

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.004

宽幅施药机械机器视觉辅助导航系统研究*

李林 魏新华 朱文静 李晋阳

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了实现宽幅施药机械喷幅的精确拼接, 提出一种机器视觉辅助 GPS 导航方法。该方法首先对施药机械幅边喷洒泡沫剂并进行泡沫剂识别, 识别过程中为了有效分割目标与背景, 选定蓝色泡沫剂作为试验对象, 提出使用超蓝色灰度化方案, 并经过形态学滤波、行定位点的选取、Otsu 分割提取泡沫剂信息, 使用迭代的最小二乘法检测泡沫剂中心线的信息; 然后给出了二维图形航向偏角和偏距的定义, 并根据识别的泡沫剂信息进行航向偏角和偏差信息的提取, 从而指导施药机械的行进方向。试验表明, 所提方法可以较为准确地进行泡沫剂识别, 根据泡沫剂信息识别得到的偏角计算值和实际测量值平均误差为 1.58° , 最大误差为 2.5° , 偏距计算值和实际测量值平均误差为 5.4 cm , 最大误差为 8.4 cm , 检测精度能够满足实际需求。

关键词: 宽幅施药机械 导航 机器视觉 全球定位系统 直线检测

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0028-06

Research on Auxiliary Navigation System for Wide Spraying Mechanism Based on Machine Vision

Li Lin Wei Xinhua Zhu Wenjing Li Jinyang

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: To achieve precision mosaic of sprinkling width in wide spraying mechanism, a novel auxiliary GPS navigation method based on machine vision was put forward. Firstly, the foams sprayed to the breadths of spraying mechanism were identified, during which blue foams were chosen in order to effectively segment the target and background, and then the center line of foams image was obtained by iterative least square method after extra-blue gray algorithm, morphological filter, anchor points selection and Otsu segmentation. Secondly, the definition of rotate angle and offset distance was given, and the information of course deviation was obtained by analyzing the parameter of foam's center line. Experiments showed that the proposed method could accurately obtain the information of foams. The mean error of rotate angle between the values obtained by the proposed method and the real values was 1.58° , and the maximum value was 2.5° . The mean error of offset distance between the values obtained by the proposed method and the real values was 5.4 cm , and the maximum value was 8.4 cm .

Key words: Wide spraying mechanism Navigation Machine vision Global position system Line detection

引言

随着农业生产经营规模的逐步扩大, 施药机械朝着大型化和智能化方向发展^[1], 国外发达国家施

药机械的喷幅已达到 $20 \sim 30\text{ m}$, 国内施药机械虽发展相对较慢, 喷幅也达到 $10 \sim 15\text{ m}$, 不少大型农机企业已开始生产喷幅达 $20 \sim 30\text{ m}$ 的施药机械。由于农药大多是无色的, 对于如此大的喷幅, 如果仅仅

收稿日期: 2015-02-05 修回日期: 2015-05-04

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA10230704)、江苏省农业科技支撑计划资助项目(BE2013401)、江苏大学高层次人才基金资助项目(14JDG149)和江苏省农业科技支撑计划资助项目(BE2014415)

作者简介: 李林, 助理研究员, 主要从事智能化农业装备和机器视觉技术研究, E-mail: lilin@ujs.edu.cn

依靠驾驶员的观察来实现喷幅的精确拼接非常困难,极易出现重喷和漏喷现象,需要自动驾驶技术进行辅助驾驶。

目前,使用最广泛的自动驾驶方式是全球定位系统(GPS)^[2],其中,RTK-GPS^[3-4]采用了载波相位动态实时差分的方法进行定位,精度达厘米级。RTK-GPS虽然可以满足沿作物行导航的要求,但是RTK-GPS价格昂贵,中小型农场和个体承包户无力承受,而且在幅宽拼接的关键位置,如地头转弯时,容易受到树木等遮挡物的影响,RTK-GPS会短期失效。

