

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.005

基于视觉识别的小麦收获作业线快速获取方法

赵 腾^{1,2} 野口 伸² 杨亮亮² 石井 一畅² 陈 军¹

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 北海道大学农学院车辆机器人实验室, 北海道 060-8589)

摘要: 针对小麦生长分布不均等情况下激光作业线检测系统精度偏低的问题,提出了基于视觉的小麦收获作业线快速获取的方法。通过对成熟期麦田的彩色图像进行对比度增强和降低亮度的处理,将其转换为灰度图像,利用阈值分割方法分离已收获与待收获区域,对二值图像采用互相关函数法检测已收获与待收获区域的分界点,利用Hough变换法拟合目标直线。所提方法在激光作业线识别系统的基础上扩大了视野范围,并限制了图像处理的范围,试验结果表明该方法对小麦收获作业线的检测结果平均偏差为2.35 cm,标准差为3.26,能够满足小麦收获导航线识别的要求,是一种有效的检测算法。

关键词: 小麦; 收获; 视觉识别; 导航线; 激光作业线识别系统; 互相关函数法

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0032-06

Fast Edge Detection Method for Wheat Field Based on Visual Recognition

Zhao Teng^{1,2} Noboru Noguchi² Yang Liangliang² Kazunobu Ishii² Chen Jun¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Vehicle Robotics Laboratory, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Hokkaido 060-8589, Japan)

Abstract: To overcome the shortages of the developed method for edge detection system based on laser rangefinder (LF), a vision based fast edge information acquiring algorithm for the LF system was proposed. Inverse perspective mapping (IPM) geometrical transform was used to remove the perspective effect on original mature wheat field. The image after IPM transformation was then processed by illumination reduction and contrast enhancement to make the difference between cut and uncut wheat field more evidently, and then transferred into grayscale image. Threshold segmentation method based on histogram was used to convert grayscale image into a binary image, so as to distinguish the cut and uncut wheat. The target points were clustered by adopting cross correlation method on each horizontal scan line in the binary image, and then Hough transform was used to detect the edge line between cut and uncut wheat. The proposed method extended the field of view of the edge detection system based on LF, and owing to the LF system the region of interest area for image processing was well restricted. The results showed an average deviation of 2.35 cm, with standard deviation of 3.26. This edge detector providing satisfied performance under different conditions, was an effective edge detection method, and met the demand of recognition for navigation path in wheat harvesting.

Key words: wheat; harvesting; visual recognition; navigation line; crop edge detection system based on laser rangefinder; cross correlation function method

引言

农业机械自动导航是精准农业的核心关键技

术^[1-2]。农作物收获具有收获速度较慢、障碍物少、环境简单等特点,作业具有重复性^[3]。因此如何精确地识别出收获与未收获作物间的边界线,有效避

收稿日期: 2016-06-03 修回日期: 2016-08-19
基金项目: 高等学校博士学科点专项基金项目(20130204110020)
作者简介: 赵腾(1987—),女,博士生,主要从事农业机械导航研究,E-mail: zhaoteng@nwsuaf.edu.cn
通信作者: 陈军(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事农业机械自动化研究,E-mail: chenjun_jdxy@nwsuaf.edu.cn

免收获过程中的漏割、重割现象,并防止出现收获机非满幅作业等情况,成为国内外学者深入研究的一个重要课题。目前,作物线检测的方法主要有基于测距^[4-5]和基于视觉的^[6-7]两种判定方法。

张卫等^[8]采用最大类间方差法分割图像,利用中间线检测定位基准线。OKAMOTO 等^[9]将 RGB 色彩模式中的 g/r 值小于 50% 的部分置零,以此来寻找目标点。BENSON 等^[10]针对是否存在阴影的问题,提出了自适应的阈值分割算法。CHO 等^[11]对水稻田进行逆透视投影变换,还原作物行平行的状态,消除了视角误差。沈明霞等^[12]采用最小距离分类器对农作物区和非农作物区域的形态特征进行分类。丁幼春等^[13]针对垄行、作业区域与未作业区域的标识线提出一种旋转投影算法。陈娇等^[14]采用垂直投影法提取导航定位点,采用改进的 Hough 变换实现田间多垄线识别。CHOI 等^[15]依据激光测距的原理对作物高度进行重构,实现作物行的定位。ZHAO 等^[16]应用激光传感器对麦田信息进行获取,采用最大类间方差的方法寻找收获边界点,并采用最小二乘法对边界线进行拟合。

