

# 基于改进纯追踪模型的温室采摘运输自动跟随系统

汪小昆<sup>1,2</sup> 鲁伟<sup>1</sup> 陈满<sup>3</sup> 王挺<sup>1</sup> 章永年<sup>1,2</sup> Boukangou M P<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省现代设施农业技术与装备工程实验室, 南京 210031;  
3. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

**摘要:** 基于 Kinect 体感感应技术,设计了一套温室果蔬采摘运输自动跟随平台。通过体感感应系统获取图片上像素点的深度信息,结合图像处理算法,逐行扫描确定人体图像并实时获取人体骨骼信息,计算了人体当前的三维坐标并记录人体走过的路径轨迹。系统采用自调整函数对路径进行优化,避免了剧烈转向行为,并对优化后的路径以模糊算法动态确定纯追踪模型的前视距离,从而实时调整转向和转角,实现了精准跟随和稳定跟随。试验结果表明,该跟随系统能在避免剧烈转向的前提下以较高的精度跟随,横向最大跟踪偏差不超过 10.0 cm,最大深度偏差为 5.5 cm,且系统性能不受光照条件影响,满足温室采摘运输要求。

**关键词:** 温室; 采摘; 运输; 体感感应技术; 路径优化; 纯追踪模型

中图分类号: S229<sup>+</sup>.1; TP275 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)12-0008-06

## Automatic Following System for Greenhouse Harvesting Transportation Based on Adaptive Pure Pursuit Model

Wang Xiaochan<sup>1,2</sup> Lu Wei<sup>1</sup> Chen Man<sup>3</sup> Wang Ting<sup>1</sup> Zhang Yongnian<sup>1,2</sup> Boukangou M P<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Jiangsu Province Engineering Laboratory for Modern Facilities Agricultural Technology and Equipment, Nanjing 210031, China

3. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Transportation for harvest and plant protection activities inside greenhouse calls for a lot of labor. The available transporting equipment has limited function which is not very flexible. While the widely used railway transportation vehicles inside greenhouse in many developed countries are hard to introduce to China due to variable construction styles and nonstandard layouts, some automatic following system is urgently in need. Thus a kind of autonomous transportation system for greenhouse harvesting activity was presented based on Kinect sensor developed by Microsoft Company. The Kinect sensor could acquire the depth data of each pixel on the picture, from which the skeleton of a workman could be analyzed by several image processing algorithms. Direction and heading angle was determined by the real-time coordinate of the center of gravity of the skeleton. At the same time, the 3D coordinate of the workman was kept and the tracking path was thus formed. To avoid dramatic turning, adaptive function was applied to optimize the path firstly. And then pure pursuit method was introduced to complete the tracking stably and precisely. The look-ahead distance was timely decided by fuzzy controller, with which the vehicle would track more flexibly according to different look-head distances. The result showed that the system was able to turn freely and precisely while avoiding drastic turning. The largest lateral deviation of straight line tracking was smaller than 10.0 cm, and the largest depth deviation was 5.5 cm. The working function had nothing to do with the light condition, which met the demands of harvesting and goods transportation in greenhouse in different seasons.

**Key words:** greenhouse; picking; transportation; technology of Kinect; path optimization; pure pursuit model

收稿日期: 2016-05-13 修回日期: 2016-06-20

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1033)

作者简介: 汪小昆(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物环境模拟与控制研究,E-mail: wangxiaochan@njau.edu.cn

## 引言

目前国内设施蔬菜生产中的搬运作业多以人力或非专用设备搬运为主,需要投入大量的劳动力和进行高强度的劳动作业,费时费力且缺乏灵活性。因此,我国设施农业对省力式的设施生产物流运输平台的需求日益强烈。

