

农田作业机器人视觉导航目标曲线检测算法研究

蒋海波,张云伟,徐会杰,郭志伟
(昆明理工大学 现代农业工程学院,云南 昆明 650224)

摘要:为研究农田作业机器人视觉导航信息的提取方法,以自然环境下采集的曲线特征较为明显的农田图像为研究背景,根据图像 RGB 颜色特征,利用颜色聚类算法,将导航路径从复杂的背景中提取出来.并对得到的二值图像进行形态学处理以消除噪声,然后对图像逐行扫描检测出导航路径的中心离散点,利用最小二乘法拟合出导航路径,并提出一种新的导航参数的获取方法.试验结果表明:该算法具有速度快、精确度高的优点;在作业环境具有较强的曲线特征等情况下有较好的检测效果.

关键词:视觉导航;RGB 颜色空间;导航参数;农业机器人

中图分类号:TP242.62;S223 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-855X(2008)04-0091-06

Curve Path Detection for Vision Guided Navigation of Agricultural Robot

JIANG Hai-bo, ZHANG Yun-wei, XU Hui-jie, GUO Zhi-wei

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: Natural colorful field images are analyzed in RGB vector space to study the feasibility of lane detection for agricultural robots. The navigation path is successfully recognized from the background. Perceptual color clustering and morphological image processing are used in preprocessing to obtain binary images and remove noise respectively. The guidance points are found from the average position information of the navigation path by progressive scanning. The best guidance lane is located using least-squares curve-fitting which is then used to guide the robot. The experimental results show this algorithm has high speed and remarkable precision. The better detecting performance is obtained especially in robot working environment that has curve features.

Key words: vision navigation; RGB vector space; navigation parameter; agricultural robot

0 引言

随着精细农业和智能农业的发展,自主行走农业机器人在耕作、播种、施肥、喷洒农药、收割作业、农田环境信息采集等方面有着广泛的用途.由于农田作业环境复杂,非结构化特征明显,视觉导航具有信息探测范围宽、目标信息完整、适应能力强等优势.而且随着计算机图像处理技术的日趋成熟,相关硬件的性价比不断提高,视觉导航已经成为国内外研究较多的导航方式.

在农田作业机器人视觉导航参数提取方面,目前国内外学者主要是通过 Hough 变换或者线性回归检测出直线路径,然后把直线参数转换到世界坐标系下导航参数来控制机器人的运动^[1-9].但是,由于农田环境复杂,在植株偏移、路径转弯、作物垄行具有较强的曲线特征等情况下,利用提取直线信息作为导航参数显然很难达到精确导航的目的,甚至有时会出现检测出错的情况.因此,本文提出一种根据农田作业路径的形态特征得到导航离散点,然后通过最小二乘法对离散点进行曲线拟合得到导航路径的算法.取拟合曲线与以摄像机标定中心为原点的图像坐标系 X 轴的交点上的切线,将该切线的切角 θ 和图像坐标系的原点到该切线的距离 λ 作为导航参数.

收稿日期:2008-04-18. **基金项目:**2008年昆明理工大学研究生课外学术科技创新基金(项目编号:YCC0777).

第一作者简介:蒋海波(1981-),男,在读硕士生.主要研究方向:农业机器人视觉导航.

E-mail:haibo330@126.com

1 路径识别

1.1 颜色聚类的图像分割

聚类是将模式向量的集合分为若干个子集的过程. 在农田图像中, 颜色特征是最直观的特征, 针对复杂的图像背景, 选择合适的色彩空间是图像分割比较关键的问题. 本文在 RGB 颜色空间利用颜色聚类的方法对图像进行分割, 类的数目确定为 2, 即路径和非路径. 非路径包括草、树木、树阴等其它干扰. 通过 Euler 公式, 分别计算图像中某点 RGB 分量到路径颜色聚类中心 (R_1, G_1, B_1) 和非路径颜色聚类中心 (R_2, G_2, B_2) 的距离, 即:

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(R - R_1)^2 + (G - G_1)^2 + (B - B_1)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(R - R_2)^2 + (G - G_2)^2 + (B - B_2)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

d_1 为图像中某点 RGB 颜色空间矢量到路径聚类中心的距离; d_2 为图像中某点 RGB 颜色空间矢量到非路径聚类中心的距离. 当 $d_1 < d_2$ 时, 该像素点被判别为路径, 否则该像素点被判别为非路径. 通过分析机器人全局作业环境 RGB 图像 3 个分量的统计直方图, 获得全局路径聚类中心为 $(215, 195, 145)$; 非路径聚类中心为 $(100, 140, 25)$. 图 1 为一幅机器人作业环境图像, 图 2 为 RGB 颜色聚类分割处理的结果.



