

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.029

基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测*

王新忠 韩旭 毛罕平 刘飞

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

【摘要】 针对温室非结构作业环境和复杂背景下作业机器人路径识别检测问题开展研究。在 HSI 颜色空间分析番茄垄间道路图像在各分量的分布特性,提出了基于机器视觉的垄间加热管敏感区域提取方法,依据 *I* 分量直方图采用最大类间方差法进行图像自适应阈值分割,对分割后二值图像利用目标区域的边缘提取算法获得导航离散点簇。根据最小二乘法原理对导航离散点簇拟合得到 2 条加热管边缘线,在此基础上给出中心导航基准线检测算法,并针对光照不均和作物遮挡对导航路径检测进行了实验。实验表明,与 Hough 变换算法相比,该算法简单快速,对光照不均具有良好的鲁棒性,能够准确提取目标敏感区域的边缘信息,对不同遮盖率番茄垄间导航路径提取正确率达 91.67%。

关键词: 视觉导航 温室 番茄 路径检测 HSI 颜色空间

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0161-06

Navigation Line Detection of Tomato Ridges in Greenhouse
Based on Least Square Method

Wang Xinzong Han Xu Mao Hanping Liu Fei

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

Abstract

The problem of detect navigation line by machine vision under non-structural environment and complex background in greenhouse was addressed. After analyzing the distribution characteristics of the road images in tomato ridges based on HSI color space, a method was proposed for extracting the sensitive region of the heat pipe. Firstly, the binary images were generated from the road images by using Otsu segmentation method based on *I*-histogram. The discrete set of navigation points was obtained by using edge extraction algorithm in accordance with the binary images. And then, the two sidelines of the heat pipe were obtained by using the least square method to fit the discrete points, on the basis of this, the navigation line detection algorithm was proposed. Finally, the influences of the illumination in homogeneity and the different covering on navigation line detection were investigated. The experimental results indicated that in comparison with Hough transform, the algorithm was simple and fast, as well as robust with illumination in homogeneity, the edge information of target region could be extracted accurately and the recognition correct rate under different covering was 91.67%.

Key words Vision navigation, Greenhouse, Tomato, Path detection, HSI color space

引言

导航信息获取技术是农业机器人智能化的关键

技术,以机器视觉为主的机器人导航路径检测已成为该领域的研究热点,但目前多集中在田间作业机器人导航路径检测方面^[1~7]。与田间作业环境相

收稿日期: 2011-09-19 修回日期: 2011-10-21

* 国家自然科学基金资助项目(60575020)、江苏省农机三项工程资助项目(NJ2011-46)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011346)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏财教[2011]8号)、苏州市科技支撑计划资助项目(SN201137)和昆山市农业科技计划资助项目(KN1110)

作者简介: 王新忠,副教授,主要从事农业装备系统监测与控制研究,E-mail: wangxinzong@gmail.com

比,温室由于其设施和作物密集度大、目标背景信息叠加多义、空间占用率高,从而增加了温室作业机器人路径检测的难度,使得温室环境视觉导航研究更具挑战性。

国内外对于温室环境下基于机器视觉的机器人导航路径检测研究尚处于探索实验阶段^[8~11],文献[8]针对无土栽培温室类结构化环境下机器人定位问题,提出一种基于激光测距的全局定位方法。但该导航方法成本较高,灵活性与准确性不如机器视觉导航。文献[9]通过在温室垄间路面铺设红色导航线驱动机器人寻线行走,避免了目标信息多义的问题,并利用矩不变自动阈值法提取导航路径,该算法可在一定程度抑制光照对颜色信息的影响。文献[10]在 RGB 空间下对光照均匀的温室垄间图像进行灰度化处理,并利用基于一点的改进型 Hough 变换拟合导航参考直线。文献[11]针对温室环境下机器人自主导航,通过训练神经网络对图像进行分割,获取导航预瞄点,并用拟合圆弧曲线作为机器人跟踪路径。但上述研究所面临的主要问题是温室非结构作业环境,此环境必然伴随着光照不均、目标背景信息多义等因素,影响了机器人路径识别方法的鲁棒性与实时性。

