

# 基于暗原色的农机具视觉导航线提取算法

李 勇 丁伟利

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 针对农机具视觉导航线提取算法受外界环境影响较大,适用性、稳定性较差等问题,提出了一种基于暗原色的农机具视觉导航线提取算法。基于暗原色原理提出了一种新的农田图像灰度化方法,实现了农田图像中的农作物和土壤更好地区分。再利用形态学方法和最大类间方差法对灰度图进行二值化和滤波,并结合垂直投影的方法提取导航感兴趣区域,进而确定感兴趣区域的导航定位点,并通过最小二乘法将定位点拟合得到导航线。实验结果表明,该算法适用于不同颜色情况下的农田场景及农田道路导航线提取,与传统算法相比,在精度上满足导航线的要求且速度也有较大的提高,具有更广的适用性。

**关键词** 机器视觉;导航线;暗原色;农机具;农田环境

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0215001

## Navigation Line of Vision Extraction Algorithm Based on Dark Channel

Li Yong Ding Weili

*Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*

**Abstract** The farm machinery vision navigation line extraction algorithm is influenced by the external environment, suitability and stability. An algorithm to extract the line for vision navigation based on dark channel is presented. Getting the gray image from the color image using dark channel, then obtaining the two values grayscale and filtering it using morphological method and Otsu method, and using the vertical projection method to extract the interested navigation region, next determining the navigation point in the region of interest. The navigation line location is extracted by the least squares fitting. The experimental results show that this method can be applied to different farmlands and road scenes. Compared with the traditional algorithm, the precision can meet the requirements of navigation line, and this method has faster speed. Besides, this method has wider applicability.

**Key words** machine vision; navigation line; dark channel; agricultural machinery; farmland environment

**OCIS codes** 150.0155; 150.1135; 150.1488; 150.5758; 330.1690

## 1 引言

近年来,农业机器人在农业生产中的运用越来越广泛,促进了现代农业的发展,基于机器视觉的自主导航技术是农业机器人实现作业智能化的关键技术<sup>[1]</sup>。

近十年来,国内研究人员对基于视觉的农业机器人导航线检测研究提出了很多方法。目前,已有的农田视觉导航线提取算法中,大多选择颜色空间模型进行图像灰度化,再利用直线扫描的方式检测作物导航线。其中颜色空间的选择,通常有基于2G-R-B超绿模型算法<sup>[2-6]</sup>、基于HSI颜色模型的H分量算法<sup>[7]</sup>、基于YCrCb颜色模型的算法<sup>[8-9]</sup>,导航线提取方式主要有直线扫描方法<sup>[2,8]</sup>、Hough变换<sup>[3-4,7]</sup>、随机算法<sup>[5-6,10]</sup>。基于2G-R-B模型算法采用RGB颜色空间,利用归一化2G-R-B作为特征因子,提取出绿色分量,进而将绿色农

收稿日期: 2014-07-29; 收到修改稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61005034)、河北省自然科学基金(F2012203185)

作者简介: 李勇(1991—),男,硕士研究生,主要从事模式识别与智能系统方面的研究。E-mail: 842384077@qq.com

导师简介: 丁伟利(1979—),女,博士,副教授,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: weiye51@ysu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

