

# 基于良序集和垄行结构的农机视觉导航参数提取算法

张志斌, 罗锡文\*, 李 庆, 王在满, 赵祚喜

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

**摘 要:** 根据田间作物垄行间杂草离散的特点, 基于图像矩阵, 运用像素子集的良好性, 结合垄宽先验知识得到垄行轨迹中心。同时, 系统选择图像的绿色成分为目标特征空间, 滤掉了非绿色的背景噪声, 为寻找垄行子集奠定了基础。在摄像头参数结构的可线性化映射区(图像中间约 1/3 区域), 考虑移动平台的速度和系统图像采样间隔, 在系统处理速度大于平台移动速率条件下, 建立了单目视觉导航系统的动态方程。试验结果表明: 航向角和位置参数平均误差分别约为  $1^\circ$  和 1 mm。该算法设计简洁, 实现容易, 可有效避免杂草等噪声的影响, 对光照也有一定的适应性。

**关键词:** 良序集; 垄行结构; 机器视觉导航; 农业机械

**中图分类号:** TP242.62; S223

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)7-0122-05

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 with English abstract)

## 0 引 言

由于农田环境的非结构化特点, 要求农业机械视觉导航系统在识别田间垄行结构时具有很高的鲁棒性, 在设定的时间内能输出正确的识别结果<sup>[1]</sup>, 以引导农用机械自主作业, 如喷洒农药、施肥和收获等。N. D. Tillett<sup>[2]</sup>等较早提出运用 Hough 变换, 在杂草等噪声较少的多垄图像中提取导航参数, 能克服断垄等影响。但 Hough 变换本身存在累加器峰值较难确定和重复线段多等问题, 在杂草等噪声较大时, Hough 变换识别垄线系统的实时性和准确性较差。周俊<sup>[3]</sup>采用 Hough 变换, 结合卡尔曼滤波预测, 提取作物边界的导航参数, 在样机纵向速度为 0.27 m/s 和 0.94 m/s 时, 能较好跟踪篱笆边缘; 杨为民等<sup>[4]</sup>用 Hough 变换和动态窗口技术检测垄行特征, 获得了较好的仿真和试验效果, 但两者在系统的准确性、鲁棒性和适应性方面还需改善。另外, 一些研究者<sup>[5]</sup>利用绿色植物的光谱特性, 用近红外摄像头或在彩色摄像头上加装滤光片采集图像和提取垄线结构, 减少了特征空间中噪声的影响, 结合 Hough 变换提取导航参数, 系统的鲁棒性得到了改善。F. A. C. Pinto<sup>1</sup>等<sup>[6]</sup>采用主成分分析方法, 把垄行图像映射到低维特征

矩阵中, 通过求矩阵特征值从一组图片的 ROI (Region Of Interest) 中获取导航信息, 采用另一组测试图片进行验证, 绝对位置误差为 4.47 cm, 航行角误差为  $4.26^\circ$ , 但算法应用到田间垄行图像时, 非结构化的田间环境将使 ROI 的确定较困难。H. T. SΦgaard 等人<sup>[7]</sup>提出不分割垄图像, 把垄行灰度化图像分成 15 个横条块, 通过垄点区域纵向累积, 然后确定各灰度区域重心来跟踪垄行, 跟踪误差为  $\pm(6\sim12)$  mm, 但杂草等噪声对垄行区域重心的确定影响比较大。

综上所述, 农田视觉导航系统需要迫切解决的问题包括: 一是改善光照对系统算法的影响; 二是对作物垄线的准确识别, 克服杂草等噪声影响。本文基于垄间杂草等噪声具有离散特点, 运用垄行像素子集的良好性和作物的颜色特征, 提出一种新的算法, 以有效去除离散分布的杂草等噪声的影响, 对光照也有一定的适应性, 系统的动态响应较好。

## 1 算法原理

### 1.1 田间垄行图像的特征提取

采用德国 Balser A301c 彩色摄像头。由于绿色植物对绿光反映比较灵敏, 故可提取绿色通道作为系统的特征空间。H. T. SΦgaard 等<sup>[7]</sup>曾用超绿 (2G-B-R) 来提取绿色植物的特征参数, 可较好地适应宽范围光照条件的变化。本研究选择绿色通道作为特征空间, 在保证原作物颜色信息的基础上, 再进行超绿运算, 只保留和作物颜色较接近的离散分布的杂草等, 同时达到降低维数的目的。图 1 为一幅田间采集的图像, 图 2 是采用上