以往图像检测的研究主要针对小麦喷药、除草等初期、中期的管理作业,以及收获前期的导航目标检测,但对于成熟小麦收获边界线的检测,该类研究方法很难达到理想的效果,同时算法的鲁棒性也难以保证。

本文针对 ZHAO 等^[16]开发的基于激光扫描的作物收获线识别系统(LF)在小麦生长稀疏、中期作业车辙痕迹存在等情况下,无法正确检测出导航线的问题,提出基于激光与视觉相结合的小麦收获作业线快速获取的方法,通过激光扫描作物收获线识别系统判定作物边界位置,限定图像的感兴趣区域,检测麦田图像中边缘信息,确定收获作业引导线的位置,进而通过摄像机标定模型得到收获机与作物边缘的相对位置关系,为实现其自主运动提供导航信息。

1 作物边缘识别系统

基于激光扫描的小麦收获作业线的识别系统^[16],其静态识别精度在 ± 13 cm 以内,但某些情况下,激光扫描识别系统不能有效地提取出作物收获边缘线,如小麦稀疏种植区域、小麦中期管理作业时车辆通过后留下的轮辙等情况会使激光扫描识别系统的精度急剧下降,其获取的数据呈一系列无规则的散乱点,较难计算出实际已收获与待收获区域的边缘,如图 1 所示。此外,由于激光传感器的角分辨率为 0.25° ,根据激光测距原理知,距离越远,目标

点信息越容易丢失。激光扫描识别系统的视野范围较窄,采用视觉的方法可以扩大视野范围,但增大了图像信息量,而研究目标只需要提取已收获与待收获区域的作业线,大量数据会延长系统处理时间,因此采用激光扫描系统设定图像感兴趣区域,可大大节约数据处理的时间,也扩大了收获机前方的视野范围。

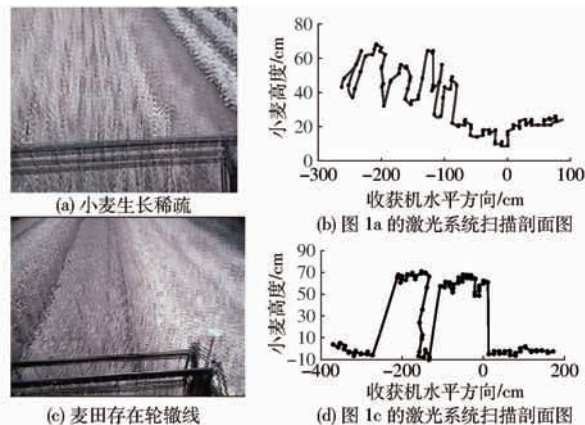


图 1 激光边缘检测精度低的情况

Fig. 1 Conditions of low accuracy on edge detection by LF system

本文采用 USB 接口的摄像机(ITC-100R 型, ITS 公司)进行图像采集,输出彩色图像,图像大小为 640 像素 $\times$ 480 像素。摄像机安装在洋马 AG1100 型联合收获机驾驶舱顶部,摄像机安装位置如图 2 所示,其中设定摄像机坐标系为 (O_c, X_c, Y_c, Z_c) ,摄像机镜面的右方为 X_c 方向。 (O, X, Y, Z) 为世界坐标系,原点 O 为摄像机坐标系原点在地面上的投影点, X 方向与 X_c 方向一致。

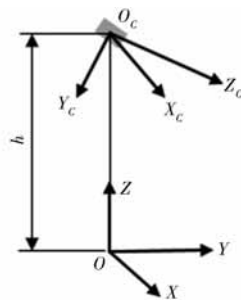


图 2 摄像机安装位置及坐标示意图

Fig. 2 Camera installation and coordinate systems

1.1 摄像机标定

摄像机的几何成像模型决定了三维空间物体表面的点与二维图像中对应点的变换关系,成像模型的参数即为摄像机参数,求解摄像机参数的过程即为摄像机标定的过程。摄像机参数包括了主点和焦距等与摄像机内部结构相关的参数,以及透镜的横向畸变和切向畸变参数^[17]。在图像识别的很多应用场景中,消除图像畸变是图像预处理的首要问题。研究采用张正友提出的使用平面棋盘网格进行摄像

