

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.028

联合收获机视觉导航控制系统设计与试验*

丁幼春¹ 王书茂²

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 设计了联合收获机机器视觉导航控制硬件系统,提出了基于直方图的导航路径融合算法,在简化的二轮车运动学模型的基础上,设计了模糊PD控制器。麦田试验结果表明:旋转投影算法配合直方图融合算法能够有效地检测收获与未收获边界线,提高了控制系统的准确性与抗干扰性;在正常小麦收获速度挡位下,割幅变化范围在0.18m以内,在有外界扰动下(人为方向盘扰动),能在2~5s内回到正常的跟踪误差范围内。

关键词: 联合收获机 视觉导航 控制系统 直方图融合

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0137-06

Vision Navigation Control System for Combine Harvester

Ding Youchun¹ Wang Shumao²

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

The vision navigation control hardware system was set up in the combine harvester and a histogram fusion algorithm for multi-frame navigation lines was put forward. On the basis of kinematics of simplified two-wheel vehicle, model one fuzzy PD controller was constructed. The tests in wheat field show that the rotation and projection algorithm with histogram fusion algorithm is valid to recognize the cut/uncut line, and can improve the precision of the system and robustness, the change of harvesting width is in 0.18m during the working speed, and it could come back to the right path in 2~5s when given manual disturbance using steering wheel.

Key words Combine harvester, Vision navigation, Control system, Histogram fusion

引言

智能农业机械作为一种高度信息化、自动化的现代农业装备,其显著特征之一是导航控制自动化。开展机器视觉导航控制系统研究,对于设计与开发智能农业机械以及实施精细农业均具有重要意义。

我国对农业机械装备进行导航控制系统的研究近年来有所增加^[1-8],但是针对联合收获机的智能化研究主要集中在喂入量测量、控制以及测试平台等的研究^[9-13],导航控制系统方面的研究相对较少。

本文以联合收获机为研究平台,USB接口DH-HV1302UC型相机、Computer M0814-mp型镜头、DWQT型角度传感器及雷达测速器为主要导航传感器,改装液压转向系统为计算机控制,设计开发基于机器视觉的联合收获机导航控制系统,旨在通过小麦田间跟踪收获边界试验研究,探寻一种简单有效的视觉导航控制方法。

1 运动学分析

以新疆4LD-2A型自走式轴流谷物联合收获机为基础平台,配备58kW柴油发动机,标称喂入量

收稿日期:2009-07-14 修回日期:2009-07-31

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2007BAD89B04)

作者简介:丁幼春,讲师,主要从事自动控制、测试、机器视觉技术研究,E-mail: kingbug163@163.com

通讯作者:王书茂,教授,主要从事机电一体化和计算机测控技术研究,E-mail: wangshumao@cau.edu.cn

2 kg/s, 割幅 2.5 m, 前后轮轴距 2.8 m, 总质量 4.3 t, 前轮驱动, 后轮通过液压缸实现转向操作。

在不考虑轮胎与地面侧向滑动的前提下, 将联合收获机简化为二轮车模型进行运动学分析, 如图 1 所示, ϕ 为后轮转向角 (以联合收获机纵向为基准, 偏左为正, 偏右为负), θ 为航向偏角, 即联合收获机纵向与 y 轴正向之间的夹角, 右偏为正, 左偏为负, l 为前后轮轴距, R 为转向半径, 联合收获机纵向速度为 v , 通过运动学分析获得的车体位姿 (x, y, θ) 与行走速度、后轮转向角之间的关系为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \sin\theta(t) \\ \dot{y}(t) = v(t) \cos\theta(t) \\ \dot{\theta}(t) = v(t) \tan\phi(t) / l \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\dot{x}(t)$ ——前轮轴中心在 x 方向的速度, m/s
 $\dot{y}(t)$ ——前轮轴中心在 y 方向的速度, m/s
 $\dot{\theta}(t)$ ——联合收获机航向偏角速度, rad/s

