

基于机器视觉的农业车辆路径跟踪^{*}

刘兆祥¹ 陈艳¹ 籍颖^{1,2} 刘刚¹ 张漫¹ 周建军¹

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071000)

【摘要】 简述了一种基于机器视觉的农业车辆自动导航系统。提出了直线检测算法,显著降低了内存需求和时间消耗;以横向偏差和航向偏差作为输入量,构建了二维模糊决策器,对期望前轮转角进行决策;构建了基于PID的转向控制器,实现前轮转向控制,并采用简化的两轮车运动学模型进行了仿真。仿真和实验结果表明,该导航系统可以有效地实现直线路径跟踪。当车速为0.3 m/s时,最大跟踪横向偏差不超过5 cm,平均偏差不超过2 cm;当车速为0.6 m/s时,最大跟踪横向偏差不超过8 cm,平均偏差不超过4 cm。

关键词: 机器视觉 自动导航 随机霍夫变换 模糊逻辑 PID控制

中图分类号: TP242.6⁺2

文献标识码: A

Path Tracking of Agricultural Vehicle Based on Machine Vision

Liu Zhaoxiang¹ Chen Yan¹ Ji Ying^{1,2} Liu Gang¹ Zhang Man¹ Zhou Jianjun¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China 2. College of Information and Science & Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract

An autonomous navigation system based on machine vision for agricultural vehicle was studied. A novel line detection algorithm was proposed for navigation directrix detection, which could decrease the cost of memory and time considerably. A 2-D fuzzy controller with the inputs of lateral error and heading error was built to determine the expected angle of turning wheel, and a turning controller based on PID was constructed to control the turning of front wheel. The simplified kinematics model of two-wheel vehicle was adopted for simulation. The results of simulation and experiments indicated that the navigation system could track the desired beeline path effectively. The maximum tracking lateral error was less than 5 cm and 8 cm at the speed of 0.3 m/s and 0.6 m/s respectively, and the average lateral error was less than 2 cm and 4 cm respectively.

Key words Machine vision, Autonomous navigation, Randomized Hough transform, Fuzzy logic, PID control

引言

随着现代精细农业的迅速发展,农业车辆自动导航技术得到越来越广泛的应用,逐渐成为现代农业工程技术的重要组成部分。在导航信息获取方面,机器视觉以其获取信息量丰富、被动感知等优点

成为一种重要的导航信息获取技术,当前研究重点侧重于提高算法的实时性和鲁棒性。文献[1~3]均采用霍夫变换(HT)实现农田作物行的识别和检测,但是传统HT存在计算量大、占用内存大和参数量化精度不易控制的缺陷。文献[4~5]则采用过已知点的HT实现农机作业路径的识别和检测,该方法

收稿日期: 2009-07-10 修回日期: 2009-08-01

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A304)

作者简介: 刘兆祥, 博士生, 主要从事智能化检测与控制技术研究, E-mail: lxzaihaojia@yahoo.cn

通讯作者: 刘刚, 教授, 博士生导师, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: pac@cau.edu.cn

虽然节省了存储空间,但是由于迭代过程中每次建立新的累加器都要重新投影,因此增加了搜索次数。文献[6~7]提出了随机霍夫变换(RHT),该方法具有占用内存小、运算速度快的特点,但是由于确定候选直线两点都通过随机采样的方法选取,存在大量的无效采样和累积,降低了算法的性能。在导航控制方面,当前研究侧重于提高控制算法的自适应性和自学习能力。文献[8]设计了带自调整因子的自适应模糊控制器,因子大小与横向偏差大小呈线性关系。文献[9]利用车辆的运动学模型结合模糊控制,实现车辆的横向预测控制。文献[10]则采用车辆动力学模型设计模糊神经网络智能控制器。

简述一种基于机器视觉的农业车辆自动导航系统,提出一种新的导航基准线提取算法,采用模糊决策算法和PID控制算法,实现直线路径跟踪,并以一段深绿色胶条模拟农作物行,开展视觉导航实验研究。

1 视觉导航系统

视觉导航系统包括主控计算机、摄像机、操纵控制器、转向驱动机构、前轮偏角测量装置和导航车。主控计算机采用台湾IEI公司的PPC-3710GS型工控机,摄像机采用北京嘉恒中自图像技术有限公司的OK-AC1310型摄像机,操纵控制器采用ARM7微控制器LPC2119,转向驱动机构由北京和利时电机技术有限公司的减速器和步进电动机组成,前轮偏角测量装置采用WYT-AT-1型角度传



