

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.034

果园视觉导航基准线生成算法*

冯娟^{1,2} 刘刚¹ 司永胜² 王圣伟¹ 何蓓¹ 任雯¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001)

【摘要】 针对果园导航环境的复杂性,提出了一种基于图像处理的果园导航基准线生成算法。采用二维Otsu算法获取最优分割阈值,对色差 $R-B$ 分量图进行二值化处理;根据水平投影曲线的一阶导数变化规律,提取树的主干区域(ROI);根据区域中邻近像素灰度值的变化规律,提取主干与地面的交点作为特征点;根据点的分布特性对其进行归类,并利用最小二乘法拟合左右边界线,提取边界线上各行中心点生成果园导航基准线。在不同场景中的实验结果表明,该算法对噪声的干扰有较强的鲁棒性,使导航基准线的生成准确率高于90.7%;处理一幅 640×480 像素的图像平均耗时小于119 ms,具有较好的实时性。

关键词: 果园 导航 基准线 图像处理 水平投影法
中图分类号: TP242.6⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0185-05

Algorithm Based on Image Processing Technology to
Generate Navigation Directrix in Orchard

Feng Juan^{1,2} Liu Gang¹ Si Yongsheng² Wang Shengwei¹ He Bei¹ Ren Wen¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract

An algorithm based on image processing technology was proposed for generating navigation directrix in orchard of complex circumstance. Image of $R-B$ component was binarized by 2-D maximum between-cluster variance. A region of interest was detected by horizontal projection method to extract tree trunks. Crossing points between tree and ground were obtained by scanning the trunks and classified into different clusters in terms of their neighboring relation. Least square method was used for detecting two border lines, center points of crossing points between two border lines were extracted to generate navigation directrix for agricultural robot. The experimental results under various scene conditions showed that the algorithm could generate navigation directrix accurately, the accuracy was more than 90.7% which showed a good noise robust;the average processing time of a 640×480 pixels image was less than 119 ms and met the need of real-time.

Key words Orchard, Navigation, Directrix, Image processing, Horizontal projection method

引言

如何实现自主导航是农业机器人领域的研究热点之一,视觉导航技术凭借其探测信息范围广、获取

信息完整等优势,成为目前国内应用较多的机器人导航方式^[1]。其关键环节在于通过图像处理技术准确可靠地提取导航基准线^[2]。

目前该方面的研究大多是针对农田中的行播作

收稿日期: 2011-10-25 修回日期: 2011-11-30
* 国家自然科学基金资助项目(31071333)和保定市科学技术研究与发展计划资助项目
作者简介: 冯娟,博士生,河北农业大学讲师,主要从事机器视觉、农业机器人研究,E-mail: yurenmatou1011@163.com
通讯作者: 刘刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

物,因其具有明显的垄沟特点,为视觉系统提供了较好的识别依据,文献[3~5]提出了不同的作物行导航路径生成算法。

在果园环境中,受树木空间排列随机,大小、生长形态各异,光线强弱变化大,背景多元叠加等因素的影响,增加了快速准确地生成果园导航基准线的难度。文献[6]尝试生成林间导航路径,但其研究对象高大挺拔、生长规范,视野范围内采集的图像易于处理。文献[7]通过果树近红外图像,以细化主干的方法提取与地面的交点,但其受土壤颜色与地面阴影影响较大。本文针对果园导航环境的复杂性,对果园导航基准线的生成算法进行深入研究。

1 导航基准线生成算法

1.1 图像分析与预处理

以乔化密植栽培的果树为主要研究对象,果树树干高度在 60~85 cm 之间。图 1a 是自然场景下拍摄的李子树图像,其果树分布具有明显的线性特

征,树叶茂密,枝干呈紫灰色,较土壤颜色偏深;地表覆盖少量杂草,存在一定阴影,视野范围内树干与其他区域具有较强的对比度。每棵树与地面的交界点是反映导航位置和方向的重要标志,提取这些点将有助于导航基准线的生成。