为了克服RTK-GPS在宽幅施药机械中的缺陷,国外施药机械通过对幅边喷洒泡沫剂标识的方法进行幅宽拼接。由于喷杆跨度较大,即使设置了泡沫剂喷洒装置,驾驶员也很难实现往复喷幅的精确拼接,而且喷幅越大,拼接难度就越大;对丘陵地带等的形状不规则田块,作业路径完全靠驾驶员凭感觉掌握,更易出现重喷、漏喷现象。这样不仅浪费农药,影响防治效果,造成环境污染,驾驶员的驾驶疲劳强度也非常大。

为了实现宽幅施药机械中喷幅的精确拼接,本文提出使用机器视觉辅助GPS的自动驾驶方法,针对泡沫剂的识别和航向偏差的提取进行研究。

1 泡沫剂的识别

为了指导施药机械的行进方向,需要实时检测施药机械的航向偏差,而航向偏差是通过识别泡沫剂得到的。

泡沫剂最主要的特征是其中心线,因此,本文对泡沫剂的识别主要进行了泡沫剂中心线的提取。根据田间施药机械导航作业环境和图像信息处理特点,泡沫剂中心线的检测过程如图1所示。

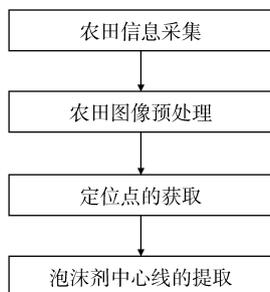


图1 泡沫剂中心线的检测过程

Fig. 1 Process of foams center line detection

1.1 农田信息采集

试验时间为2014年10月26日,试验对象是处于收获期的水稻,所使用的相机型号为AVT_Manta_G-031C,配备Computar_H0514-MP2镜头,图像分

辨率为656像素×492像素。处理与分析图像的计算机CPU为Intel Core i7 930 2.4 GHz,内存为8 GB,操作系统为Microsoft Windows 8.1,图像处理软件采用Matlab 2013b。

为了准确有效地进行泡沫剂中心线的提取,泡沫剂的颜色应尽量选择与农田环境差异较大的颜色,以便进行后期的图像分割。选取蓝色、红色和白色3种颜色的泡沫剂分别进行中心线的提取试验。

考虑到光照对图像处理的影响,为了验证算法的鲁棒性,选择顺光和逆光2种情况分别进行试验,试验采集时间为10:00。

1.2 农田图像预处理

图像预处理是泡沫剂中心线提取过程中非常重要的环节,关系到视觉辅助导航的准确性和实时性。

文中采集的图像均为彩色图像,为了降低运算复杂度,减少后期图像处理的工作量,需要对图像进行灰度化处理。试验中选取的水稻为收获期水稻,为了提高算法鲁棒性,需要根据水稻图像的特点选取泡沫剂的颜色。选取喷洒泡沫剂前拍摄的10幅水稻图像作为参考图像,提取其R、G、B3个通道的均值信息为

$$\begin{cases} R_{\text{mean}} = 131.59 \\ G_{\text{mean}} = 125.53 \\ B_{\text{mean}} = 52.66 \end{cases} \quad (1)$$

试验中发现水稻图像中R分量和G分量占据较大的比重,为了较好地完成目标与背景的分离,根据作物的颜色特征进行灰度化变换,分别对选取不同颜色的泡沫剂采用不同的灰度化方案。

对喷洒蓝色泡沫剂的图像,改进了超绿特征灰度化方法^[5-7],使用超蓝特征灰度化方法对水稻图像进行灰度化操作。通过加大B、减小R和G使目标与背景更好地分离,灰度化为

$$f(x,y) = \begin{cases} 0 & (B < R \text{ 或 } B < G) \\ 2B - R - G & (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