图1 机器人作业环境图

Fig.1 Original images of robot working environment



图2 颜色聚类路径识别

Fig.2 Path recognition based on color clustering

1.2 导航路径中心轨迹确定

由于农田作业环境较为复杂, 环境噪声较多, 植株生长参差不齐, 因此在图像分割出的路径周围会出现一些细小的突起和一些孤立的区域, 为了获得更加精确的导航路径, 必须对图像进行进一步处理.

形态学开和闭运算对图像都有平滑轮廓的作用^[10], 形态学开运算可以切断狭区, 消除图像中的“孤岛”和突刺; 形态学闭运算可以融合图像中狭窄的间断和细长的“沟壑”, 消除小的孔洞. 本文取大小为 7×9 结构元素对所得分割图像进行形态学开闭运算, 取得了较好的效果, 如图 3 所示, 机器人行走路径灰度为 1, 背景灰度值为 0, 原图像中噪声已经被消除, 较好地保持了机器人行走路径结构信息.

导航路径定位通过检测路径中心点的位置来实现. 对图像进行逐行横向扫描, 分别检测到路径在各行的左右边缘位置, 设导航路径第 i 行右边缘点坐标为 (u_{ir}, v_{ir}) , 左边缘点坐标为 (u_{il}, v_{il}) , 在该行上的路径中心点坐标为 (u_{im}, v_{im}) , 则有:

$$u_{im} = \frac{u_{ir} + u_{il}}{2}, \quad v_{im} = \frac{v_{ir} + v_{il}}{2} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

利用该法检测路径的中心线如图 4 所示.

1.3 最小二乘法曲线拟合导航离散点

在导航路径具有较强的曲线特征的情况下, 所获得的绝大部分导航离散点不在同一条直线上, 因此, 利用检测直线来获得导航参数具有较大的误差. 最小二乘法曲线拟合^[11]是指在对给出的观测数据 (x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 作曲线拟合时, 把使各观测数据与拟合曲线类 H 的偏差的平方值和最小值作为衡量曲



图3 形态学滤波
Fig.3 Morphological filtering

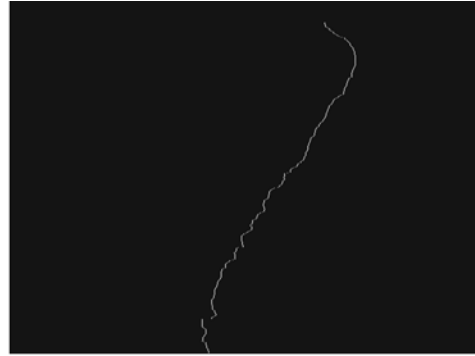


图4 导航路径离散点
Fig.4 Discrete points of the navigation path

线拟合优劣的标准,即

$$\sum_{i=0}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 = \min_{\psi \in H} \sum_{i=0}^n [y_i - \psi(x_i)]^2 \quad (3)$$

$\psi(x)$ 为属于曲线类 H 的某一曲线函数. 在用最小二乘法求取拟合曲线时,一般通过研究问题自身规律及给定数据描图来确定拟合曲线的形式. 由于农田作业环境中存在各种未知角度的转弯以及其它干扰,所获得的导航离散点也不具有统一的结构特征,通过多次试验对比,本文采用 5 阶多项式对提取出的导航离散点进行拟合,取得了较好的拟合精度.

2 摄像机的标定和导航参数获取

2.1 摄像机的模板标定

摄像机标定是确定摄像机成像几何模型参数的过程^[12],是重建和识别环境中物体的前提,摄像机标定大致分为摄影测量学标定和自标定两类,摄影测量学标定精度高,但需要昂贵的标定设备,而且试验需要精确的设置;自标定法不需要任何标定物,方法灵活,但是它并不成熟,由于未知参数太多,很难得到稳定的结果. 综合两种标定方法的特点,本文采用了一种介于两种方法之间的平面模板标定法^[13]. 该方法只需要摄像机从不同方向拍摄一个平面模板的多幅图像,并提取每幅图像上的网格角点,则平面模板与网格角点之间就确定了一个单应性矩阵 H .