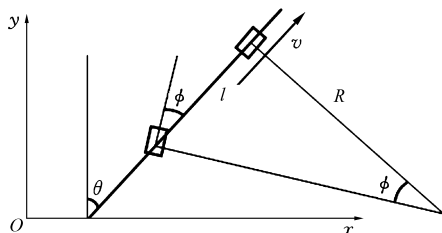


图 1 简化的二轮车模型

Fig. 1 Model of a simplified two-wheel vehicle

2 导航控制系统结构与改装

2.1 转向控制系统设计与改装

要实现联合收获机横向速度自动导航, 必须对其转向系统加以改装。为了驾驶操作安全, 实现人工驾驶与视觉导航控制系统自动驾驶, 切换自如, 互不干涉, 同时为了消除液压油路切换过程中产生的强烈冲击, 在不改变原有液压系统工作性能的基础上, 液压系统设计中增加了一个液压分流器与液压转向器, 使得两个液压转向器控制同一转向液压缸。改装的转向控制系统设计如图 2 所示。

根据转向所需力矩选取合适的步进电动机及其驱动器, 选定 86BYG250BN-SAFRBL-0401 步进电动机及两相混和式步进电动机细分驱动器 SH-20504, 供电电压 24 V, 可达 5 N·m 的保持转矩, 有效转速可达 150 r/min。

经测试表明, 仅采用大闭环进行路径跟踪很难实现好的跟踪效果。主要原因为: 由于液压的变化, 导致步进电动机一定的转角可能会产生不同的后轮转角, 当液压较高时, 出现过调, 导致标识线超出相机的视野范围; 当液压较低的时候, 出现控制量不足, 无法实现及时的调整。

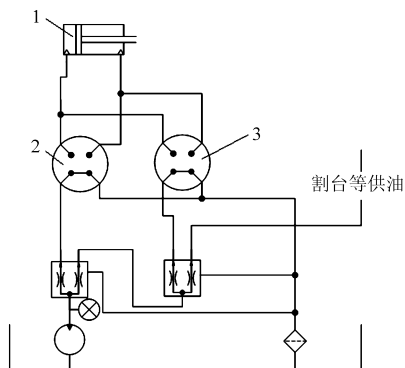


图 2 液压转向改装设计

Fig. 2 Refit design of the hydraulic steering

1. 转向液压缸 2. 手动液压转向器 3. 电控液压转向器

利用后轮转角单位负反馈的小闭环控制结构来确认后轮转角状态, 小闭环的控制频率高达 100 Hz, 控制系统框图如图 3 所示。经试验研究分析, 转角越大、液压压力越小, 对应的调节时间越长, 在步进电动机脉冲输入频率为 400 Hz (0.45°/plus) 时, 达到指定后轮转角稳态时的时间不大于 0.7 s。通过小闭环对后轮转角的反馈控制可以完全获得后轮转角的状态, 为系统跟踪路径控制提供了很好的控制能力。

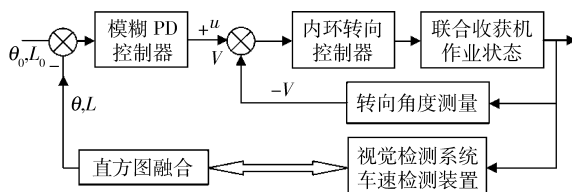


图 3 导航控制系统框图

Fig. 3 Structure of the control system

大闭环采用模糊 PD 控制器, 经反复测试研究, 确定控制周期在 0.5 ~ 1.4 s 之间, 控制周期由行走速度决定, 周期的调节由控制周期内的处理帧数决定。所以在实时控制过程中, 通过实时检测到的行走速度, 调节处理帧数与步进电动机输入频率, 速度越大, 控制周期越小, 转向输入速度越高。

2.2 导航控制系统硬件结构

本文研究平台是基于车载计算机 USB 总线结构硬件构架, 利用高速数据采集器 NI-USB6211 与计频卡 7503, 硬件结构如图 4 所示。利用车载电源, 进行逆变获取 AC220V, 通过升压获取 24V, 以及 DC-DC 变换获得 5V, 供整个控制系统方便使用。NI-USB6211 提供 12 路 A/D 转换通道, 2 路定时器产生脉冲, 4 路 TTL/I/O, 主要用来采集角位移电压、电动缸反馈电压, 产生指定频率脉冲信号给步进电动机驱动器, 同时通过 I/O 控制继电器继而控制电动缸。7503 提供 6 路测频通道, 主要获取行走速度以及脱粒消耗功率。全部扩展电路以及板卡采用抗

