

# 联合收获机大曲率路径视觉导航方法<sup>\*</sup>

丁幼春 廖庆喜 黄海东 段宏兵

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

**【摘要】** 针对联合收获机大曲率路径难检测的问题,在旋转投影直线检测的基础上提出了双切线大曲率路径转弯半径估计算法。基于简化的二轮车运动学模型,在联合收获机机器视觉导航试验平台上,设计了智能控制器,以便根据不同路径选择不同的控制方式。路面与麦田试验结果表明:双切线转弯半径估计算法能够有效地检测曲线路径转弯半径;在小麦正常收获速度下,联合收获机能够跟踪转弯半径大于10 m的曲线路径,路面曲线跟踪误差最大值为0.19 m,田间曲线边界跟踪过程中割幅变化范围最大为0.29 m。

**关键词:** 联合收获机 视觉导航 大曲率路径检测 智能控制器

**中图分类号:** S225.31; TP242.6<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)S0-0122-06

## Large Curvature Path Detection for Combine Harvester Based on Vision Navigation

Ding Youchun Liao Qingxi Huang Haidong Duan Hongbing

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

### Abstract

For the difficult problem of detecting large curvature path of nature image processing, a double tangent-line detection algorithm for turning radius based on rotation and projection line detection arithmetic was put forward. On the base of kinematics of simplified two-wheel vehicle model, an intelligent controller was constructed for the vision navigation test platform of combine harvester. The controller could select different control mode according to the different path (including straight path and curve path). The tests on road with tag line and in wheat field with curvature cut boundary showed that the double tangent-line detection algorithm was valid to detect turning radius and the system could trace the curvature path whose radius was greater than 10 m. During the normal working speed, the maximum error of tracing large curvature path on road was 0.19 m and in field the change of harvesting width was within 0.29 m.

**Key words** Combine harvester, Vision navigation, Large curvature path detection, Intelligent controller

### 引言

我国对农业机械装备进行导航控制系统的研究包括基于视觉与GPS的导航路径识别、规划<sup>[1-4]</sup>,导航控制系统设计等<sup>[5-13]</sup>,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

平台等研究<sup>[14-17]</sup>,基于视觉的导航控制特别是曲线跟踪方面的研究相对较少。

视觉导航中多以直线路径模型进行导航控制,针对小曲率(大半径)路径特别是直线路径有较好的效果,但对较大曲率路径跟踪误差较大,甚至不能很好地进行跟踪。相对于直线路径模型,大曲率路

收稿日期: 2011-08-15 修回日期: 2011-08-23

<sup>\*</sup> 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009JC001)

作者简介: 丁幼春,副教授,主要从事自动控制、测试、视觉导航研究, E-mail: kingbug163@163.com

通讯作者: 廖庆喜,教授,主要从事油菜播种机械和高粗茎秆作物收获机械研究, E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

径模型可以获得预瞄点的曲率,由此可以得到精确的航向偏差,有利于提高导航控制精度。但大曲率路径的视觉检测难度较大,主要体现在:很难获得一套通用的适用于自然环境下大曲率路径准确检测的分割算法或者颜色特征分类算法,从而难以获得准确的曲线路径边界。

文献[1]基于直线模型提出了一种旋转投影算法,在帧检测时间 6.2 ms 的情况下,对田间导航路径检测正确率达到 95% 以上。文献[5~6]在此算法基础上设计了导航控制系统,实现田间小麦收获与未收获边界的跟踪,跟踪误差在 0.18 m 内。本文在旋转投影算法的基础上,把大曲率路径近似为理想圆弧,通过获取圆弧上两条切线方程,间接求出大曲率路径预瞄点曲率,为联合收获机视觉导航控制器提供关键的航向偏差参数,以实现大曲率路径跟踪。

## 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 58 kW 柴油发动机,标称喂入量 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,由此可推导出理论转弯半径  $r = l / \tan \varphi_0$ ,其中  $l$  为前后轮轴距,  $\varphi_0$  为后轮转向角。