本文针对温室番茄作物垄间的环境特点,从 HSI 颜色空间的亮度分量入手,对垄间加热管进行分割识别,在分析光照不均对导航路径检测影响的基础上,提出一种基于边缘信息的导航离散点提取算法,通过最小二乘法拟合导航离散点簇,从而得到中心导航基准线,获取导航路径信息。

1 图像采集

1.1 实验场地及仪器

在江苏大学 Venlo 型连栋实验玻璃温室内采集番茄垄间通道图像,图像分辨率 640 × 480 像素,实验设备包括台式计算机(主频 2.80 GHz,内存 4 GB, WinXP 操作系统),MV-3103UC 型 USB2.0 高分辨率数字工业摄像机,其成像尺寸 17 mm (2/3"),视角

40.1° × 32.6° × 24.7° (D × H × V),输出图像为 RGB 格式,导航摄像头安装俯视角为 60°。导航信息提取算法利用 Matlab 7.3 独立开发。实验以温室番茄垄间加热管为识别对象,在自然光条件下根据天气、光照以及两侧加热管被番茄枝叶及其他杂物遮盖不同情况分别进行导航图像的采集。

1.2 颜色空间选取

RGB 和 HSI 是农业工程图像处理领域常用的颜色模型,由于 R、G、B 3 个颜色分量耦合相关且与光照强度呈递增关系,若光照不稳定,便会使目标信息不稳定,对于智能导航来说,光照影响是不能忽略的。HSI 颜色空间把亮度与色彩完全分离,减小了光照变化给颜色判别带来的影响,可避免颜色分量之间相关性问题,并具有较好算法适应性,因此实验中在 HSI 颜色空间进行图像处理,采用经典方法进行 HSI 颜色空间与 RGB 颜色空间的转换^[12]。

2 基于 I 分量的目标识别

2.1 图像空间分布特性分析

在采集的图像中存在土壤背景、番茄作物、通道和加热管 4 类不同对象(图 1a),对 4 类对象的区分将增加算法的复杂度,降低系统的实时性,因此选择一种合适的分量空间使得土壤背景和番茄作物保持一定相似性并突出道路或加热管其中一个特征成为导航路径检测的基础和前提。以阴天天气、加热管遮盖率 30% 的番茄垄间图像(图 1a)为例,对该图像在 HSI 空间的分布特性进行定量分析,图 1b~1d 分别显示了该图像在 H、S、I 分量上的分布(X 代表图像列像素,Y 代表图像行像素),从图中可以直观的看到图像在 S 分量和 I 分量均存在 2 个尖峰区域,该尖峰区域的位置对应的是道路两侧的白色加热管,因此实验选取白色加热管作为导航路径检测的识别对象,即目标区域。