机标定的方法^[18],对摄像机参数进行标定。

1.2 逆透视投影变换

一般情况下,农田中小麦是平行种植的,但是由于视角误差,摄像机采集的图像平面中各行小麦将相交于一个消隐点,而不呈现出平行态。逆透视投影变换(Inverse perspective mapping, IPM)是车道检测^[19]、障碍物探测^[20]、人行道检测^[21]等研究中广泛应用的一个环节,运用摄像机位置与视野内目标物的定位关系,将原始图像变换到鸟瞰视图中,起到消除原图像的透视效果,还原目标原本的几何特点,有利于推导车辆与目标的相对位置关系。

本文采用逆透视投影变换,将图像转换到大地坐标系中,将图像由前向视角(Frontview)转换为鸟瞰视角(Birdview)。由目标图像的坐标,通过映射关系找到对应的原始图像坐标,然后将其值复制到目标图像。地面区域的实际大小与鸟瞰视图的大小成一定比例,即鸟瞰视图中一个像素的位置,在地面坐标上,也有相应的点与其对应。通过对应关系,每个前向畸变视图图像的像素都能够在鸟瞰视图中找到对应的位置,如图3所示,图3b为原始图像(图3a)经过逆透视投影变换后的效果。

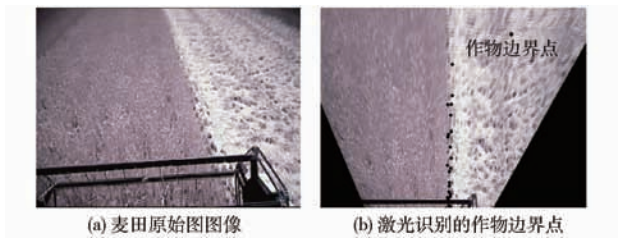


图3 激光测距仪与摄像机坐标系匹配

Fig.3 Coordinate matching of laser rangefinder and camera

1.3 摄像机与激光坐标系匹配

本文旨在研究一种激光传感器与视觉结合的小麦收获作业线识别方法,且基于激光扫描的作业线识别系统已经开发完成,因此需要将二者的坐标系进行匹配,以达到精确识别的目的。由于激光扫描作业线识别系统的精度已经得到验证,本研究中将以激光扫描系统的坐标系为基准,采用旋转和平移的方式将摄像机坐标上的信息转换到激光扫描系统的坐标系中,坐标系匹配^[17]计算式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \mathbf{R} \left(\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} - \mathbf{T} \right) \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 (x', y') ——麦田中某一点在激光坐标系内的坐标

(x_c, y_c) ——该点在经过透视转换后的鸟瞰图中的坐标

ϑ ——激光坐标系与摄像机坐标系间的夹角

(x_T, y_T) ——两坐标系在 x 轴和 y 轴方向上的平移坐标

$\mathbf{R}$ ——旋转矩阵 $\mathbf{T}$ ——平移矩阵

采用棋盘格标定法,首先利用摄像机检测棋盘格图像中的所有角点,然后在棋盘格标定板上所有角点的位置放置具有一定高度的细而直的木棒,并利用激光扫描作业识别系统求解出各木棒在激光坐标系内的坐标,则摄像机坐标中所有角点的坐标均与激光坐标系中木棒位置代表的角点坐标一一对应,通过多项式的求解,得到旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矩阵 $\mathbf{T}$ 。

通过式(2)完成激光坐标与图像坐标的匹配,图3为一次激光扫描内的作物边界点。通过对激光测得的作物边界点与逆透视投影变换后图像中作物边缘位置的比较,得出激光检测系统与图像的坐标匹配精度如表1所示,激光检测系统坐标与逆透视投影变换后图像坐标的平均偏差为 -0.234 mm ,标准差为 1.554 。如图3所示,基于激光检测系统所获取的作物边界点均分布在逆透视投影变换后图像中收获与待收获区域的分界线上,即以透视变换后的坐标为基准对作物收获进行引导,完全满足收获作业的需求。