$$H = A[R \quad t], \quad A = \begin{bmatrix} \sigma & \gamma\beta & c_x \\ 0 & \beta & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 (c_x, c_y) 是主点的像素坐标; σ, β 分别是在像素级上水平和垂直方向上的尺度因子; γ 是倾斜系数,反映像素坐标系坐标轴之间的夹角大小. 矩阵 A 的各参数并不依赖摄像机所处的位置及面向,被称为摄像机的内部参数矩阵^[14]. 旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 描述了摄像机在世界坐标系中的方位,合称为外参数矩阵. 由于光线在穿过透镜时会发生折射,这就导致直线在图像上映射为曲线,所以要考虑摄像机的透镜畸变. 本系统中只考虑径向畸变,畸变函数^[15]如下:

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= x' + (x' - c_x) [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ \tilde{v} &= y' + (y' - c_y) [k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{aligned} \quad (5)$$

$[\tilde{u}, \tilde{v}]$ 为畸变像素坐标, $[x', y']$ 为理想像素坐标, $[x, y]$ 为理想成像坐标.

本标定中,平面模板采用张贴在平滑桌面上的激光打印机打印的棋盘格(如图 5),格式为 9×7 ,尺寸为 $270 \text{ mm} \times 210 \text{ mm}$,每格的宽度 30 mm ,共包括 10×8 个角点,打印机为 Canon LBP-1910 激光打印机. 摄像机 CCD 传感器长宽比为 $1:1$,尺寸大小为 $1/1.8$ 英寸,图像分辨率为 640×480 .

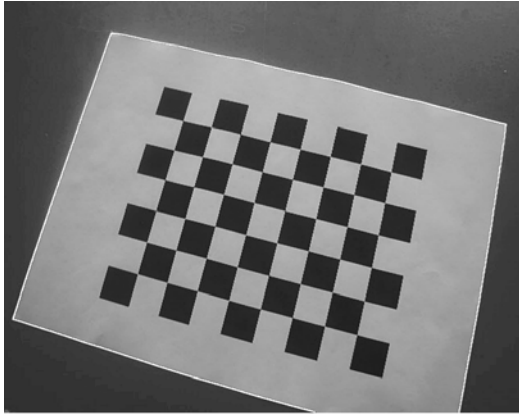


图5 标定模板
Fig.5 Model plane

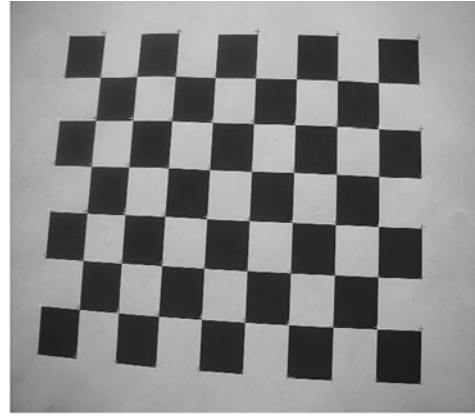


图6 提取的角点(用“+”标记)
Fig.6 Extracted corners (indicated by cross)

试验结果得到的摄像机内部参数如表1.

本导航系统采用最后一组标定数据来计算农田作业机器人的导航参数.

2.2 导航参数获取

图7为利用导航路径获得控制信息的示意图,图中 X 轴为摄像机坐标系中 $x_c o_c z_c$ 平面和地平面交线在图像坐标系中的投影, Y 轴与机器人中轴线重合;图中曲线为导航路径, X 轴与导航路径交于 p 点,取导航路径在 p 点的切线 L ,线段 Od 垂直于切线 L ,角度 $\angle \alpha$ 为切线 L 与机器人轴线的夹角; λ 为主点到切线 L 的垂直距离;本研究取 $\angle \alpha$ 与 λ 为导航控制信息.图8为摄像机坐标系与世界坐标系位置关系示意图, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为世界坐标系, $O_c X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系, h 为摄像机距离地面的高度, $\angle EO_c A$ 为摄像机的视场角,摄像机光轴与摄像机坐标系的 $O_c Z_c$ 轴重合, $\angle \phi$ 为光轴与地面所成的角度.设 (x_w, y_w, z_w) 为世界坐标系中的 B 点坐标,虚线 BP 为摄像机坐标系 $x_c o_c z_c$ 平面与地平面的交线. P 为 $x_c o_c z_c$ 平面与实际导航路径的交点,直线 PD 为导航路径在 P 点的切线. $o_w D$ 垂直于切线 PD ,其距离表示为 λ_w .切线 PD 与世界坐标系 z_w 轴的夹角记为 α_w .令平面 $x_w o_w z_w$ 与地平面重合, y_w 方向垂直地面向上,则对应的 p 点坐标点为 $(w_w, 0, z_w)$, (x, y) 为图像坐标系下的相应点坐标. p_x 为单位像素的宽度, p_y 为单位像素的高度.