干扰金属箱封装,接口采用统一的航空插头方式,以提高系统的稳定性,便于在恶劣的环境下使用。

需要说明的是整个硬件系统是针对联合收获机

纵向速度与横向速度全面控制而设计的,限于篇幅,本文只是针对视觉导航中的横向速度控制进行研究。

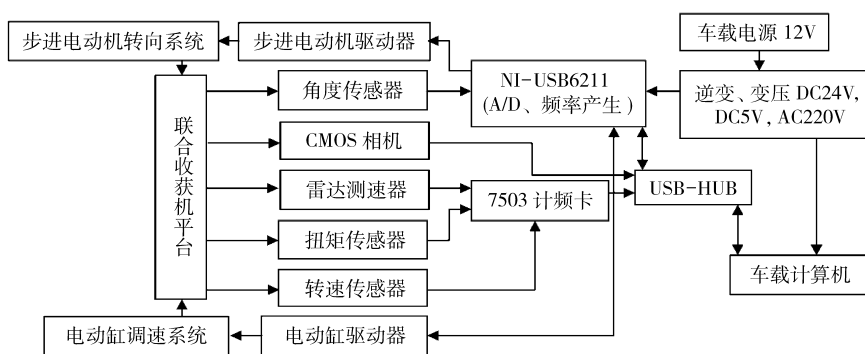


图 4 视觉导航控制系统硬件结构示意图

Fig. 4 Hardware structure of the vision navigation control system

3 导航控制系统设计

3.1 路径参数获取方法

基于视觉导航的控制系统中,导航路径检测的准确性与快速性是整个导航系统成败的关键。基于图像旋转投影的导航路径识别算法^[14]处理一帧的时间在 10 ms 以内,若以每一帧检测的结果进行转向角控制,液压和机械系统响应速度跟不上,而且也达不到很好的控制效果。为此,在大闭环反馈环节,

对连续检测的多帧检测结果进行了直方图融合处理,处理步骤见图 5。此算法核心思路是:①利用多次检测结果建立频次直方图,控制周期内检测得到的结果出现频次最高的最可能成为最终结果。②依据导航路径参数的变化连续性原理对结果进行约束,即本周期内检测得到的结果必须与上周期检测结果相差不大。通过此思路算法,获得的导航路径参数可信度更高,抗干扰性更强。

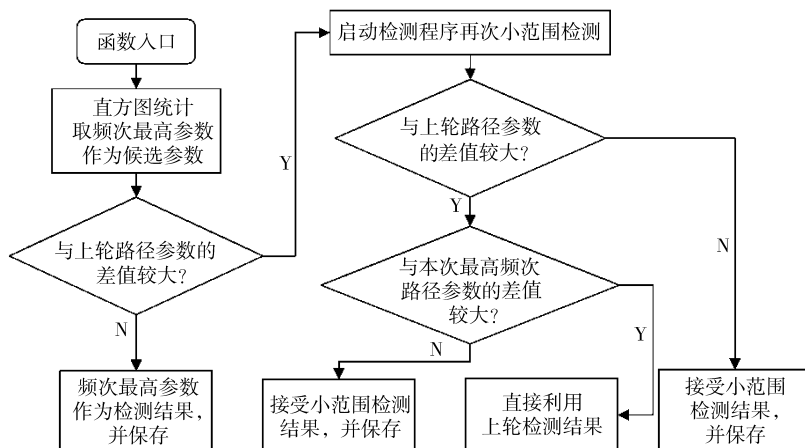


图 5 提高检测路径参数鲁棒性算法流程图

Fig. 5 Robustness algorithm flow chart of the detection cutting line

3.2 路径跟踪方法

模糊 PD 控制器中,控制量 u 的计算式为

$$u = k(pe + d\dot{e}) \quad (2)$$

式中, e 、 \dot{e} 分别为导航路径与目标路径的归一化偏差以及偏差变化率, p 是比例系数, d 是微分系数,并设定 $p + d = 1$ 。 k 是比例系数,相当于系统的增益。检测到的导航路径有 2 个参数即航向偏角 θ 与航位偏差 L , 试验研究表明,偏差 e 的构成与导航路径参数状态有关,其具体关系表示为

$$e = \begin{cases} (1 + d_p)\theta/\theta_m & (\theta \geq 0) \\ (1 - d_p)\theta/\theta_m & (\theta < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中 d_p ——归一化的航位偏差