图 1 为地面一段圆弧几何关系,其中  $d$  为圆弧的高度,方向为联合收获机正前方;  $l_1$ 、 $l_2$  为 A、B 两点的圆弧切线;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为  $l_1$ 、 $l_2$  与竖直方向的夹角; 圆心角  $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$ ;  $R$  为圆弧半径。

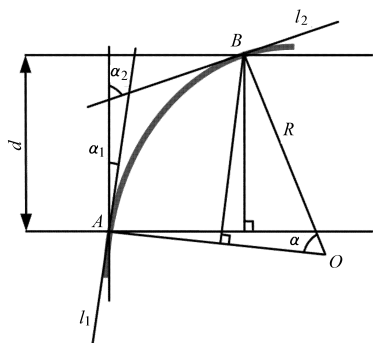


图 1 地面圆弧几何关系

Fig. 1 Geometrical relationship of ground arc

由图 1 的几何关系可以推出圆弧半径  $R$  与各参数关系为

$$R = \frac{d}{\cos \alpha_1 [\sin \alpha + (\cos \alpha - 1) \tan \alpha_1]}$$

结合联合收获机理论转弯半径  $r = l / \tan \varphi_0$ , 可得

$$\varphi_0 = \arctan \left( \frac{l}{d} \cos \alpha_1 (\sin \alpha + (\cos \alpha - 1) \tan \alpha_1) \right) \quad (1)$$

$\varphi_0$  即为联合收获机后轮转向角。式(1)表明,针对一段半径为  $R$  的圆弧路径,只要获得  $l_1$ 、 $l_2$  两切线与竖直方向的夹角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ , 圆弧的高度  $d$  以及联合收获机前后轮轴距  $l$ , 那么在没有航位偏差的前提下,联合收获机转向轮转向  $\varphi_0$  角度后,可以实现这段圆弧路径的准确跟踪,这也是实现大曲率路径跟踪的原理所在。

## 2 大曲率路径转弯半径估计算法

### 2.1 试验设备

采用 USB 接口的 DH-HV1302UC 型相机进行图像采集,镜头为 Computer M0814-MP, 焦距 8 mm, 输出为彩色图像,采集速率最高为 30 帧/s, 安放在联合收获机割台的上端。相机安置位置及视场如图 2 所示,其中  $\phi = 30^\circ$ ,  $h = 3.1$  m,  $l_{OP_3} = 3.4$  m,  $l_{P_1P_3} = 11.5$  m, 也就是说相机能够获得联合收获机前方 11.5 m 的路径信息。用于图像处理的计算机主频为 2.93 GHz (双核 CPU)、内存为 2 GB。采集图像时的天气状态为晴天与阴天,采集的图像大小为  $640 \times 480$  像素,导航路径有带标识线的行车道和田间小麦收割现场。

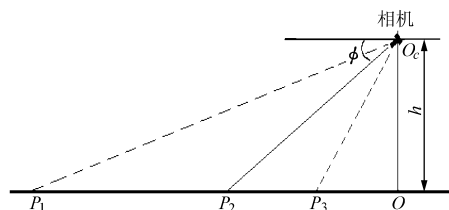


图 2 相机安装及视场示意图

Fig. 2 Sketch of camera installation and view field

### 2.2 大曲率路径转弯半径估计算法

在大曲率路径近似为理想圆弧的情况下,由式(1)知需要获得 2 个特定点的切线方程参数即可计算出该圆弧的曲率(半径),进而可以获得跟踪圆弧的转向角度。

图像的旋转投影算法能够有效检测直线路径,该算法通过角度枚举对图像 ROI (region of interest) 实施旋转变换,由旋转后图像的列均值与枚举角度构成旋转投影矩阵,对其行向量实施差分运算得到差分旋转投影矩阵,由其极值可确定图像导航路径即航向偏差与航位偏差,该算法具有抗干扰(颜色、亮度)、快速与准确等特点<sup>[1]</sup>。针对曲线路径,通过该算法的角度枚举运算,可以获得与旋转中心有关的最大列均值及其位置,即可获得对应于该旋转中心下的直线模型路径方程,此方程可近似认为是曲

