

农田作业机械路径优化方法*

孟志军¹ 刘 卉² 王 华² 付卫强¹

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 2. 首都师范大学信息工程学院, 北京 100048)

【摘要】 提出了一种面向农田作业机械的地块全区域覆盖路径优化方法。基于农田地块几何形状、作业机具参数、地头转弯模式等先验信息,将田间作业划分为不同区域,根据选择不同的路径优化目标:转弯数最少、作业消耗最小、总作业路径最短或有效作业路径比最大,计算出最优作业方向,生成最优作业路径。基于地块全区域覆盖路径优化算法,设计开发了农田作业机械的路径规划软件,并选取了4块典型的凸四边形农田地块进行作业路径规划测试。测试结果表明,最优作业方向上的路径优化目标量比其他作业方向上有显著减少;对于上述4个地块,按照不同优化目标计算所得的最优作业方向均与地块某个边的方向角相同,对于长宽比较大的地块,最长边方向通常为最优作业方向。

关键词: 农田作业机械 路径优化 全区域覆盖

中图分类号: S232 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)06-0147-06

Optimal Path Planning for Agricultural Machinery

Meng Zhijun¹ Liu Hui² Wang Hua² Fu Weiqiang¹

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. Information Engineering College, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract

A kind of optimal path planning method for complete field coverage in agricultural machinery farming was described. The given convex field was decomposed into sub regions according to typical farming pattern of complete field coverage. Optimal path planning should minimize agricultural machines turns, farming time, route distance or other optimization object. According to the different purpose of path planning above, optimal travel direction could be determined based on topological features of arable lands, turns pattern in the headland and other useful information. Farming path planning software was developed by using this algorithm. The test results from four actual quadrangular fields showed that the optimization object for field operation in optimal travel direction decreased obviously compared with other directions. Each optimal travel direction in those quadrangular fields above was along any edge. Especially for a quadrangle having a larger edge ratio, the optimal travel direction was almost the longest edge.

Key words Agricultural machinery, Optimal path planning, Complete field coverage

引言

农田作业机械的田间作业路径,一般由操作人员根据习惯、经验和常识性规则进行选择,也有学者

提出了一些路径设计方法。陈济勤从传统的农业机械运营管理和农田作业工艺角度考虑,提出了针对耕地、播种、收割等不同农田作业方式下的直行、绕形、斜行等作业路径模式^[1]。Stoll 提出根据地块最

收稿日期: 2011-11-16 修回日期: 2012-02-26

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD04B05-1)、国家自然科学基金资助项目(31101078)、北京市自然科学基金资助项目(4112013)和农业部“948”重点资助项目(2011-G32)

作者简介: 孟志军,副研究员,博士,主要从事精准农业智能信息集成技术及智能装备技术研究,E-mail: mengzj@nercita.org.cn

长边将田块分割成子地块进行路径优化的方法^[2]。Zhao Chunjiang 等基于 GIS 组件开发了平行作业路径生成软件,能够根据用户指定的作业地块和作业方向,生成平行作业路径并进行作业导航模拟^[3]。Vougioukas 等提出了一种基于动力学约束的两阶段田间作业路径规划方法^[4]。

田间作业路径的合理规划有利于提高农田机械的作业质量,减小生产资料消耗和农机作业能耗^[5]。对于当前现代农业装备前沿的自动驾驶拖拉机研究,田间作业路径规划尤为重要。对于自动驾驶拖拉机,需要给定明确的田间作业路径,作为系统输入的导航跟踪目标,才能进行正常的行走和作业,并且田间作业路径优化设计有利于更好发挥自动驾驶拖拉机在复杂田间环境及作业任务下的作业优势^[6~11]。然而,目前关于农田作业机械路径设计与优化研究还较少,尚未形成一种优化和通用的路径规划算法。

本文针对田间作业环境和作业任务中的可预知性,提出一种面向农田作业机械的地块全区域覆盖路径优化方法,设计开发作业路径规划软件,并针对典型地块进行作业路径优化设计与数据分析。