作物与土壤背景分割。这种方法可以较好的分割绿色作物与土壤,便于作物行检测,但耗时较长,对非绿色农田失效;基于HSI颜色模型的H分量算法将HSI颜色空间3个分量分离,选取色调分量H进行分割。这种方法中H分量与光照信息无关且可以有效抑制噪声影响,但不易于图像更好地分割,且耗时较长;基于YCrCb颜色模型的算法将RGB颜色空间转换成YUV颜色空间,再通过矩阵变换得到Cb分量,从而对图像进行分割。这种方法可以很好地分离土壤和绿色作物,而不受光照等因素影响,但缺点是复杂度较高,对非绿色作物失效。直线扫描的方法主要是对农作物与土壤分割后的二值图像,按照特定的步长,利用等面积三角形对图像左右两部分分别扫描或者利用作物行特征的扫描。这类方法精度高,抗干扰性强,但需要设定合适的步长参数,而且扫描工作量大,不具有广泛的适用性;Hough变换的方法主要是利用对二值图像作物行进行Hough变换。这类方法稳健性好,但运算效率低,实时性较差;随机算法是通过二值图像作物行区域选择定位点,随机抽取任意两点确定一条可能的待检测的直线,统计该直线在一定范围内的点数,若满足要求,则提取该直线。这类方法比Hough变换降低了复杂度,但容易受随机点选择的影响。

综上所述,已有方法不能适用于非绿色环境下的农作物导航,如耕种时期的农田,刚出芽的幼苗农田,秸秆较低且成熟的农作物农田等,使其应用受到限制。而且,直线扫描的方式受到图像分割效果等因素的影响较大,不能够满足稳定性要求。为了快速提取农机具视觉导航线,提出了一种基于暗原色的导航线提取算法,该算法利用暗原色进行灰度转化,再对图像利用形态学滤波和最大类间方差(Otsu)法对灰度图像进行分割滤波,然后利用垂直投影法提取感兴趣区域,最后利用感兴趣区域定位点进行最小二乘拟合得到导航线。

## 2 图像预处理与分割

在智能导航及场景理解中<sup>[11-12]</sup>,为了快速及准确地提取场景的特征,需要对图像进行预处理。农业视觉导航中,农田环境复杂多变,而彩色图像包含信息多,数据量大。为了快速提取导航线信息,首先需要对图像进行预处理,进而对图像进行有效地分割,从而有助于感兴趣区域的提取。

### 2.1 农田图像的暗原色灰度化

农田图像中,农作物大多为绿色等鲜艳颜色,也有少部分暗色情况,且农机具导航图像天空区域较少。根据暗原色原理,如果图像中包含:1)色彩鲜艳的物体或表面;2)颜色较暗的物体或者表面,则这些物体或表面的RGB三个通道中任意一个通道的值必然很小,其对应的暗原色图像也总是灰暗的<sup>[13]</sup>。因此,在农田图像中农作物暗原色图像或土壤的暗原色图像,两类必然有一类灰暗的。

任何颜色都由红、绿、蓝三原色组成,假设一点的颜色为 $RGB(r,g,b)$ ,通过对该点的三个颜色通道值按一定的规则进行计算得到一个值 $gray$ ,将原 $RGB(r,g,b)$ 中的 $r,g,b$ 统一用 $gray$ 替换,形成新的颜色 $RGB(gray,gray,gray)$ ,即得到该点颜色的灰度值。

为使视觉导航具有更广泛的使用范围,基于上述暗原色原理和灰度化规则,对农田图像按以下步骤进行灰度化处理,并将此过程定义为图像的暗原色灰度化。

首先,对暗通道进行数学定义,任意输入的农田图像 $I$ ,每个像素的暗通道表示为

$$I^{\text{dark}}(x,y) = \min_{c \in \{r,g,b\}} I^c(x,y), \quad (1)$$

式中 $I^c(x,y)$ 表示像素坐标为 $(x,y)$ 的颜色通道, $I^{\text{dark}}(x,y)$ 表示像素坐标为 $(x,y)$ 的暗原色通道。

然后,遍历图像 $I$ 中的所有像素点,对每个像素点的3个颜色通道值进行大小比较,三个颜色通道分别为: $I^r(x,y)$ ,  $I^g(x,y)$ ,  $I^b(x,y)$ 。即按(1)式计算每个像素的灰度值,并最终得到其暗原色灰度化图像 $I_{\text{dark}}$ 。