当前我国设施农业发展不均衡,存在小型温室空间狭窄、温室内部结构不统一、设备购置经费有限等问题,因此国外普遍使用的轨道式运输车很难引入我国设施农业中。采用灵活式自动运输平台是解决这一突出矛盾的有效途径,但是国内相关研究起步较晚<sup>[1-3]</sup>。金立生等<sup>[4]</sup>提出了以人工驾驶数据为训练样本并用神经网络进行训练,完成自主跟踪控制,但训练样本对神经网络模型有较大影响,且训练速度较慢难以满足实时性的要求。丁永前等<sup>[5]</sup>采用 PD 控制器研制了果园自主跟随电动车,并提出了跟随车以红外传感器检测相对航向角的方式跟随引导车的研究方法,但 PD 参数整定困难,需要一定的专家经验和大量的试验。李逃昌等<sup>[6]</sup>提出了模糊自适应纯追踪模型,自适应函数能够调节追踪模型的前视距离,跟踪误差较小,但是相关研究中的跟踪路线主要为弧线、S 型线,并未提到路线发生急剧变化时的解决方案,而在温室中作业者在完成不同工作时行走路线多变,难以避免路线震荡的情况,在这种情况下机械容易出现卡死等机械故障。

本文以 Kinect 体感感应器设计一种温室果蔬采摘自动跟随平台,以体感感应设备采集作业者的骨骼位置信息,形成相应的跟随轨迹,并针对温室内果蔬采摘自动跟随平台平稳精确跟踪的问题,提出一种路径优化算法,该算法先对人到车之间的路线进行优化,并对优化后的路线采用纯追踪模型进行跟随,其前视距离由模糊算法动态确定,以期实现精准并平稳的跟踪效果。

## 1 自动跟随系统设计

### 1.1 整体结构设计及工作原理

自动跟随系统由车载计算机、控制器与控制系统、Kinect 体感感应器、直流无刷电动机、步进电动机、电池组及其固定装置等系统和部件组成,结构简图如图 1 所示。本文选用微软公司开发的 Kinect for Xbox360 简称 Kinect 作为视觉传感器提取作业人员位置信息。它是一种 3D 摄影机,能够获取深度数据进而通过图像处理算法获取人体骨骼坐标信息。其最佳探测距离为 80~440 cm,水平视角为 57°,垂直视角为 43°。最佳工作高度为 60~180 cm。为

了使车体与作业人员保持(30±5) cm 的工作距离, Kinect 安装在距离车体最前端 50 cm 处,摄像头高度设置为 80 cm,与水平面夹角设置为 0°。直流电动机为型号为 80BL89S40-445TK0,功率为 500 W;步进电动机用于实现车体的转向控制,额定扭矩为 29 N·m,最大瞬间负载 44 N·m。前轮导向轴上安装绝对型旋转编码器,用于测量前轮转角,其输出为 0~5 V,对应角度 0°~360°。车体上配有蓄电池组,为各个工作部件供电。该车体长 1 m,宽 0.4 m,满足我国设施栽培环境的客观要求。

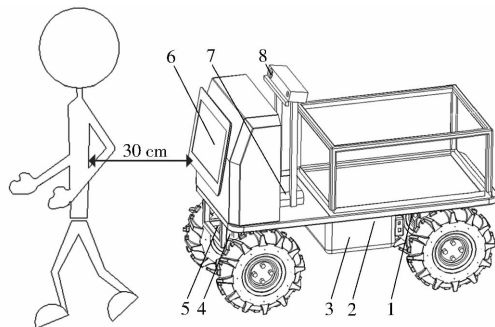


图 1 自动跟随系统机械结构简图

Fig. 1 Structural sketch of automatic following system

1. 直流行星减速电动机
2. 控制器
3. 蓄电池
4. 绝对型旋转编码器
5. 行星减速步进电动机
6. 触摸屏控制器
7. 车载计算机
8. Kinect 感应器