由摄像机针孔模型几何原理及摄像机坐标系与世界坐标系位姿关系(如图8)可知

$$\lambda_w = \frac{\lambda p_x h}{f \cos \alpha \sin \phi} \cos \alpha_w + \frac{h}{\tan \phi} \sin \alpha_w \quad (6)$$

又因为图像中的角度^[16]为:

$$\tan \alpha = \frac{p_y}{p_x} \left(\tan \alpha_w \sin \phi + \frac{\lambda_w \cos \phi}{h \cos \alpha_w} \right) \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可得:

$$\alpha_w = \arctan \left(\frac{p_x}{p_y} \sin \phi \tan \alpha - \frac{\lambda p_x \cos \phi}{f \cos \alpha} \right) \quad (8)$$

又因为摄像机内参数矩阵中: $\sigma = f/p_x$; $\beta = f/p_y$,则式(6)、(8)可变为:

$$\lambda_w = \frac{\lambda h \cos \alpha_w}{\sigma \cos \alpha \sin \phi} + \frac{h}{\tan \phi} \sin \alpha_w \quad (9)$$

表1 参数标定结果

Tab.1 Results with real data of 3 through 5 images

参数	3幅图像	4副图像	5副图像
σ	839.020 6	885.977 4	883.358 6
β	853.172 7	896.452 7	896.452 7
γ	0.002 56	0.002 327	0.001 290
c_x	351.227 9	350.604 9	347.034 4
c_y	337.595 6	329.867 7	330.945 7
k_1	0.423 1	0.503 2	0.511 0
k_2	-1.422 0	-1.945 7	-1.948 6

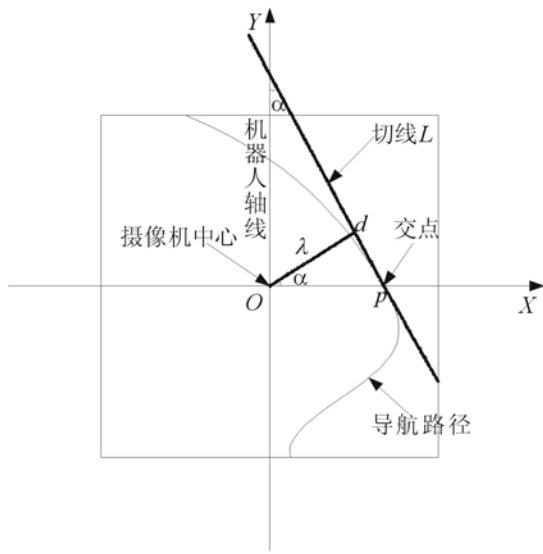


图7 导航参数示意图

Fig.7 Schematic diagram of navigation parameters

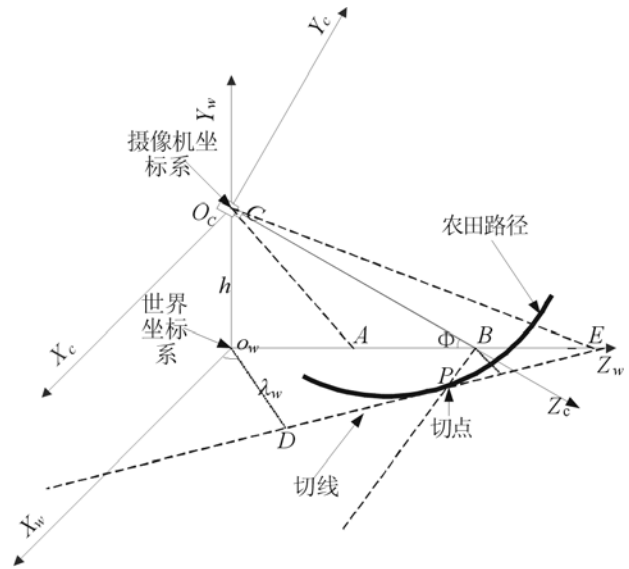


图8 摄像机坐标系和世界坐标系

Fig.8 World-camera coordinates system

$$\alpha_w = \arctan\left(\frac{\beta}{\sigma} \sin\phi \tan\alpha - \frac{\lambda \cos\phi}{\sigma \cos\alpha}\right) \quad (10)$$

即 λ_w 和 α_w 为世界坐标系下的导引参数,控制机器人的运动.