1 田间作业路径优化目标

田间作业环境和作业任务具有可预知性,因此基于作业地块几何形状、作业机具参数、地头转弯模式等先验信息,可以将农田作业机械的田间作业划分为不同区域,构建农田地块全区域覆盖路径。地头转弯区是指用于农机转弯的区域,通常此区域为非有效作业区域,不种植农作物;在有效作业区域内,农机采用常见的直行梭式行走方法,如图 1 所示。此外,还作如下假设:①假定拖拉机机组在理想条件下作业,不考虑天气、地形等环境因素对作业过程的影响。②拖拉机机组作业时,从农田地块的某一边界开始,一行接一行顺序行进作业,不存在从地块中间任意点开始作业或者跳跃作业的可能。

根据不同作业任务或特定的作业需求,可以选择不同的路径优化目标,计算出农田作业机械的最优作业方向,生成最优作业路径。本研究提出以下路径优化目标:

- (1)转弯数最少:拖拉机机组按照最优作业方向进行田间作业时,在所有地头边界上的转弯数之和最小。
- (2)作业消耗最小:拖拉机机组按照最优作业方向进行田间作业时,在地头上进行转弯操作所消耗的时间最少。
- (3)总作业路径最短:总作业路径是指地块边界内所有直线作业行路径长度与各相邻作业行首尾

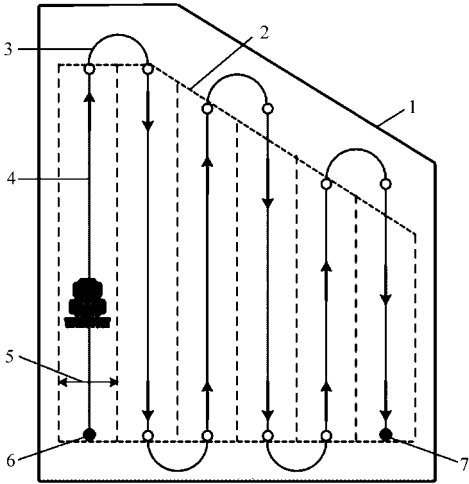


图 1 地块全区域覆盖作业路径示意图
Fig. 1 Conceptual diagram of optimal path planning for complete field coverage

1. 自然地块 2. 地块边界 3. 半圆形转弯 4. 作业路径 5. 作业幅宽 6. 作业起点 7. 作业终点

转弯路径长度之和,当拖拉机机组按照最优作业方向上进行田间作业时,总作业路径最短。

(4)有效作业路径比最大:有效作业路径是指地块边界内的所有直线作业行路径长度,当拖拉机机组在最优作业方向上进行田间作业时,有效作业路径长度与总作业路径长度的比值最大。

2 地块全区域覆盖路径优化算法

基于地块全区域覆盖路径,设计了路径优化算法,计算农田作业机械的最优作业方向。给出如下定义:拖拉机机组作业的农田地块为凸多边形,在地块中无障碍物。凸多边形地块有 m 条边,第 i 条边的边长为 $L_i (i=1,2,\cdots,m)$,第 i 条边与 x 轴正向夹角为 φ_i 。拖拉机机组进行田间作业起始点为 $A_1(x_1,y_1)$,且 A_1 是凸多边形地块边界上的一点。拖拉机机组作业时上一行和下一行之间的距离为作业幅宽 w 。拖拉机作业方向 θ 为与 x 轴正向逆时针夹角,且 $\theta \in [0^\circ,180^\circ)$ 。拖拉机机组在田间作业时,仅采用一种转弯模式,常见转弯模式包括半圆形、梨形和鱼尾形。半圆形转弯时,转弯半径为 R ;梨形转弯时,2 个圆弧的半径均为 R ;鱼尾形转弯时 2 个圆弧半径均为 R ,如图 2 所示。

以下分别计算不同路径优化目标下的农田作业机械最优作业方向。

2.1 转弯数最少

拖拉机机组在地头边界作业时,在多边形地块第 i 条边上的转弯数 N_i 为

$$N_i = \frac{|\sin(\theta - \varphi_i)| L_i}{2w} \quad (i=1,2,\cdots,m) \quad (1)$$