线路径的一条切线,如图3所示。

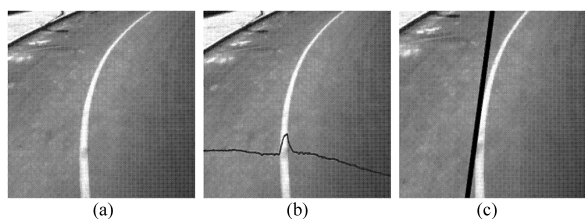


图3 基于旋转投影算法的曲线切线检测

Fig.3 Tangent line detection based on rotation and projection arithmetic

(a) 原曲线标识路径 (b) 角度枚举列均值曲线  
(c) 最大列均值对应的直线

旋转中心变化,切线的切点也相应发生变化。基于此,大曲率路径转弯半径估计算法为:

(1)确定初始旋转中心点。图像的旋转变换就是在图像平面内绕某一确定点对图像实施坐标变换,该确定点称为旋转中心点,即

$$\begin{cases} U = u \cos \alpha + v \sin \alpha + u_0 \\ V = -u \sin \alpha + v \cos \alpha + v_0 \end{cases}$$

其中 $(u, v)$ 是原图像坐标, $(u_0, v_0)$ 是旋转中心坐标。初始旋转中心点决定着第1条切线位置,设定 $u_0 = w_i/2, v_0 = 3h_i/4$ ,且取图像ROI为 $(0, h_i/2, w_i, h_i)$ ,以缩小小曲率路径检测范围。其中 $w_i$ 为图像的宽度(像素), $h_i$ 为图像的高度(像素)。

(2)实施旋转投影算法,求取曲线第1条近似切线 $l_1$ ,其表征参数为图像 $u$ 轴截距 $c_{c1}$ 及与图像 $v$ 轴夹角 $\alpha_{c1}$ 。其中枚举角度取 $\Delta\alpha = 1^\circ$ ,线性压缩比 $\beta = 0.25$ ,旋转 $\alpha$ 从 $-45^\circ$ 到 $45^\circ$ 。

(3)确定第2个旋转中心点,求取曲线第2条近似切线。在相机一定视野中,曲线具有连续性,第2旋转中心点应该依赖于第1条切线位置,为此沿 $l_1$ 直线在高度方向上(从上到下) $h_i/4$ 处确定为第2旋转中心,即 $u_0 = l_1|_{y=h_i/4}, v_0 = h_i/4$ ,且取图像ROI为 $(u_0 - w_i/4, 0, u_0 + w_i/4, h_i/2)$ 。旋转投影算法仍取步骤(2)中相同的参数,得到第2条近似切线 $l_2$ ,其表征参数为图像 $u$ 轴截距 $c_{c2}$ 及与图像 $v$ 轴夹角 $\alpha_{c2}$ 。

(4)求取大曲率路径转弯半径。文献[1]中给出的地面直线与图像直线的转换关系为

$$\begin{cases} c = h \left( k_c \frac{f_y}{f_x} \cos \phi + \frac{c_c}{f_x} \sin \phi \right) \\ k = \frac{c_c \cos \phi - k_c f_y \sin \phi}{f_x} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $k_c = \tan \alpha_c$   
式中  $c_c$ ——图像坐标下直线在 $u$ 轴的截距  
 $c, k$ ——地面坐标下直线截距与正切  
 $f_x, f_y$ ——相机的内参数,通过标定可以获得

通过式(2)将切线 $l_1, l_2$ 转换为地面坐标系下的直线方程,进而可获得其对应的 $\alpha_1, \alpha_2$ 及 $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ 。地面圆弧(大曲率路径)的高度 $d$ 通过图像坐标系中的两旋转中心点以及图2中相机的视场确定。由式(1)可以求出跟踪地面大曲率路径(航位偏差为零的前提下)转向轮转向角 $\varphi_0$ 。