3 试验与分析

试验提取了 20 帧不同垄行结构的图像分别进行处理,所用图像尺寸为 640×480 像素,试验用计算机处理器为 Celeron[®] 1.60GHz. Hough 变换检测直线导航参数平均耗时 110 ms, Radon 变换检测直线导航参数平均耗时 421 ms,本算法检测导航参数平均耗时 63 ms. 试验表明当导航路径有明显曲线特征时,用直线拟合导航路径不具有较好的全局性和鲁棒性,如图 9 所示. 而用最小二乘曲线拟合算法,则能够检测出与机器人行走路径匹配较好的导航线,如图 10 所示. 其中蓝色点为导航离散点,红色曲线为导航路径拟合曲线. 在图像坐标系下,导航曲线与导航离散点的平均误差为 0.19242 ± 0.05345 mm; 均方根误差为 0.26636 ± 0.08020 mm; 最大误差为 0.92211 ± 0.28770 mm.



(a) $\angle\phi$ 为 30° 时的图像

(b) $\angle\phi$ 为 45° 时的图像

(c) $\angle\phi$ 为 60° 时的图像

图9 Hough变换检测导航路径

Fig.9 Navigation path detected by Hough Transform

4 结论

本文运用基于 RGB 颜色矢量空间的聚类算法,把土壤从草及树木背景中识别出来. 并利用形态学开闭运算对所得图像进行处理,在图像坐标系中根据作业环境边界的走势特征,通过最小二乘曲线拟合算法



(a) 与图9(a)的对比图

(b) 与图9(b)的对比图

(c) 与图9(c)的对比图

图10 最小二乘曲线拟和检测导航路径

Fig.10 Navigation path detected by least-squares curve-fitting

得到导航路径并提取出导航参数,最后利用坐标系转换关系,把图像坐标系中位移偏差和角度偏差转换为世界坐标系中的导航参数.试验表明,该算法对于跟踪各种垄行结构都具有较好的实时性和鲁棒性,能够实现农田作业机器人的精确导航.

参考文献:

- [1] ASTRAND B, ALBERT - JAN, BAERVELDT. A vision based row - following system for agricultural field machinery[J]. Mechatronics, 2005, 15:251 - 269.
- [2] HAN S, DICKSON M A, NIB, et al. A robust procedure to obtain a guidance directrix for vision - Based vehicle guidance systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 179 - 195.
- [3] SF GGAARD H T, OLSEN H J. Determination of crop rows by image analysis without segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 38:141 - 158.
- [4] KISE M, ZHANG Q, ROVIRA MAS F. A Stereovision - based Crop Row Detection Method for Tractor - automated Guidance [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4):357 - 367.
- [5] 杨为民,李天石,贾鸿社.农业机械机器视觉导航研究[J].农业工程学报,2004,20(1):160 - 165.
- [6] 周俊,姬长英,刘成良.农用轮式移动机器人视觉导航系统[J].农业机械学报,2005,36(3):90 - 94.
- [7] 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.
- [8] 于国英,毛罕平.农业智能车辆视觉导航参数提取的研究[J].农机化研究,2007,1(1):167 - 169.
- [9] 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.
- [10] RAFAEL C, GONZALEZ, RICHARD E WOODS. Digital Image Processing[M]. Second Edition. Prentice Hall, 2002.
- [11] 谢政,李建华,汤泽滢.非线性最优化·第二版[M].长沙:国防科技大学出版社,2003.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330 - 1334.
- [14] HEIKILA J, SILCEN O. A four - step camera Calibration procedure with implicit image correction[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'97), 1997. 1106 - 1112.
- [15] WEI Guo - qing, MA Song - d. Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994. 16(5):469 - 480
- [16] OKAMOTO H, HAMADA K, KATAOKA T, et al. Automatic guidance system with crop row sensor[C]. Zhang Qin. Automation Technology for Off - Road Equipment. Chicago: ASAE Publication, 2002.