自动跟随系统工作原理如图 2 所示。Kinect 检测系统获取深度信息并由 USB3.0 传输到车载计算机,由车载计算机计算和提取获得人体坐标位置和跟随路径,并设置人体与小车始终保持(30±5) cm 的工作距离,当大于该设定距离时,小车前行,反之后退。通过串行接口将控制指令发送给 STM32 控制器; Kinect 检测系统实时获取小车的航向偏角,角度检测装置实时监测前轮的转角,并由控制器解析其偏转角度。

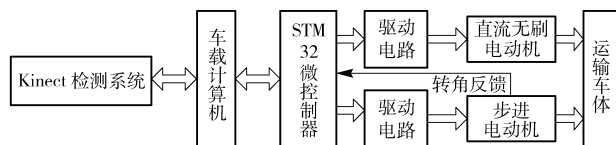


图 2 自动跟随系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of automatic following system

### 1.2 人体检测系统设计

#### 1.2.1 骨骼信息的获取

Kinect 是微软开发的一款 3D 体感摄像机,它有 3 个镜头,分别为红外线发射器、RGB 摄像机和红外线 CMOS 摄像机<sup>[7-10]</sup>。红外发射器发出红外光,由红外线 CMOS 摄像机接收反射光线,并由发射和接收的时间差计算每个像素点的距离,从而得到深度图像<sup>[11-12]</sup>。

Kinect 通过激光散斑的方式获取空间位置信息,这些散斑是由激光照射到粗糙物体表面形成的,具有高度的随机性,即空间中任何两点的散斑均不相同,且其工作性能不受环境亮度因素的影响<sup>[13-14]</sup>。当作业人员出现在拍摄空间时,系统根据散斑图案就可以获得像素点的深度信息,通过边缘检测、噪声阈值处理、对人体目标特征点分类等方法将人体与环境分离。然后通过像素扫描和特征提取,将指关节、腕关节、肘关节、膝关节、髌关节、肩关节、胸锁关节、下颌关节等 20 个人体关节分离出来。经过分离和提取后的人体骨骼图和对应的深度图像如图 3 所示。



图 3 骨骼图和深度图对比

Fig. 3 Comparison of skeleton image and depth image

由于温室中作业时人体的上半身骨骼点位置比较容易发生改变,因此从稳定性方面考虑以髌关节(重心)作为跟踪目标点,当髌关节出现在图片不同位置上时,即对应不同的人体坐标。由于人体与车体间始终保持一定的距离,因此通过寻找人体骨骼信息和确定重心点,记录重心点的坐标变化即可得到人体经过的路线轨迹,即小车的跟随路径。由 Kinect 参数可得图片对应实际空间尺寸为  $2.97 \text{ m} \times 2.38 \text{ m}$ ,以摄像头中心为原点,实时建立空间坐标系,形成对应的跟随路径。空间坐标如图 4 所示,其中  $O$  为摄像头位置, $S$  为人走过的一段路径。

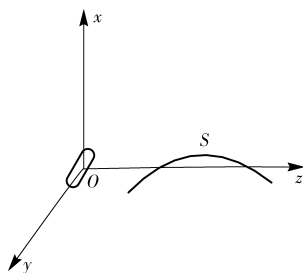


图 4 空间坐标

Fig. 4 Spatial coordinates of system

### 1.2.2 空间坐标转换

由于随着距离的增加分辨率会降低,因此空间中的实际坐标与深度图像上的点并不是线性对应关系。为了更加准确地获取人体在空间的实际坐标,采用文献[15-16]中的公式把图像上的点转换为 3D 空间坐标,即

$$\begin{cases} x = (i - c_x)f_x g \\ y = (j - c_y)f_y g \\ z = g \end{cases} \quad (2)$$

式中  $x, y, z$ ——像素点对应的空间坐标  
 $g$ ——像素点到摄像头的实际距离  
 $f_x, f_y$ ——比例参数  
 $c_x, c_y$ ——图像中心点

