

基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取

孟庆宽¹ 何 洁¹ 仇瑞承¹ 马晓丹^{1,2} 司永胜³ 张 漫¹ 刘 刚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试验室, 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083

² 黑龙江八一农垦大学信息技术学院, 大庆 黑龙江 163319

³ 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 河北 071001

摘要 针对基于机器视觉的农业导航机器人在图像处理时易受光照变化影响和常规导航线检测算法实时性、稳健性不高等问题, 提出了 YCrCg 颜色模型, 选择该颜色模型中与光照无关的 Cg 分量进行后续图像处理, 采用基于二维直方图的模糊 C 均值聚类法(FCM)进行图像分割, 并根据图像中作物行的特点, 提出了基于直线扫描的作物行直线检测算法。该算法将图像底边和顶边像素点作为直线的两个端点, 通过移动上下端点位置产生不同斜率直线, 选择包含目标点最多的直线作为作物行中心线。实验表明, 不同光照下基于 YCrCg 颜色模型的图像分割可以有效地识别出作物行, 处理一幅 640 pixel×480 pixel 图片耗时约为 16.5 ms, 直线扫描算法能快速准确的检测出导航线, 与最小二乘法、Hough 变换等算法相比具有速度快、抗干扰性强等优点。

关键词 机器视觉; 颜色模型; 图像分割; 导航线; 农业导航

中图分类号 TP242.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0715002

Crop Recognition and Navigation Line Detection in Natural Environment Based on Machine Vision

Meng Qingkuan¹ He Jie¹ Qiu Ruicheng¹ Ma Xiaodan^{1,2} Si Yongsheng³
Zhang Man¹ Liu Gang¹

¹ Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, Key Laboratory of Agriculture Information Technology, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

² College of Information Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China

³ College of Information Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hubei 071001, China

Abstract In order to solve the problems of serious illumination interference for image processing and the poor robustness of conventional navigation line detection algorithms in agricultural navigation robot based on machine vision, the methods of crop recognition and navigation line extraction in natural environment are studied. Cg component of YCrCg color model is selected for subsequent image processing to reduce the adverse effects of light change on image segmentation and navigation line extraction. The fuzzy C-means clustering method (FCM) based on two-dimensional histogram is used for Cg component segmentation, so as to identify the green crop. According to the characteristics of crop rows in image, a method of crop line detection based on linear scanning is designed. Pixel on image bottom and top edge are selected as two endpoints of a straight line, by moving the endpoints location result in different slope lines, the line containing the most target points is chosen as the crop centerline, and then obtain the navigation line. The experimental results show that image segmentation based on YCrCg color model can effectively

收稿日期: 2014-01-10; 收到修改稿日期: 2014-02-18

基金项目: 国家 863 计划(2012AA101901)

作者简介: 孟庆宽(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事农业自动化图像信息处理方面的研究。

E-mail: 373414672@qq.com

导师简介: 张 漫(1975—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农业电气化与自动化等方面的研究。

E-mail: cauzm@cau.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

identify the crops under different illumination conditions. Further more, the time consumption for single image of $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ is about 16.5 ms. The linear scanning algorithm can quickly and accurately find the navigation line. Compared with Hough transform and least square algorithm, the designed algorithm has the advantages of high speed and good robustness.

Key words machine vision; color model; image segmentation; navigation line; agricultural navigation

OCIS codes 150.1135; 150.1488; 150.5758; 330.1690

1 引言

利用农业机器人进行自主导航作业,不仅可以把劳动者从重复单调的劳动中解放出来,也可以大幅度提高农田作业精准度和工作效率^[1]。目前,农业导航机器人研究主要包括机器视觉和卫星定位(GPS)技术两种方式^[2]。GPS可以提供作业机器人的绝对位置信息,但其抗干扰性差,受到房屋、树木遮挡时容易造成信号丢失。机器视觉导航技术具有信号探测范围广、信息丰富完整、非接触测量和性价比高等优点。基于机器视觉的农业导航系统利用视觉传感器采集农田图像信息,通过图像处理提取导航路径,控制导航机器人沿导航路径行走作业。导航机器人在田间自然光照条件下工作,视觉传感器采集的是分散、非结构化的农作物图像,而且受到光照变化、阴影噪声等因素的影响,造成图像分割效果不佳,降低了导航路径识别的准确性和实时性。