图2 图像预处理结果

Fig.2 Pre-process result of image

(a) 原图 (b) 灰度化 (c) 二值化 (d) 提取定位点

为进一步提高导航基准线的检测速度,对随机霍夫变换(RHT)进行改进,提出了基于已知点的RHT直线检测算法。算法原理如下:

(1) 将所有定位点的分布中心作为已知点,并初始化动态链表为空。

(2) 从所有定位点中随机选择一点,计算该点与已知点的距离,如果小于给定的距离阈值,返回步骤(2);否则,将该点从定位点中清除,转步骤(3)。

(3) 根据该点和已知点计算直线参数 θ ,从链表中搜索与 θ 近似相等(差别非常小)的单元,如果找到,转步骤(5);否则转步骤(4)。

感器,导航车为改装的四轮电动车。

系统工作原理如图1所示。摄像机实时采集路径的图像信息经USB总线传输至主控计算机,主控计算机完成路径的识别和定位,计算出车辆相对目标路径的横向偏差和航向偏差,继而完成期望前轮偏角的决策,将决策结果经RS-232总线传输至操纵控制器,操纵控制器将期望前轮偏角和来自角度传感器的实际前轮偏角进行比较,通过输出一定频率的脉冲信号驱动步进电动机旋转,完成前轮的转向。

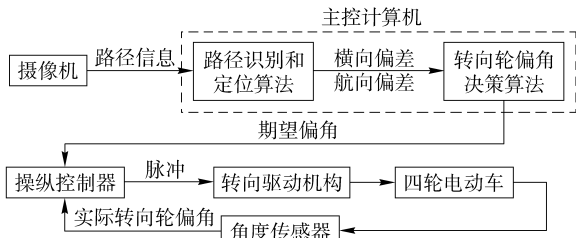


图1 视觉导航系统框图

Fig.1 Structure of vision navigation system

2 路径识别和定位

2.1 导航基准线检测

根据目标路径特点,采用农田图像RGB彩色模型的颜色特征因子 $2G-R-B$ 实现图像的灰度化(耗时10ms),采用OTSU自动阈值法实现图像的二值化(耗时10ms),采用基于垂直投影的窗口移动法获取代表导航基准线的定位点(耗时57ms)。原图和各步骤处理结果如图2所示。

(4) 赋予 θ 一个值为1的累加器,并追加到链表末尾。

(5) 将 θ 对应的累加器加1,并判断累加器的值是否小于给定的阈值,如果成立,转步骤(2);否则,转步骤(6)。

(6) 根据 θ 和已知点计算直线参数 ρ ,确定直线方程,并统计到该直线的距离小于给定距离阈值的点的个数,如果个数大于给定的阈值,则认为检测成功;否则将该随机点放回定位点空间,返回步骤(2)。

该算法继承了传统RHT的随机抽样、收敛映射和动态链表3种机制,克服了其计算量大、占用内

存大、参数量化精度不易控制以及检测代表直线参数的峰值比较困难等缺点,而且将二维累积参数 (ρ, θ) 降低为一维累积参数 (θ) ,进一步降低了内存需求。在运算速度上,该算法只需要随机采样一点,提高了检测直线的概率和速度。

采用该算法对图2d进行处理,耗时1 ms左右,而HT和RHT分别耗时40 ms和10 ms左右。该算法的处理结果如图3所示。

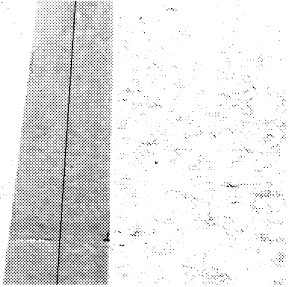


图3 导航基准线检测结果

Fig. 3 Detection result of navigation directrix

2.2 车辆相对位姿求解

根据导航基准线确定车辆相对目标路径的姿态,首先要完成摄像机的标定,确定摄像机的内外参数。采用张正友摄像机标定法。由于摄像机的畸变很小,可以忽略不计,所以直接采用针孔成像模型完成图像坐标系到世界坐标系的转换,世界坐标系的原点选择为摄像机光心在地面上的垂直投影点。车辆相对目标路径的位置关系如图4所示。

