

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.002

# 基于定向摄像头的大拱棚运输车视觉导航研究

李天华<sup>1,2</sup> 吴增昊<sup>1</sup> 廉宪坤<sup>1</sup> 侯加林<sup>1,2</sup> 施国英<sup>1,2</sup> 王 奇<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

**摘要:** 针对大拱棚中运输车导航问题,提出了一种适用性更高的导航方法。为了规避叶间空隙对 Hough 直线变换精度造成的影响,使用道路尽头横向中心点作为导航信息标定点,搭建摄像头云台使得摄像头视轴始终与道路平行。使用色度法对作物与道路进行分割处理,通过面积筛选所得的轮廓点集,能够准确计算出道路尽头的横向中心点像素坐标,从而得到运输车的位姿信息。通过运动学建模对运输车进行了轨迹仿真,得到了运输车不同速度下对识别误差的动态响应。基于 Raspberry Pi 平台搭建了导航信息提取装置,在不同道路长度的拱棚中对比了本文方法与 Hough 变换法的识别精度,并使用不同类型摄像头进行了静态导航信息提取实验,同时在不同速度进行了运输车的直线行驶实验。静态实验表明,相比于传统 Hough 变换,该导航方法能够显著提高识别精度,使用长焦摄像头比普通摄像头识别精度平均提高了 25.7%,导航线平均识别偏差为 2.4 cm,检测速率为 240 ms/f,具有较高的精度和实时性。行驶实验表明,该导航方法在不同速度下均能保证较小的稳态误差,能够满足生产要求。

**关键词:** 视觉导航; 色度法; 路径检测; 运动学仿真; 摄像头云台

**中图分类号:** S24      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0008-06

## Navigation Line Detection for Greenhouse Carrier Vehicle Based on Fixed Direction Camera

LI Tianhua<sup>1,2</sup> WU Zenghao<sup>1</sup> LIAN Xiankun<sup>1</sup> HOU Jialin<sup>1,2</sup> SHI Guoying<sup>1,2</sup> WANG Qi<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China)

**Abstract:** To solve the key prerequisite of greenhouse carrier vehicle navigation, a new navigation method was proposed based on fixed direction camera. A pan-tilt camera was constructed to collimate the vision line to corridor's center line with geomagnetic sensor and digital servo. The angle error was detected by geomagnetic sensor and the error was compensated by servo. The drawback of Hough transform was avoided by using new method of picture processing. The vision system ran in Raspberry Pi based on OpenCV in Linux. It distinguished corridor and crop by value of hue instead of Excess—Green method and the end point of corridor was got by area of screening. By using the Ackerman principle, the vehicle's position and attitude angle can be received. The dynamic response was got by modeling the equation of vehicle and simulating the movement of vehicle at different vehicle speeds. The experiment was done in real greenhouse which was divided into two parts, including the static experiment and dynamic experiment. The error of navigation information was obtained by processing the picture in fixed platform and a control experiment with Hough transform. The vehicle can drive automatically at different speeds in greenhouse. The results showed that the average time cost of this method was less than 240 ms/f, the average detection error of the navigation line was 2.4 cm, and the long-focus camera can reduce the error by 25.7%, which indicated that the method was available to get navigation line with appropriate accuracy and instantaneity.

**Key words:** vision navigation; hue; corridor detection; kinematic simulation; pan-tilt camera

收稿日期: 2018-07-02    修回日期: 2018-08-15

**基金项目:** 国家特色蔬菜产业技术体系项目(CARS24D01)、山东省现代农业产业技术体系蔬菜创新团队项目(SDAIT0202211)和山东省农业重大应用技术创新项目(鲁财农指(2015)16号)

**作者简介:** 李天华(1976—),男,副教授,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 13518683945@163.com

## 0 引言

设施农业是一种高效的现代农业生产方式。大拱棚由于其纵向长度长,使得人力运输劳动量大、效率低,自动驾驶运输车的使用能够降低劳动强度,提高工作效率。目前运输车的导航方式主要分为轨道导航和道路信息导航两种。其中轨道导航具有运行稳定、安装方便等优点,但轨道铺设使成本增高,影响整地作业;道路信息导航则是通过提取棚内道路特征信息获得导航路径,尽管目前业内已展开大量相关研究<sup>[1-9]</sup>,但由于大棚内复杂的背景环境,使得导航信息难以提取,因此尚未广泛用于生产<sup>[10-12]</sup>。文献[13]中使用最小二乘法对垄间加热管进行导航线的检测,具有较高的准确性和快速性,但只适用于装有加热管的大棚。文献[14]使用超绿法进行作物与道路的区分,并使用了改进型的 Hough 变换获得导航线,适用于多种大棚环境,但识别精度较低。文献[15]利用道路与作物冠层外表面的平整度差异区分道路,具有较高的精确度,但只能用于道路平整度较高的大棚。