为了评价提出的图像暗原色灰度化方法的性能,在Matlab(R2010b)软件环境下对比了2G-R-B和暗原色灰度化图像的运行时间和归一化直方图特征。如图1所示,图1(b)和1(c)分别对应图1(a)中典型绿色植物农田图像的2G-R-B和暗原色灰度化图像;图1(d)和1(e)分别表示1(b)和1(c)的归一化直方图。由图可知,将图1(a)分别转换到图1(b)和1(c)所用的时间分别为:0.532 s和4.267 s。图1(b)的直方图存在明显的波峰波谷,比图1(c)的直方图更容易进行阈值分割。同时,从图1中,明显看出暗原色灰度图土壤可以与绿色植物进行明显的区分,

2G-R-B 灰度图虽然也可以区分绿色植物与土壤,但轮廓不够清晰,尤其是绿色叶子部分,对原图像信息的反应不够准确,并且从运行速度及易分割上考虑,暗原色图像都比 2G-R-B 图像更适合区分农田图像中的农作物和土壤。

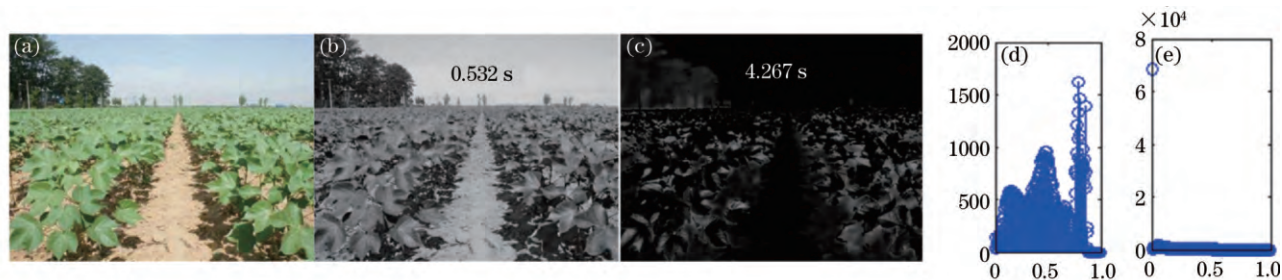


图1 灰度转换结果。(a)原图像;(b)暗原色灰度图;(c)2G-R-B灰度图;(d)暗原色灰度直方图;(e) 2G-R-B灰度直方图

Fig.1 Gray conversion results. (a) Original image; (b) dark channel gray image; (c) 2G-R-B gray image; (d) dark channel histogram; (e) 2G-R-B histogram

由于在现实生活中,也存在着一些非绿色环境的农业场景,因此确定暗原色灰度化方法对非绿色农田图像的适用性也很重要。图2为典型的非绿色农田图像,图2(b)为图2(a)的暗原色灰度图像,而在对图2(a)进行灰度转换时,2G-R-B模型则失效,如图2(c)所示。图2(d)和2(e)分别表示2(b)和2(c)的归一化直方图。由图可知,将图2(a)分别转换到图2(b)和2(c)所用的时间分别为:0.956 s和2.827 s。并且图2(d)所示的直方图存在明显的波峰波谷。因此,采用暗原色灰度化的转换方法能够更好地满足农机具视觉导航的实时性和对不同环境的适用性。