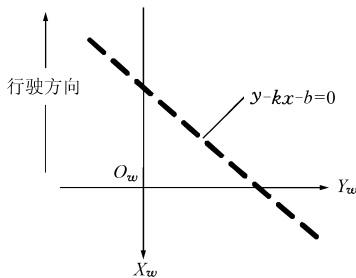


图4 车辆相对目标路径的姿态

Fig. 4 Sketch map between vehicle and path

图4中, X_w 轴负方向为车辆行驶方向,虚线为目标路径,车辆相对目标路径的横向偏差即为坐标系原点 O_w 到直线 $y - kx - b = 0$ 的距离,为 $|b|/\sqrt{1+k^2}$ 。偏差正负号判断方法为:原点在直线的上方,即 $-b > 0$ 时,偏差为正;原点在直线的下方,即 $-b < 0$ 时,偏差为负。

直线与 X_w 轴的夹角即为航向偏差,即

$$\Psi = \arctan k \quad (\Psi \in (-90^\circ, 90^\circ)) \quad (1)$$

3 导航决策和控制

3.1 期望前轮转角决策

模糊控制具有无需被控对象精确数学模型、鲁

棒性好等特点,以横向偏差和航向偏差为输入,建立二维模糊控制器,实现期望前轮偏角的决策。

模糊推理的方法选用目前应用较多的“Max-Min-重心法”。具体的模糊控制器设计与模糊论域选择、模糊集合的定义、量化因子的选取以及模糊控制规则的建立等诸多因素有关,这些往往需通过反复实验才能最终确定。根据大量实验和工作经验,横向偏差 E 的基本论域选择为 $[-24 \text{ cm}, 24 \text{ cm}]$ 量化因子为 $K_e = 0.25$,航向偏差 Ψ 的基本论域选择为 $[-12^\circ, 12^\circ]$,量化因子为 $K_\Psi = 0.5$,期望前轮偏角 U 的基本论域选择为 $[-6^\circ, 6^\circ]$,量化因子 $K_U = 1$ 。模糊控制器的设计原则为:当横向偏差较大时,选择控制量快速消除横向偏差;当横向偏差较小时,则以系统的稳定性为主要考虑因素。

文献[8]表明,模糊控制规则可用如下解析式简化描述为

$$U = -[\alpha E + (1 - \alpha)\Psi] \quad (\alpha \in (0, 1)) \quad (2)$$

其中, α 为规则修正因子,又称为加权因子。通过调整 α 值,可以调整控制规则,而且易于计算机实现。经反复验证,当 $\alpha = 0.6$ 时,式(2)比较符合设计的模糊控制规则。

3.2 前轮转角控制

采用PID方法实现前轮的转向控制。PID控制器的输入为期望前轮偏角与实际前轮偏角的差值,输出为驱动电动机的脉冲频率值。经分析,实际前轮转角与脉冲频率之间的传递函数为

$$f(s) = \frac{0.0238}{0.5s^2 + s} \quad (3)$$

在此基础上建立PID控制器仿真模型,并在Matlab/Simulink环境下进行仿真。仿真结果显示,当 $K_P = 280$ 、 $K_I = 0$ 、 $K_D = 30$ 时,控制性能较好。其阶跃响应如图5所示。

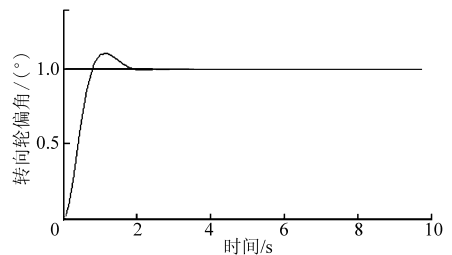


图5 PID模型的阶跃响应

Fig. 5 Step response of PID model

4 系统仿真与实验

4.1 系统仿真

在Matlab/Simulink环境下,以简化的两轮车运动学模型为控制对象,进行直线路径跟踪仿真实验。

运动学模型如图 6 所示,表达式为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos\theta \\ \dot{y} = v \sin\theta \\ \dot{\theta} = v \tan\beta/L \end{cases} \quad (4)$$