图 1b 是图 1a 中直线的线剖图。分析图中各分量的分布特性:树干区域的 R 值与 B 值较接近,而土壤和杂草区域的 R 值明显大于 B 值。为了突出其效果,若 $R - B < 18$,则 $R - B = 255$,否则 $R - B = 0$,得到图 1b 中的 Y 曲线。如图 1b 所示,T1~T13 对应树干区域均位于波峰(其中 T11~T13 属于一棵树,由于剖面线贯穿处存在较粗的枝干分支,产生 3 段的效果);而土壤等背景区域大多位于波谷。因此,色差分量 $R - B$ 可以较好地地区分树干区域和果园背景。虽然该分量对树叶的检测不敏感,但树叶大部分位于主干之上,通过后续算法不会影响识别精度。同时,果园剪枝修整时掉落在土壤中的枝条会在分割过程中产生少量噪声,可以通过后期算法进行消除。

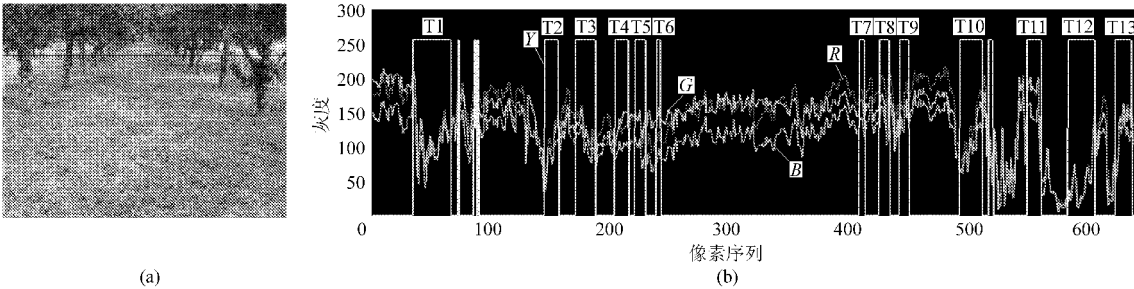


图 1 线剖面分析示意图
Fig.1 Schematic representation of line profile map
(a) 原始图 (b) 线剖面图

采用 $R - B$ 对原始图像灰度化后,利用二维 Otsu 算法获取最优分割阈值($s = 79, t = 104$),即文献[8]中二维直方图的门限向量,对图像进行二值化,实现树干区域的提取。该算法既利用图像像元点间的灰度分布信息,又考虑了像元点之间的空间相关信息,分割效果优于一维 Otsu 算法[8]。由于背景中存在大量由枯枝、落叶、杂草等形成的噪声,容易造成后续特征点提取的误判。本文采用开运算和

闭运算交替滤波的方法,对二值图像执行去噪;经数学形态学处理后的二值图像中,仍有部分噪声存在,和树干区域相比,这些噪声的面积较小,可根据面积特性进一步去除,即去除图像中小于最大面积 1/10 的区域。对图 1a 预处理的过程如图 2 所示。

1.2 主干区域提取

为了提高图像处理速度,满足实时性的要求,文献[9]提取图中最能表现导航特征的关键区域作为

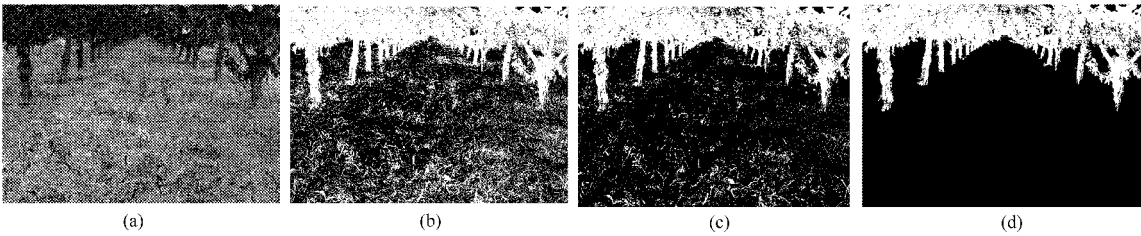


图 2 果园图像预处理
Fig.2 Preprocessing of orchard image
(a) $R - B$ 色差图 (b) 二值化图 (c) 交替滤波效果图 (d) 小面积去噪效果图

感兴趣区域(ROI),用一定尺寸的窗口限定其范围,大小由拍摄角度、场景中主干高度及背景情况确定。

由图2d可知,图像上部为枝叶,中部的树干区域不仅反映果树排列的变化趋势,与地面的交点还包含着丰富的导航信息,为了凸显这一重要区域,采用水平投影法实现主干区域提取。具体步骤如下:

设图像大小为 $M \times N$, $I(i, j)$ 为图像上点 (i, j) 处的灰度。

(1)将图2d进行孔洞填充后进行逐行扫描,计算每一行的水平投影值 $S(i)$

$$S(i) = \sum_{j=1}^M I(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

求得投影曲线如图3a所示。

(2)求出 $S(i)$ 曲线的一阶导数最小值

$$T = \min(s(k) - s(k-1)) \quad (k=2, \dots, N) \quad (2)$$

对应的行 i_T 为窗口的上界线。

(3)找出 $S(i) = 0$ 的初始位置,对应的行 i_B 为窗口的下界线。

(4)窗口的左界线为 $j_L = 0$, 右界线为 $j_R = M$ 。

图3a左上角为坐标系原点,横坐标表示水平投影值 $S(i)$,纵坐标表示图像的行,曲线代表各行水平投影值的分布。从图中容易看出,图像上部出现行水平投影值急剧下降趋势,该处即为主干区域与细小枝干的分界处;其他部分虽有小幅波动,但变化不明显。按照步骤(2)可得到 $i_T = 101$, 确定为窗口的上界;在 $i_B = 255$ 时,曲线开始与纵轴相交,确定该处为窗口的下界,图中用2条虚线分别表示。图3b中虚线框为提取主干区域的窗口。由于细小枝干的影响,提取主干后的图像中仍存在极少数小面积的噪声,故仍采用小面积消除法,获得明显的主干区域,图4表示其反色效果。通过以上步骤,图像大小调整为 $M \times N'$, 其中 N' 表示主干区域的高度。

1.3 特征点提取

目前,获取导航特征点的算法较多。文献[10]提取作物行间最大背景空隙的中点为特征点,文献[11]使用边缘中间线算法检测导航定位基准点,

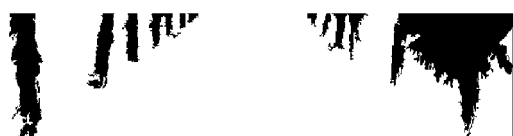


图4 主干区域去噪

Fig. 4 Denoising of tree trunk

文献[12]使用基于移动窗口的灰度投影法与垂直投影法进行作物行特征点提取。根据乔化密植树主干直立、易区分的特点,提取主干与地面的交点作为特征点来表示果树,可以减少后续的计算量。本研究的提取算法如下:

(1)建立一个空矩阵 A , 大小规格与主干图像一致,记为 $M \times N'$ 。

(2)对去噪声后的主干图像进行区域标记,得到 n 个连通区域。

(3)对某一标记区域 k 逐行逐列扫描,设扫描初始点为图像的左上角, i 值由上到下依次增大, j 值由左到右依次增大,若当前点 (i, j) 的像素值为1,同时满足点 $(i, j-1)$ 处及点 $(i+1, j)$ 处的像素值皆为0时,则认为该点符合主干与地面交点的特征(简称为候选点)。其中 $i=1, 2, \dots, N'-1$; $j=2, 3, \dots, M$; $k=1, 2, \dots, n$ 。

(4)将所有候选点对应的坐标存入 A 中,搜索 i 值最大的点,并将其余点转换为背景点。

(5)当扫描区域 $k=n$ 时,则停止搜索。否则,继续执行步骤(3)操作。

用上述方法对图4标记的区域共10个,特征点提取的效果如图5所示。星状点表示提取的结果,每个点代表一个具有主干特征的果树。由图可知,该方法选取的点满足一个良好特征所具备的可区别性、可靠性、独立性、数量少等基本要求。



图5 特征点提取

Fig. 5 Extraction of feature points

1.4 导航基准线生成

每棵果树的区域都会产生唯一的特征点,图5中所有的特征点较均匀地分布于图像两侧。因此,以图像的垂直中心线(即图像总列数的1/2处)为界对特征点进行分类。若检测点位于图像左侧,则将其对应坐标值存入数组 L ;反之,则对应坐标值存入数组 R 。

和农作物类似,果树一般呈直线排列;在局部范围内,机器人的行走路径也近似为直线,因此使用直线路径模型进行研究^[13]。常用生成直线的方法有最小二乘法、Hough变换及其改进形式^[14]。本文提