收稿日期: 2006-04-09 修订日期: 2007-05-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60574029)

作者简介: 张志斌 (1974—), 男, 内蒙古兴和人, 博士生, 研究方向为图像处理与模式识别。广州 华南农业大学工程学院, 510642。

Email: Pearl740@tom.com

\*通讯作者: 罗锡文 (1945—), 教授, 博士生导师。广州 华南农业大学工程学院, 510642。Email: xwluo@scau.edu.cn

述方法二值化处理的结果,垄行目标点灰度值为0,背景灰度值为1。从图中可以看出处理后保持了作物垄信息,改善了背景中石块等非绿色因素的影响。



图1 作物垄行图

Fig.1 Original images of crop rows



图2 二值化后垄行图

Fig.2 Binary images of crop rows

## 1.2 垄行中心轨迹的确定

研究表明,田间图像中杂草聚集等噪声是随机存在的。对于系统的图像矩阵,各行向量中被检测到的目标点集  $R_i$  为若干个良序子集  $C_{ij}$  的并集,可表示为

$$R_i = \bigcup_{j=1}^{j=m} C_{ij} \quad (1)$$

式中  $m$ ——子集数;  $C_{ij}$ ——第  $i$  行第  $j$  个连续子集。

在幼苗期间,杂草较小,大多呈离散或簇状分布,反映作物垄行点集区域的大小(可列势)符合高斯统计规律,因此,可结合垄宽度先验知识,通过设置最大和最小阈值  $d_{\max}, d_{\min}$  滤掉离散小区域和较大面积杂草等噪声,然后再求各区域中心,如式(2)所示

$$m_{ij} = \frac{S_{ij}}{|C_{ij}|} \quad (2)$$

式中  $S_{ij}, |C_{ij}|$ ——分别为第  $i$  行第  $j$  个连续子集元素坐标和与子集元素个数。运行式(2)后,较大面积的杂草和离散点等噪声被去掉了(尽管垄上的区域信息同时被削弱,但保持了垄线结构,为进一步直线段拟合节省了计算时间),处理结果如图3所示。为消除孤立点噪声对直线段拟合的影响,对式(2)处理获得的矩阵各行向量,按从左向右扫描顺次求各目标点间的距离,设置阈值  $d_c$ ,若顺次距离大于  $d_c$ ,则去掉该点。图4即为运用此法对图3处理的结果(为了清楚,作了加粗处理),一些

边缘离散点被去掉了,减小了直线段拟合的误差。

一般阈值  $d_{\min}, d_{\max}$  和  $d_c$  大小确定应小于垄平均宽度(像素坐标下),本文垄宽为10,  $d_{\min}, d_{\max}$  和  $d_c$  分别为2,8和8。

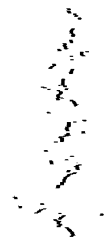


图3 运行式(2)处理结果

Fig.3 Images after the treatment using equation (2)



图4 去掉孤立点的拟合结果

Fig.4 Images after removing the isolated points and straight line fitting

## 2 摄像头标定和系统动态方程的建立

摄像头标定的目的是从二维图像信息推知三维物体的位姿信息,以确定空间三维点与其二维图像点坐标的特定关系。已有的摄像头标定法有线性法、非线性法和两步标定法等,这些方法均比较灵活,但尚不成熟,可靠性不高<sup>[8]</sup>。对于线的投影,一般采用非线性优化方法,以最大化地减少误差<sup>[9]</sup>。本文在非线性的基础上寻找可线性化线的映射区,建立移动平台视觉导航系统的动态方程。

### 2.1 像素坐标到像平面坐标的映射

图5为平台结构示意图,图6为摄像头安装的侧视图和俯视图。 $h$  为摄像头中心距地面的高度, $f$  为摄像头焦距。 $(x_2, y_2, z_2)$  为摄像头坐标,镜头中心  $o$  为坐标原点,  $z_2$  轴与摄像头光轴一致,摄像头绕  $x_2$  轴旋转  $\frac{\pi}{2} - \varphi$  得到坐标  $(x_1, y_1, z_1)$ ;  $(x_3, z_3)$  为世界坐标,与垄行一致,原点为  $o$  在地面的垂足  $o'$ 。一般,当  $h \gg f$  时,针孔式摄像头成像原理可简约为小孔成像原理<sup>[10]</sup>。因此,从计算机像素坐标  $(x_{comp}, y_{comp})$  到  $(x_2, y_2, z_2)$  映射关系如式(3)所示<sup>[11,12]</sup>

