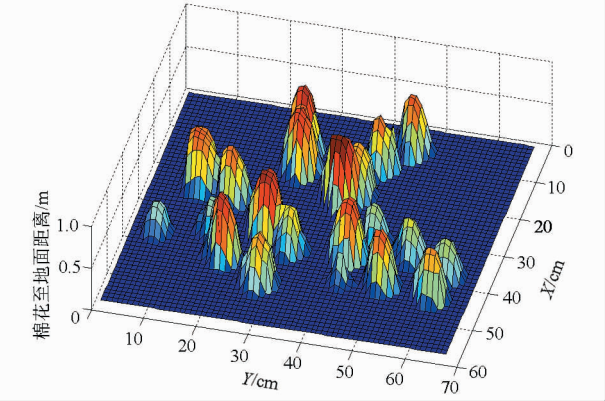


图 7 棉花三维图
Fig. 7 Cotton three-dimensional map

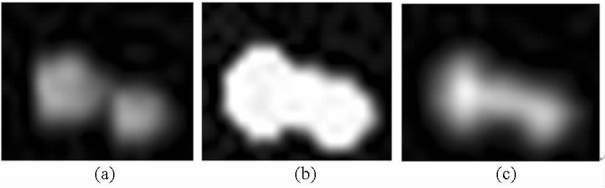


图 8 粘连重叠棉花的距离变换
Fig. 8 Distance transform of adhesion overlapping cotton
(a) 棉花图像 (b) 二值图 (c) 距离变换

(2) 分水岭变换。对距离变换灰度图进行分水岭变换,寻找其中的汇水盆地,获取分水岭脊线(图 9d)。

(3) 测量单朵棉花距离。以汇水盆地为模板提取单朵棉花图像(图 9e),求取单朵棉花表面点云的最小距离,并与人工测量结果进行比较(图 10)。

实验结果表明,成功提取了 23 朵棉花中的 21 朵(正确识别率 91.3%),其中,有效分割了遮挡不过半的粘连重叠棉花,分别标记为(6,8)、(7,10)、(11,13);不能分割遮挡过半的粘连重叠棉花,被遮挡的 2 朵棉花分别在标记为 7 和 14 的汇水盆地中,距离地面 0.39 m 和 0.30 m,它们被纵向在同一方向上的相邻果枝上的棉花遮挡。红外传感器与人工测量结果之间的相关系数为 0.992 2,21 朵棉花的平

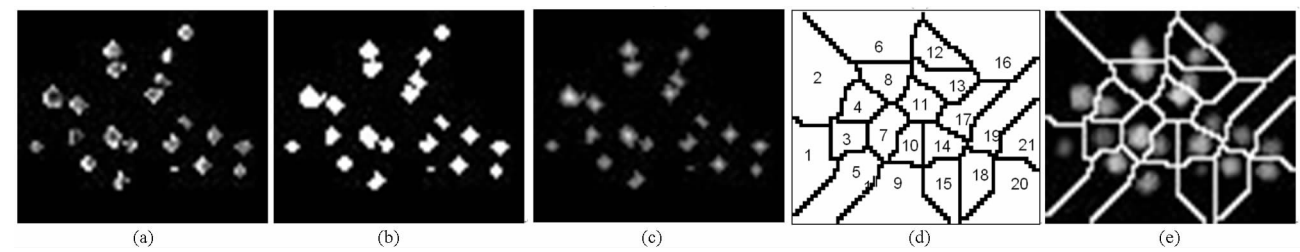


图 9 棉花图像分割过程

Fig. 9 Procedure of cotton image segmentation

(a) 峰点滤波 (b) 峰点二值图 (c) 峰点距离变换 (d) 汇水盆地 (e) 单朵棉花图像

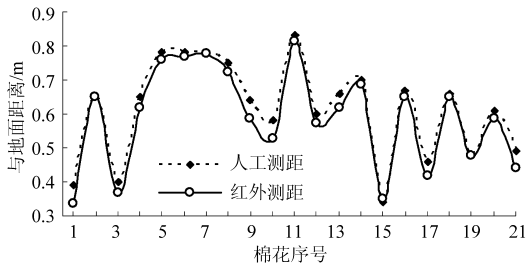


图 10 单朵棉花红外与人工测距的比较

Fig. 10 Comparison of infrared and manual measurement of single cotton

均测量误差为 0.024 5 m, 相对测量误差为 2.59%。

3 结论

(1) 利用红外测距实验装置和计算机图像处理技术, 研究了一种用于采棉机器人的红外测距方法,

实现了棉株上棉花的识别与定位。结果表明, 单朵棉花的图像识别率达 91.3%; 红外与人工测距结果的相关系数为 0.992 2, 单朵棉花的测距结果正确, 采样精度为 0.01 m, 测距精度为 0.008 5 m; 该方法有效地避免了户外光照条件多变的影响, 为采摘机器人运动轨迹的规划提供了参数。