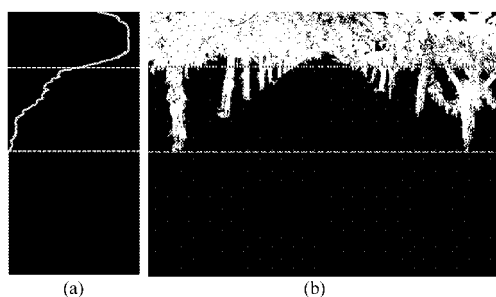


图3 主干区域提取

Fig. 3 Extraction of tree trunk

(a) 水平投影曲线 (b) 主干区域

取的特征点数量不多、杂点较少,由此采用生成速度快、精度高的最小二乘法检测左右边界线。最后通过计算各行边界线中心点来生成果园导航基准线,其效果如图6所示。其中两侧细线代表特征点拟合生成的左、右边界线,中间粗线代表生成的导航基准线。



图6 导航基准线生成效果

Fig.6 Generation of navigation directrix

2 实验结果与分析

在山西省沁水县南郎村、北京市昌平区香堂村和果树研究所示范基地采集多幅富士苹果树、红宝石李子树图像,大小为640×480像素,存储格式为JPG。采集设备为北京嘉恒公司的OK系列摄像机AC1310,安置在行驶速度为1.5~3.5 m/s的导航车上,倾斜角为15°。图像处理所用计算机配置为CPU主频3.2 GHz,内存1.96 GB,开发环境为Visual Studio 2008,使用VC++语言,程序输出结果是原始图附加生成的导航基准线。图7为实验现场,使用装置包括导航车、摄像机、便携式计算机。

导航基准线与水平方向间的夹角称为导航线角度,它是导航信息的重要参数之一,决定了机器人所需调整的转角程度。当导航线角度接近90°时,说

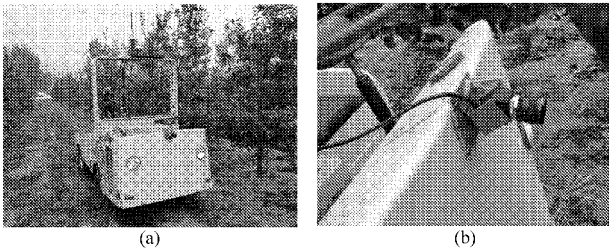


图7 实验现场图

Fig.7 Map of testing spot

(a) 实验装置 (b) 摄像机安置图

明机器人行走正位于视野内安全移动范围的最佳方向^[6]。为了衡量导航基准线生成的准确性,采用人工的方法拟合出最佳导航基准线,获得最佳导航线角度;并以此为基准,分析算法生成的导航线角度与最佳导航线角度的差异。经多次实验证明:角度相对偏差在±2.5°之间可认为结果准确。使用在不同场景中拍摄的278幅果园图像,验证该算法的可靠性和实时性,其中代表场景包括:①晴天拍摄,地表覆盖少许草,土壤裸露,有阴影存在。②阴天拍摄,地表无草覆盖。③晴天拍摄,地表覆盖成片杂草。验证结果如表1所示。