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{hd(x_{comp} - c_x)}{[dy(y_{comp} - c_y)\sin\varphi + f\cos\varphi]s_x} \\ h \\ \frac{fh}{[dy(y_{comp} - c_y)\sin\varphi + f\cos\varphi]\sin\varphi} - h\tan\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $dx, dy$ ——分别为像素在  $x$  轴、 $y$  轴上的物理尺寸； $c_x, c_y$ ——图像中心坐标。

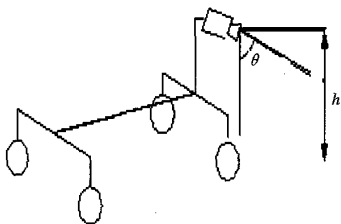


图5 平台结构示意图

Fig. 5 Scheme of the camera and the platform

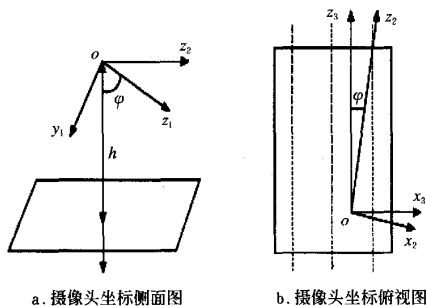


图6 摄像头坐标投影图

Fig. 6 Side and overhead views of camera coordinate projection

## 2.2 线性化映射区和系统动态方程

由式(3)可知由坐标  $(x_{comp}, y_{comp})$  到坐标  $(x_2, z_2)$  是比较复杂的非线性映射,在纵向和横向上都有微小的畸变。本试验中摄像头内部参数  $dx = dy = 9.9 \times 10^6$  (mm),  $S_x = 1.3$ ,  $C_x = 320$ ,  $C_y = 220$ 。取  $h = 570$  mm。图7和图8分别为采用 Matlab6.5 绘制的  $z_2 = f(x_{comp}, y_{comp})$  曲面图和等高线区域。由图可见在  $(C_x, C_y)$  周围,在逻辑坐标区域(100,400)内,横向和纵向均具有均匀等高线,其线性性较好,横向理论误差为 0.001 mm(纵向对系统精度影响可忽略)。为减小图像畸变产生的系统误差,可选取该区域为可线性化映射区。本文选取  $L \in [\text{Height}/3, 2\text{Height}/3]$ , 作为映射域,这与文献[13,14]分析的结果一致。