## 2.3 算法验证

根据上述算法采用VC++6.0开发出基于双切线的大曲率路径转弯半径检测程序,针对采集的1800幅图像进行识别检测。图4是几种典型情况下的识别效果,图中直线分别代表 $l_1$ 与 $l_2$ ,同时显示出 $\alpha$ 角度以及算法运行的时间。 $\alpha$ 角右弯曲为正,左弯曲为负,正负决定弯曲方向。一帧的检测所需时间在22ms左右,差异在1.5ms内,满足实时性要求。

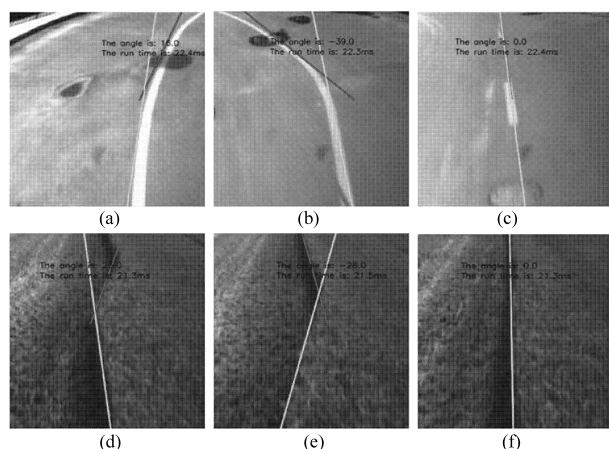


图4 基于双切线的大曲率路径转向角检测效果图

Fig.4 Turning angle detection for large curvature path based on double tangent-line

(a) 路面右弯曲路径检测 (b) 路面左弯曲路径检测  
(c) 路面非弯曲路径检测(两切线重合)  
(d) 小麦田间右弯曲路径检测 (e) 小麦田间左弯曲路径检测  
(f) 小麦田间非弯曲路径检测(两切线重合)

对路面以及田间采集的样本图像测试表明,如果第1条切线 $l_1$ 检测准确,那么 $l_2$ 检测准确性可达99%,错误的原因在于路径曲率过大(半径过小),导致相机有限的视野中从图像的左边或者右边延伸出去,而非从顶部延伸,从而与算法中检测第2条切线 $l_2$ 所确定的旋转中心位置误差较大,导致检测失败。结合本联合收获机转向系统以及视觉系统,圆弧路径半径大于10m时,在 $l_1$ 检测准确的前提下能正确检测 $l_2$ 。

利用文献[5]提出的多帧检测结果直方图融合处理可以大幅度提高 $l_1$ 检测的准确性,其核心思路是:利用多次不同区域检测结果结合相关约束综合评判得到最终结果,可信度更高,抗干扰性更强。旋

转投影算法处理一帧的时间在 10 ms 以内,这就充分可以充分利用直方图融合的思想尽可能地提高  $l_1$  检测的准确率,本试验根据控制周期的要求选取 19 帧进行一次融合。

### 3 导航控制系统设计与试验

新疆 4LD-2A 型自走式轴流谷物联合收获机通过液压缸实现后轮转向操作,以此为对象,改装液压转向系统为计算机控制,构建视觉导航试验平台。采用 USB 接口的 DH-HV1302UC 型相机,Computer M0814-MP 型镜头,DWQT 型角度传感器,雷达测速器等构成信息采集系统。

#### 3.1 导航控制系统硬件结构

视觉导航试验平台是基于车载计算机 USB 总线结构硬件构架(图 5),包括高速数据采集器 NI-USB6212。利用车载电源,进行逆变获取 AC220V,通过变压获取 24 V 以及 DC-DC 变换获得 5 V,供控制系统使用。NI-USB6212 提供 16 路 16 位高速 A/D 转换通道,2 路 32 位定时器产生脉冲或者计数,32 路 TTL I/O,2 路模拟量输出。主要用来采集角位移电压、雷达测速器速度信号,产生指定频率脉冲信号、方向信号给步进电动机驱动器。