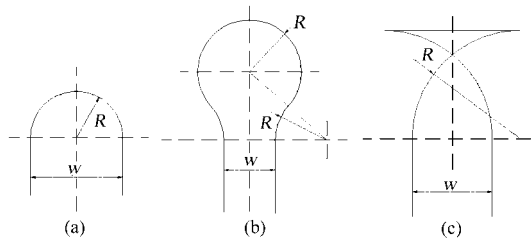


图 2 拖拉机的 3 种转弯模式

Fig. 2 Three turn patterns of agricultural machinery

(a) 半圆形 (b) 梨形 (c) 鱼尾形

拖拉机机组在多边形地块的所有地头边界上的总转弯数 N 为

$$N = \sum_{i=1}^m N_i \quad (2)$$

那么在 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$ 搜索最优作业方向, 即对总转弯数 N 求解极小值

$$\frac{dN}{d\theta} = 0 \quad (3)$$

则计算所得 θ 值即为拖拉机机组的最优作业方向。

2.2 作业消耗最小

路径规划旨在提高作业效率, 因此可以通过时间消耗来表征拖拉机田间作业消耗^[12]。拖拉机机组无论采用哪种转弯模式, 在地头任意相邻作业行的一个转弯作业消耗 C_0 均由 3 部分组成, 如图 3 所示。

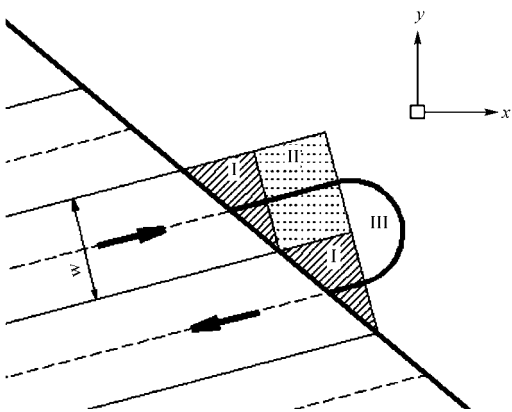


图 3 地头区域的某一转弯路径

Fig. 3 One turn in headland

(1) 行驶在 2 个相等直角三角形区域 I 中线段部分的消耗为 C_{01} , 若拖拉机在该区域内的行驶速度为 v_1 , 则

$$C_{01} = \frac{w}{v_1 |\tan(\theta - \varphi_i)|} \quad (4)$$

(2) 行驶在矩形区域 II 中线段部分的消耗为 C_{02} , 若拖拉机在该区域内的行驶速度为 v_2 , 则

$$C_{02} = \frac{w}{v_2 |\tan(\theta - \varphi_i)|} \quad (5)$$

(3) 行驶在转弯区域 III 曲线部分的消耗为 C_{03} ,

若拖拉机在该区域内的行驶速度为 v_3 , 则

$$C_{03} = \begin{cases} \frac{\pi w}{2v_3} & (\text{半圆形转弯}) \\ \left(\pi + 4\arccos \frac{w+2R}{4R} \right) \frac{R}{v_3} & (\text{梨形转弯}) \\ \frac{(\pi+2)R-w}{v_3} & (\text{鱼尾形转弯}) \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可知, 一个转弯作业消耗 C_0 为

$$C_0 = C_{01} + C_{02} + C_{03} \quad (7)$$

拖拉机机组在多边形地块第 i 条边上的作业消耗 $C_i (i=1, 2, \dots, m)$ 存在 2 种情况:

(1) 当作业方向与多边形地块的第 i 条边接近平行, 即 $|\theta - \varphi_i| \approx 0$ 或 $|\theta - \varphi_i| \approx \pi$ 时, 拖拉机机组在第 i 条边上不转弯, 此时作业消耗为靠近地块第 i 条边上、地头一侧的条形未覆盖区域, 若 a 为该区域内单位面积上消耗的时间, 则此时作业消耗 C_i 为

$$C_i = \frac{a |\sin(\theta - \varphi_i)| L_i^2}{2} \quad (8)$$

(2) 当作业方向与多边形地块的第 i 条边不平行时, 拖拉机机组在第 i 条边上的转弯数 $N_i \geq 1$, 则此时作业消耗 C_i 为

$$C_i = N_i C_0 \quad (9)$$

拖拉机机组在多边形地块作业的总作业消耗 C 为

$$C = \sum_{i=1}^m C_i \quad (10)$$

在 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$ 搜索最优的作业方向, 即对总作业消耗 C 求解极小值

$$\frac{dC}{d\theta} = 0 \quad (11)$$

则计算所得 θ 值即为拖拉机机组的最优作业方向。

2.3 总作业路径最短

总作业路径 P 是指所有直线作业行路径长度 P_w 与各相邻作业行首尾转弯路径长度 P_T 之和。

(1) 直线作业行路径长度

已知拖拉机机组作业起始点 $A_1(x_1, y_1)$, 经过 A_1 点的第 1 条目标作业路径与多边形交于 $B_1(x'_1, y'_1)$, 则拖拉机机组的一组作业路径的平行直线方程为

$$y - y_1 = \tan\theta \left[x - x_1 - \frac{(n-1)w}{\sin\theta} \right] \quad (12)$$
$$(n=1, 2, \dots, N+1)$$