θ_m ——航向偏差最大值

偏差变化率 \dot{e} 是在两个相邻控制周期内偏差的差值。引入偏差变化率有助于降低超调,缩短调节时间。

系统的增益 k 与行走速度有关,在正常收获小麦时 k 取 1.4,在速度较大时,变化到 0.6,增益的增

大有助于提高系统的响应速度,减少累积误差,但是过大的增益又会降低系统的稳定性。

比例系数、微分系数的整定是整个控制系统的关键,为了获得较好的控制效果,在路面进行了大量的试验研究,采用模糊化的方法获取参数 p ,即 e, \dot{e} 作为输入, p 作为输出。显然 $e, \dot{e} \in [-1, 1], p \in [0, 1]$,输入输出在其论域上分别定义7个模糊子集{负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZO),正小(PS),正中(PM),正大(PB)},采用对称均匀分布的三角形隶属度函数对输入输出语言变量进行模糊分割。但是需要注意的是, p 的模糊子集中负大(NB)对应0,正大(PB)对应1。

模糊推理合成规则选用“max-min 重心法”,反模糊方法采用系数加权平均法,模糊推理规则可以由 e, \dot{e} 和 p 描述,在试验与操作人员经验基础上归纳出49条控制规则。

如果 $e = e_i, \dot{e} = \dot{e}_j$,则 $p = p_{ij}$,其中 $i = 1, 2, \dots, 7, j = 1, 2, \dots, 7$,模糊规则控制如表1所示。

表1 模糊控制规则

Tab.1 Fuzzy control regulation

\dot{e}	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	PS	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

4 试验结果

为了验证导航路径识别算法、直方图融合算法以及导航控制算法,在带有标识线路面进行大量试验的基础上,在国家精准农业研究示范基地进行了视觉导航控制试验,长方形试验地小麦长势均匀,单产在 6750 kg/hm^2 以上,长达250 m,试验前,沿周围收获3圈,剩下小麦地长约200 m。收获现场如图6所示。

试验前,人为设计收获边界如图7所示,A型收获未收获边界为直线型,B型中边界带有较小曲率的转弯。自动驾驶之前,操作人员以满割幅正常收获速度人工驾驶收割5 m左右之后,切换为计算机控制导航状态,进行无人驾驶收割小麦。如果联合收获机从始至终能以满幅无人驾驶收割,就可以认定视觉导航控制系统达到了满意的跟踪效果。



图6 收获现场

Fig.6 Scene of the harvest

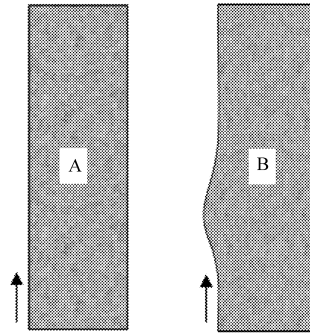


图7 人为设计收获边界

Fig.7 Cut/uncut edge of manual designed

在进行A、B型视觉导航无人驾驶的时候,通过目测以及过程录像回放,割幅2.5 m的联合收获机没有出现超满割幅致使小麦未被收割的情况,割幅最小与最大的差异保持在0.15 m左右。在多次重复试验中,均能保持较好的跟踪性能,具有较高的稳定性。如图8所示的B型边界,图中1号割幅为人工驾驶收获,收获时人为造成收获未收获边界形成一定的弯曲,2、3、4号割幅均为自动驾驶收获,均延续了1号割幅边界弯曲特性。

为了对本系统导航线跟踪效果进行更精确的评价,利用联合收获机排草形成的轨迹,每隔2 m测量轨迹到未收获小麦边界的垂直距离,以获得割幅尺寸,如图9所示。

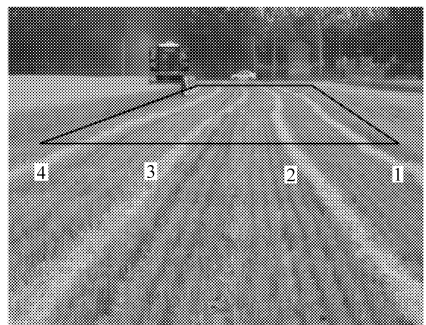


图8 小曲率边界跟踪结果

Fig.8 Tracing result of the small curvature cut/uncut edge

联合收获机收获小麦时速度挡位变化不大,一般在 $4 \sim 6.5 \text{ km/h}$,速度太小,收获效率降低,速度



图9 割幅测量示意图

Fig.9 Sketch of measuring harvesting width

过大时,导致小麦清选不干净。图 10、11 是平均收获速度为 4.2 km/h 时的控制量与割幅变化曲线,其中控制量(控制电压)由式(2)计算获得。图 12、13 是平均收获速度为 6.1 km/h 时的控制量与割幅变化曲线。