对喷洒红色泡沫剂的图像,由于目标与背景均含有较高的R分量,试验发现直接通过超红色特征灰度化不能取得较好的分离结果,为了有效分离背景图像,可以通过加大R、减小G和B进行灰度化的方法,多次试验表明,可有效分离出背景图像的灰度化公式为

$$f(x,y) = \begin{cases} 0 & (R < B \text{ 或 } R < G) \\ 1.2B - 0.2R - G & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

对喷洒白色泡沫剂的图像,发现目标图像中的R、G较高,B相对较低,试验表明,可有效分离出背景图像的灰度化公式为

$$f(x, y) = 0.8B + 0.1G + 0.1R \quad (4)$$

从式(4)可以看出,得到的灰度化图像实质上是赋予不同权重的 HSI 模型中的光照强度分量。

图像灰度化之后,泡沫剂位置和背景中存在着一些孔洞,为了更好地从图像中提取泡沫剂中心线,需要缩小或消除孔洞和缝隙。图像闭运算^[8]可以填充作物行或背景中的孔洞,平滑边界,同时保证不会产生全局的几何失真、且不改变总的位置和形状。

由于试验中泡沫剂中心线的方向大体为上下方向,闭运算选用 5×1 的结构元素。

对灰度化的图像需要进行阈值分割,得到目标图像。灰度化图像中目标与背景有较大的差别,选用最大类间方差法(Otsu)。Otsu 的基本思想是:以最佳门限将图像灰度直方图分割成两部分,使其类间方差取得最大值,即分离性最大^[9-10]。这样一方面满足了分割作物行和背景的最佳阈值的需要,另一方面满足了机器视觉连续提取图像时,在不同时间和地点选择不同阈值的需要。

图2给出了相同光照下3种颜色泡沫剂的分割结果。从图2中可以看出,喷洒蓝色和红色泡沫剂的图像分割效果较好,可以比较准确地分割出泡沫剂的位置信息。

采集不同光照环境下喷洒蓝色泡沫剂和红色泡沫剂的水稻图像做分割试验,图像采集时间分别为 8:00、10:00、12:00、14:00、17:00,每个时间点采集 10 幅图像。试验发现,在光照较弱(8:00 和 17:00)的情况下,蓝色泡沫剂图像具有更好的鲁棒性,稳定

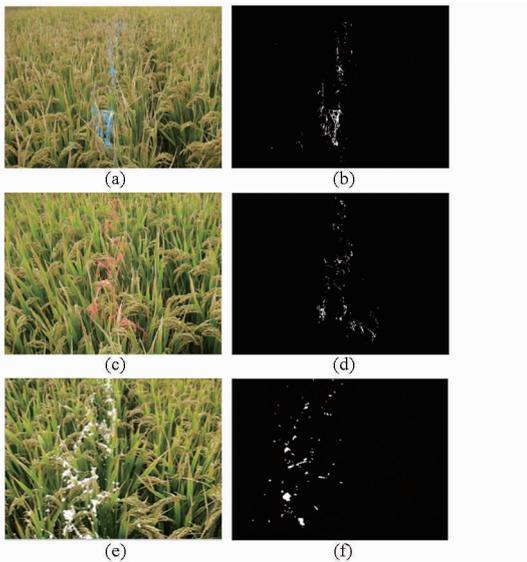


图2 3种颜色的泡沫剂图像分割结果
Fig.2 Segmentation results of foams images with three different colors

- (a) 喷洒蓝色泡沫剂的水稻图像 (b) 图2a的分割结果
(c) 喷洒红色泡沫剂的水稻图像 (d) 图2c的分割结果
(e) 喷洒白色泡沫剂的水稻图像 (f) 图2e的分割结果

性更强,因此,选用蓝色泡沫剂并将喷洒蓝色泡沫剂的图像作为试验对象进行下一步的研究。

1.3 定位点的获取

由于泡沫剂本身具有柔性的特点,而且喷洒过程不一定严格按照直线进行操作,图像获取过程中也会存在噪声等因素的影响,如果直接对分割后的图像进行直线拟合会导致拟合的结果具有较大的误差,并且图像处理复杂性高、鲁棒性差。为了解决以上问题,借用中值滤波^[11]的思想,对分割后的图像每一行进行统计,得到每一行不为零所有点的中间位置信息,将这个位置的点作为该行的定位点,保存其位置信息作为下一步泡沫剂中心线提取的候选点。