对于机器视觉导航系统,颜色空间的选择、图像分割方法和导航线提取算法是决定导航系统性能的三个重要环节。在颜色空间选择上,文献[3-4]采用RGB颜色空间,利用归一化 $2G-R-B$ 作为颜色特征因子,突出图像中绿色比重,一定程度上降低了光照对图像分析造成的干扰,但无法完全消除光照变化对图像处理的影响。文献[5]使用色调-饱和度-亮度(HIS)颜色空间对田间成熟番茄进行识别,通过统计方法找出成熟番茄H分量分布,利用阈值法分割出成熟番茄。由于HIS颜色模型与RGB颜色模型转换算法复杂、计算量大,导致该方法实时性不高。文献[6]采用基于光照无关图的方法消除阴影噪声,提高导航系统在光照变化条件下导航参数提取的稳健性,该算法计算复杂、耗时长,难以满足导航作业实时性要求。在图像分割方面,文献[7-8]采用Otsu法进行图像分割,具有算法简单、计算量小等优点。Otsu算法对于直方图上具有明显波峰、波谷的图像表现出很好的分割效果,但对于物体与背景不存在明显灰度差异或者各物体灰度范围有较大重叠的图像分割效果不佳。在导航线提取方面,文献[9-11]采用改进Hough变换算法进行导航线提取,一定程度上提高了运算效率,但存在检

测精度低、峰值难以确定等问题。文献[12-13]利用最小二乘法进行作物行直线拟合,具有较快的检测速度,不过最小二乘法对噪声敏感,难以在杂草噪声较高的情况下准确提取作物行直线。

针对田间光照变化对图像分割效果的影响以及常规导航线提取算法存在的不足,本文以玉米为研究对象,采用YCrCg颜色模型,选择与光照强度无关的 C_g 分量进行图像灰度化,以降低光照变化对图像处理的影响,引入基于二维直方图的模糊C均值聚类法(FCM)对 C_g 分量图进行聚类分割,将绿色作物从土壤背景中分割出来,利用直线扫描算法进行导航线提取,提高了导航路径识别的实时性和准确性。

2 颜色空间选择

颜色空间也称为色彩空间或者色彩模型,是通过坐标系统或者子空间描述颜色的一种方式。颜色空间有很多种类,常用的包括RGB、HIS和YCrCb颜色空间。

RGB颜色空间各基色有很强的相关性,对亮度变化敏感。导航作业时,采集的图像经常受到光照变化干扰,使用RGB颜色空间进行图像处理容易造成图像分割信息不明确,降低导航路径检测精度。

HIS颜色空间颜色和亮度相互分离,H分量对光照变化不明显且可以识别不同颜色物体,适合处理对光照变化较为敏感的图像。但H分量与RGB转换关系为非线性容易造成图像失真^[14-15]。

YCrCb(亦称YUV模型)颜色空间中,Y表示明亮度,Cr和Cb表示色度,该颜色模型亮度与色度相分离,适合处理易受光照变化影响的图像。Cr和Cb分别表示RGB输入信号红色部分和蓝色部分与亮度之间差异。农田作物行绿色分量占很大比重,而YCrCb颜色空间中缺少RGB绿色信号与光照亮度差异描述,所以引入 C_g 分量来描述绿色作物特征。YCrCg颜色空间由RGB颜色空间经过矩阵变换得到Y、 C_g 、Cr信号,其转换公式为^[16]

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cr \\ Cg \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 65.481 \\ 112 \\ -81.085 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (1)$$

由转换(1)式可以得知, YCrCg 与 RGB 之间转换为线性, 具有算法简单、计算量小等优点。

图 1 为玉米彩色图片转换到 HIS、YCrCg、RGB 颜色模型下的灰度图(其中在 RGB 模型下利用 $2G-R-B$ 将彩色图片进行灰度化)。对比转换结果可以

发现, HIS 的 H 分量图、YCrCg 的 C_g 分量图和 $2G-R-B$ 分量图均可以较好地将玉米作物从土壤背景中进行区分, 但 YCrCg 模型中玉米灰度图像更加完整清晰。