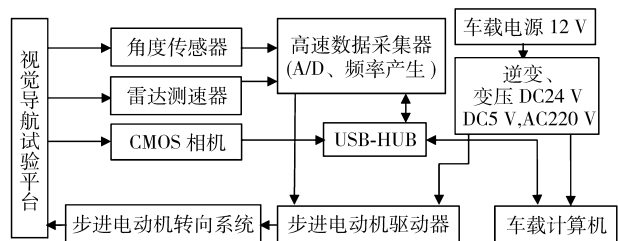


图 5 联合收获机视觉导航控制系统硬件结构框图

Fig.5 Hardware structure of vision navigation control system

#### 3.2 控制器结构及参数获取

导航控制器采用双闭环控制结构,如图 6 所示。大闭环由视觉检测系统和车速检测反馈以及智能控制器构成,智能控制器可以根据路径的状态采用直线路径还是曲线路径控制算法,得到对应的控制量。小闭环以后轮转角测量作为单位负反馈构成,确保控制量适时完全执行。

结构中,反馈环节检测参数有航位偏差  $D$ 、航向

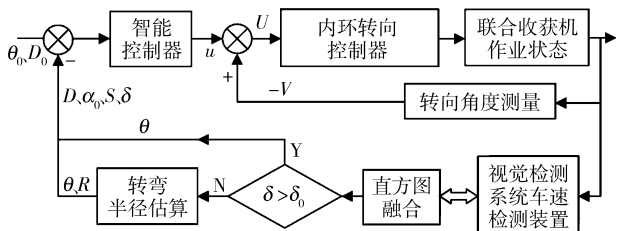


图 6 联合收获机导航控制器结构框图

Fig.6 Double closed loop control system structure

偏差  $\theta$ (直线路径参数)、曲线路径转弯半径  $R$ 、直线与曲线的判决因子  $\delta$ 、行车速度  $S$  以及转向轮当前转角  $\alpha_0$ ,这些参数作为智能控制器的输入,控制量为转向轮转角。

直线路径与曲线路径通过判决因子  $\delta$  判定。根据旋转投影算法原理,直线路径与曲线路径差异体现在差分旋转投影矩阵极值的大小上,这主要是直线路径经旋转后在图像列均值上具有集中突变的特点,差分旋转投影矩阵极值较大,而曲线路径不管旋转到什么位置,曲线路径很难被集中到某一列或几列,列均值较分散,差分旋转投影矩阵极值较小,直线路径所对应的极值为曲线的 2~6 倍。通过设定合适的阈值  $\delta_0$ (本系统取 15),当  $\delta > \delta_0$  时,给出航向偏差  $\theta$ ;当  $\delta \leq \delta_0$  时,认为是曲线路径,采用转弯半径估计算法,得到转弯半径  $R$ ,给出航向偏差  $\theta$  以及转弯半径  $R$ 。智能控制器根据判决因子  $\delta$  的大小确定采用直线路径控制算法还是曲线路径控制算法,直线路径控制算法采用模糊 PD 控制方法<sup>[5-6]</sup>,不再赘述。阈值  $\delta_0$  的选取不可能绝对分开直线路径与曲线路径,但  $\delta_0$  可以取大值,以增加直线路径误判为曲线路径的机会,减少曲线路径误判为直线路径的机会,由图 4c、4f 可知,直线路径当作曲线路径检测时,两切线重合,得到转弯半径为  $\infty$ ,转向角为零,不影响导航控制。结构中小闭环控制方法见文献[6]。

#### 3.3 路径跟踪方法

转弯半径  $R$  带有极性,正代表右转弯,负代表左转弯,根据  $R$  以及式(2)可以得到转向角  $\varphi_0$ ,设计控制器在  $k$  时刻控制量为

$$u_k = \begin{cases} K_1(e_k + \dot{e}_k) & (|D_k| > \varepsilon) \\ K_2\varphi_k & (|D_k| \leq \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$e_k = \frac{D_k - D_0}{D_m}$$