该坐标系中坐标原点为摄像头中心, $x$ 轴为竖直方向, $y$ 轴为水平方向,与  $xOy$  平面垂直的坐标轴为  $z$  轴,即深度方向。

## 2 路径跟踪控制方法

### 2.1 路径优化算法

如图 5 所示,以横向偏差  $d$  为纵轴,时间  $t$  为横轴建立直角坐标系。当检测到的人体轨迹在短时间内发生急剧变化时如果跟随系统按照此轨迹进行跟踪很容易造成转角卡死故障,并且在实际操作中并不需要路径发生急剧变化时车体急剧跟随,灵敏度过高会导致稳定性降低,因此为了使灵敏度和稳定性得到折中,提出路径优化算法,即

$$\begin{cases} \Delta d_1 = |d(t_1) - d(t_0)| > k_1 \\ \Delta d_2 = |d(t_2) - d(t_1)| > k_2 \end{cases} \quad (3)$$

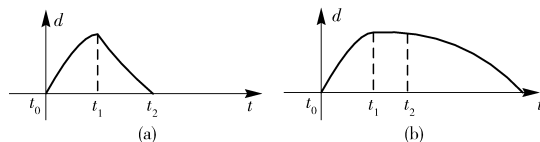


图 5 变化路径示意图

Fig. 5 Sketches of changing path

经过现场多次试验,阈值  $k_1$  取  $0.5 \text{ m}$ ,  $k_2$  取  $0.3 \text{ m}$ ,  $t_1$  取  $0.5 \text{ s}$ ,  $t_2$  取  $1 \text{ s}$ 。如图 5b 所示,当只满足式(3)中的第 1 个条件时,不认为路径是暂时性的急剧变化,只有同时满足式(3)中的 2 个条件时才认为路径发生了如图 5a 所示的剧烈变化,此时不能按照原有路径跟随,需要对路径进行优化,优化方法为

$$d' = d(1 - \alpha) \quad (\alpha \in (0, 1)) \quad (4)$$

其中  $\alpha = k_3 \left| \frac{d}{M} \right|^p \quad (p < 1) \quad (5)$

$$k_3 \leq \left( \frac{M}{d_{\max}} \right)^p \quad M = 1.1 d_{\max}$$

式中  $d$ ——横向偏差

$d'$ ——优化后的横向偏差

$\alpha$ ——路径优化自调整函数

$k_3$ ——比例参数

$M$ ——最大误差设定值

自调整函数只有在路径发生急剧变化时起作用,其中  $p < 1$  是为了增大横向偏差对自调整函数的

影响。

## 2.2 纯追踪模型

纯追踪模型是一种几何算法,其目的是确定车体到跟踪路径所需要走过的弧长,其核心是模拟驾驶员的视觉特点,确定一个合适的前视距离<sup>[17-19]</sup>。机械速度对前视距离的选择有直接影响,该模型中,由于温室中机械作业速率较低,本文不考虑机械速度对前视距离的影响。

由于纯追踪模型是在车体坐标系下定义的,因此始终以摄像头中心为坐标原点建立坐标系。如图 6 所示,  $(x, y)$  为路径上的点,并定义:  $R$  为车体瞬时转弯半径;规定路径偏离车体左侧为负值,反之为正值;  $L$  为前视距离;  $\theta$  为当前航向和目标路径之间的偏差。

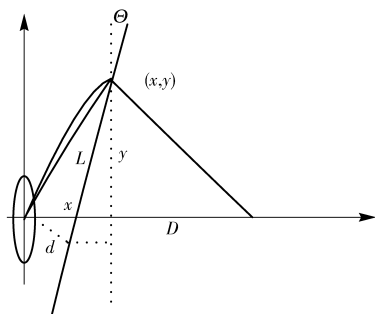


图 6 纯追踪几何解析示意图

Fig. 6 Geometric analysis of pure pursuit model

由图 6 可得

$$D + x = R \quad (6)$$

$$X^2 + Y^2 = L^2 \quad (7)$$

$$D^2 + y^2 = R^2 \quad (8)$$

$$x = d \cos \theta + \sqrt{L^2 - d^2} \sin \theta \quad (9)$$

由式(6)~(9)可得

$$R = \frac{L^2}{2x} = \frac{L^2}{2(d \cos \theta + \sqrt{L^2 - d^2} \sin \theta)} \quad (10)$$