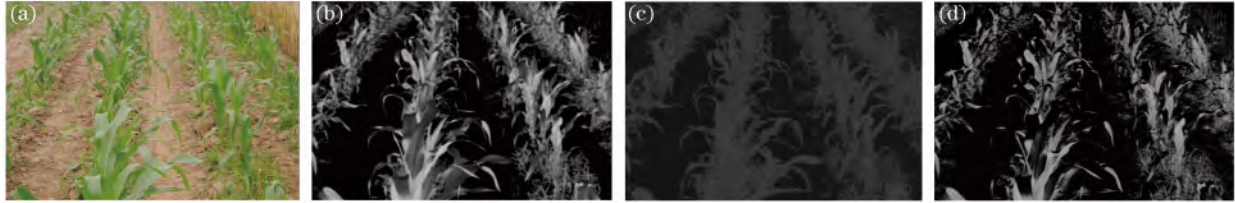


图 1 各颜色空间分量图。(a) 原图; (b) C_g 分量图; (c) H 分量图; (d) $2G-R-B$ 分量图

Fig. 1 Component graph of each color space. (a) Origin image; (b) C_g component image;

(c) H component image; (d) $2G-R-B$ component image

图 2 为 C_g 、 H 、 $2G-R-B$ 分量归一化直方图, 通过直方图可以得出, C_g 分量直方图存在明显波峰波谷, 适合采用阈值分割或者聚类分割进行目标提取。

通过对晴天、阴天、顺光、逆光等情况下玉米图片进行实验, 结果表明 C_g 分量对光强变化不敏感, 可以将 C_g 分量作为绿色作物识别的依据。

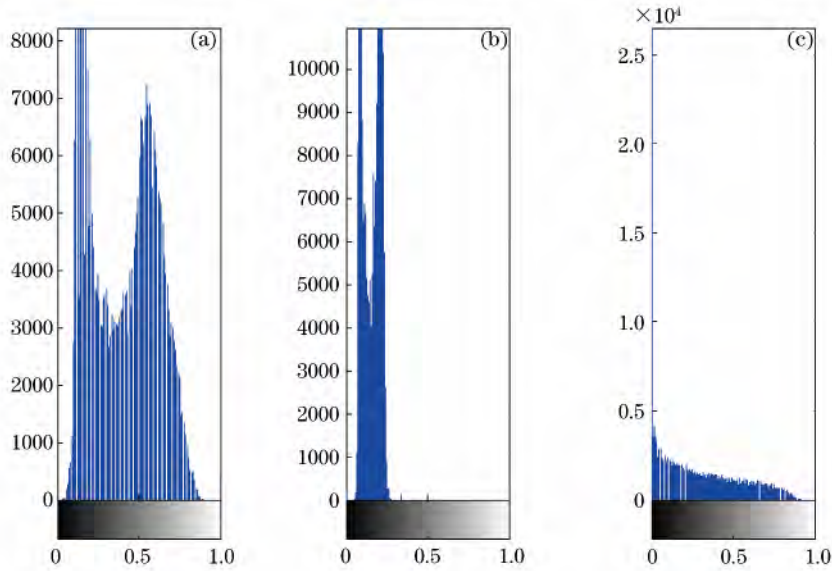


图 2 C_g 、 H 、 $2G-R-B$ 分量直方图。(a) C_g 分量; (b) H 分量; (c) $2G-R-B$ 分量

Fig. 2 Histogram of C_g , H and $2G-R-B$. (a) C_g component; (b) H component; (c) $2G-R-B$ component

3 图像分割

针对阈值分割方法存在的不足, 本文采用基于二维直方图的 FCM 算法对作物图像进行分割, 将像素灰度与像素邻域信息组成图像二维向量作为 FCM 样本点, 提高图像分割准确度和抗噪声干扰能力。

3.1 传统模糊 C 聚类算法

FCM 算法最早由 Ruspini 和 Bezdek 于 1981 年提出^[17], 该算法用于图像分割时, 根据图像像素

与聚类中心的加权相似测度, 通过迭代使目标函数最小以获取最佳聚类^[18-19]。

设聚类类别为 C , $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \in R^p$ 表示图像中 n 个像素样本, 每个样本取 p 个特征, $x_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})^T$ 。图像的分割转化为将这 n 个样本分成 C 类的聚类问题, FCM 目标函数为