表1 不同场景下基准线生成算法的效果与耗时

Tab.1 Results and time of the algorithm under various scene conditions

场景	图片数	生成准确率/%	平均耗时/ms
①	148	92.1	105
②	31	93.3	101
③	99	90.7	119

以下对其中具有代表性的3幅图像的处理过程进一步分析。图1a属于第1种场景,图8a与图8e

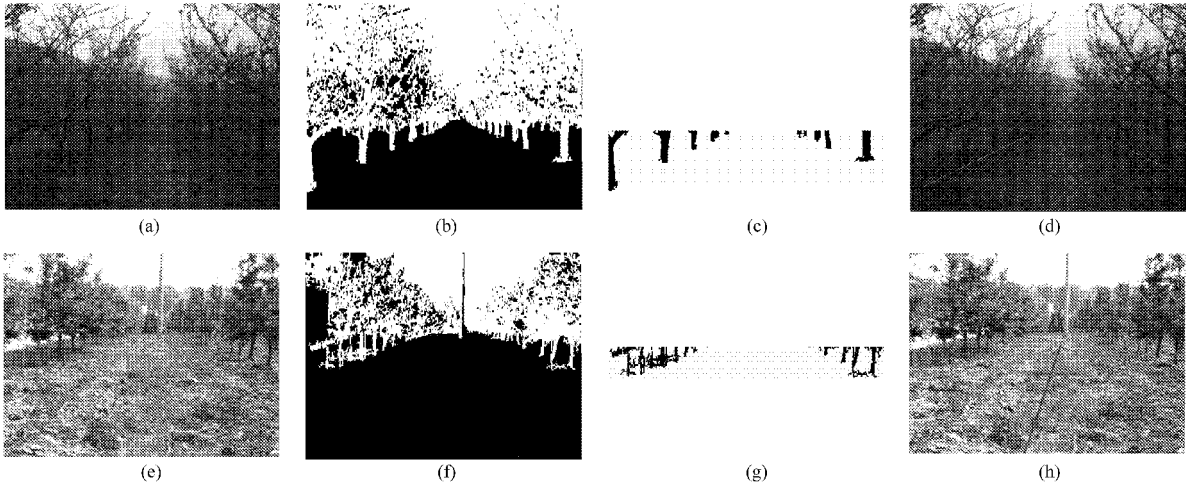


图8 不同场景下导航基准线的生成过程

Fig.8 Generative process of navigation directrix under various scene conditions

(a) 阴天原图 (b) 阴天去噪声图 (c) 阴天主干区域提取 (d) 阴天导航基准线效果图
(e) 覆草原图 (f) 覆草去噪声图 (g) 覆草主干区域提取 (h) 覆草导航基准线效果图

属于后2种场景。

由图2d、图8b和图8f可看出,在晴天或阴天情况下,选用 $R-B$ 分量和二维Otsu结合的分割法均能较好地分割果树和背景。枯叶、土壤、杂草、阴影没有影响树干区域的分割效果。利用数学形态学及小面积消除法能较好地去除噪声,使树干底部与地面交界区域无过多的杂点。表明该算法对噪声的干扰有较强的鲁棒性。

由图4、图8c和图8g可知,利用水平投影法可有效提取树的主干区域,为后续处理减少运算量,为特征点的快速提取奠定基础。由图6、图8d和图8h可知,利用特征点提取算法可有效检测到大部分特征点,并最终生成准确的果园导航基准线。

分析生成失败的主要原因有两点:①某些果树底部有较高、较密的杂草,使树木与地面交界处产生偏移,影响特征点的准确提取。②将其他行的果树采集到图片中,使提取的特征点分布呈折线形,影响导航基准线的准确生成。

3 结论

(1)用 $R-B$ 色差分量结合二维Otsu分割法较好地将树干区域和果园背景分开,利用开运算和闭运算交替滤波法及小面积去除法,有效地滤除图像中的噪声。

(2)分析水平投影曲线的一阶导数变化规律,确定了树的主干区域;根据区域中邻近像素灰度的变化规律提取了特征点,大大减少了计算量,提高了图像的处理速度。

(3)根据特征点的分布规律进行分类,使用最小二乘法检测左、右边界,并通过提取边界线各行中心点生成导航基准线,生成准确率达到90.7%以上。

(4)对个别偏离树排列趋势的特征点,有待研究一定的约束算法进行剔除。

(5)不同场景下的实验表明,该算法不仅能快速准确地生成导航基准线,并具有良好的稳定性和可靠性。

参 考 文 献

- 孙元义,张绍磊,李伟. 棉田喷药农业机器人的导航路径识别[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(2):206~209.
Sun Yuanyi, Zhang Shaolei, Li Wei. Guidance lane detection for pesticide spraying robot in cotton fields [J]. Journal of Tsinghua University:Sci. & Tech., 2007, 47(2):206~209. (in Chinese)
- 周俊,姬长英. 基于知识的视觉导航农业机器人行走路径识别[J]. 农业工程学报,2003,19(6):101~105.
Zhou Jun, Ji Changying. Road recognition for agricultural robot guided by machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2003,19(6):101~105. (in Chinese)
- 司永胜,姜国权,刘刚,等. 基于最小二乘法的早期作物航中心线检测方法[J]. 农业机械学报,2010,41(7):163~167,185.
Si Yongsheng, Jiang Guoquan, Liu Gang, et al. Early stage crop rows detection based on least square method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(7):163~167,185. (in Chinese)
- 籍颖,刘刚,申巍. 基于机器视觉技术获取导航基准线的方法[J]. 光学学报,2009,29(12):3362~3366.
Ji Ying, Liu Gang, Shen Wei. A method based on machine vision to obtain a guidance directrix [J]. Acta Optica Sinica, 2009,29(12):3362~3366. (in Chinese)
- 杨庆华,吴佳艺,鲍官军,等. 农林环境机器视觉导航路径生成算法及应用[J]. 农业机械学报,2009,40(3):147~151.
Yang Qinghua, Wu Jiayi, Bao Guanjun, et al. Algorithms of path guidance line based on computer vision and their applications in agriculture and forestry environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):147~151. (in Chinese)
- 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)
- Tao S P, Takeda J. Guidance path-extraction algorithm for vision-based autonomous orchard vehicle navigation [C] // Bio-Robotics 3. 3rd IFAC International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems, Sapporo Convention Center, JAPAN, Sapporo:IFAC,2006:137~142.
- 景晓军,蔡安妮,孙景鳌. 一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J]. 通信学报,2001,22(4):71~76.
Jing Xiaojun, Cai Anni, Sun Jing'ao. Image segmentation based on 2D maximum between-cluster variance, 2001,22(4):71~76. (in Chinese)
- Rovira-Mas F, Zhang Q, Reid J F. Automated agricultural equipment navigation using stereo disparity images [J]. Transaction of the ASAE,2004, 47(4):1289~1300.