从图 1b~1d 中凸起的尖锐程度、显著性和边缘信息完整性考虑,图像的目标区域在 I 分量较 S 分量更利于识别与提取。为进一步验证此观点,随机

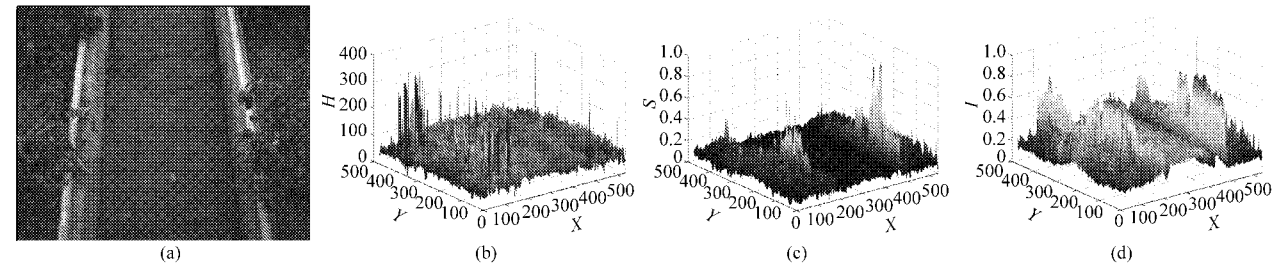


图 1 图像在 HSI 空间上的分布

Fig.1 HSI distribution of image

(a) 原始图像 (b) H 分量 (c) S 分量 (d) I 分量

选取 20 幅不同遮盖率的番茄垄间导航图像,分别在 S 、 I 分量采用固定阈值分割算法进行目标识别,实验结果如表 1 所示。

表 1 基于不同颜色分量的目标识别正确率
Tab.1 Contamination recognition rates under different color components

颜色分量	误识别数	正确识别数	识别正确率/%
S	14	6	30
I	1	19	95

实验结果表明,基于 I 分量的目标识别具备更强的代表性和可分辨性,识别正确率达 95%。

2.2 垄间加热管敏感区域识别

番茄垄间导航图像识别处理在 HSI 颜色空间进行,以图 2a 为逆光、晴天条件下拍摄的番茄垄间图像,番茄在加热管上遮盖率 30%。首先将图像由 RGB 空间转换至 HSI 空间并提取其亮度 I 分量信息;然后基于亮度分量直方图采用最大类间方差法 (Otsu) 进行自适应阈值分割,可提取出白色加热管区域图像,如图 2b、2c 所示。

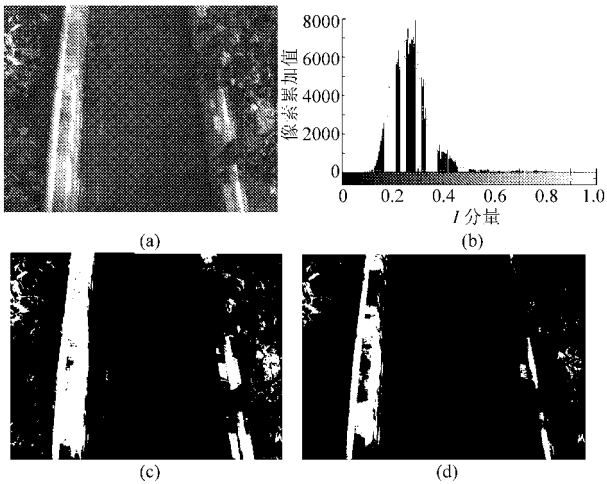


图 2 温室番茄垄间图像
Fig.2 Images of tomato ridges

(a) 原始图像 (b) I 分量直方图

(c) Otsu 图像分割结果 (d) 修正后分割结果

Otsu 法是基于全局的阈值选取,在对实际温室道路图像处理中因拍摄过程中存在不同天气情况及光线等干扰,简单采用由 Otsu 法所得到的阈值进行处理,难以获得稳定、满意的分割效果,因此对 Otsu 法所求得的阈值进行修正以突出特征目标区域图像。为合理确定阈值修正量 δ ,本文在 3 种典型天气情况下分别采集图像并从中各随机选取了 5 幅进行阈值修正量的确定实验,实验结果如表 2 所示。

表 2 中人工值由人工依据处理效果选定,Otsu

表 2 不同天气下分割阈值比较
Tab.2 Comparison threshold under different weather

天气	项目	图像号					δ
		1	2	3	4	5	
晴天	人工值	0.780 0	0.850 0	0.800 0	0.800 0	0.800 0	0.25
	Otsu 值	0.555 9	0.580 4	0.561 8	0.563 7	0.561 8	
	差值	0.224 1	0.269 6	0.238 2	0.236 3	0.238 2	
多云	人工值	0.700 0	0.700 0	0.750 0	0.800 0	0.750 0	0.18
	Otsu 值	0.558 8	0.556 9	0.557 8	0.555 2	0.557 8	
	差值	0.141 2	0.143 1	0.192 2	0.244 8	0.192 2	
阴天	人工值	0.500 0	0.500 0	0.500 0	0.500 0	0.500 0	0.03
	Otsu 值	0.519 6	0.468 6	0.487 3	0.445 1	0.472 3	
	差值	0.019 6	0.031 4	0.012 7	0.054 9	0.027 7	