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2, \quad (2)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, 0 \leq u_{ij} \leq 1, \\ j = 1, 2, \dots, n, i = 1, 2, \dots, c, \quad (3)$$

(2)式中 $U=[u_{ij}]$ 是 $c \times n$ 阶矩阵, u_{ij} 表示第 j 个元素属于第 i 类的隶属度。 $d_{ij} = ||x_j - v_i||^2$ 是 x_j 与 v_i 的归一化距离,用来度量数据点和聚类中心的相似性。通过迭代算法使(2)式中目标函数达到最小值 $\min\{J(U,V)\}$ 即为最佳分类效果。

3.2 基于二维直方图模糊C聚类算法

传统FCM算法进行图像分割只考虑像素灰度信息,没有利用像素空间信息,在含有噪声的图像中,图像一维直方图中的物体和背景区分布往往相互重叠不可区分,导致FCM对噪声较高的图像分割效果不佳。为此,提出了二维直方图的思想,图像中像素与其邻域像素具有很强的相关性,将图像灰度信息与邻域灰度相结合构成图像二维向量,将二维向量作为FCM样本点进行图像分割^[20]。

设原图像可以用二元函数 $f(x,y)$ 表示,灰度级为 L ,图像尺寸 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。对 $f(x,y)$ 利用 3×3 点阵得到平滑图像 $g(x,y)$, $g(x,y)$ 灰度级为 L ,大小为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ 。将 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 构成一个二维向量 $T[f(x,y), g(x,y)]$,该向量表示相应的灰度—邻域均值对。设 $T(s,u)$ 出现频率为 P_{su} ,它表示 $f(x,y)$ 中灰度级为 S , $g(x,y)$ 中灰度级为 U ,这两种情况同时出现的二维点数,且满足以下关系。

$$\sum_{s=0}^{L-1} \sum_{u=0}^{L-1} P_{su} = M \times N, \quad (4)$$

$$0 \leq P_{su} \leq M \times N, \quad (5)$$

式中 $\{P_{su}\}$ 代表的是二维直方图,直方图共有 $M \times N$ 个数据点,由于二维直方图有效的利用空间信息,提高了图像分割抗噪声能力。在二维直方图中,数据



图3 二值图像

Fig.3 Binary image

空间是二维的,则 $p=2, x_k=(x_{k1}, x_{k2}), k=1, 2, \dots, n, x_{k1}$ 和 x_{k2} 分别表示像素灰度值和邻域灰度值,将 x_k 组成的样本集合作为FCM算法样本点进行图像分割。

图3为玉米Cg分量图分割效果图,通过与原始图像对比可以看出,基于二维直方图FCM分割算法较好地实现玉米与土壤背景的分割。

4 导航路径检测

4.1 作物行位置信息获取

二值图像中作物行为白色,土壤背景为黑色,利用垂直投影法对白色像素进行投影,可以获取作物行的位置和个数信息^[21]。图4为基于垂直投影法的作物行检测结果。

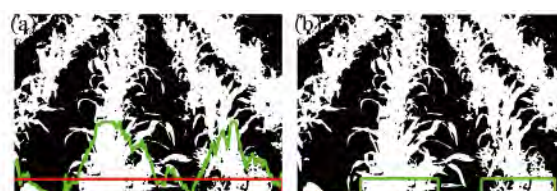


图4 基于垂直投影法的作物行检测。(a)图像灰度投影;(b)作物行个数和位置检测

Fig.4 Method of crop rows detection based on vertical projection. (a) Image gray projection; (b) crop row number and position detection

图4(a)中,绿色波形表示作物行灰度投影,设置一个高度阈值 T (图中红色线段),将波形高度值与 T 进行对比,如果波形高度大于等于 T 则波形高度等于 T ,否则波形高度等于0,这里 T 等于投影窗口内目标像素总和的平均值。通过投影可以获取作物行的左右两侧位置信息,一个作物行的位置可以用一个条带表示如图4(b)所示。在含有杂草的作物行图像中,出现多个绿色伪条带(杂草投影产生),需要滤除。为保证作物个数信息的有效性,选取阈值 R ,对宽度小于 R 的条带予以滤除, R 为图像宽度的10%。