将式(12)与地块的多边形方程联立求解, 可得任意直线作业路径与多边形地块的 2 个交点 $A_n(x_n, y_n)$ 和 $B_n(x'_n, y'_n)$ 。那么, 多边形地块边界内所有直线作业路径的总长度, 即有效作业路径 P_w

为

$$P_w = \sum_{n=1}^{N+1} \sqrt{(x_n - x'_n)^2 + (y_n - y'_n)^2} \quad (13)$$

(2) 转弯路径长度

如图 3 所示,拖拉机机组无论采用哪种转弯模式,在地块边界外进行一个转弯的路径 P_0 由 3 部分组成。

拖拉机机组在 2 个相等直角三角形区域 I 中行驶距离 P_{01} 为

$$P_{01} = \frac{w}{|\tan(\theta - \varphi_i)|} \quad (14)$$

拖拉机机组在矩形区域 II 中的的行驶距离 P_{02} 为

$$P_{02} = \frac{w}{|\tan(\theta - \varphi_i)|} \quad (15)$$

根据不同的转弯模式,拖拉机机组在转弯区域 III 的转弯路径长 P_{03} 为

$$P_{03} = \begin{cases} \frac{\pi w}{2} & \text{(半圆形转弯)} \\ \left(\pi + 4 \arccos \frac{w + 2R}{4R} \right) R & \text{(梨形转弯)} \\ (\pi + 2)R - w & \text{(鱼尾形转弯)} \end{cases} \quad (16)$$

由式 (14) ~ (16) 可知,一个转弯的路径 P_0 为

$$P_0 = P_{01} + P_{02} + P_{03} \quad (17)$$

拖拉机机组在多边形地块转弯区域内的总转弯路径 P_T 为

$$P_T = \sum_{i=1}^m N_i P_0 \quad (18)$$

综上,拖拉机机组在多边形地块作业时的总路径 P 为

$$P = P_w + P_T \quad (19)$$

在 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$ 搜索最优的作业方向,即对拖拉机机组的总作业路径 P 求解极小值

$$\frac{dP}{d\theta} = 0 \quad (20)$$

则计算所得 θ 值即为拖拉机机组的最优作业方向。

2.4 有效作业路径比最大

有效作业路径为地块边界内的所有直线作业行路径长度 P_w ,有效作业路径长度与总作业路径长度的比值 r 为

$$r = \frac{P_w}{P} \quad (21)$$

在 $\theta \in [0^\circ, 180^\circ)$ 搜索最优的作业方向,即对 r 求解极小值

$$\frac{dr}{d\theta} = 0 \quad (22)$$

则计算所得 θ 值即为拖拉机机组的最优作业方向。

3 路径规划与数据分析

3.1 路径规划软件设计

基于地块全区域覆盖路径优化算法,设计开发了农田作业机械路径规划软件。采用 Microsoft Visual Studio 2005 开发平台,应用 GIS 组件,设计并开发了运行于桌面计算机的路径规划软件。路径规划软件可以根据用户输入地块多边形和作业机具基本参数,按照不同路径优化目标计算田间最优作业方向,并自动生成最优路径空间矢量图;支持各种 GIS 标准化数据格式的作业路径输出。

3.2 路径规划测试

为了检验本研究提出的路径规划方法,选取了 4 块典型农田地块进行作业路径规划设计,并对路径规划结果进行分析。

选取的 4 个地块均为典型的凸四边形地块,分别以转弯数最少、作业消耗最小和总作业路径最短作为路径优化目标计算最优作业方向。为了与实际农田机械作业数据进行比较,在路径规划测试中,设置农田机械作业幅宽为 6 m,地块边界内的正常作业速度为 1.5 m/s,地头直行与转弯时的行驶速度均为 0.8 m/s,采用半圆形转弯模式。地块基本信息及路径规划计算结果如表 1 所示,其中长宽比为地块最长边与最短边的比值,最优作业方向及地块各边的方向角均为与 x 正方向逆时针夹角。