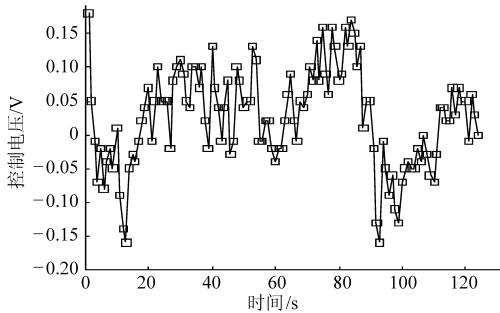


图 10 控制量随时间变化曲线(平均速度 4.2 km/h)

Fig. 10 Control value at different time at average speed of 4.2 km/h

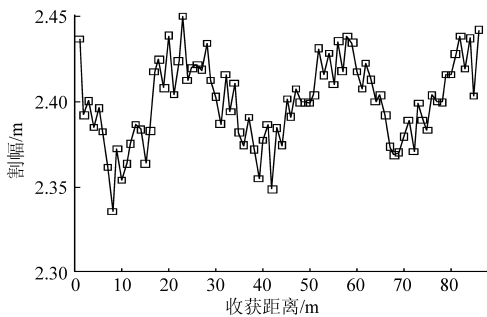


图 11 割幅变化(平均速度 4.2 km/h)

Fig. 11 Harvesting width at different points at average speed of 4.2 km/h

由割幅变化曲线可以看出,割幅最大与最小的差值在收割速度为 4.2 km/h 时为 0.13 m,速度为 6.1 km/h 时为 0.18 m,与目测基本一致。

在试验过程中,当随机的方向盘人为扰动时,如人为向已收获区域打方向盘,车头方位将发生变化,导致跟踪偏差增大,控制量也随之变大,并产生一定的超调量,但超调过后仍能控制在正常的误差范围内,此时控制量与割幅变化如图 14、15 所示。

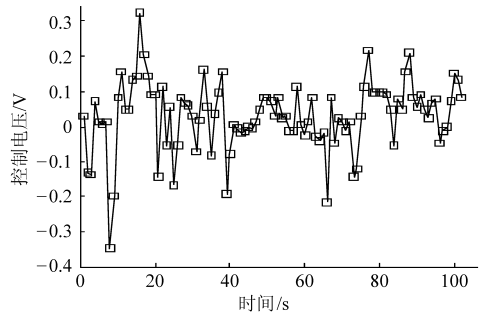


图 12 控制量随时间变化曲线(平均速度 6.1 km/h)

Fig. 12 Control value at different time at average speed of 6.1 km/h

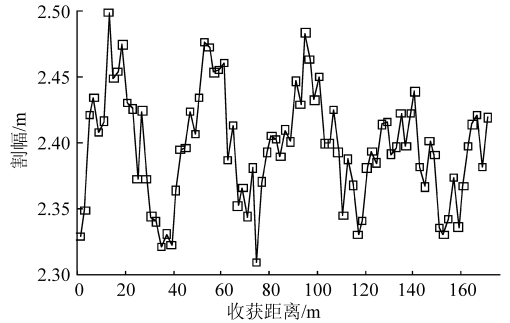


图 13 割幅变化(平均速度 6.1 km/h)

Fig. 13 Harvesting width at different points at average speed of 6.1 km/h

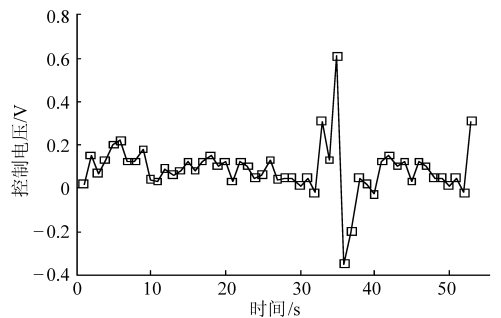


图 14 控制量随时间变化曲线(平均速度 5.1 km/h)