本文提出一种具有较高适应性的导航方法,针对大拱棚中作物密集、背景信息复杂的特点,从识别道路尽头横向中心入手,避免复杂背景信息对于实时直线拟合的干扰,同时搭建摄像头云台补偿车体运动带来的视轴角度变化,并通过道路尽头横向中心点的像素坐标获得导航信息。

## 1 导航原理

基于 Hough 变换的导航信息提取方法会由于阴影和叶片的影响存在很大的噪声<sup>[16]</sup>,特别是叶片稀疏时导航线拟合程度差,为了排除这种处理的干扰,规避对近处道路边缘的识别,选取道路尽头的横向中心点作为标定对比点。由于摄像头视轴在小车运动过程中会随航向角而变化,故需要对摄像头进行角度补偿。使用舵机辅以地磁传感器搭建摄像头云台可以使得视轴始终与道路平行。

如图 1 所示,在摄像头视轴方向始终与道路平行的条件下,车体的横向偏差  $x$  即为所识别道路尽头点横坐标与该帧图像中尽头点横坐标的像素差,车体姿态角  $\theta$  即为舵机补偿转角。

由线性摄像头模型可知车体距离道路尽头点越近,道路尽头宽度所占摄像头屏幕比例越大,这使得单位像素差所代表的横向偏差距离与车体位置存在耦合关系,为了使得车体运动过程中得到的偏差量处于同一量级,必须通过道路尽头宽度所占摄像头屏幕比例来修正所得横向偏差,具体修正方法见 2.3 节。

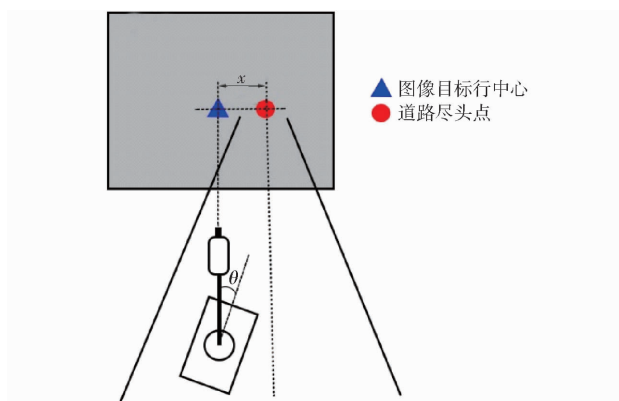


图 1 导航原理图

Fig. 1 Diagram of navigation

## 2 图像处理

### 2.1 图像空间区分

为了区分道路与两旁作物,本研究采用色度识别法进行区域分割,RGB 颜色分量与光照强度具有耦合关系,受光线影响大,HSV 色彩空间是一种更为直观的色彩空间,且色度 (Hue) 与亮度分离<sup>[17-18]</sup>,RGB 颜色空间与 HSV 色彩空间的转换公式为

$$\begin{cases} H = \arctan \frac{2R - G - B}{3(G - B)} \\ S = 1 - \frac{3\min(R, G, B)}{R + G + B} \\ V = \max(R, G, B) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $H$ ——色度分量  $S$ ——饱和度分量  
 $V$ ——明度分量  $R$ ——红色分量  
 $G$ ——绿色分量  $B$ ——蓝色分量

图 2 为拱棚内道路图像,如图中方框所示,选取 3 部分区域进行色度分析<sup>[19]</sup>。图 3 为色度-饱和度分布图,可以观察到明显的色度差异,作物区域的色度主要分布于 40~70 区间内,通过此色度范围对原图像进行分割处理,获得二值化图像如图 4a 所示。