表1 激光与摄像机坐标系匹配精度

Tab.1 Accuracy of matching coordinate

试验序号	平均值/mm	标准差
1	-0.7	1.883
2	-1.4	1.546
3	1.4	1.136
平均	-0.234	1.554

同时,基于激光扫描的作物收获线识别系统精度在图3中得到了进一步验证,即靠近收获机区域由激光扫描识别系统获取的作物边界点较为密集且精度高,远离收获机区域作物边界点较为稀疏且精度低。而基于视觉的作业线识别的视野要优于激光识别系统,采用视觉识别与激光识别相结合的方式能够扩大视野范围,更好的为收获机提供导航信息。

以往研究中,感兴趣区域(Region of interest, ROI)的选取主要为基于先验知识的选取和手动选取。本文基于激光传感器获取作物边界点位置 (x_0, y_0) ,并以该点为基准在图像中设定感兴趣区域。

2 作物边缘识别

田间采集到的作物图像背景较为复杂,会影响

对目标的提取,为了减少处理的信息量需对其进行图像预处理^[18]。

2.1 图像预处理

将彩色图像转换成灰度图像,可以消除算法对图像色彩的依赖。目前研究多采用超绿色法^[22-23]强调绿色、抑制其余两个分量的方法对图像进行强调处理。如图 4 所示,成熟麦田图像中,收获区与未收获区的绿色分量与红、蓝色分量的差别不大,此类方法并不适用。本研究采用降低整体亮度、增强对比度的方法,对感兴趣区域的已收获区域与待收获区域的差别进行强调处理(图 4b)。在图像增强的基础上,进行灰度化处理。并采用 3×3 的结构元素对灰度图像进行 2 次中值滤波,消除拍摄过程中产生的随机干扰。

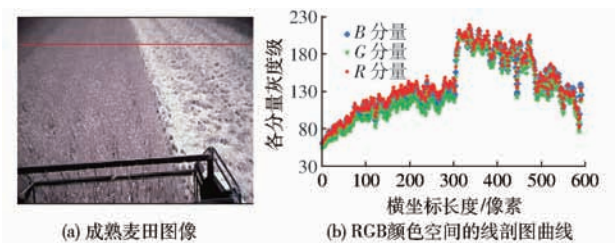


图 4 成熟麦田在 RGB 颜色空间的线剖图

Fig. 4 Line profile of mature wheat field on RGB color space

利用图像的灰度直方图进行分析,选择两峰间的波谷作为阈值对图像二值化处理(图 5),将已收获与未收获部分进行分割^[24]。并采用 1×3 的结构元素对图像进行 2 次开运算处理,既能填充图像中细小的空洞,又可以有效保护边缘信息,结果如图 5d 所示。其中,已收获区域为白色,待收获区域为黑色。

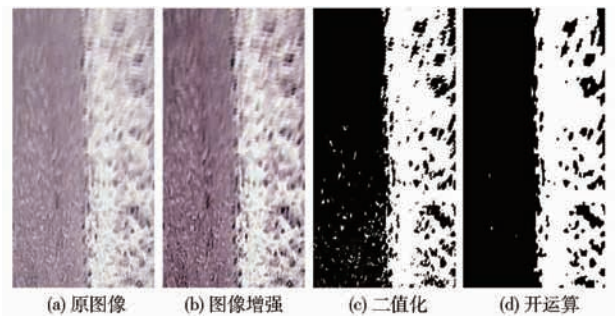


图 5 图像预处理

Fig. 5 Image preprocessing

2.2 收获与待收获小麦边界点的判定

相关函数是由比较 2 个随机信号的相似程度而引入的概念,但对确定信号同样适用^[25]。由于收获与未收获小麦的轮廓为阶跃型波形,由图 6 所示,建立阶跃模型函数 $f(x)$,采用互相关函数法对二值图像中的行数据自左向右进行作物边缘点的检测。阶