4.2 作物行直线检测

摄像机获取的农田图像中作物行起始于图像底边,终止于图像顶边,走向近似为一条直线,可以通过图像顶边和底边两个点确定作物行位置。根据上述思想提出了基于直线扫描的作物行检测算法,在图像顶边和底边选择2个点,控制上下端点位置产生不同斜率直线,统计落在直线一定区域范围内目标点个数,将包含目标点最多的直线作为作物行直线,进而得到导航线。将图像底边作为作物行直线

起点选择范围,顶边作为直线终点选择范围。该算法具体步骤为

1) 设图像高度为 H_{height} , 宽度为 W_{width} , 直线起点纵坐标为 0, 终点纵坐标为 H_{height} ;

2) 初始化作物行直线起点移动步长(Bottom_Step, B_{step})、终点移动步长(Top_Step, T_{step})、作物行计数器 $N_{\text{num}}=1$ 、直线距离阈值 d 、直线参数数组(Line_Array, L_{Array});

3) 利用垂直投影法获取作物行位置信息 P_{nL} 、 P_{nR} 和个数信息 N , P_{nL} 和 P_{nR} 分别表示第 n 条作物行两侧边缘位置, 如果 $N \geq 1$ (图像中包含 1 条以上作物行) 则执行步骤 4), 如果 $N = 0$ (图像中没有作物行), 则程序结束;

4) 将图像顶边划分为 $W_{\text{width}}/T_{\text{stop}}$ 个线段, 线段端点作为作物行直线候选终点;

5) 选择作物行直线起点($P_{\text{num}L}, 0$)与所有候选终点构成直线, 统计距离直线 d 范围特征点(白色像素点)个数, 选择特征点最多的直线作为最佳候选直线, 并将特征点数和直线参数存储到数组 Line_Array;

6) $P_{\text{num}L} = P_{\text{num}L} + B_{\text{step}}$, 如果 $P_{\text{num}L} < P_{\text{num}R}$ 则返回步骤 5), 否则执行步骤 7);

7) 在 Line_Array 数组中寻找最多特征点对应的直线, 将其作为作物行直线, 初始化 Line_Array;

8) $N_{\text{num}} = N_{\text{num}} + 1$, 如果 $N_{\text{num}} \leq N$ 则返回步骤 5), 否则程序结束。

4.3 算法复杂度分析

直线扫描算法中, 扫描步长 Bottom_Step、Top_Step、距离阈值 d 和作物行个数共同决定了算法检测时间和精度。设图像中作物行个数为 N , 检测 N 条作物行直线所需时间为

$$T = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\omega_i}{B_{\text{step}}} + 1 \right) \left(\frac{W_{\text{width}}}{T_{\text{step}}} + 1 \right) \times H_{\text{height}} \times 2d \times t, \quad (6)$$

式中 W_{width} 为图像宽度, H_{height} 为图像高度, ω_i 为第 i 条作物行宽度, t 表示遍历一个像素所用时间。扫描步长越小, 算法精度越高, 但检测时间也相应增加。试验表明, 对 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 图像, 当 $B_{\text{step}} \in \left[\frac{\omega_i}{5}, \frac{\omega_i}{15} \right]$, $T_{\text{step}} \in \left[\frac{W_{\text{width}}}{25}, \frac{W_{\text{width}}}{35} \right]$, $d=5$ 时, 算法精度和实时性在最佳状态。

5 实验结果与分析

本研究的机器视觉系统由电荷耦合器件(CCD)

摄像机、工控机、相机支架等构成。摄像机采用美国灰点(Point Grey)公司生产的高分辨率 CCD 彩色相机, 图片输出格式为 bmp, $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。工控机采用 Intel(R)Core(TM)2 @2.93 GHZ 处理器, 4 G 内存, 运行系统为 Windows XP。