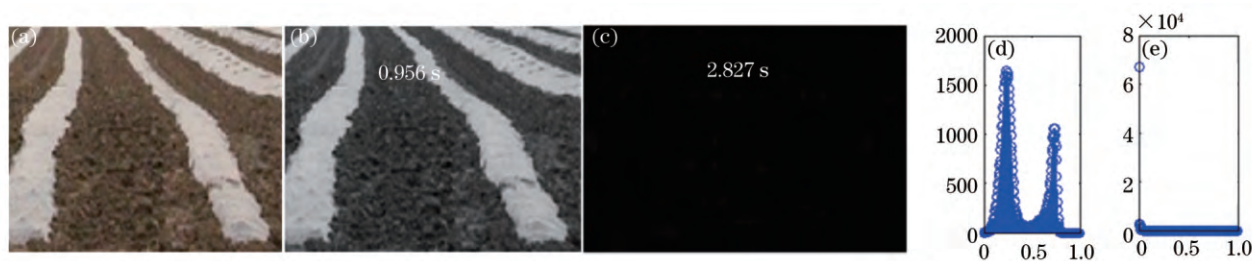


图2 暗原色灰度转换结果。(a)原图像;(b)暗原色灰度图;(c) 2G-R-B灰度图;(d)暗原色灰度直方图;(e) 2G-R-B灰度直方图

Fig.2 Gray conversion results. (a) Original image; (b) dark channel gray image; (c) 2G-R-B gray image (d) dark channel histogram; (e) 2G-R-B histogram

## 2.2 基于形态学滤波和 Otsu 法的图像分割

为降低图像拍摄过程中产生的干扰,首先对灰度化后的图像进行腐蚀-中值滤波-膨胀处理。即对图像  $I_{\text{dark}}$  采用半径为 3 pixel 的圆盘状结构进行腐蚀,再通过 3 pixel×3 pixel 的窗口对图像进行中值滤波,最后通过半径为 3 pixel 的圆盘状结构进行膨胀,并且得到滤波后的灰度图像  $I_f$ 。

然后,采用 Otsu 法对图像进行二值化处理。由图 1(d)、2(d)可知,暗原色图像可以通过阈值分割的方法对图像进行二值化。考虑到农田图像存在光照、各处对比度不同及突发噪声等因素的影响,针对目标和背景有较大差别的图像,采用以下全局自适应阈值  $k$  对图像进行分割:

$$\begin{cases} \mu = \lambda_0 \times \mu_0 + \lambda_1 \times \mu_1 \\ \delta^2(k) = \lambda_0 \times (\mu - \mu_0)^2 + \lambda_1 \times (\mu - \mu_1)^2 = \lambda_0 \times \lambda_1 \times (\mu_1 - \mu_0)^2, \\ \delta^2(k_0) = \max\{\delta^2(k)\} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\mu$  为图像的总平均灰度,  $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$  分别为前景、背景所占的比例,  $\mu_0$ 、 $\mu_1$  分别为前景、背景的灰度平均值,  $\delta^2(k)$  为前景和背景的方差,  $k_0$  为最佳阈值。

接下来,对灰度图像  $I_f$  的每个像素按(3)式判断,即可得到二值图像  $I_{bw}$  :



$$I_{bi}(x,y)=\begin{cases} 0, & I_f(x,y)<k_0 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

最后,考虑到农田环境的特点,所提形态学方法对二值化后的图像进行再次滤波,以去除二值图像中存在的颗粒状噪声、缺株或多株造成的噪声等干扰。具体滤波过程为:先利用半径为5 pixel的圆盘状结构进行形态学开运算,再用5 pixel×1pixel的结构元素进行形态学闭运算,得到最终的二值图像 $I_b$ 。通过上述滤波操作,可突出目标区域的纵向结构,填充作物行或背景中的孔洞,去除图像模糊的影响,并且不改变目标的位置和形状,提高算法整体的稳定度。

图3为上述基于形态学滤波和Otsu法的图像分割得到二值图像的过程。图3(a)为图2(a)的灰度图,经过第一次滤波处理后得到图3(b),再利用Otsu法对图像进行阈值分割得到二值图,如图3(c)所示,然后对二值图像第二次滤波得到图3(d)。因为农田场景为非绿色情况,要提取土壤部分,则需要将上述过程得到的二值图像,进行取反处理,即 $I_b \sim I_b$ ,得到图3(e),从而进行下一步的处理。