### 2.2 区域筛选

由于叶间空隙及反光的高亮点使得图像包含许多杂质连通域,通常使用滤波或者腐蚀膨胀进行杂质区域的去除<sup>[20]</sup>,但这种方法在去除中等大小的杂质区域时,会影响所需区域的边界精确度,故本研究使用区域筛选的办法进行杂质区域的去除。

具体算法为:构建图像轮廓集,使用零阶矩  $M_{00}$  得到区域面积,面积最大的区域即为所需要的区域,图 4b 为筛选之后的结果,零阶矩计算公式为

$$M_{00} = \sum_i \sum_j V(i, j) \quad (2)$$

式中  $V(i, j)$ ——像素灰度  
 $i, j$ ——图像像素横、纵坐标值

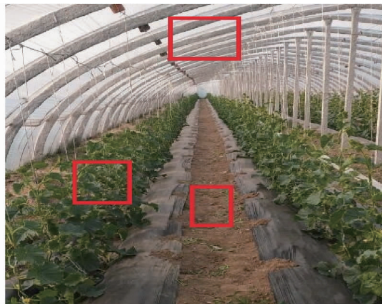


图 2 拱棚内道路图像

Fig. 2 Interior picture of greenhouse road

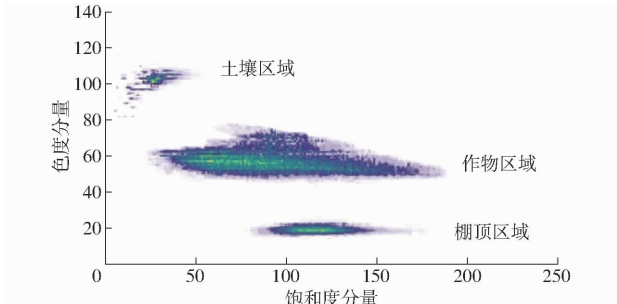


图 3 色度-饱和度分布图

Fig. 3 Distribution diagram of hue and saturation

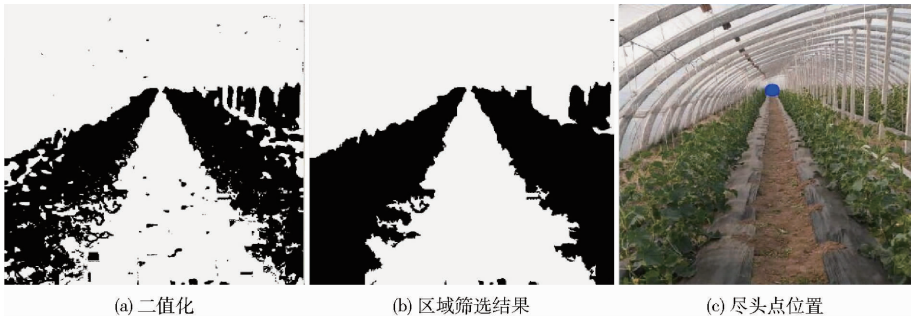


图 4 图像处理过程

Fig. 4 Step of image processing

2.3 道路尽头处理

所得区域的横向最窄处中心点即为所需道路尽头点,本研究所使用的 Python 语言循环遍历效率低,逐行扫描将降低处理速度,故使用先前所得的轮廓点集进行尽头点坐标获得,相关公式为

$$\begin{cases} x_e = x_c - \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \\ k = \frac{x_2 - x_1}{2x_c} \\ x_b = \frac{x_e}{k} \end{cases} \quad (3)$$

- 式中
- $x_1$ ——左半轮廓最右点横坐标

$x_2$ ——右半轮廓最左点横坐标

$x_e$ ——横向偏差

$x_c$ ——图像目标行中心横坐标

$k$ ——道路尽头宽度占摄像头屏幕比例

$x_b$ ——修正后的横向偏差

图 4c 中圆点处为处理所得的尽头点位置。

3 摄像头定向

为了使得视轴方向始终与道路平行,使用地磁传感器配合舵机组成定向随动云台。单独使用地磁传感器无法对当前车体姿态误差形成闭环控制,地磁传感器与摄像头联接可以实时检测摄像头的方位角<sup>[21-23]</sup>,故直接使用地磁传感器所得的方位角对舵机进行补偿,舵机转角公式为

$$e(t) = \alpha(t) - \beta \quad (4)$$

- 式中
- $e(t)$ ——舵机转角, (°)