跃模型函数 $f(x)$ 与二值图像行采样序列 $g(i)$ 之间在 d 时刻的互相关系数 $\text{coef}(d)$ ^[15] 计算公式为

$$\text{coef}(d) = \frac{\sum_i (g(i) - m_g)(f(i - d) - m_f)}{\sqrt{\sum_i (g(i) - m_g)^2} \sqrt{\sum_i (f(i - d) - m_f)^2}} \quad (i = 0, 1, \dots, N - 1; d = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (5)$$

式中 $g(i)$ ——二值图像中一行扫描线上的数据点,超出范围的数据点忽略不计
 $f(i)$ ——阶跃模型上的点
 m_g, m_f ——相应数据序列的平均值
 $\text{coef}(d)$ ——阶跃模型 $f(x)$ 在偏移 d 时, $f(x)$ 与 $g(i)$ 之间的互相关系数

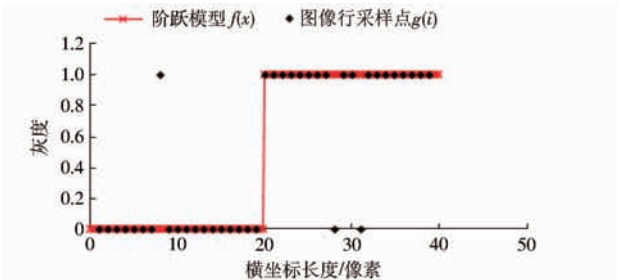


图 6 互相关函数模型

Fig. 6 Cross correlation function model

两个数据系列之间的相关程度越高,互相关系数越大。函数 $f(x)$ 偏移为 d^* 时,互相关系数达到最大值,该处图像行采样序列 $g(i)$ 对应的横坐标即为收获与未收获小麦的边界点位置。

图 7a 为在整个感兴趣区域内,采用互相关函数法自下而上对每 5 行采集扫描数据进行收获与未收获小麦边界点搜寻^[14]的检测结果。采用 Hough 变换法对检测到的目标点进行直线检测,拟合导航定位线,将检测到的导航定位线绘制到小麦图像的鸟瞰图中,结果如图 7b 所示。从图 7 可看出,本文算法检测到的导航定位线与实际作物边缘线吻合。在感兴趣区域内,每 5 行计算一次作物边界点,既保证了边界识别精度,又极大地提高了系统

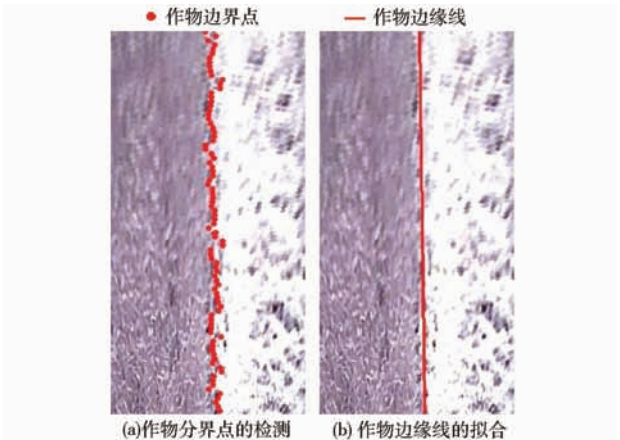


图 7 作物边缘线的检测

Fig. 7 Crop edge line detection

响应速度。

3 试验与结果分析

由于播种、施肥、灌溉不均等因素,同一地块中小麦生长密度并非均匀分布。如图 1a 所示,在局部区域小麦生长稀疏矮小的情况下,激光作物边缘识别系统显示出很大劣势,无法对收获机的作业进行引导。

本文针对上述问题,考虑了多种激光检测系统精度较低的情况,以激光检测为前提,根据作物的高度信息初步判定作物边界位置,并以此为基础,限定图像的感兴趣区域,通过图像增强、作物分界点检测等提取出作物边缘线,并与精度在 $\pm 2\text{ cm}$ 内的手持 GPS(Legacy-E 型, Topcon 公司)测量的实际作物边缘位置进行对比,对本文所述的基于视觉的作物边缘快速识别方法进行验证。根据小麦不同种植生长密度、不同光照等情况,设计了多种方案进行试验,其中包括小麦种植稀疏、强光照条件下收获与未收获部分对比不明显、存在中期管理作业车辆通过后留下的轮辙线、麦田旁种植其他作物(如大豆)、以及靠近地边有少许杂草等情况。