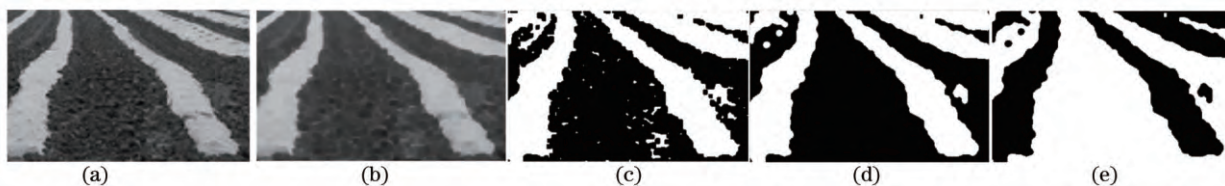


图3 二值分割过程。(a)灰度图;(b)第一次滤波结果图;(c)二值图;(d)第二次滤波二值图;(e)二值图取反  
Fig.3 Two value segmentation process. (a) Gray image; (b) the first filter result; (c) two value image; (d) the second filter result; (e) negation two value image

### 3 基于垂直投影法的中心导航线提取

图4为对二值图像进行导航线提取的过程。以图1(a)为例,得到二值图像后,导航线提取主要分为三步:利用垂直投影[图4(a1)]提取感兴趣区域[图4(a2)];再提取导航定位点,如图4(b)所示,最后基于最小二乘法提取导航线,如图4(c)。

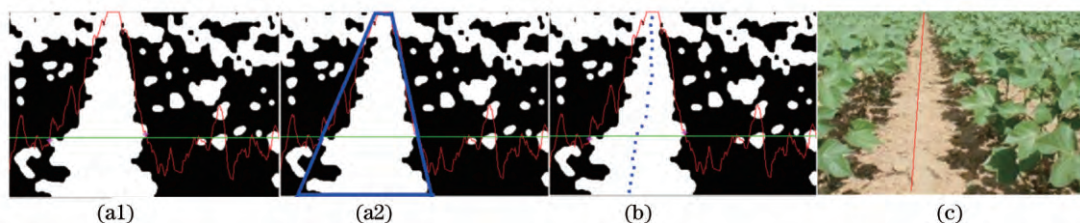


图4 二值图像导航线提取过程。(a1)垂直投影图;(a2)感兴趣区域;(b)定位点;(c)导航线  
Fig.4 Two value image navigation line extraction process. (a1) Vertical projection image; (a2) interested area; (b) anchor point; (c) navigation line

#### 1) 感兴趣区域提取

一般情况下,农机具正常行驶时,摄像头拍摄的视野内正前方为农机具行驶的方向,农机具所用的摄像头拍摄的视野也比较近,且一般采用垄间区域作为导航区域。根据这一特点,从农机具正前方的土壤区域中提取导航线。使二值图像中作物行为黑色,垄间土壤区域为白色,利用垂直投影法对白色像素进行投影,可以得到导航感兴趣的区域。

如图4(a1)所示,红色波形为垄间土壤的灰度投影,设置一个高度阈值 $T$ (图中绿色直线),求取红色波形与高度阈值 $T$ 的交点的横坐标 $X=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ( $n$ 为交点的个数)。寻找灰度投影值在较大位置区域的横坐标 $[V_l, V_r](V_l < V_r)$ ,若有多个峰值区域,则取峰值区域较大的位置。然后,寻找距离灰度投影值在较大位置区域两侧最近的交点 $X_l, X_r$ ( $l < r$ ),如图4(a1)中紫色点所示。再利用这4个点的信息确定一个梯形[4(a2)中蓝色梯形],即可得到感兴趣区域;

#### 2) 导航定位点提取

为了获取导航区域的中间定位点,首先,将二值图像分成若干个水平条图像,为减少计算量,使每个水平条包含  $D$  个像素行。设图像大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ ,将图像划分为  $d = \lceil M/D \rceil$  个水平条。然后,依次对每个水平条做垂直投影,寻找垂直投影图中投影值最高位置的区域,若有多个区域,则取这些区域的中值。再对这些区域的横坐标求平均值,从而确定每个水平条的导航定位点  $Q_i(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, d)$ ,如图4(b)所示;