$\alpha(t)$ ——当前视轴方位角, (°)

$\beta$ ——初始基准角, (°)

摄像头定向流程如图 5 所示。

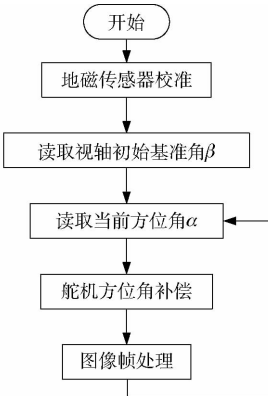


图 5 摄像头定向流程图

Fig. 5 Flow chart of fixed direction camera

4 建模与仿真

为了验证此种导航方式的动态性能以及对识别误差的响应,运用 Matlab Simulink 工具箱进行了运输车的运动仿真。

图 6 为运输车常用的四轮车结构,后轮为驱动轮,前轮为转向轮,根据 Ackerman 转向原理对四轮车进行了运动学建模<sup>[24-25]</sup>,忽略车轮的侧滑以及形变,则其姿态方程为

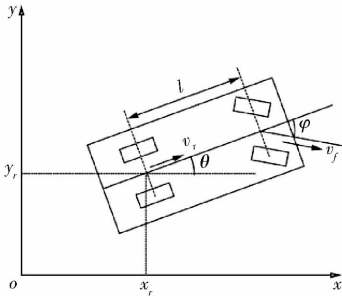


图 6 四轮结构运输车运动示意图

Fig. 6 Motion diagram of carrier vehicle

$$\begin{cases} [\dot{x}_r & \dot{y}_r & \dot{\theta}] = [v_r \cos \theta & v_r \sin \theta & \frac{v_r}{l} \tan \varphi] \\ [\dot{x}_f & \dot{y}_f & \dot{\theta}] = [v_r \frac{\cos(\theta + \varphi)}{\cos \varphi} & v_r \frac{\sin(\theta + \varphi)}{\cos \varphi} & \frac{v_r}{l} \tan \varphi] \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\varphi$ ——前轮偏角, (°)  
 $v_r$ ——后轮速度, m/s  
 $v_f$ ——前轮速度, m/s  
 $l$ ——前后轮轮距, m

前轮转向时步进电机减速可近似为延迟环节<sup>[26]</sup>, 延迟时间  $\tau$  为 0.05 s,  $l$  取 1 m, 后驱动轮视为匀速, 为了保证车体的稳定性, 限制前轮最大偏角为 45°。

用横向偏差采集量中叠加均方差为 0.03 的白噪声模拟导航信息提取时产生的识别误差, 控制器使用 PID 控制, 在阶跃输入下得到不同速度的后轮轨迹如图 7 所示。

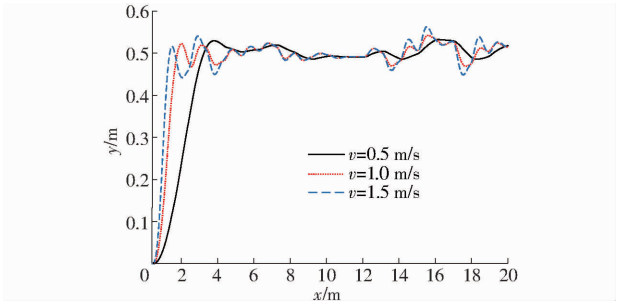


图 7 不同速度的后轮轨迹

Fig. 7 Track diagram of rear-wheel at various speeds

由图 7 可知, 该系统能够较快地矫正距离导航中心 0.5 m 的偏差, 其稳态偏差与车速成正相关关系, 且在导航信息识别存在偏差的情况下, 车体后轮的运动轨迹与导航线的稳态误差较小。

5 实验与分析

为了更好地满足小型化的生产要求, 本研究使用嵌入式 Raspberry Pi 系统板, 其主频为 1.2 GHz, 内存为 1 GB, 运行 Linux 系统并配置了 OpenCV 环境。地磁传感器使用 HMC5883L 模块, 摄像头分别使用了 ov5647 摄像头和 ov2710 长焦摄像头。实验