其中,对于存在奇数个不为零点的行,选取最中间位置的点作为定位点,对于存在偶数个不为零点的行,选取最中间2个点的平均值作为定位点,图3为定位点选取结果图。

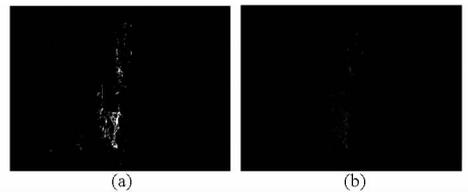


图3 定位点的选取

Fig.3 Selection of anchor points

(a) 图2a分割效果 (b) 图3a的定位点选取结果

进行定位点的选取可有效去除成像过程中以及喷洒不均匀带来的噪声,提高了算法的鲁棒性,并明显降低下一步泡沫中心线检测的复杂度。

1.4 泡沫剂中心线的提取

目前,常用的直线检测主要采用 Hough 变换和最小二乘法。其中 Hough 变换^[12]由于鲁棒性强而被广泛采用,但是 Hough 变换检测直线存在累加器的阈值难以设定、计算量大、参数空间所需的存储量大等缺陷^[13]。而基于最小二乘法^[14-15]的直线拟合算法具有计算公式简单明确、运算速度快且具有较高精度的优势。但在噪声较大的图像中,最小二乘法无法拟合出精确的直线,鲁棒性较差。为了消除干扰点的影响,提高最小二乘法的鲁棒性,提出了一种基于外点剔除的迭代最小二乘法进行直线拟合。

外点剔除的基本原理如图4所示,直线 $y = kx + b$ 为用最小二乘法拟合的直线,通过计算采样点与目标直线的欧氏距离剔除距离大于阈值 T 的点,然后对其余采样点继续使用最小二乘拟合。