## 2.3 模糊控制器设计

前视距离对跟踪的精度和稳定性有直接的影响。前视距离较大时,车体沿着曲率较小的弧线行进,此时机械比较稳定,但是逼近路线的时间较长,影响跟随的精度。前视距离较小时,车体沿着较大的弧线行进,逼近预设路线速度较快,但是机械容易产生震荡,稳定性较差。因此选择合适的前视距离十分关键。PETRINEC 等<sup>[20]</sup>指出取前视距离等于轮距时有较好的跟踪效果,但固定的前视距离不能用于所有的场合,因此本文针对优化后的路径采用模糊控制的方法为纯追踪模型动态确定合适的前视距离。

本文设计的自动跟随系统主要用于设施农业或植物工厂等硬度较大的路面,不考虑轮胎与地面的

侧向滑动,因此采用 KELLY<sup>[21]</sup>提出的简化二轮车模型,将轮胎看成刚性轮,其简化模型如图 7 所示。

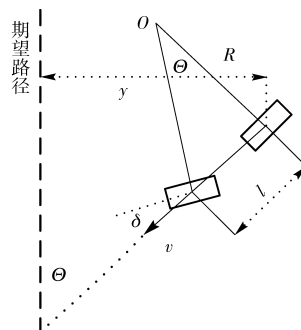


图 7 跟随车辆运动学分析示意图

Fig. 7 Schematic diagram of following vehicle for kinematical analysis

图中,  $l$  为轮距,  $y$  为横向偏差,  $\delta$  为转向轮偏角,并规定以车体自身为参考系,向左偏为负值,反之为正值。由运动学分析可知

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos \theta(t) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin \theta(t) \\ \dot{\theta}(t) = \frac{v(t)}{l} \tan \delta(t) \end{cases} \quad (11)$$

由图 7 得

$$R = \frac{l}{\tan \delta} \quad (12)$$

结合式(10)、(12)可得期望转角为

$$\delta = \arctan \frac{2lx}{L^2} = \arctan \frac{2l(d \cos \theta + \sqrt{L^2 - d^2} \sin \theta)}{L^2} \quad (13)$$

纯追踪模型中前视距离直接影响跟随效果,为了更精确地进行跟随,采用模糊算法动态确定前视距离  $L$ 。模糊控制器的输入为横向偏差和航向偏差,其基本论域范围为  $[-0.5 \text{ m}, 0.5 \text{ m}]$  和  $[-90^\circ, 90^\circ]$ ,论域为  $[-6, 6]$ ,比例因子为  $1/10$ 。输出为前视距离,论域为  $[-6, 6]$ ,比例因子为  $1/6$ 。根据专家经验和相关知识制定模糊推理调节器的相应控制规则。完成了整个控制器的设计,其控制框图如图 8 所示。

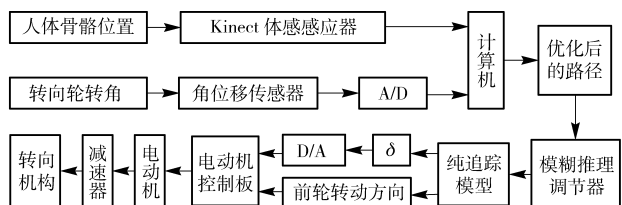


图 8 自动跟随系统路径跟踪控制框图

Fig. 8 Block diagram of automatic following system path tracking control

## 3 试验

### 3.1 跟随系统性能分析

为了研究基于改进纯追踪模型的温室果蔬采摘

自动跟随系统的性能,在自行研制的自动跟随系统上进行试验验证。首先分别将带有路径自调整函数和不带有路径自调整函数的控制规则植入自动跟随系统,然后由人在前面引导,走出一段具有急剧变化的复杂路径。在摄像头正下方小车底盘位置悬挂滴漏液体的容器,每隔 5 cm 记录滴漏液体与路径之间的偏差。绘制曲线如图 9 所示。