5.1 颜色模型光照适应性试验

为验证不同颜色空间对光照变化的适应性, 将不同光照强度下农田作物图片转换到 YCrCb、HIS 和 RGB 三种颜色空间, 利用基于二维直方图的 FCM 算法进行分割对比试验。试验选择晴天(光照强度约 $220 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)和阴天(光照强度约 $120 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)情况下玉米田图片, 如图 5 所示。图 6 为基于 YCrCb 颜色空间的图像分割, 分割结果受光照变化影响很小, 而且分割信息完整, 噪声点少。图 7 为基于 HIS 模型的图像分割, 分割图像存在明显噪声点, 图 7(a)中部分阴影被误认为绿色作物, 造成错误分割; 图 7(b)噪声较大, 无法有效识别出作物行, 分割效果较

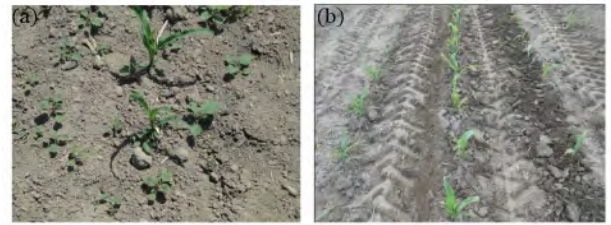


图 5 晴天和阴天采集的图像。(a)晴天; (b)阴天
Fig. 5 Images of cloudy and sunny day. (a) Sunny day; (b) cloudy day

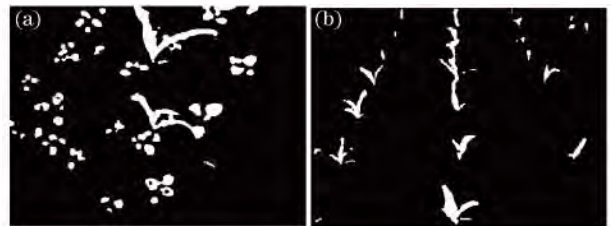


图 6 YCrCb 模型分割结果。(a)晴天; (b)阴天
Fig. 6 Segmentation results of YCrCb color space. (a) Sunny day; (b) cloudy day

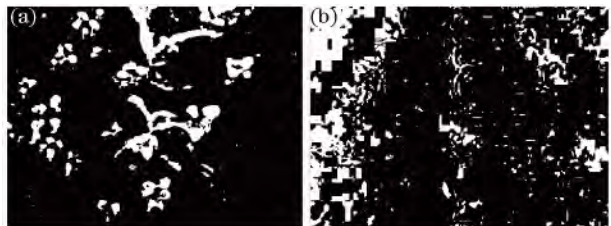


图 7 HIS 颜色空间分割结果。(a)晴天; (b)阴天
Fig. 7 Segmentation results of HIS color space. (a) Sunny day; (b) cloudy day

差。图 8 为基于 RGB 颜色空间分割的效果图,阴天时效果与 YCrCg 空间效果相似,晴天时分割效果不佳,绿色作物分割信息不完整,这是由于 RGB 颜色空间 R 、 G 、 B 颜色分量对光照变化敏感造成的。

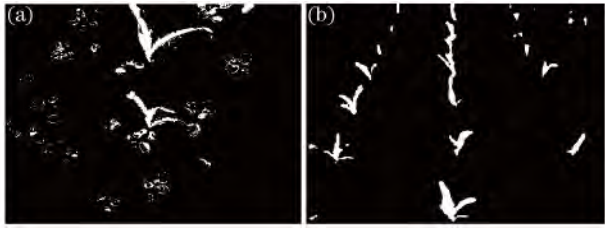


图 8 RGB 颜色空间分割结果。(a)晴天;(b)阴天

Fig. 8 Segmentation results of RGB color space.