### 3) 导航线提取

针对每个水平条的导航定位点够成的导航定位点集  $Q(x, y)$ ,需要将其拟合成直线,即导航线。然而, Hough 变换、直线扫描等方式耗时较多,考虑到导航实时性的要求,采用最小二乘拟合的方法,对这些点进行拟合,从而得到导航线,如图4(c)红色直线所示,直线方程为

$$y = ax + b. \quad (4)$$

## 4 实验结果与分析

在 3 GHz PC 机的 Windows 7 操作系统环境下,利用 Matlab2010(b)软件进行仿真实验。由于不同摄像机拍摄到的图像大小不同,采用大小在  $500 \text{ pixel} \times 300 \text{ pixel}$  和  $680 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$  之间的图像进行实验。为了验证所提算法对不同类型农田的适用能力,分别选取不同类型的农田图像,包括存在绿色农作物的图像、非绿色农作物的图像、农田道路图像等。图5为部分绿色农作物图像导航线提取结果;图6为部分非绿色农作物图像导航线提取结果;图7为田间道路图像导航线提取结果。由图可知,所提算法对不同类型的农田图像都能较准确地提取出导航线,具有广泛的适用性。为了验证所提算法对不同光照条件的农田的适用能力,针对晴天和阴天情况进行实验,如图8(a)、8(b)所示,所提算法在晴天和阴天情况下都能提取出农机具的导航线。如图8(c)、8(d)所示,也选取了农田区域有水和无水的情况进行了对比实验,实验表明在农田中有水与无水对导航线的提取影响较小。为了验证所提算法的抗干扰性及稳定性,对有雾环境、抖动产生干扰的情况、有人干扰、存在大量积水的情况进行了实验,实验结果如图9所示。由于暗原色原理广泛应用于去雾算法,且具有较好的效果,从图9的实验结果中可以看出,基于暗原色的导航线提取对雾天环境及抖动情况具有一定的抗干扰能力。



图5 不同环境的绿色农田导航线提取结果

Fig.5 Navigation line of different environments

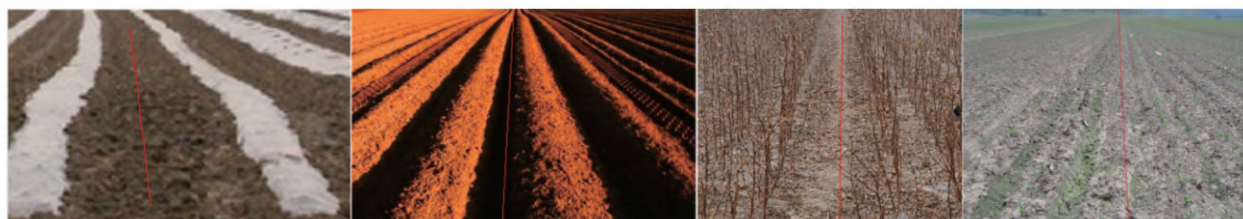


图6 不同环境的非绿色农田导航线提取结果

Fig.6 Navigation line of different environments

为了统计所提算法的效率,对 50 幅图像利用所提算法和传统的 Hough 变换在 Matlab2010(b)软件环境下提取导航线的算法损耗时间进行了统计,提取导航线的各个阶段的对比结果如表 1 所示。由表可知,所提出的暗原色灰度转换平均损耗时间约为 2G-R-B 损耗时间的 5 倍,整体算法所损耗时间约是传统 Hough 变换的 3 倍,根据文献[14]可知,文献中算法速度是传统 Hough 变换的 2 倍即可满足实时性要求,又由于实验仿真是在 Matlab2010 软件环境下运行,根据经验当算法在 C 语言环境下运行时,速度将会提高至少 10 倍。由此