表 1 4 个四边形地块的路径规划测试结果
Tab. 1 Test results of four quadrangle fields

地块名称	地块面积/m ²	长宽比	地块形状	地块各边的方向角/(°)				最优作业方向/(°)		
								转弯数最少	作业消耗最小	总作业路径最短
Field7	51 768. 23	4. 45		95	5	95	5	95	95	95
Field12	51 863. 18	1. 34		90	1	90	8	8	90	90
Field16	23 098. 63	1. 42		81	171	81	177	81	81	81
Field22	34 014. 60	1. 07		88	167	88	169	167	169	88

3.3 测试数据分析

(1) $[0^{\circ}, 180^{\circ})$ 作业方向上的优化目标比较

对每个地块 $[0^{\circ}, 180^{\circ})$ 作业方向上的总转弯数、作业消耗和总作业路径数据的计算结果进行比较。以最优作业方向上的优化目标数据为基数, 分别计算其他作业方向相对最优作业方向的总转弯数、作业消耗和总作业路径的增量, 计算公式分别为

$$T_{N_i} = \frac{N_i - N_{\min}}{N_{\min}} \times 100\%$$
 (23)

$$T_{C_i} = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\min}} \times 100\%$$
 (24)

$$T_{P_i} = \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\min}} \times 100\%$$
 (25)

式中 $N_{\min}$ ——最优作业方向上的转弯数
 $C_{\min}$ ——最优作业方向上的作业消耗
 $P_{\min}$ ——最优作业方向上的总作业路径

图 4 为 Field7 和 Field22 两个地块的计算结果, Field7 地块中, 最优作业方向上的总作业路径比其他作业方向上的减少量接近 400%。可见, 在地块作业时, 合理选择作业方向将有利于减少生产资料消耗和农机作业能耗。

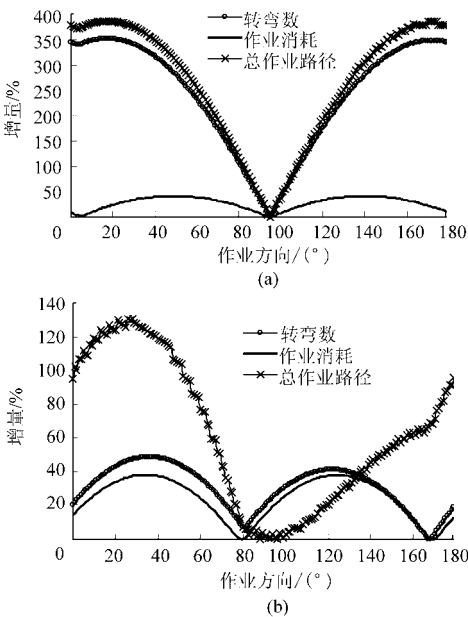


图 4 $[0^{\circ}, 180^{\circ})$ 作业方向上的优化目标比较
Fig.4 Optimization comparison in any travel direction of $[0^{\circ}, 180^{\circ})$
(a) Field7 (b) Field22

(2) 最优作业方向分析

从表 1 可见, 对于上述 4 个地块而言, 按照不同优化目标计算所得的最优作业方向均与地块某个边

的方向角相同。参照地块长宽比数据, 长宽比较大的地块, 如 Field7 和 Field16, 长边方向通常为最优作业方向, 图 5 左侧为 Field16 的最优作业路径。事实上, 在无任何导航作业时, 操作者往往也会根据经验选择沿地块长边进行作业, 图 5 右侧为 2001 年小麦实际收获作业数据, 采用了美国 CASE IH 公司的 2366 谷物联合收获机, 作业幅宽为 6 m。从图中可以看出, 无导航作业时, 尽管选择了最优作业方向, 但存在较多重叠和遗漏, 经过实际数据计算, Field16 地块的作业重叠率高达 13.3%。然而, 当地块长宽比接近 1 时, 操作者往往很难确定沿哪个边作业会更好, 例如 2001 年小麦实际收获作业中, Field22 就未采用最优作业方向。

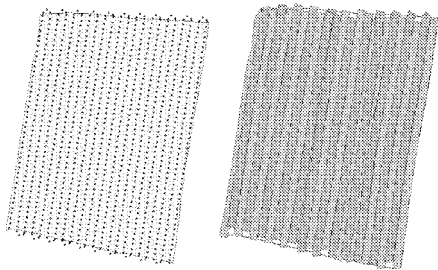


图 5 Field16 的最优作业路径与实际作业方向
Fig.5 Optimal travel direction and actual travel direction in Field16