设在  $(x_{comp}, y_{comp})$  下直线  $y = kx + b$ ,联立式(3)得

万方数据

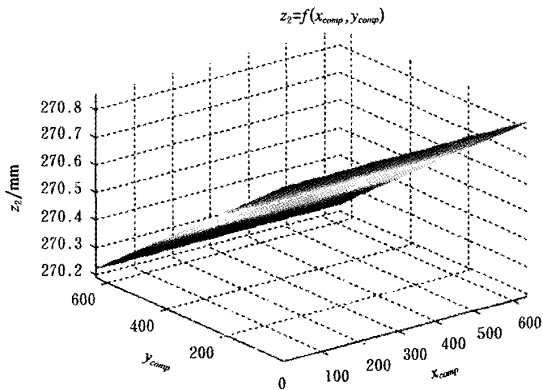


图7  $z_2 = f(x_{comp}, y_{comp})$  曲面图

Fig. 7 Surface of  $z_2 = f(x_{comp}, y_{comp})$

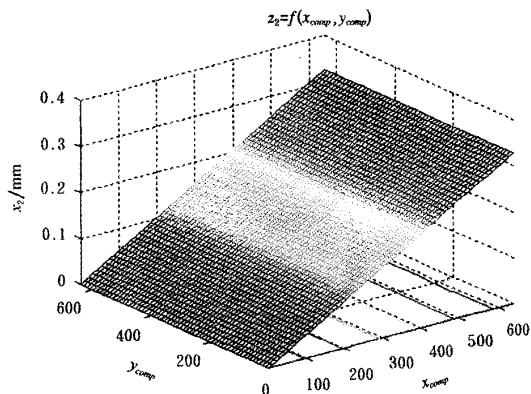


图8  $x_2 = f(x_{comp}, y_{comp})$  曲面图

Fig. 8 Surface of  $x_2 = f(x_{comp}, y_{comp})$

在  $(x_2, z_2)$  下的直线为  $y_2 = k'x_2 + b'$ ,其中当  $-\frac{\pi}{2} <$

$\arctan k' < \frac{\pi}{2}$  时,

$$k' = \frac{fS_x dy k}{dysin\varphi(kC_x + b) + f\cos\varphi} \quad (4)$$

$$b' = \frac{hfdx}{dysin\varphi(kC_x + b) + f\cos\varphi} - h\tan\varphi$$

当  $\theta = \frac{\pi}{2}$  时,畸变可忽略。

故由图6b得到系统在世界坐标下  $t$  时刻的导航参数  $(\Psi, p_x, p_y)$ ,如式(5)所示

$$p_x(t) = p_x(t - T) + Tv(t)\sin\Psi(t)$$

$$p_y(t) = p_y(t - T) + Tv(t)\cos\Psi(t)$$

$$\begin{cases} \Psi(t) = \frac{\pi}{2} - \arctan k'(t) & \Psi(t) \neq \frac{\pi}{2} \\ \Psi(t) = \theta(t) & \Psi(t) = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $T$ ——采样间隔;  $v$ ——平台移动速率;  $p_x$ ,

$p_y$ ——分别为拟合线段中心坐标。该式成立的条件为系统处理每帧图像的速度  $v_{comp}$  和平台移动速度  $v_{plat}$  满足关系:  $v_{comp} > v_{plat}$ 。

3 视觉导航系统算法流程图

系统算法由 Windows API 程序实现,在 Intel(R) 4 CPU 2.00GHz 计算机上运行。最后把像素的坐标值映射到世界坐标下,输出序列导航参数值,由转向控制器操纵转向轮的转向。如图 9 所示。

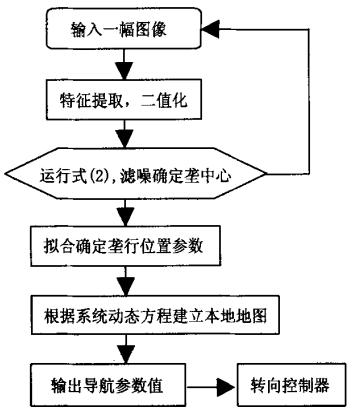


图 9 算法流程图  
Fig. 9 Flowchart of the system algorithm

4 试验结果

试验在华南农业大学农场的一块油菜地中进行,垄行宽度  $N = 10\text{ cm}$ ,油菜植株高度约为  $5\text{ cm}$ ,杂草密集度小于植株,由久保田插秧机改装的移动平台由人工操纵沿预先标记的直垄段行走,平台移动速度约为  $1\text{ m/s}$ ,图像采样间隔  $T = 0.1\text{ s}$ ,系统连续获取导航图像并进行实时处理;系统处理图像速度约为  $40\text{ 帧/s}$ ,满

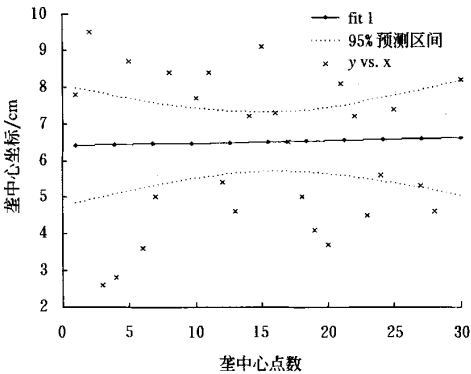


图 10 作物垄行中心点拟合  
Fig. 10 Results of the central dots fitted

足动态方程(5)成立条件。图 10 为系统提取垄中心点拟合分析结果,可见,在 95% 预测区间内大部分点较匀称地位于拟合线两旁,垄中心区宽度约为  $2\text{ cm}$ ,远小于实际垄宽度  $10\text{ cm}$ ,所提取的垄行像素点在实际垄行像素范围内;图 11 为系统提取的航向角结果,大部分点位于  $90^\circ$  附近,平均位置误差约为  $1\text{ mm}$ ,平均航向角误差约为  $1^\circ$ ,占用计算机 CPU 时间为毫秒级,系统动态响应较好。