式中  $e_k, \dot{e}_k$ ——当前航位偏差及偏差变化率

$D_k$ ——当前航位偏差  $D_0$ ——标准航位

$D_m$ ——最大航位偏差

$K_1$ ——比例系数,融入速度因素,详见文献[6]

$\varphi_k$ ——当前曲线路径转向角

$K_2$ ——增益系数,实现转角到电压量的转换

定义当前偏差变化率  $\dot{e}_k$  为两个相邻控制周期内航位偏差的差值,即  $\dot{e}_k = e_k - e_{k-1}$ ,引入偏差变化率有助于降低超调,缩短调节时间。

$u_k$  随  $D_k$  的大小不同采用不同结构形式,在航位偏差较小的情况下,可直接利用转向角实现曲线路径的跟踪。在航位偏差较大时,以纠正航位偏差

为主,  $\varepsilon$  取  $0.1D_m$ 。

## 4 试验结果

为了验证曲线路径跟踪效果,在带有弯曲标识线的路面以及江苏保丰集团农场(福田雷沃重工农装试验基地)分别进行了路面和田间试验,图7为曲线路径试验现场。

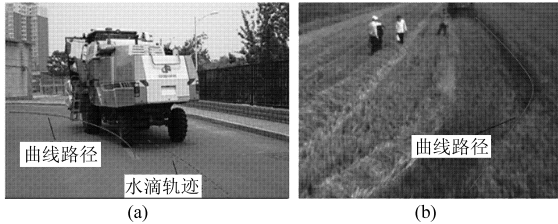


图7 联合收获机曲线路径试验现场

Fig.7 Curve path navigation test of combine harvester

弯曲路径选择的是校内带有黄色间断的中心标示线公路,弯道长约20 m,弯道半径约10.5 m,路面弯道跟踪试验通过滴水获得行走轨迹,同时每隔0.5 m采集一个样本点获得跟踪误差。试验时,先跟踪直线路径,而后平稳过渡到曲线路径跟踪。

试验地小麦长势均匀,单产在  $6750 \text{ kg}/\text{hm}^2$  以上,地块长约200 m,宽100 m。试验前,沿周围收获3圈,人为形成小麦收割曲线边界,弯曲半径约

15 m。自动收割前在收割边界上选定测量点,收割后每隔1 m测量选定点到未收获小麦边界的垂直距离,获得割幅尺寸,间接获得跟踪误差。

进行了常用收获速度的测试,得到如下结果:

(1)路面试验在速度为  $7.8 \text{ km}/\text{h}$  时(相当于高速收获),联合收获机能顺利跟踪直线路径与曲线路径,直线路径跟踪误差最大为  $0.05 \text{ m}$ ,曲线跟踪误差最大为  $0.19 \text{ m}$ 。在  $5.12 \text{ km}/\text{h}$  时,曲线跟踪误差最大为  $0.17 \text{ m}$ 。速度越大,跟踪误差相对较大,带来的清选损失也越大。

(2)田间试验在收获速度为  $6.1 \text{ km}/\text{h}$  时,弯道处割幅最大差值为  $0.29 \text{ m}$ ;速度为  $4.2 \text{ km}/\text{h}$  时为  $0.22 \text{ m}$ 。

## 5 结论

(1)基于旋转投影算法,获取大曲率路径的两条切线方程能够有效地估算转弯半径。

(2)设计的智能控制器能够根据路径选择不同的控制方式。

(3)联合收获机在不同速度下路面与田间曲线路径跟踪试验结果表明:路面跟踪误差最大值为  $0.19 \text{ m}$ ;田间割幅变化范围最大为  $0.29 \text{ m}$ 。