(a) Sunny day; (b) cloudy day

5.2 颜色模型分割处理时间试验

为了对 YCrCg、RGB、HIS 三种颜色模型分割时间进行比较,分别对 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 和 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 图像进行分割,图像格式为 bmp。图像分割时间如表 1 所示,可以看出基于 HIS 颜色空间图像分割耗时最多,这是由于 H 分量与 R 、 G 、 B 分量转换算法复杂计算量较大导致。RGB 颜色模型分割耗时最少,但由于分割效果受光照变化影响较大,不适合用于自然光照条件下农田导航作业。YCrCg 颜色模型对光照变化不敏感,分割耗时略高

于 RGB 模型,但可以满足导航作业实时性要求。

表 1 不同颜色空间图像分割耗时比较

Table 1 Consumption contrast of different color spaces

Color modes	Image size ($640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$) /ms	Image size ($800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$) /ms
YCrCg	17.1	25.2
HIS	22.7	34.3
RGB	14.8	22.9

5.3 作物行中心线检测试验

为检验直线扫描算法的准确度和实时性,分别利用标准 Hough 变换、最小二乘法和直线扫描算法进行导航线检测,实验对象为中耕期玉米。标准 Hough 变换算法中, $\theta \in [-90^\circ, +90^\circ]$, $\rho \in [-800, +800]$, 量化精度 0.5° ; 扫描算法中 $B_{\text{step}} = 15$, $T_{\text{step}} = 25$, $d = 5$ 。三种方法检测结果如图 9 所示,图中实线表示作物行直线,虚线表示导航线。

从图 9 可以看出, Hough 变换和扫描算法都可以正确检测出导航线,而最小二乘法检测结果则存在一定误差。表 2 为直线提取参数,在时间消耗方面,标准 Hough 变换最多,为 167 ms; 扫描算法次之,为 86 ms; 最小二乘法最少,为 81 ms。在检测精度方面,扫描算法检测的导航线精度与 Hough 变换接近,最小二乘法得到的直线精度低于前两种算法,主要由于杂草噪声影响造成检测精度降低。



图 9 不同算法导航线检测结果。(a) Hough 变换;(b)最小二乘法;(c)直线扫描算法

Fig. 9 Navigation line test results of different algorithms. (a) Hough transforms; (b) least square method;

(c) linear scanning algorithm

表 2 不同算法直线参数比较

Table 2 Results of liner parameter comparison

	Left crop line parameters		Right crop line parameters		Navigation line parameters		Time loss /ms
	k	b	k	b	k	b	
Hough transformation	-3.11	550.53	9.39	-2967.9	-9.39	2310.47	167
Least square method	-4.79	689.76	7.36	-2277.1	-28.17	6367.88	81
Linear scan algorithm	-3.10	593.84	7.96	-2460.7	-10.17	2543.55	86

6 结 论

1) 针对农业机器人视觉导航中图像处理易受

光照变化影响的问题,提出了适合农田自然光照条件下玉米作物行识别的 YCrCg 颜色模型,颜色模型

中的 C_g 分量可以很好的表示玉米特征。

2) 针对传统模糊聚类算法存在的不足, 将图像灰度值和邻域灰度值构成二维直方图, 作为 FCM 算法样本点进行图像分割, 有效提高了图像分割抗噪声能力。

3) 根据作物行在图像中的特点, 提出了直线扫描检测方法, 实验表明该方法可以快速准确的对导航线进行检测, 与常规导航线检测方法相比具有实时性高、稳健性好等优点。