地点位于山东省泰安市岱岳区房村镇。

5.1 静态导航信息提取实验

为了更准确地得到该导航方法的精度, 本研究首先进行了静态导航信息提取实验, 以隔离其他误差对识别精度的叠加影响。如图 8 所示, 将导航信息提取设备放置在与道路平行的水平台面上, 设备宽度为 80 cm, 实验台高度与摄像头安装高度相同。



图 8 静态实验

Fig. 8 Diagram of static experiment

摄像头视轴方向由云台自动标定, 每隔 5 cm 进行一次水平移动, 使其位于实验台上不同位置, 得到 17 个尽头点中心像素坐标; 改变水平台面距离道路尽头的位置, 进行了 3 种不同距离的实验。

本研究同时复现了文献[14]中的改进型 Hough 变换, 在不改变其他条件的情况下获得导航线, 得到 Hough 变换法输出的偏差坐标。

每组实验输出的 17 个像素坐标与绝对位置拟合所得的直线的斜率为相对位置与实际位置的比值, 通过该比值能够获得识别误差的实际大小。本实验共得到 153 组输出坐标偏差与实际位置关系的数据, 统计结果如表 1 所示。

表 1 导航信息识别偏差

| Tab.1 Error of navigation information detection |                     |                    |                  |                    |                  |                    |
|-------------------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| 与尽头点的距离/m                                       | 普通摄像头<br>(Hough 变换) |                    | 普通摄像头<br>(定向摄像头) |                    | 长焦摄像头<br>(定向摄像头) |                    |
|                                                 | 平均偏差/cm             | 方差/cm <sup>2</sup> | 平均偏差/cm          | 方差/cm <sup>2</sup> | 平均偏差/cm          | 方差/cm <sup>2</sup> |
|                                                 | 20                  | 4.14 25.41         | 1.94 6.41        | 1.66 3.63          |                  |                    |
| 40                                              | 3.31 15.28          | 3.09 17.28         | 2.53 10.83       |                    |                  |                    |
| 60                                              | 3.94 18.03          | 4.64 32.03         | 3.05 15.39       |                    |                  |                    |

由表 1 可知, 本文方法与 Hough 变换相比能够显著提高识别精度, 与 Hough 变换不同的是本文方法在远距离识别时精度下降, 这是由于远距离时尽头点边缘模糊以及干扰随着距离增大而增加。长焦摄像头的识别平均偏差相比于普通摄像头平均偏差降低了 25.7%, 使用长焦摄像头时 3 种距离的平均识别偏差为 2.4 cm。两种摄像头的平均处理速率为 240 ms/f。

5.2 直线行驶实验

为了获得车体的实时位置, 铺设交流电磁线作为实验辅助测量装置, 直线行驶实验如图 9 所示。通过磁场检测电感, 经过数字滤波和非线性区间函数拟合后, 其测量精度与车体运行偏差相差一个数



图9 直线行驶实验

Fig. 9 Experiment of straight driving

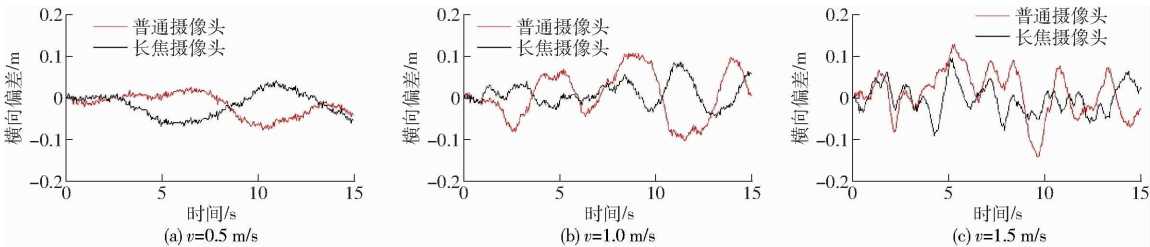


图10 后轮中心与道路中心的横向偏差曲线

Fig. 10 Track diagrams of transversal error between rear wheel and road centers

表2 行驶实验横向偏差

Tab.2 Transversal error of driving experiment

| 行驶速度/<br>( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | cm    |      |       |      |
|-------------------------------------------|-------|------|-------|------|
|                                           | 普通摄像头 |      | 长焦摄像头 |      |
|                                           | 平均偏差  | 最大偏差 | 平均偏差  | 最大偏差 |
| 0.5                                       | 2.3   | 7.7  | 2.5   | 6.8  |
| 1.0                                       | 4.8   | 10.6 | 2.2   | 8.5  |
| 1.5                                       | 4.4   | 14.1 | 2.8   | 9.4  |