图像中坐标系的建立准则如图5所示,以每帧图像的中心为坐标原点,每个像素代表一个单位。

提取泡沫剂中心线的程序流程图如图6所示。

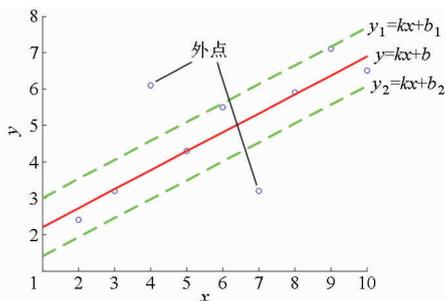


图4 外点剔除的原理图

Fig. 4 Schematic diagram of eliminating bad points

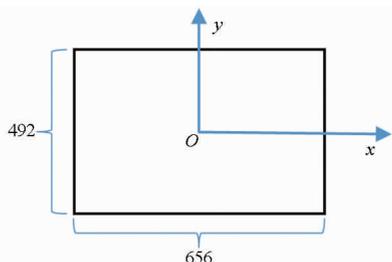


图5 图像坐标系

Fig. 5 Image coordinate

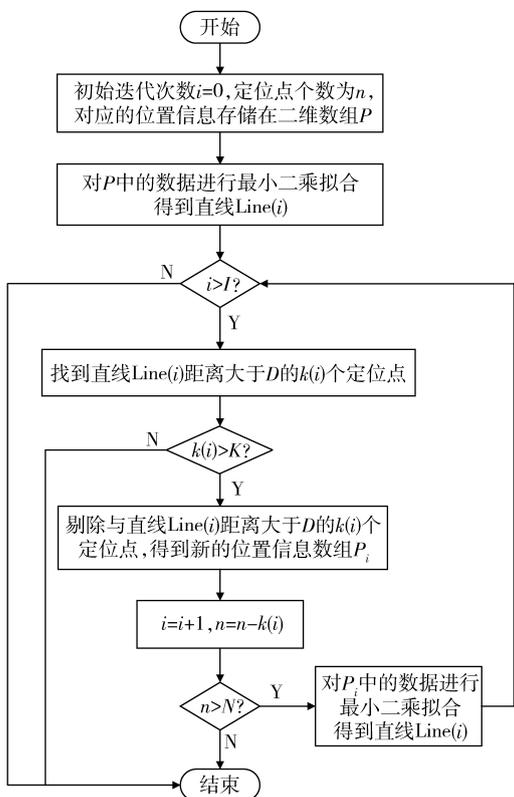


图6 泡沫剂中心线提取算法流程图

Fig. 6 Flowchart of foams' center line detection algorithm

具体步骤为:

(1) 将 1.3 节中获取的定位点的个数存储为 n , 对应的位置信息存储到二维数组 P , 设置初始迭代次数 i 。

(2) 对 P 中的位置信息使用最小二乘法进行直线拟合, 得到直线 $Line(i)$, 可表示图 4 所示 $y = kx + b$ 。

(3) 当 i 小于最大迭代次数 I 时, 搜索与拟合的直线 $Line(i)$ 距离大于阈值 T 的 $k(i)$ 个定位点并保存其位置信息。

(4) 当 $k(i)$ 大于阈值 K 时, 剔除数组 P 中与拟合的直线 $Line(i)$ 距离大于阈值 T 的定位点的位置信息, 得到新的数组 P_i 。

(5) 更新定位点的数量: $n = n - K(i)$, 并更新迭代次数 $i = i + 1$ 。

(6) 当定位点的数量大于需要的拟合数量 N 时, 对新的数组 P_i 进行最小二乘拟合, 得到新的直线 $Line(i)$ 。

(7) 重复步骤(3)~(6), 直到收敛, 得到最优直线方程。

为了验证迭代算法的有效性, 对图 7a、7c 中每次迭代的均方误差 (RMSE) 进行统计。

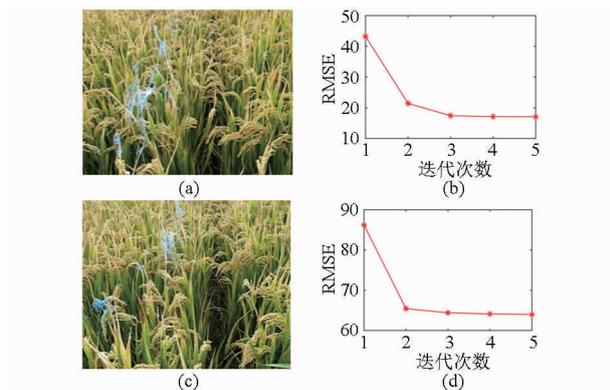


图7 每次迭代的均方根误差统计

Fig. 7 RMSE of each iteration

(a) 随机选取的图像 1 (b) 图 7a 每次迭代的 RMSE
(c) 随机选取的图像 2 (d) 图 7c 每次迭代的 RMSE

从图 7 可以看出, 使用迭代的最小二乘法可以有效降低 RMSE, 说明了迭代方法的有效性, 当迭代次数在 3~5 次时 RMSE 趋于稳定, 达到最优值, 后期试验迭代次数均设置为 3。

2 航向偏差的提取

为了实现机器视觉辅助 GPS 的自动导航, 需要根据识别的泡沫剂信息进行航线偏差的提取并根据航线偏差对施药机械的行驶方向予以纠正。其中, 航线偏差包括偏距和偏角。