上述试验地块均为凸四边形, 若检验各种形状地块的路径优化效果, 还需要进行更深入的试验研究。

4 结论

(1) 基于农田地块几何形状、作业机具参数、地头转弯模式等先验信息, 将田间作业划分为不同区域, 提出了一种面向农田作业机械的地块全区域覆盖路径优化方法。根据选择不同的路径优化目标, 转弯数最少、作业消耗最小、总作业路径最短或有效作业路径比最大, 计算出最优作业方向, 从而生成最优作业路径。

(2) 基于地块全区域覆盖路径优化算法, 设计开发了农田作业机械的路径规划软件。选取了 4 块典型的凸四边形农田地块进行作业路径规划测试。结果表明, 最优作业方向上的路径优化目标量比其他作业方向上有显著减少。此外, 对于上述 4 个地块, 按照不同优化目标计算所得的最优作业方向均与地块某个边的方向角相同, 并且对于长宽比较大的地块, 最长边方向通常为最优作业方向。

参 考 文 献

1 陈济勤. 农业机器运用管理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.

- 2 Stoll A. Automatic operation planning for GPS-guided machinery[C]//Proceedings of 4th European Conference on Precision Agriculture, 2003:657~664.
- 3 Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, Wang Xiu. Development of an object-oriented program for variable rate application performance testing[C]//2004 CIGR International Conference, Beijing, China, 2004.
- 4 Vougioukas S, Blackmore S, Nielsen J, et al. A two-stage routeplanning system for autonomous agricultural vehicles[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture, 2005: 597~604.
- 5 Timo Oksanen, Arto Visala. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8):651~668.
- 6 Blackmore S, Fountas S, Vougioukas S, et al. A method to define agricultural robot behaviours[C]//Automation Technology for Off-road Equipment, Proceedings of the 2004 Conference, 2004:155~161.
- 7 Oksanen T, Kosonen S, Visala A. Path planning algorithm for field traffic[C]//2005 ASABE Annual Meeting, Paper Number 053087, 2005.
- 8 苗玉彬, 王明军. 农业车辆导航系统中路径规划策略的研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(5):12~15.
Miao Yubin, Wang Mingjun. Research on path planning strategy in agricultural vehicle guidance system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5):12~15. (in Chinese)
- 9 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)
- 10 蔡晋辉, 才辉, 张光新, 等. 复杂环境下自动导引车路径识别算法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10):20~24, 89.
Cai Jinhui, Cai Hui, Zhang Guangxin, et al. Guidance line identification algorithm for AGV in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):20~24, 89. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 Jin Jian, Tang Lie. Optimal path planning for arable farming [C]//2006 ASABE Annual Meeting, Paper Number 061158, 2006.

(上接第 24 页)

- 7 周罗善. 基于单目视觉的车道保持预警系统研究[D]. 上海:华东理工大学, 2011.
Zhou Luoshan. Study of precautionary assistance system of lane keeping based on monocular vision[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 8 李胜, 马国梁, 胡维礼. 基于 backstepping 方法的车式移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(2):248~252.
Li Sheng, Ma Guoliang, Hu Weili. Tracking control of car-like mobile robot based on backstepping[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(2):248~252. (in Chinese)
- 9 Urmson C, Ragusa C, Ray D, et al. A robust approach to high-speed navigation for unrehearsed desert terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(8):467~508.
- 10 Wu Jinbo, Xu Guohua, Yin Zhouping. Robust adaptive control for a nonholonomic mobile robot with unknown parameters[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2009, 7(2):212~218.
- 11 李进. 基于 DSP 的视觉导航智能车辆路径识别[J]. 安徽科技学院学报, 2012, 26(1):46~50.
Li Jin. Road recognition of vision-guided intelligent vehicle based on digital signal processor[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2012, 26(1):46~50. (in Chinese)
- 12 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)
- 13 李进, 陈无畏, 李碧春. 基于行为的智能车辆导航控制体系结构[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7):162~167.
Li Jin, Chen Wuwei, Li Bichun. Activity-based control architecture for intelligent vehicle navigation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7):162~167. (in Chinese)
- 14 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):137~142.
Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):137~142. (in Chinese)