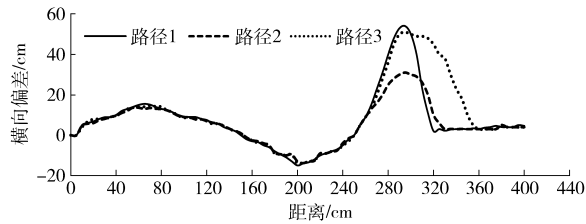


图 9 不同控制算法下的跟踪曲线

Fig.9 Tracking curves under different controlling algorithms

图 9 中,路径 1 为人走过的原始路径,路径 2 为本文加入路径优化后的跟踪效果,路径 3 为未加入路径优化的跟踪效果。由图可得:路径变化幅度较小时,2 种跟踪效果无明显差异,均能较好地跟随人体行进。当人体走过的路线发生急剧变化时,路径 3 也随之发生剧烈变化,但由于变化急剧,当人体回到平稳路径时,车体不能较快恢复,需要较长的调整时间。而路径 2 由于加入了路径优化能够较快恢复,满足实时跟随的要求。

### 3.2 温室跟随试验

为了测试系统实际工作效果,于 2016 年 5 月 10 日在南京农业大学工学院的温室里进行试验。该温室中,垄长 12 m,垄间间距 0.8 m。作业者在进行采摘作业时自由行进,行进路线用白色粉笔做标记,在摄像头正下方小车底盘位置悬挂滴漏液体的容器。试验在不同光照度下进行,记录横向跟随偏差和深度偏差如表 1 所示。

试验结果表明:跟随路径在 4.5 m 处和 11.0 m 处出现急剧变化,其横向偏差分别为 30.0 cm 和

表 1 跟踪轨迹偏差

Tab.1 Deviation of tracking trajectory

距离/ m	横向偏差/ cm	深度偏差/ cm	距离/ m	横向偏差/ cm	深度偏差/ cm
0.5	10.0	5.5	6.5	5.0	4.2
1.0	8.3	4.7	7.0	7.6	5.1
1.5	6.2	4.1	7.5	4.6	4.8
2.0	6.5	3.4	8.0	5.0	3.9
2.5	8.0	3.9	8.5	3.0	4.3
3.0	4.0	3.4	9.0	7.0	3.7
3.5	5.7	5.0	9.5	5.8	3.6
4.0	7.0	5.1	10.0	3.9	3.0
4.5	30.0	6.0	10.5	4.7	4.6
5.0	8.0	5.4	11.0	26.0	3.4
5.5	7.2	4.3	11.5	4.0	3.0
6.0	7.1	3.0	12.0	4.5	3.0

26.0 cm。其余情况下路径变化相对缓慢,跟踪比较平稳,横向最大跟踪偏差为 10.0 cm,最大深度偏差 5.5 cm。试验中观测到光照条件对系统性能无明显影响,满足温室采摘作业需求。

## 4 结论

(1) 针对我国设施农业果蔬采摘运输作业频繁、劳动力投入量较大、缺乏灵活性的特点,研究了基于 Kinect 体感感应器的温室果蔬采摘自动跟随系统,建立了相应的硬件平台。

(2) 为了减少作业中路径急剧变化造成车体过灵敏和不必要的转向行为,提出了适应度函数优化路径,并以纯追踪模型进行跟随,采用模糊算法动态解析纯追踪模型的前视距离,从而提高跟随性能。

(3) 试验结果表明,优化后的路径避免了剧烈转向行为,提高了系统的稳定性。温室自动跟随试验最大横向偏差为 10.0 cm,最大深度偏差 5.5 cm。光照条件对系统性能无明显影响,满足温室果蔬采摘作业要求。