可见,所提算法速度较快,可以认为所提算法可以满足实时性的基本要求。由此可知,所提算法和目前已有的算法相比,所提算法适用于不同环境下的农田图像,而且还可以应用于农田的道路图像,对农机具视觉导航具有更重要的意义,因此,所提算法具有广泛的适用性。



图7 不同环境的农业道路导航线提取结果

Fig.7 Navigation line of different road environments



图8 不同条件下农田导航线提取结果。(a)晴天;(b)阴天;(c)农田中无水;(d)农田中有水

Fig.8 Navigation line of different conditions. (a) Sunny day; (b) cloudy day; (c) without water in the farmland image; (d) with water in the farmland image



图9 不同干扰下农业环境导航线提取结果。(a)有雾环境;(b)抖动情况;(c)有人干扰;(d)存在大量积水

Fig.9 Navigation line of different interferences. (a) Fog environment; (b) Jitter; (c) with interference of human; (d) with a lot of water

表 1 导航线提取所耗时间统计表

Table 1 Time of navigation line extraction statistics

Method	Dark channel	2G-R-B	Proposed method	Hough transformation
Average time loss /s	0.744	3.547	1.325	4.274

为了对所提算法的精确度进行评价,将所提算法与SF算法、Hough变换算法、随机算法进行对比,对比结果如图10所示,红色直线为导航线。从实验结果中可知,上述几种方法均可以正确的提取农田图像的导航线。表2将4种算法提取的直线的参数进行了比较,由表2可知,4种算法斜率最大差值为1.8712,截距最大差值为345.3704,由此可知,所提算法所得到的直线参数与其他三种算法相差较小,能够满足视觉导航所需要的精度要求。

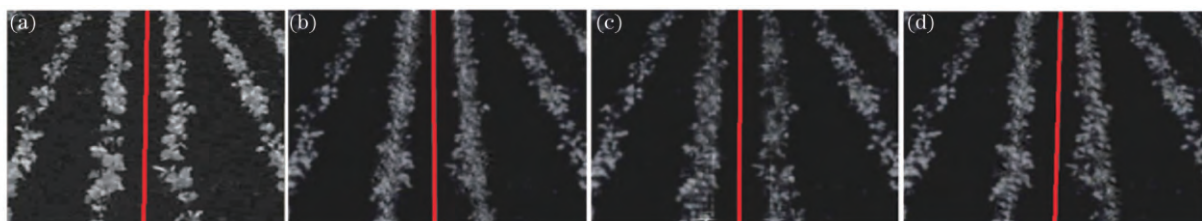


图10 不同算法导航线提取结果。(a)所提算法;(b)SF算法;(c) Hough变换算法;(d)随机算法

Fig.10 Navigation line of different methods. (a) Proposed method; (b) SF method; (c) Hough transformation method; (d) random algorithm

表 1 不同算法直线参数比较

Table 1 Results of liner parameter comparison

Method	Slope $a$	Intercept $b$
Proposed method	-0.0134	327.0222
SF method	0.3764	337.6437
Hough transformation	-0.5168	348.9507
Random algorithm	-1.8712	672.3926

## 5 结 论

针对目前算法中大多选择颜色空间模型的超绿特征进行图像的灰度化再进行分割,而不能适用于非绿色环境下的农作物导航的问题,提出了一种基于暗原色原理的农田图像灰度化新方法,实现了农田图像中的农作物和土壤更好地区分,且暗原色灰度化的速度比 2G-R-B 灰度化速度快得多。又根据农机具航线所在位置的特点,提出了一种基于垂直投影法的中心导航线提取算法,该算法利用垂直投影的方法提取土壤感兴趣区域,而不需要通过处理各垄及作物行来获取导航线,利用最小二乘拟合提取导航线,相比基于区域生长的各个垄的定位点确定及 Hough 变换提取导航,所提算法速度更快,复杂度及计算量更小,既提高了速度,也保证了精度。总之,提出的基于暗原色的农机具视觉导航线提取算法对绿色农田环境、非绿色农田环境(如耕种时期的农田,刚出芽的幼苗农田,秸秆较低且成熟的农作物农田等)和农田道路环境的导航线提取均具有良好的效果,并且运算复杂度低,通过与其他算法的对比,所提算法在精度上可以满足农机具视觉导航的需求且速度上较其他算法更快,具有更广泛的适用性。