6 结论

(1)提出了一种新型的大拱棚运输车导航方

量级,故其能够作为车体后轮绝对位置的测量装置。于车体后轮安装磁场检测电感,作为车体后轮位置的检测装置。测量结果仅用于实验分析而不参与车体导航控制。

将识别装置安装在大棚运输车前端顶部,后轮使用编码器测速,使车体运行得到不同速度的后轮中心与道路中心横向偏差曲线,如图10所示,偏差统计数据如表2所示,由图10和表2可知,长焦摄像头能够通过提高识别精度从而提高车体运行的稳定性;车体行驶偏差随速度增加而增加,这是由于高速情况产生的抖动对舵机方向补偿产生影响;车体在高速最大偏差不超过15 cm,低速后轮轨迹收敛程度高,能够满足生产要求。

法,能够在复杂的大棚环境中准确提取出道路尽头点坐标,与Hough变换相比,抗干扰能力更强,相关度更高,在不同长度的大棚中导航线横向平均识别偏差为2.4 cm,具有较高的识别精度。

(2)使用长焦摄像头能够显著提高识别精度,在精度要求更高的环境,可以通过使用高精度地磁传感器及长焦高分辨率摄像头,进一步提高导航精度。

(3)由行驶实验结果可知,该导航方法使用基本的反馈控制即可满足运输车所需要的导航精度,能够满足生产要求。

参 考 文 献

1 魏爽,季宇寒,曹如月,等. 农机自动驾驶控制决策方法与软件系统[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):30-34,171. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2017s005&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s005&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.005.  
WEI Shuang, JI Yuhua, CAO Ruyue, et al. Decision control method and software of automatic navigation system for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(Supp.):30-34,171. (in Chinese)

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

3 PAWIN T, TOFAEL A, TOMOHIRO T. Navigation of autonomous tractor for orchards and plantations using a laser range finder: automatic control of trailer position with tractor[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 90-103.

4 宋宇,刘永博,刘路,等. 基于机器视觉的玉米根茎导航基准线提取方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):38-44. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170205&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170205&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.005.  
SONG Yu, LIU Yongbo, LIU Lu, et al. Extraction method of navigation baseline of corn roots based on machine vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(2):38-44. (in Chinese)

5 张甜. 高茬水田耕整路径机器视觉识别方法研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.  
ZHANG Tian. Study on the method of machine vision recognition of high stubble paddyfield-tillage's path[D]. Wuhan: Huazhong

- Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 6 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.  
GAO Guoqin, LI Ming. Navigating path recognition for greenhouse mobile robot based on K-means algorithm [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7):25-33. (in Chinese)
- 7 JUNG K, LEE I, SONG H, et al. Vision guidance system for AGV using ANFIS [C]// Intelligent Robotics and Applications. Springer Berlin Heidelberg, 2012:377-385.
- 8 BUTDEE S, SUEBSOMRAN A. Automatic guided vehicle control by vision system [C]// Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEE International Conference on IEEE, 2009:694-697.
- 9 居锦,刘继展,李男,等. 基于侧向光电圆弧阵列的温室路沿检测与导航方法[J]. 农业工程学报,2017,33(18):180-187.  
JU Jin, LIU Jizhan, LI Nan, et al. Curb-following detection and navigation of greenhouse vehicle based on arc array of photoelectric switches [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18):180-187. (in Chinese)
- 10 OHMORJ H. Utilization of the electric vehicle in greenhouse horticulture [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2010, 72:527-530.
- 11 YAMASHITA J, SATOU K, HIKITA M, et al. Development of an automatic transport vehicle for use in greenhouses [J]. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, 2010, 53:75-84.
- 12 王志文,郭戈. 移动机器人导航技术现状与展望[J]. 机器人,2003,25(5):470-474.  
WANG Zhiwen, GUO Ge. Present situation and future development of mobile robot navigation technology [J]. Robot, 2003, 25(5):470-474. (in Chinese)
- 13 王新忠,韩旭,毛罕平,等. 基于最小二乘法的温室番茄垄间视觉导航路径检测[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(6):161-166. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120629&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120629&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.029.  
WANG Xinzong, HAN Xu, MAO Hanping, et al. Navigation line detection of tomato ridges in greenhouse based on least square method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):161-166. (in Chinese)
- 14 任永新,谭豫之,杨会华,等. 基于模糊控制的黄瓜采摘机器人视觉导航[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2009, 30(4):343-346.  
REN Yongxin, TAN Yuzhi, YANG Huihua, et al. Visual navigation of cucumber picking robot based on fuzzy control [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2009, 30(4):343-346. (in Chinese)
- 15 贾士伟,李军民,邱权,等. 基于激光测距仪的温室机器人道路边缘检测与路径导航[J]. 农业工程学报,2015,31(13):39-45.  
JIA Shiwei, LI Junmin, QIU Quan, et al. New corridor edge detection and navigation for greenhouse mobile robots based on laser scanner [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13):39-45. (in Chinese)
- 16 孙元义,张少磊,李伟. 棉田喷药农业机器人的导航路径识别[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(2):206-209.  
SUN Yuanyi, ZHANG Shaolei, LI Wei. Guidance lane detection for pesticides praying robot in cotton fields [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(2):206-209. (in Chinese)
- 17 相阿荣,王一鸣. 利用色度法识别杂草和土壤背景物[J]. 中国农业大学学报,2000,5(4):98-100.  
XIANG Arong, WANG Yiming. The research on hue to identify weed and backgrounds [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4):98-100. (in Chinese)
- 18 陈树人,沈宝国,毛罕平,等. 基于颜色特征的棉田中铁苋菜识别技术[J]. 农业机械学报,2009,40(5):149-152.  
CHEN Shuren, SHEN Baoguo, MAO Hanping, et al. Copperleaf herb detection from cotton field based on color feature [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5):149-152. (in Chinese)
- 19 ANDREASEN C, RUDEMO M, SEVESTRE S. Assessment of weed density at an early stage by use of image processing [J]. Weed Research, 1997, 37(1):5-18.
- 20 WEI Guo, UDAY K R, NINOMIYA S. Illumination invariant segmentation of vegetation for time series wheat images based on decision tree model [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 96(8):58-66.
- 21 陈戌冬,田跃,李杰,等. 基于磁角度传感器云台控制系统的设计与研制[J]. 传感器与微系统,2007(11):72-74.  
CHEN Xudong, TIAN Yue, LI Jie, et al. Design and development of pan-tilt control system based on magnetic sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007(11):72-74. (in Chinese)
- 22 纪钢,司洞洞,吴萍萍. 基于反馈式可定位云台控制系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2015,23(5):1582-1585.  
JI Gang, SI Dongdong, WU Pingping. Addressed PTZ control system design and implementation based on feedback [J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(5):1582-1585. (in Chinese)
- 23 王日俊,白越,续志军,等. 基于扰动观测器的机载云台扰动复合补偿方法[J]. 光电子·激光,2015,26(1):108-115.  
WANG Rijun, BAI Yue, XU Zhijun, et al. A composite disturbance compensation method for airborne platform based on improved disturbance observer [J]. Journal of Optoelectronics·laser, 2015, 26(1):108-115. (in Chinese)
- 24 任孝平,蔡自兴. 基于阿克曼原理的车式移动机器人运动学建模[J]. 智能系统学报,2009,4(6):534-537.  
REN Xiaoping, CAI Zixing. Using the Ackerman principle for kinematic modeling of wheeled mobile robots [J]. Transactions on Intelligent Systems, 2009, 4(6):534-537. (in Chinese)
- 25 史晨红,左敦稳,张国家. 基于轨迹控制的 AGV 运动控制器设计研究[J]. 机械设计与制造工程,2014,43(2):7-12.  
SHI Chenhong, ZUO Dunwen, ZHANG Guojia. Design of AGV-based trajectory navigation motion controller [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(2):7-12. (in Chinese)
- 26 周云山,王荣本,王志中,等. 自动引导车辆系统的研究(四)——自动引导车辆(AGV)的建模仿真[J]. 农业工程学报,1994,10(4):62-67.  
ZHOU Yunshan, WANG Rongben, WANG Zhizhong, et al. Modeling and simulation of automated guided vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(4):62-67. (in Chinese)