Fig. 14 Control value at different time at average speed of 5.1 km/h

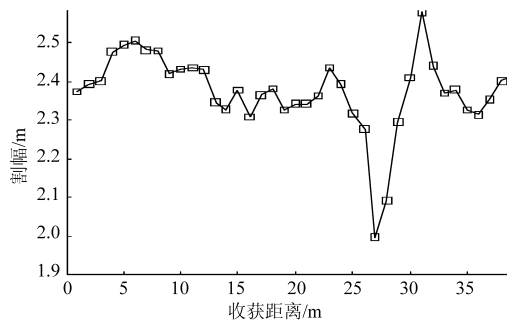


图 15 割幅变化(平均速度 5.1 km/h)

Fig. 15 Harvesting width at different points at average speed of 5.1 km/h

5 结论

利用机器视觉技术对联合收获机导航路径跟踪

进行了研究,在现有联合收获机平台上对液压转向系统实施改装,加装必要的传感器,通过麦田试验得到以下结论:

(1)旋转投影算法配合直方图融合算法能够较好地收获未收获边界线进行精确检测。

(2)在正常的作业速度范围内,割幅变化范围在0.18 m以内。

(3)在试验过程中,随机的方向盘人为扰动,联合收获机能在2~5 s内回到正常的跟踪误差范围内,控制系统有较好的抗干扰性能。

参 考 文 献

- 1 罗锡文,区颖刚,赵祚喜,等.农用智能移动作业平台模型的研制[J].农业工程学报,2005,21(2):83~85.
Luo Xiwen, Ou Yinggang, Zhao Zuoxi, et al. Research and development of intelligent flexible chassis for precision farming[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(2): 83~85. (in Chinese)
- 2 田海清,应义斌,张方明.农业车辆导航系统中自动控制技术的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(7):148~152.
Tian Haiqing, Ying Yibin, Zhang Fangming. Development of automatic control technique for agricultural vehicle guidance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 148~152. (in Chinese)
- 3 张智刚,罗锡文,周志艳,等.久保田插秧机的GPS导航控制系统设计[J].农业机械学报,2006,37(7):95~97.
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 95~97. (in Chinese)
- 4 周建军,张漫,汪懋华,等.基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J].农业机械学报,2009,40(4):151~156.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151~156. (in Chinese)
- 5 王友权,周俊,姬长英,等.基于自主导航和全方位转向的农用机器人设计[J].农业工程学报,2008,24(7):110~113.
Wang Youquan, Zhou Jun, Ji Changying, et al. Design of agricultural wheeled mobile robot based on autonomous navigation and omnidirectional steering [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(7): 110~113. (in Chinese)
- 6 周俊,刘成良,姬长英.农业机器人视觉导航的预测跟踪控制方法研究[J].农业工程学报,2004,20(6):106~110.
Zhou Jun, Liu Chengliang, Ji Changying. Predictive tracking and control method for vision-guided navigation of agricultural robot [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 106~110. (in Chinese)
- 7 王友权,周俊,姬长英,等.农用轮式移动机器人灰色预测控制[J].农业机械学报,2008,39(12):213~215.
- 8 李进,陈无畏,李碧春,等.自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制[J].农业机械学报,2008,39(2):20~24.
Li Jin, Chen Wuwei, Li Bichun, et al. Road recognition and tracking control of an vision guided AGV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 20~24. (in Chinese)
- 9 介战,陈家新,刘红俊.GPS联合收获机随机喂入量模糊控制技术[J].农业机械学报,2006,37(1):55~58.
Jie Zhan, Chen Jiaxin, Liu Hongjun. Research on fuzzy control of random feed quantity of GPS combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 55~58. (in Chinese)
- 10 陈进,李耀明,季彬彬,等.联合收获机喂入量测量方法[J].农业机械学报,2006,37(12):76~78.
Chen Jin, Li Yaoming, Ji Binbin, et al. Study on measurement method of combine feed quantity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 76~78. (in Chinese)
- 11 姬江涛,王荣先,符丽君.联合收获机喂入量灰色预测模糊PID控制[J].农业机械学报,2008,39(3):63~66.
Ji Jiangtao, Wang Rongxian, Fu Lijun. Grey prediction fuzzy PID control of the feeding quantity in combine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 63~66. (in Chinese)
- 12 陈度,祝青园,郑永军,等.联合收割机性能检测系统研究[C]//中国农业机械学会2008年学术年会论文集:846~850.
- 13 Kang Feng, Wang Shumao, Zhu Qinguan, et al. Study of an onboard information platform for a grain combine harvester [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(5): 927~934.
- 14 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):63~66.
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): 63~66. (in Chinese)