## 参 考 文 献

- 1 Liu Haitao, Guan Shengxiao, Qin Liang, *et al.*. Study on vision-based navigation system of intelligent-robot [J]. Computer Applications and Software, 2012, 27(12): 218-220,242.  
刘海涛,关胜晓,秦亮,等.智能机器人视觉导航系统的研究[J].计算机应用与软件,2010,27(12): 218-220.
- 2 Li Mingxuan, Zhang Man, Meng Qingkuan, *et al.*. Rapid detection of navigation baseline for farm machinery based on scan-filter algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 41-47.  
李茗萱,张漫,孟庆宽,等.基于扫描滤波的农机具视觉导航基准线快速检测方法[J].农业工程学报,2013,29(1): 41-47.
- 3 Ji Ying, Liu Gang, Shen Wei. A method based on machine vision obtain a guidance directrix [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3362-3367.  
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): 3362-3367.
- 4 Yuan Zuoyun, Mao Zhihui, Wei Qing. Orientation technique of crop rows based on computer vision [J]. J China Agricultural University, 2005, 10(3): 69-72.  
袁佐云,毛志怀,魏青.基于计算机视觉的作物行定位技术[J].中国农业大学学报,2005,10(3): 69-72.
- 5 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.
- 6 Jiang Guoquan, Ke Xing, Du Shangfeng, *et al.*. Detection algorithm of crop rows based on machine vision and randomized method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 85-88.  
姜国权,柯杏,杜尚丰,等.基于机器视觉和随机方法的作物行提取算法[J].农业机械学报,2008,39(11): 85-88.
- 7 Gao Guoqin, Li Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K-means algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 25-33.  
高国琴,李明.基于K-means算法的温室移动机器人导航路径识别[J].农业工程学报,2014,30(7): 25-33.
- 8 Meng Qingkuan, He Jie, Qiu Ruicheng, *et al.*. Crop recognition and navigation line detection in natural environment based on machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0715002.  
孟庆宽,何洁,仇瑞承,等.基于机器视觉的自然环境下作物行识别与导航线提取[J].光学学报,2014,34(7): 0715002.
- 9 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): 176–180.
- 林伟明, 胡云堂. 基于 YUV 颜色模型的番茄收获机器人图旬分割方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 176–180.
- 10 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 Machinery, 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.
- 11 Ding Weili, Li Yong, Wang Wenfeng, *et al.*. Depth estimation of urban road image based on contour understanding [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0715001.
- 丁伟利, 李 勇, 王文峰, 等. 基于轮廓特征理解的城市道路图像深度估计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0715001.
- 12 Ding Weili, Li Yong, Wang Wenfeng, *et al.*. Vanishing point detection algorithm for urban road image based on the envelope of perpendicular and parallel lines [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015002.
- 丁伟利, 李 勇, 王文峰, 等. 基于垂线包络和平行线对的城市道路图像消失点检测算法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015002.
- 13 K M He, J Sun, X O Tang. Single image haze removal using dark channel prior [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341–2353.
- 14 Yuan Ting, Ren Yongxin, Li Wei, *et al.*. Navigation information acquisition based on illumination chromaticity stability analysis for greenhouse robot [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 161–166.
- 袁 挺, 任永新, 李 伟, 等. 基于光照彩色稳定性分析的温室机器人导航信息获取[J]. 农业工程学报, 2012, 43(10): 161–166.

栏目编辑: 张浩佳