由于成熟期的已收获与待收获小麦之间的像素上差别不大,经过透视变换后,部分数据缺失,如细节轮廓特征等,部分情况下无法直观地分辨出收获作业线的位置,不利于对比检测到的结果与原始图像中作物边缘。为此,在本文讨论过程中,直接对原图像进行感兴趣区域选取,对收获机的导航作业线进行检测。

图 8 为不同情况下麦田作物边缘线的检测结果,图中直线为检测出的小麦收获作业线。表 2 为多种情况下本文方法获取的作物边界点与实际作物边缘位置对比,平均偏差为 2.35 cm ,标准差为 3.26 。在待收获区域生长密度偏低的情况下,采用互相关函数逐行检测收获与待收获作物间分界点时会出现较大误差,以及中值滤波对边缘信息的影响,造成在小麦种植稀疏和存在轮辙线的情况下对作物边界点误识别的现象,一些检测区域的最大偏差达到 15.8 cm 。

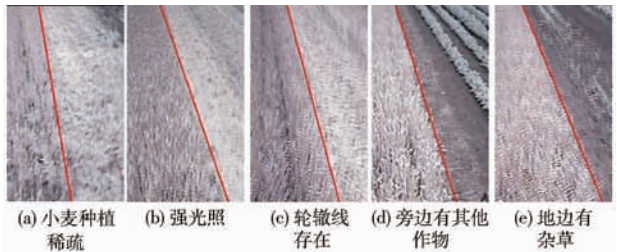


图 8 不同情况下作物边缘线的检测

Fig. 8 Crop edge detection under different conditions

表 2 视觉识别作物边缘的偏差
Tab.2 Deviation of the proposed crop edge detection method

序号	最大偏差/cm	平均偏差/cm	标准差
1	13	3.01	2.69
2	8.8	2.10	2.58
3	15.8	4.90	5.53
4	3.2	0.56	0.80
5	7.4	1.19	1.42
平均	9.6	2.35	3.26

针对上述 5 种情况,以及小麦种植分布均匀的情况下,对本文提出的算法的检测结果进行了整理,小麦收获边缘线的平均正确识别率为 97.7% ,如表 3 所示。但是在小麦种植稀疏的情况下,收获边缘线的正确识别率偏低,为 92% ,这是由于植物生长不规则,小麦叶片的延伸方向及程度各不相同,作物行边缘呈非理想化的直线,因此在拟合作物边缘线时会出现误差。此外由于小麦生长密度过低,待收获区域内相邻小麦植株间存在空隙过大,进行图像增强处理后仍难以区别已收获与待收获区域,造成检测精度下降。

表 3 作物边缘识别正确率
Tab.3 Correct recognition rate of crop edge detection

数据组	测试帧数/帧	正确率/%
均匀种植	500	100
强光照	500	98
种植稀疏	300	92
存在轮辙线	500	97
旁边种植其他作物	500	100
地边有少许杂草	300	99
平均值	433	97.7

尽管某些情况下正确识别率偏低,但整体平均估计精度为 97.7% ,因此本文提出的作物边缘线识别方法可以在作物生长分布不均匀、周围存在噪声等情况下,有效检测出作物边缘线,验证了该算法对作物收获作业线识别的准确性,满足农业的需求。

4 结论

(1)提出了一种以激光识别为基础,运用图像处理对作物收获边缘线进行快速获取的方法。通过激光测距设定图像感兴趣区域,大大缩小了图像处理的范围,节约了计算时间。

(2)利用增强对比度、降低整体亮度的方法将彩色图像转换为灰度图像,根据灰度直方图实现收获与待收获小麦分离。

(3)采用互相关函数法对已收获与待收获作物区域间的分界点进行识别,并通过 Hough 变换对收

获作业线进行拟合。

(4)对周围种植其他作物、生长稀疏、强光照下

的麦田进行检测表明,该算法均能有效的检测出收获作业线,具有较强的抗干扰性。

参 考 文 献

1 胡静涛,高雷,白晓平,等. 农业机械自动化导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10):1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):1-10. (in Chinese)

2 KONDO N, MONTA M, NOGUCHI N. Agricultural robots (I): Fundamentals and theory [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.