值为原始 Otsu 法计算值,实验表明,在晴天(光照不均)和多云天气情况下,人工值与 Otsu 值差值较大,处理这 2 种天气情况下的导航图像时均需在 Otsu 值的基础上加修正量,而阴天天气时的人工值与 Otsu 值较为接近,无需进行修正。处理结果如图 2 所示,可以看到,相比图 2c,使用修正后的阈值分割,图 2d 中加热管目标区域则更为突出。

修正后的阈值分割图像对土壤和作物不敏感,无法剔除背景强度 I 与白色加热管强度相近的区域,这些区域在分割后的图像中呈 2 种形态:一种是与目标区域相互独立的白色斑点;另一种则是与目标区域相连通的白色片状区域(图 2d)。这 2 类情况较易出现在晴天天气,特别是导航图像存在光照不均情况时。因此,需要采用相关数学形态学对图像作进一步处理。

3 番茄垄间导航线提取

对于图 2d 中的第 1 类干扰区域,可以采用数学形态学进行处理,但对于与目标区域相连通的白色片状区域干扰,一般形态学去噪则难以奏效。因此,传统的直线检测算法无法应用于此类图像的导航基准线提取。为解决这一问题,本文提出一种基于区域边缘导航离散点的直线提取算法。

3.1 区域边缘导航离散点提取算法

温室作业机器人的行驶速度相对缓慢,因此可将近视视野范围的加热管作重点处理,这样既避免了目标信息多义给信息获取带来的困难,同时也减少了图像处理计算量。算法步骤如下:

(1)对二值图像从第 1 行开始向下逐行扫描,按列顺序进行检测,当检测到像素值为 1 的区域时,标记该区域,并将该区域各像素下标存入矩阵 G (矩阵 G 大小规格与待测图像一致,记为

$[m, n]$),继续扫描直至该行扫描结束,进入下一行扫描。

(2)为避免光照不均的影响,定义目标区域外边缘突变点为导航离散点。当扫描全部结束后读取矩阵 G 各行第一个和最后一个不为零的元素并分别写入矩阵 G_1 和 G_2 。

(3)由于番茄枝叶遮盖等因素的影响使得所提取目标不可避免的存在间断情况,因此还需剔除矩阵 G_1 、 G_2 中的无效特征元素,即矩阵 G_1 中大于 $n/2$ 及矩阵 G_2 中小于 $n/2$ 的元素,最后得到 G_1 、 G_2 两列点簇,即为导航离散点簇。

对阈值分割后的二值图像(图 2d)进行相关数学形态学处理,依据上述特征点提取算法获得导航离散点簇如图 3 所示,实验结果表明该算法对光照不均具有很好的鲁棒性,提取的导航离散点簇能够很好地反映特征目标的边缘信息。

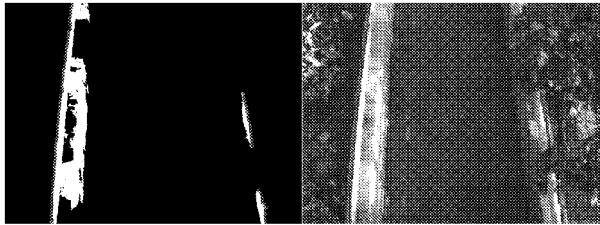


图 3 扫描产生的导航离散点簇

Fig. 3 Navigation points by image scanning

3.2 基于最小二乘法的导航基准线生成算法

传统导航基准线检测主要采用 Hough 变换、模型匹配、统计特性分析等算法。其中,Hough 变换由于鲁棒性强而被广泛采用^[13],但是 Hough 变换存在累加器的阈值难以设定、存储空间需求量大、计算量大等缺点。而基于最小二乘法的直线拟合法由于从误差最小的角度出发,计算公式简单明确、运算速度快、具有较高精度,是一种更适合本实验的直线拟合方法。