## 参 考 文 献

- 张铁民,李辉辉,陈大为,等. 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 37-42.  
ZHANG Tiemin, LI Huihui, CHEN Dawei, et al. Agricultural vehicle path tracking navigation system based on information fusion of multi-source sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 37-42. (in Chinese)
- 蔡磊,周亭亭,郭小鹏,等. 基于超声波定位的智能跟随小车[J]. 电子测量技术, 2013, 36(11): 76-79.  
CAI Lei, ZHOU Tingting, GUO Yunpeng, et al. Intelligent following carriage based on ultrasonic positioning[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(11): 76-79. (in Chinese)
- 张美娜,林相泽,丁永前,等. 基于性能指标的农用车辆路径跟踪控制器设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 40-46.  
ZHANG Meina, LIN Xiangze, DING Yongqian, et al. Design of path following controllers based on performance index for agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 40-46. (in Chinese)
- 金立生,王荣本,纪寿文,等. 智能车辆自主导航神经网络控制器设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 30-33.  
JIN Lisheng, WANG Rongben, JI Shouwen, et al. Neural network controller design for autonomous navigation of intelligent vehicle based on vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 30-33. (in Chinese)

- 5 丁永前, 王致情, 林相泽, 等. 自主跟随车辆航向控制系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1):8-13.  
DING Yongqian, WANG Zhiqing, LIN Xiangze, et al. Heading control system of autonomous following vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):8-13. (in Chinese)
- 6 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1):205-210.  
LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1):205-210. (in Chinese)
- 7 吴国斌, 李斌, 阎骥洲. Kinect 人体交互开发实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- 8 NISSIMOV S, GOLDBERGER J, ALCHANATIS V. Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 113:104-115.
- 9 ZIEGLER J, STILLER C. Spatiotemporal state lattices for fast trajectory planning in dynamic on-road driving scenarios[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, 2009:1879-1884.
- 10 KHOSHELHAM K, ELBERINK S O. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications[J]. Sensors, 2012, 12(2):1437-54.
- 11 杨东方, 王仕成, 刘华平, 等. 基于 Kinect 系统的场景建模与机器人自主导航[J]. 机器人, 2012, 34(5):581-589.  
YANG Dongfang, WANG Shicheng, LIU Huaping, et al. Scene modeling and autonomous navigation for robots based on Kinect system[J]. Robot, 2012, 34(5):581-589. (in Chinese)
- 12 李恒. 基于 Kinect 骨骼跟踪功能的骨骼识别系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013: 8-18.
- 13 KONDAK K, BERNARD M, CABALLERO F, et al. Cooperative autonomous helicopters for load transportation and environment perception[M]//KRÖGER T, WAHI F M. Advances in robotics research. Berlin Heidelberg: Springer, 2008:299-310.
- 14 杨林. 基于 Kinect 的人体目标检测与跟踪[D]. 大连: 大连海事大学, 2013: 7-20.
- 15 FRATI V, PRATTICCHIZZO D. Using Kinect for hand tracking and rendering in wearable haptics[C]//World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE, 2011:317-321.
- 16 KOUROSH K, SANDER Oude E. Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications[J]. Sensors, 2012, 12(2):1437-1454.
- 17 张智刚, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):6-12.  
ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, ZHAO Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):6-12. (in Chinese)
- 18 黄沛琛, 罗锡文, 张智刚. 改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(21):216-219.  
HUANG Peichen, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang. Control method of headland turning based on improved pure pursuit model for agricultural machine[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(21):216-219. (in Chinese)
- 19 黄沛琛. 基于纯追踪模型的插秧机地头转向控制方法[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- 20 PETRINEC K, KOVAČIĆ Z, MAROZIN A. Simulator of multi-AGV robotic industrial environments[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology, 2004:979-987.
- 21 KELLY A. A feedforward control approach to the local navigation problem for autonomous vehicles[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1994.