3 OLLIS M, STENTZ A. First results in vision-based crop line tracking[C]//Proceedings of the 1996 IEEE Conference on Robotics and Automation, 1996: 951-956.

4 SHEN B M, SATOW T, HIRONAKA K, et al. Development of laser crop row sensor for automatic guidance system of tractor-mounted implements [J]. Journal of JSAM, 2008, 70(6):90-96.

5 薛金林,张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J]. 农业机械学报, 2014,45(9):55-60.
XUE Jinlin, ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9):55-60. (in Chinese)

6 YIN X, NOGUCHI N, ChOI J M. Development of a target recognition and following system for a field robot [J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2013, 98:17-24.

7 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): 0715002-1-0715002-7.
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): 0715002-1-0715002-7. (in Chinese)

8 张卫,杜尚丰. 机器视觉对农田中定位基准线的识别[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(4):75-77.
ZHANG Wei, DU Shangfeng. Machine vision recognizing position baseline in cropland [J]. Journal of China Agricultural University, 2006,11(4):75-77. (in Chinese)

9 OKAMOTO H, HAMADA K, KATAOKA M, et al. Automatic guidance system with crop row sensor [C]//Automation Technology for Off-Roads Equipment, Proceedings of the 2002 Conference, ASAE Paper No. 701P0502, 2002: 307-316.

10 BENSON E R, REID J F, ZHANG Q. Machine vision-based guidance system for agricultural grain harvesters using cut-edge detection[J]. Biosystem Engineering, 2003, 86(4):389-398.

11 CHO W, HIDA M, SUGURI M, et al. Vision-based uncut crop edge detection for automated guidance of head-feeding combine [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(2):97-102.

12 沈明霞,李秀智,姬长英. 基于形态学的农田景物区域检测技术[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1):92-94.
SHEN Mingxia, LI Xiuzhi, JI Changying. Detection of areas of cropland scenery using morphology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1):92-94. (in Chinese)

13 丁幼春,王书茂,陈度. 基于图像旋转投影的导航路径检测算法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8):155-160.
DING Youchun, WANG Shumao, CHEN Du. Navigation line detection arithmetic based on image rotation and projection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8):155-160. (in Chinese)

14 陈娇,姜国权,杜尚丰,等. 基于垄线平行特征的视觉导航多垄线识别[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):107-112.
CHEN Jiao, JIANG Guoquan, DU Shangfeng, et al. Crop rows detection based on parallel characteristic of crop rows using visual navigation [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):107-112. (in Chinese)

15 CHOI J M, YIN X, YANG L L, et al. Development of a laser scanner-based navigation system for a combine harvester [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2014, 7(1):7-13.

16 ZHAO T, NOGUCHI N, YANG L L, et al. Development of uncut crop edge detection system based on laser rangefinder for combine harvesters [J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2016, 9(2):21-28.

17 BRADSKI G, KAEHLER A. Learning openCV [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

18 ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

19 MIGUEL Oliveira, VITOR Santos, ANGEL D Sappa. Multimodal inverse perspective mapping [J]. Information Fusion,2015,24: 108-121.

20 SIMOND N, PARENT M. Obstacle detection from IPM and super-homography [C]//Proceedings of IEEE IROS International Conference on Robot and System, 2007: 4283-4288.

21 MA Guanglin, PARK Su-Birm, Stefan. MULLER-Schneiders, et al. Vision-based pedestrian detection-reliable pedestrian candidate detection by combining IPM and a 1D profile[C]//Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2007: 137-142.

22 张红霞,张铁中. 麦田多列目标图像检测算法[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(2):62-66.
ZHANG Hongxia, ZHANG Tiezhong. Detection algorithm for multi-centerline of wheat by image processing [J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(2):62-66. (in Chinese)

23 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): 12-17.
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 CSAE, 2013,29(10):12-17. (in Chinese)

24 饶洪辉,姬长英. 基于标记信息的 Hough 变换检测早期的作物行中心线[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3):146-150.
RAO Honghui, JI Changying. Crop-row detection using Hough transform based on connected component labeling [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):146-150. (in Chinese)

25 沈元隆,周井泉. 信号与系统[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003: 119-121.