偏距和偏角的定义如图 8 所示, 航向偏角为泡沫剂中心线 (图 8 中红色直线) 与竖直方向的夹角, 航向偏距为泡沫剂中心线的中点到整幅图像中点的距离。

通过第 2 节泡沫剂的识别可以提取泡沫剂中心线的直线方程 $y = kx + b$ 。根据该直线方程可以得到图像中偏角 θ 与偏距 λ 。

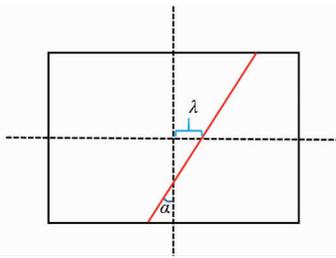


图8 偏角和偏距的定义

Fig. 8 Definition of rotate angle and offset distance

$$\theta = -\frac{b}{k} \quad (5)$$

$$\lambda = 1 - \arctan k \quad (6)$$

实际中的偏角与图像中求得的偏角相等,实际中的偏距 λ_{real} 与相机和农作物之间的距离 d 、相机 CCD 的像元尺寸 m 以及镜头的焦距 f 有关。

$$\lambda_{\text{real}} = \frac{d\lambda m}{f} \quad (7)$$

3 试验结果与分析

3.1 试验平台

施药机械为自主研发的宽幅智能化喷杆式精确变量高效静电施药机。该施药装置的喷幅为 12 m, 泡沫剂喷洒装置和图像采集装置安装在施药机械臂的两侧,如图 9 所示。泡沫剂喷洒装置的喷头方向为竖直向下,成像系统中心线垂直于泡沫剂喷洒装置的中心线。



图9 智能施药机械

Fig. 9 Intelligent spraying mechanism

3.2 泡沫剂识别试验

考虑到光照对检测效果的影响,选取逆光和顺光两种情况分别进行试验,图 10 为顺光和逆光情况下检测到图像中心线的信息,红色直线为拟合的直线。试验结果表明,在顺光和逆光的情况下均能较准确地检测出泡沫剂的中心线。试验中拍摄顺光和逆光视频各 2 个,平均每个视频 300 帧,其中 17 帧图像具有较明显的偏差,其余均能较准确地得到泡沫剂信息。



图10 泡沫剂中心线检测结果

Fig. 10 Identification of foams' center line

(a) 顺光 (b) 逆光

3.3 航向偏差试验

通过提取航向偏差信息得到施药机械的航向信息并对航向进行纠正。为了检测航向偏差提取的准确性,对提取的航向偏差信息与实际的航向偏差信息进行了比较。表 1 和表 2 给出了 6 幅图像计算得到的航向偏角和偏距的信息,并与实际的航向偏角和偏距的信息作对比。

表 1 航向偏角误差

Tab. 1 Deviation of rotation angle (°)

图像		计算值	实际值	误差
类型	帧数			
顺光	100	79.2	77.1	2.1
	200	83.6	82.9	0.7
	250	77.2	78.6	1.4
逆光	100	72.1	71.3	0.8
	200	84.7	82.2	2.5
	250	88.2	86.2	2.0

表 2 航向偏距误差

Tab. 2 Deviation of offset distance cm

图像		计算值	实际值	误差
类型	帧数			
顺光	100	18.3	14.2	4.1
	200	19.9	16.7	3.2
	250	19.4	25.8	6.4
逆光	100	15.8	19.4	3.6
	200	13.2	6.5	6.7
	250	26.8	35.2	8.4

通过分析表 1 和表 2 可以得到,偏角计算值和实际测量值平均误差为 1.58° ,最大误差为 2.5° ,偏距计算值和实际测量值平均误差为 5.4 cm,最大误差为 8.4 cm。试验结果表明:本文采用的图像处理算法检测出的泡沫剂中心线和提取的航向偏距和偏角满足需求。

4 结论

(1) 为了解决宽幅施药机械的精确拼接问题,提出使用机器视觉辅助 GPS 导航的方法,对农作物喷洒泡沫剂并使用图像处理算法识别泡沫剂得到航向偏差信息从而指导施药机械的行进方向。