(2) 以 0.65 的标准差设计了高斯滤波器的尺寸, 以 0.20 m 为强阈值, 利用 Canny 边缘检测算法有效提取了棉花的闭合边缘。

(3) 用峰点滤波器增强棉花图像, 利用分水岭算法结合棉花的农学生长特性有效地分割了遮挡不过半的粘连重叠棉花, 适应棉株上棉花分布的多样性。

(4) 人工测距时, 使用皮尺自由落下的测量方法, 皮尺的垂直度影响测量结果, 可考虑用重锤线或落地游标卡尺来保证垂直度。

参 考 文 献

- 1 韦皆顶, 费树岷, 汪木兰, 等. 采棉机器人的研究现状及关键技术[J]. 农机化研究, 2007, 29(7): 14-18.
Wei Jieding, Fei Shumin, Wang Mulan, et al. Key techniques and research statue for cotton picking robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(7): 14-18. (in Chinese)
- 2 魏泽鼎, 贾俊国, 王占永. 基于视觉传感器的棉花果实定位方法[J]. 农机化研究, 2012, 34(6): 66-68, 112.
Wei Zeding, Jia Junguo, Wang Zhanyong. A method based on visual sensor positioning method of cotton fruit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(6): 66-68, 112. (in Chinese)
- 3 Ji W, Zhao D A, Cheng F Y, et al. Automatic recognition vision system guided for apple harvesting robot[J]. Computers and Electrical Engineering, 2012, 38(5): 1186-1195.
- 4 王海青, 姬长英, 顾宝兴, 等. 基于机器视觉和支持向量机的温室黄瓜识别[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 163-167.
Wang Haiqing, Ji Changying, Gu Baoxing, et al. In-greenhouse cucumber recognition based on machine vision and least squares support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 163-167. (in Chinese)
- 5 王辉, 毛文华, 刘刚, 等. 基于视觉组合的苹果作业机器人识别与定位[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 165-170.
Wang Hui, Mao Wenhua, Liu Gang, et al. Identification and location system of multi-operation apple robot based on vision combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 165-170. (in Chinese)
- 6 李寒, 王库, 曹倩, 等. 基于机器视觉的番茄多目标提取与匹配[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 168-172.
Li Han, Wang Ku, Cao Qian, et al. Tomato targets extraction and matching based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 168-172. (in Chinese)
- 7 项荣, 应义斌, 蒋焕煜. 田间环境下果蔬采摘快速识别与定位方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 208-223.
Xiang Rong, Ying Yibin, Jiang Huanyu. Development of real-time recognition and localization methods for fruits and vegetables in field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 208-223. (in Chinese)
- 8 蔡健荣, 孙海波, 李永平, 等. 基于双目立体视觉的果树三维信息获取与重构[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 153-156.
Cai Jianrong, Sun Haibo, Li Yongping, et al. Fruit trees 3-D information perception and reconstruction based on binocular stereo vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 153-156. (in Chinese)

9 李立君,李昕,高自成,等. 基于偏好免疫网络的油茶果采摘机器人图像识别算法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 209 – 213.
Li Lijun, Li Xin, Gao Zicheng, et al. Camellia fruit image recognition based on preference artificial immune net[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 209 – 213. (in Chinese)

10 Xi Zhizhu. The application of wavelet transform in digital image processing[C] // Proceeding of the International Conference on MultiMedia and Information Technology, MMIT 2008, 2008: 326 – 329.

11 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.
Si Yongsheng, Qiao Jun, Liu Gang, et al. Recognition and location of fruits for apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 148 – 153. (in Chinese)

12 王文庆,张涛,龚娜. 基于多传感器融合的自主移动机器人测距系统[J]. 计算机测量与控制,2013,21(2):343 – 345.
Wang Wenqing, Zhang Tao, Gong Na. Range-measurement system of multi-sensor fusion based autonomous mobile robot [J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(2): 343 – 345. (in Chinese)

13 韦伟,周凌翔,刘青. 一种便携式的红外测距系统[J]. 电子设计工程,2011,19(21):40 – 42.
Wei Wei, Zhou Lingao, Liu Qing. A portable infrared distance measure system[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(21): 40 – 42. (in Chinese)

14 Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, Steven L Eddins. 数字图像处理(Matlab 版)[M]. 阮秋琦,等,译. 北京: 电子工业出版社,2005:255 – 278.

15 刘金帅,赖惠成,贾振红. 基于 YCbCr 颜色空间和 Fisher 判别分析的棉花图像分割研究[J]. 作物学报,2011,37(7):1274 – 1279.
Liu Jinshuai, Lai Huicheng, Jia Zhenhong. Image segmentation of cotton based on YCbCcr color space and fisher discrimination analysis[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1274 – 1279. (in Chinese)

16 韦皆顶,费树岷,汪木兰,等. 基于 HSV 彩色模型的自然场景下棉花图像分割策略研究[J]. 棉花学报,2008,20(1):34 – 38.
Wei Jieding, Fei Shumin, Wang Mulan, et al. Research on the segmentation strategy of the cotton images on the natural condition based upon the HSV color-space model [J]. Cotton Science, 2008, 20(1): 34 – 38. (in Chinese)

Infrared Distance Measurement Used for Cotton Picker Robot

Wang Ling¹ Zou Xiaoyu¹ Liu Siyao¹ Chen Binglin² Zhu Hongchao¹ Zhu Rongjie¹

(1. Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology & Equipment ,
Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Crop Regulation ,Ministry of Agriculture ,Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to detect cotton position on a plant, an infrared distance measurement device and the computer image processing technology, combined with the growth characteristics of cotton, were used to measure the distance of single cotton. The infrared measurement model was established in the distance of 0.7 m to 1.6 m. The distance image of plant surface point cloud was obtained with the measurement accuracy of 0.008 5 m. The Gaussian filter size was designed with the standard deviation of 0.65. 1D Gaussian filter was used to smooth the plant image and 2D Gaussian filter was used to obtain the gradient image. With the strong threshold of 0.2 m and the weak threshold of 0.08 m, the closed loop edge was constructed based on Canny edge detection operator. The image of cotton area was extracted by morphological operations, and the cotton sticks background was removed. Peak filter was used to weaken the adhesion and overlap of the cotton image. The cotton distance image was segmented based on watershed algorithm to extract the single cotton image and obtain the distance. The results show that the image recognition rate of single cotton on the plant is 91.3% and the correlation coefficient between the infrared and artificial measurement results is 0.992 2, which provides parameters for cotton picker robot to plan motor path.

Key words: Cotton Picker robot Infrared measurement Canny operator Peak filtering Watershed algorithm