- 5 邱白晶,钱国宏,周宁. 割草机器人避障控制[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,26(4):285~288.
Qiu Baijing, Qian Guohong, Zhou Ning. A voiding barriers control moving robot[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005,26(4):285~288. (in Chinese)
 - 6 安凯,马佳光. 机械臂刚体运动螺旋极小模方程的解系[J]. 光电工程,2010,37(7):8~11.
Aa Kai, Ma Jianguang. Solution system of minimum-magnitude equation about the screw of a rigid-body motion of manipulator [J]. Opto-electronic Engineering,2010,37(7):8~11. (in Chinese)
 - 7 安凯,韩爱丽,宋黎定. 一种新的自主导航技术——单相机视觉系统[J]. 激光与红外,2005,35(12):987~989.
An Kai, Han Aili, Song Liding. A new autonomous navigation technique—the vision system with single camera[J]. Laser & Infrared, 2005,35(12):987~989. (in Chinese)
 - 8 安凯,汪红嫒,任戈,等. 四象限探测仪测角新算法[J]. 激光与红外,2001,31(6):328~329.
An Kai, Wang Hongman, Ren Ge, et al. A new angle-measurement algorithm of the detector with four quadrants[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(6):328~329. (in Chinese)
 - 9 安凯,马佳光. 基于空间飞行器的来袭激光方向探测[J]. 光电工程,2011,38(5):1~4.
An Kai, Ma Jianguang. Attack direction of laser based on the CCD detection[J]. Opto-electronic Engineering, 2011,38(5):1~4. (in Chinese)
 - 10 安凯,马佳光. 一种用于交会对接的 CCD 快速测量方法[J]. 光电工程, 2011,38(6):1~6.
An Kai, Ma Jianguang. A fast CCD measurement method used in rendezvous and docking [J]. Opto-electronic Engineering, 2011,38(6):1~6. (in Chinese)
 - 11 陈玉,赵德安. 基于 LBM 的苹果采摘机器人视觉图像自动修复算法[J]. 农业机械学报,2010,41(11):153~157.
Chen Yu, Zhao Dean. Automatic image inpainting algorithm for apple harvesting robot's vision system based on LBM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):153~157. (in Chinese)
-

(上接第 189 页)

- 10 尹建媛. 农业机器人导航线提取算法的研究与实现[D]. 广州:中山大学,2008.
Yin Jianyuan. Research and implementation of route extraction algorithm of agricultural robot [D]. Guangzhou:Sun Yat-Sen University, 2008. (in Chinese)
- 11 张卫. 农业机器人视觉定位导航技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
Zhang Wei. Study on vision position and navigation of agricultural robot [D]. Beijing:China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 12 姜国权. 农田作业机械视觉导航定位技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2009.
Jiang Guoquan. Research on navigation and location of agricultural machinery based on machine vision [D]. Beijing:China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 13 曹倩,王库. 农田非结构特征视觉导航研究[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):187~189,104.
Cao Qian, Wang Ku. Vision navigation based on agricultural non-structural characteristic [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):187~189,104. (in Chinese)
- 14 吴刚,谭戡,郑永军,等. 基于改进 Hough 变换的收获机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报,2010,41(2):176~179.
Wu Gang, Tan Yu, Zheng Yongjun, et al. Walking goal line detection based on improved Hough transform on harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(2):176~179. (in Chinese)