图 3 为提取后的加热管导航离散点集合。首先对 G_1 、 G_2 导航离散点簇进行直线拟合,得到拟合函数(目标边缘线方程)分别为

$$y = -9.7867x + 1434.4 \quad (1)$$
$$(R^2 = 0.96, \text{RMSE 为 } 2.614)$$
$$y = 5.8687x - 2816.9 \quad (2)$$
$$(R^2 = 0.91, \text{RMSE 为 } 5.138)$$

由复相关系数 R^2 及均方根误差 RMSE 计算值可知,该算法能准确拟合导航离散点簇, G_1 点簇拟合结果如图 4a 所示。

$$\frac{k - k_1}{1 + k_1 k} = \frac{k_2 - k}{1 + k_2 k} \quad (3)$$

联立上述直线方程求得两目标边缘线交点,并

根据式(3)求得边缘线所成夹角的角平分线斜率 k (其中 $k_1 = -9.7867, k_2 = 5.8687$,由式(1)、(2)求得), k 为中心导航基准线的斜率。由式(1)~(3)可求得中心导航基准线为

$$y = 29.8623x - 9332.6 \quad (4)$$

式(4)也是式(1)、(2)的角平分线方程,中心导航基准线如图 4b 所示。

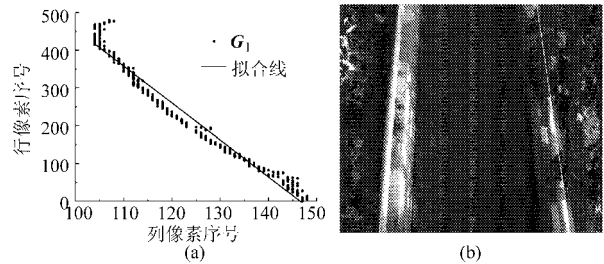


图 4 最小二乘法拟合导航基准线

Fig. 4 Fit guidance lines by least square method

(a) G_1 离散点簇拟合 (b) 导航基准线提取

为进一步衡量该算法的可靠性,随机选取 10 幅图片,利用 Matlab 运算求解,对人工求得导航基准线与拟合生成导航基准线的水平倾角作对比,结果如图 5 所示。

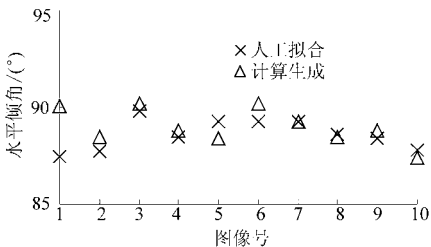


图 5 导航基准线水平倾角对比

Fig. 5 Comparison of dip angle of guidance lines

实验结果表明,该算法计算生成的导航基准线与人工拟合导航基准线的平均相对偏差率为 0.92%,能够准确检测定位导航基准线,可靠性较高。

4 实验与分析

4.1 光照

由于温室顶部结构特点使得温室内部必然存在光照不均的情况,光照不均是影响温室环境下导航路径检测的重要因素^[14],目前有关视觉导航的研究大多只在光照均匀的前提下讨论变光照对导航路径检测的影响^[15~16]。在江苏大学 Venlo 型连栋实验温室内,分别在晴天对顺光(图 6a)和逆光(图 6b)情况下采集的光照不均导航图像进行导航基准线提取实验,部分提取结果如图 6 所示。