## 参 考 文 献

- 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)
- 安秋,李志臣,姬长英,等.基于光照无关图的农业机器人视觉导航算法[J].农业工程学报,2009,25(11):208~212.  
An Qiu, Li Zhichen, Ji Changying, et al. Agricultural robot vision navigation algorithm based on illumination invariant image [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 208~212. (in Chinese)
- 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):107~113.  
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): 107~113. (in Chinese)
- 曹倩,王库,杨永辉,等.基于TMS320DM642的农业机器人视觉导航路径检测[J].农业机械学报,2009,40(7):171~176.  
Cao Qian, Wang Ku, Yang Yonghui, et al. Identifying the navigation route based on TMS320DM642 for agriculture visual robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 171~176. (in Chinese)
- 丁幼春,王书茂.联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(5):137~143.  
Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 137~143. (in Chinese)
- 丁幼春,廖庆喜,黄海东,等.联合收获机视觉导航控制器设计[J].农业机械学报,2010,41(增刊):239~244.  
Ding Youchun, Liao Qingxi, Huang Haidong, et al. Design of vision navigation controller for combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 239~244. (in Chinese)
- 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等.东方红X-804拖拉机的DGPS自动导航控制系统[J].农业工程学报,2009,25(11):139~145.  
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139~145. (in Chinese)
- 胡炼,罗锡文,张智刚,等.基于CAN总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J].农业工程学报,2009,25(12):88~92.  
Hu Lian, Luo Xiwen, Zhang Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on

- controller area network[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 88 ~ 92. (in Chinese)
- 9 周建军,郑文刚,李素,等.基于ISO11783的拖拉机导航控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(4):184 ~ 189.  
Zhou Jianjun, Zhen Wengang, Li Su, et al. Automatical navigation control system for tractor based on ISO11783 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 184 ~ 189. (in Chinese)
- 10 吴晓鹏,赵祚喜,张智刚,等.东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J].农业机械学报,2009,40(增刊):1 ~ 5.  
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 11 汪明磊,陈无畏,王檀彬,等.基于分层传感器信息融合的智能车辆导航[J].农业机械学报,2009,40(11):165 ~ 171.  
Wang Minglei, Chen Wuwei, Wang Tanbin, et al. Navigation study for intelligent vehicle based on layered sensor information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 165 ~ 171. (in Chinese)
- 12 刘兆祥,刘刚,籍颖,等.基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统[J].农业机械学报,2010,41(11):148 ~ 154.  
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148 ~ 154. (in Chinese)
- 13 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)
- 14 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)
- 15 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. Study on measurement method of combine feed quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 76 ~ 78. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 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.

## (上接第 132 页)

- 10 Halatci I, Brooks A, Iagnemma K. Terrain classification and classifier fusion for planetary exploration rovers[C]//2007 IEEE Aerospace Conference, 2007.
- 11 王明军,周俊,屠珺,等.基于条件随机场的大范围地形感知框架[J].机器人,2010,32(3):326 ~ 333.  
Wang Mingjun, Zhou Jun, Tu Jun, et al. Long-range terrain perception based on conditional random fields[J]. Robot, 2010, 32(3): 326 ~ 333. (in Chinese)
- 12 Felzenszwalb P, Huttenlocher D P. Efficient graph-based image segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2): 167 ~ 181.
- 13 Sridharan M, Stone P. Color learning and illumination invariance on mobile robots: a survey[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(6/7): 629 ~ 644.
- 14 Leung T, Malik J. Representing and recognizing the visual appearance of materials using three-dimensional textons[J]. International Journal of Computer Vision, 2001, 43(1): 29 ~ 44.
- 15 Sun Y. Iterative RELIEF for feature weighting: algorithms, theories, and applications[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(6): 1 035 ~ 1 051.
- 16 Halatci I, Brooks C A, Iagnemma K. A study of visual and tactile terrain classification and classifier fusion for planetary exploration rovers[J]. Robotica, 2008, 26(6): 767 ~ 779.
- 17 Burges C J C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2): 121 ~ 167.