参 考 文 献

- 1 J N Wilson. Guidance of agricultural vehicles—a historical perspective [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25(1): 3—9.
- 2 Shen Chuan, Jiang Huanyu, Bao Yingshi. Research on machinery vision technology and GPS in field of autonomous navigation of agriculture vehicle [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, (7): 185—188.
- 申 川, 蒋焕煜, 包应时. 机器视觉技术和 GPS 在农业车辆自动导航中的应用[J]. 农机化研究, 2006, (7): 185—188.
- 3 Jiang Guoquan, Ke Xing, Du Shangfeng, *et al.*. Crop row detection based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 1015—1020.
- 姜国权, 柯 杏, 杜尚丰, 等. 基于机器视觉的农田作物行检测[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 1015—1020.
- 4 C Gee, J Bossu, G Jones, *et al.*. Crop/weed discrimination in perspective agronomic images [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 49—59.
- 5 Zhao Jiewen, Liu Muhua, Yang Guobin. Discrimination of mature tomato based on HIS color space in Natural Outdoor scenes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 122—125.
- 赵杰文, 刘木华, 杨国彬. 基于 HIS 颜色特征的田间成熟番茄识别技术 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(5): 122—125.
- 6 An Qiu, Li Zhichen, Ji Changying, *et al.*. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 208—212.
- 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.
- 7 Yao Yuhong, Li Yanfeng, Liu Bowen, *et al.*. Analysis of real photonic crystal fibers by finite-difference frequency-domain method combined with digital image processing [J]. Acta Pica Sinica, 2008, 28(7): 1384—1389.
- 8 Hu Lian, Luo Xiwen, Zeng Shan, *et al.*. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 12—18.
- 胡 炼, 罗锡文, 曾 山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12—18.
- 9 Duan Rujiao, Zhao Wei, Huang Songling, *et al.*. Fast line detection algorithm based on improved Hough transformation [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2010, 31(12): 2274—2279.
- 段汝娇, 赵 伟, 黄松岭, 等. 一种基于改进 Hough 变换的直线快速检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(12): 2274—2279.
- 10 Zhao Ruijiao, Li Minzan, Zhang Man, *et al.*. Rapid crop row detection based on improved Hough transformation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 40(7): 163—165.
- 赵瑞娇, 李民赞, 张 漫, 等. 基于改进 Hough 变换的农田作物行快速检测算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 163—165.
- 11 Zhang Jiangxin, Shen Xiaolan, Wang Hui, *et al.*. Fast multiline detection algorithm using randomized Hough transform [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2013, 41(3): 344—350.
- 张江鑫, 沈小兰, 王 辉, 等. 快速随机 Hough 变换多直线检测算法[J]. 浙江工业大学学报, 2013, 41(3): 344—350.
- 12 Si Yongsheng, Jiang Guoquan, Liu Gang, *et al.*. Early stage crop rows detection based on least square method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 41(7): 163—167.
- 司永胜, 姜国权, 刘 刚, 等. 基于最小二乘法的早期作物行中心线检测方法[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 163—167.
- 13 Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, *et al.*. Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 8—14.
- 胡 炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 株间除草装置横向便宜量识别与作物行跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 8—14.
- 14 Zhong Yuzhuo, Qiao Bingxin, Li Shuqing. Robot Vision Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994. 77—78.
- 钟玉琢, 乔秉新, 李树清. 机器人视觉技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994. 77—78.
- 15 Lin Weiming, Hu Yuntang. Image segmentation method based on YUV color space for tomato harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 177—180.
- 林伟明, 胡云堂. 基于 YUV 颜色模型的番茄收获机器人图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 176—180.
- 16 Wang Xiaorong, Zhao Yingkai, Lin Jinguo. Fast target recognition based on YUV model and Gabor filter [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(20): 4701—4703.
- 王晓荣, 赵英凯, 林锦国. 基于 YUV 模型和 Gabor 滤波器的快速目标识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(20): 4701—4703.
- 17 J J de Dios, N Garcia. Face detection based on a new color space YCgCr [J]. IEEE International Conference on Image Processing, 2003, 3: 909—912.
- 18 Mao Hanping, Zhang Yancheng, Hu Bo. Segmentation of crop disease leaf images using fuzzy C-means clustering algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(9): 136—140.
- 毛罕平, 张艳诚, 胡 波. 基于模糊 C 均值聚类的作物病害叶片图像分割方法研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 136—140.
- 19 Chen Guo, Zuo Hongfu. The image adaptive thresholding by index offuzziness [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(5): 791—796.
- 陈 果, 左洪福. 图像的自适应模糊阈值分割法[J]. 自动化学报, 2003, 29(5): 791—796.
- 20 Liu Jianzhuang. A fuzzy clustering method for image segmentation based on two-dimensional histogram [J]. Acta Electronica Sinica, 1992, 20(9): 40—45.
- 刘健庄. 基于二维直方图的图像模糊聚类分割方法 [J]. 电子学报, 1992, 20(9): 40—45.
- 21 Meng Qingkuan, Liu Gang, Zhang Man, *et al.*. Algorithm for crop rows detection based on liner correlation coefficient constrained [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, (S): 216—223.
- 孟庆宽, 刘 刚, 张 漫, 等. 基于线性相关系数约束的作物行中心线检测方法[J]. 农业机械学报, 2013, (S): 216—223.

栏目编辑: 张浩佳