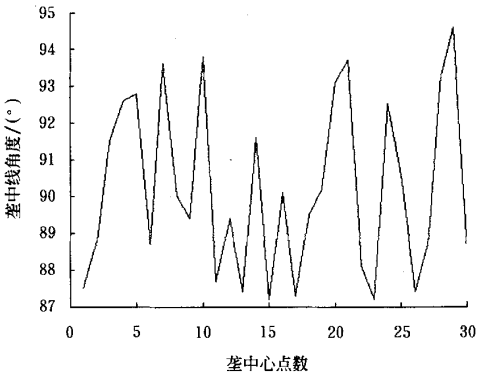


图 11 系统提取的航向角误差  
Fig. 11 Errors of the navigation angles

5 结 论

根据作物苗期田间垄行图像杂草等噪声灰度分布的特点,运用垄行子集的良好序性,结合垄行结构滤去噪声和确定垄行中心,通过拟合得出垄线方程,能够适应离散分布的杂草等噪声影响。

选择绿色空间作为目标的特征空间和超绿运算,去掉了非绿色的背景等噪声,降低了系统的维数,并改善了系统对光照的适应性。

通过仿真得出在摄像头内部参数非线性映射区(图像中间约  $1/3$  区域),摄像头标定误差较小;进一步结合移动平台速度和图像采样间隔  $T$ ,建立了单目视觉导航系统的动态输出方程。标记试验表明,该算法实现容易,系统计算量小,航向角和位置参数平均误差分别约为  $1^\circ$  和  $1\text{ mm}$ ,可满足动态实时系统的要求。

[参 考 文 献]

[1] Topi M. aenp. a. a, Markus Turtinen, Matti Pietik. ainen. Real-time surface inspection by texture [J]. System Real-Time Imaging, 2003,9:289-296.  
[2] Tillett N D, Hague T, Marchant J A. A Robotic System for Plant-Scale Husbandry[J]. J Agric Engng Res, 1998, 69:169-178.  
[3] 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.
- [4] 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.
- [5] Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 169—194.
- [6] Pinto F A C, Reid J F, Zhang Q, et al. Vehicle guidance parameter determination from crop row images using principal componet analysis [J]. J Agric Engng Res, 2000, 75: 257—264.
- [7] SØggaard H T, Olsen H J. Determination of crop rows by image analysis without segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003, 38: 141—158.
- [8] 吴文琪, 孙增圻. 机器视觉中的摄像机定标方法综述[J]. 计算机应用研究, 2004: 4—6.
- [9] Joa˜o P, Barreto, Helder Araujo. Fitting conics to paracatadioptric projections of lines[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2006, 101: 151—165.
- [10] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 57—68.
- [11] 闫振杰. 智能机器人视觉伺服系统研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [12] Bjorn Astrand, Albert-Jan, Baerveld. A vision based row-following system for agricultural field machinery[J]. Mechatronics, 2005, 15: 251—269.
- [13] Luca Lucchese. Geometric calibration of digital cameras through multi-view rectification [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23: 517—523.
- [14] 周庆瑞, 原 魁, 刘俊承. 移动机器人视觉导航控制研[J]. 计算机工程与应用, 2005, 15: 5—8.

## New algorithm for machine vision navigation of farm machine based on well-ordered set and crop row structure

Zhang Zhibin, Luo Xiwen<sup>\*</sup>, Li Qing, Wang Zaiman, Zhao Zuoxi

(Engineering College, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A basic requirement of automatic navigational system for farm machine is to recognize precisely the crop rows in various field conditions. In this paper, a new approach based on the density differences between weeds and plants was proposed to detect straight row lines, in which the subsets of the plant pixels were used to estimate the centers of crop rows. The green contents of the row images were chosen to eliminate the background soil features relatively completely compared with the Excess Green. The navigational parameters were obtained through fitting the row center dots. For nonlinear projection region  $L \in [\text{Height}/3, 2 * \text{Height}/3]$  of the camera where projecting errors can be neglected, a navigation system equation was established at a platform speed of 1 m/s and sampling interval of 0.1 s. Experimental results indicated that the tracking error of the navigation system was reduced with an angle error about  $1^\circ$  and position error about 1 mm. The system could work well under a wide range of illumination situations and was insensitive to small area weeds.

**Key words:** well-ordered set; structure of crop rows; machine vision navigation; farm machine