实验结果表明,该算法对光照不均具有很好的鲁棒性,在光照剧烈变化的情况下,能够准确地提取出导航基准线。

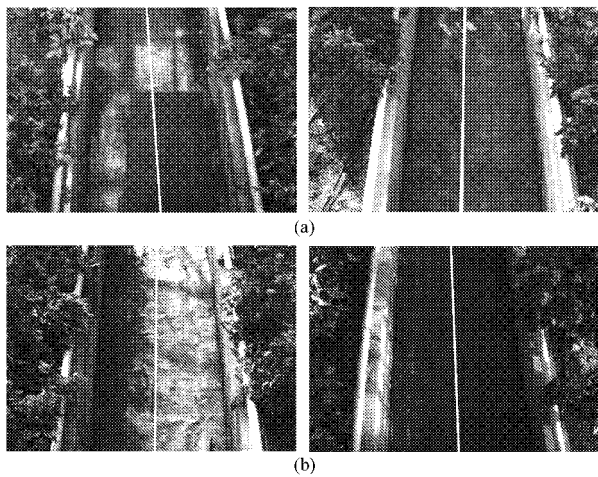


图 6 光照不均时导航线提取结果

Fig.6 Lines extraction under different illuminations
(a) 晴天顺光 (b) 晴天逆光

4.2 遮盖率

为验证该算法在普通环境中,加热管在不同作物遮盖率条件下导航基准线的提取准确性与实时性,采集不同位置、不同时段、不同遮盖率(10%~90%)的60幅导航图像,对该算法进行检测实验,实验结果如图7、表3所示。

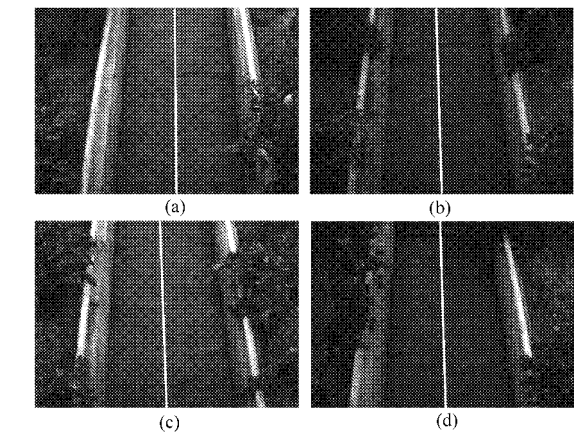


图 7 不同遮盖率时导航线提取结果

Fig.7 Guidance lines extraction under different covering rates
(a) 遮盖率 20% (b) 遮盖率 40%
(c) 遮盖率 50% (d) 遮盖率 60%

表 3 不同遮盖率提取结果

Tab.3 Contamination detection results under different covering rates

遮盖率/%	提取正确率/%	平均相对偏差率/%	最小二乘拟合平均耗时/s	Hough 变换平均耗时/s
10 ~ 30	100	0.37	0.61	1.25
30 ~ 50	100	0.51	0.57	1.29
50 ~ 70	93.33	0.83	0.59	1.19
70 ~ 90	73.33	1.13	0.56	1.22

通过对加热管不同遮盖率条件下番茄垄间图像测试表明,该算法提取导航线平均正确率达 91.67%,平均相对偏差率 0.71%,实验过程中无法提取导航线的情况多发生在遮盖率 80%~90% 区间,其主要原因是一侧目标边缘完全被枝叶遮盖,目标边缘信息严重缺失,从而导致提取失败。同时,由实验结果可知,同等条件下,同样采用 Matlab 求解,基于最小二乘拟合算法较 Hough 变换直线检测算法平均耗时降低了 52.93%,具备更好的实时性。

5 结论

- (1)利用基于 I 分量的边缘敏感区域导航离散点提取算法获取垄间加热管边缘信息,通过最小二乘法拟合导航基准线,可以有效解决识别目标的光照不均及不同遮盖率问题,具备较好鲁棒性。
- (2)对随机选取 10 幅导航图像算法生成导航基准线以及与人工拟合导航线对比分析结果显示,两者平均相对偏差率为 0.92%,能够准确检测定位导航基准线,可靠性较高。
- (3)通过对不同遮盖率(10%~90%)区间的 60 幅导航图像测试,基于最小二乘拟合的基准线提取算法提取导航线正确率达 91.67%,平均相对偏差率 0.71%,同时,实验表明本文采用的算法较 Hough 变换直线检测算法平均耗时降低了 52.93%,具备更好的实时性。

参 考 文 献

1 Åstrand B, Baerveldt A J. A vision based row-following system for agricultural field machinery[J]. Mechatronics, 2005, 15(2):251~269.