(2) 使用超蓝色特征方法对泡沫剂图像进行灰度化,有效地将目标与背景分类,并提出迭代的最小二乘法进行泡沫剂中心线的直线拟合,较准确地实现了泡沫剂的识别。

(3) 给出了图像中航向偏角和偏距的定义,对

算法进行了验证,通过计算得到的航向偏差信息对施药机械的航向进行调整,偏角计算值与实际测量值平均误差为 1.58° ,最大误差为 2.5° ,偏距计算值和实际测量值平均误差为 5.4 cm ,最大误差为 8.4 cm 。结果能满足实际需求。

参 考 文 献

- 1 吴海华,方宪法,杨炳南. 国内外农业装备技术发展现状及进展[J]. 农业工程,2013,3(6):20-23.
Wu Haihua, Fang Xianfa, Yang Bingnan. Development trends and progress of agricultural machinery technology at home and abroad [J]. Agricultural Engineering, 2013, 3(6):20-23. (in Chinese)
- 2 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析[J]. 农业机械学报,2014,45(9):44-54.
Ji Changying, Zhou Jun. Technical analysis of the development of agricultural machinery navigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):44-54. (in Chinese)
- 3 Sun H, Slaughter D C, Ruiz M P, et al. RTK GPS mapping of transplanted row crops [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1):32-37.
- 4 Zhang Q, Qiu H C. A dynamic path search algorithm for tractor automatic navigation [J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(2):639-646.
- 5 Gee Ch, Bossu J, Jones G, et al. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1):49-59.
- 6 罗锡文,张志斌,李庆,等. 基于良序集和垄行结构的农机视觉导航参数提取算法[J]. 农业工程学报,2007,23(7):122-126.
Luo Xiwen, Zhang Zhibin, Li Qing, et al. New algorithm for machine vision navigation of farm machine based on well-ordered set and crop row structure [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7):122-126. (in Chinese)
- 7 Bunting P, Lucas R. The delineation of tree crowns in Australian mixed species forests using hyperspectral compact airborne spectrographic imager data [J]. Remote Sensing of Environment, 2006,101(2):230-248.
- 8 李丽,柴文婷,梅树立. 基于自适应全局阈值融合标记的遥感图像建筑群分割[J]. 农业机械学报,2013,44(7):222-228.
Li Li, Chai Wenting, Mei Shuli. Segmentation of remote sensing images based on adaptive global threshold and fused markers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7):222-228. (in Chinese)
- 9 Otsu N A. Threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.
- 10 吕强,蔡健荣,赵杰文,等. 自然场景下树上柑橘实时识别技术[J]. 农业机械学报,2010,41(2):185-188.
Lü Qiang, Cai Jianrong, Zhao Jiewen, et al. Real-time recognition of citrus on trees in natural scene [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2):185-188. (in Chinese)
- 11 Gallagher N C, Wise G L. A theoretical analysis of properties of the median filters [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech Signal Processing, 1981,29(1):1136-1141.
- 12 张志斌,罗锡文,周学成,等. 基于 Hough 变换和 Fisher 准则的垄线识别算法[J]. 中国图象图形学报,2007,12(12):2164-2168.
Zhang Zhibin, Luo Xiwen, Zhou Xuecheng, et al. Crop rows detection based on Hough transform and Fisher discriminant criterion function [J]. Journal of Image and Graphics, 2007,12(12):2164-2168. (in Chinese)
- 13 Leemans V, Destain M F. Line cluster detection using a variant of the Hough transform for culture row localization [J]. Image and Vision Computing, 2006,24(5):542-550.
- 14 吴佳艺,杨庆华,鲍官军,等. 基于机器视觉的林间导航路径生成算法[J]. 农业机械学报,2009,40(7):176-179.
Wu Jiayi, Yang Qinghua, Bao Guanjun, et al. Algorithm of path navigation line for robot in forestry environment based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7):176-179. (in Chinese)
- 15 王新忠,韩旭,毛罕平,等. 基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J]. 农业机械学报,2012,43(6):161-166.
Wang Xinzhong, Han Xu, Mao Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):161-166. (in Chinese)