2 Gottschalk R, Burgos-Artizzu X P,Ribeiro A, et al. Real-time image processing for the guidance of a small agricultural field inspection vehicle[J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2010,8(1):434~443.

3 Subramanian V, Burks T F, Arroyo A A. Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006,53(2):130~143.

4 Finlayson G D, Hordley S D, Lu C, et al. On the removal of shadows from images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006,28(1):59~68.

5 Leemans V, Destain M F. Application of the Hough transform for seed row localisation using machine vision[J]. Biosystems Engineering, 2006,94(3):325~336.

- 6 丁幼春,王书茂,陈度. 基于图像旋转投影的导航路径检测算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 155 ~ 160.
Ding Youchun, Wang Shumao, Chen Du. Navigation line detection arithmetic based on image rotation and projection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 155 ~ 160. (in Chinese)
- 7 张志斌,罗锡文,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.
Zhang Zhibin, Luo Xiwen, 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)
- 8 刘洞波,刘国荣,胡慧,等. 基于激光测距的温室移动机器人全局定位方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5): 158 ~ 163.
Liu Dongbo, Liu Guorong, Hu Hui, et al. Method of mobile robot global localization based on laser range finder in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 158 ~ 163. (in Chinese)
- 9 袁挺,李伟,谭豫之,等. 温室环境下黄瓜采摘机器人信息获取[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 151 ~ 155.
Yuan Ting, Li Wei, Tan Yuzhi, et al. Information acquisition for cucumber harvesting robot in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(10): 151 ~ 155. (in Chinese)
- 10 任永新,谭豫之,杨会华,等. 基于模糊控制的黄瓜采摘机器人视觉导航[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(4): 343 ~ 346.
Ren Yongxin, Tan Yuzhi, Yang Huihua, et al. Visual navigation of cucumber picking robot based on fuzzy control[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(4): 343 ~ 346. (in Chinese)
- 11 任永新,李伟,陈晓,等. 非结构环境下基于机器视觉的机器人路径跟踪方法[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(10): 21 ~ 25.
Ren Yongxin, Li Wei, Chen Xiao, et al. Path following control for mobile robot based on machine vision in unstructured environment [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(10): 21 ~ 25. (in Chinese)
- 12 Smith A R. Color gamut transform pairs [C] // Proceedings of the 5th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1978: 12 ~ 19.
- 13 赵颖,陈兵旗,王书茂,等. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 83 ~ 86.
Zhao Ying, Chen Bingqi, Wang Shumao, et al. Fast detection of furrows based on machine vision on autonomous mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 83 ~ 86. (in Chinese)
- 14 安秋,李志臣,姬长英,等. 基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 208 ~ 212.
An Qiu, Li Zhichen, Ji Changying, et al. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 208 ~ 212. (in Chinese)
- 15 赵博,王猛,毛恩荣,等. 农业车辆视觉实际导航环境识别与分类[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 166 ~ 170.
Zhao Bo, Wang Meng, Mao Enrong, et al. Recognition and classification for vision navigation application environment of agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 166 ~ 170. (in Chinese)
- 16 王新忠,顾开新,刘飞. 基于无线传感器网络的丘陵果园灌溉控制系统[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(4): 364 ~ 368.
Wang Xinzhong, Gu Kaixin, Liu Fei. Hill orchard irrigation control system based on wireless sensor networks[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(4): 364 ~ 368. (in Chinese)