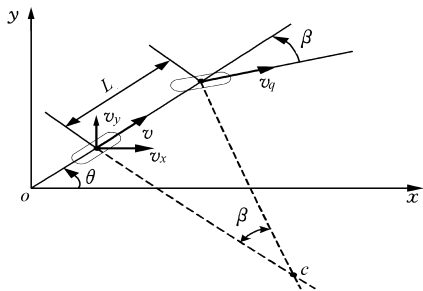


图 6 两轮车运动学模型

Fig. 6 Kinematics model of two-wheel vehicle

式中 θ ——航向角,rad
 β ——前轮转向角,rad
 v ——速度,m/s L ——轴距,m

在此基础上进行基于模糊决策逻辑和 PID 控制的导航控制仿真,将导航车速度设定为 1 m/s,初始航向为 x 轴正方向,以直线 $y = 5x$ 为目标路径进行仿真。仿真结果如图 7 所示。可见,仿真跟踪曲线在经过初始阶段的振荡后,很快与预定跟踪路线达到很好的重合,说明基于模糊决策逻辑和 PID 控制的直线路径跟踪控制算法理论上可行。

4.2 直线路径跟踪实验

选用 1 条长 20 m、宽 0.1 m 的深绿色胶条模拟农作物行,进行直线路径跟踪实验。车辆初始横向

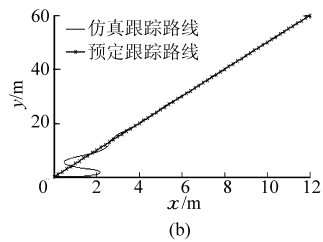
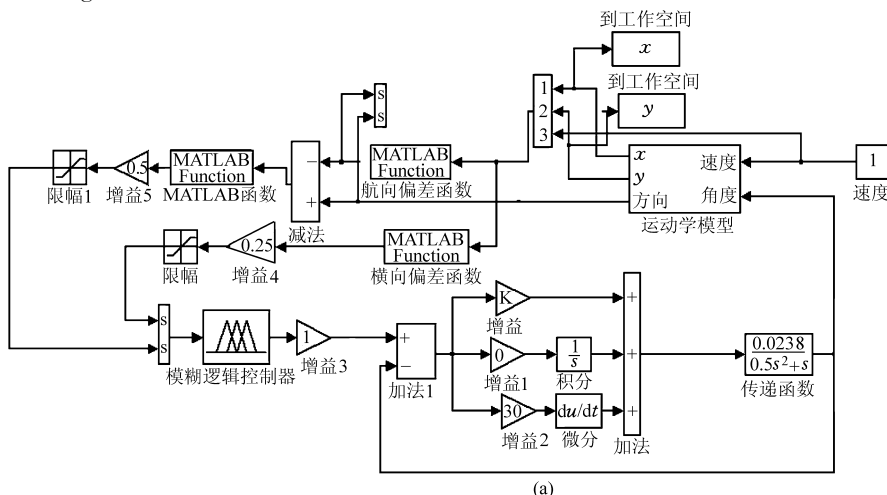


图 7 直线跟踪仿真结果

Fig. 7 Simulation result of beeline tracking

(a) 仿真框图 (b) 仿真结果

偏差调整在 10 cm 左右,两组实验结果如图 8 所示。

最大跟踪横向偏差不超过 5 cm,平均偏差不超过 2 cm;当速度为 0.6 m/s 时,车辆仍然可以实现目标路径的跟踪,最大跟踪横向偏差不超过 8 cm,平均偏差不超过 4 cm,不过跟踪曲线呈 S 状比较明显,这是由于车速较快,控制相对滞后造成的,需要进一步改进控制算法。

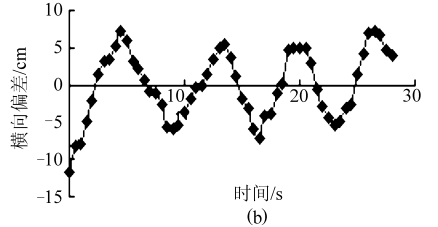
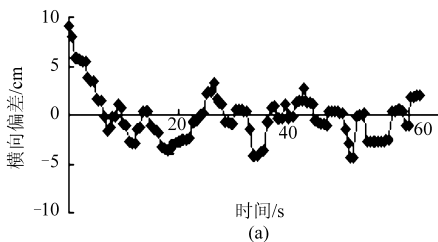


图 8 两组直线跟踪实验结果

Fig. 8 Experimental result of beeline tracking

(a) $v = 0.3 \text{ m/s}$ (b) $v = 0.6 \text{ m/s}$

可见,当速度为 0.3 m/s 时,车辆可以很快进入相对稳定阶段,能够很好地跟踪目标路径,稳定阶段

5 结束语

构建了基于机器视觉的农业车辆自动导航系统;提出了基于机器视觉的农业车辆导航基准线检测方法,该方法显著降低了内存需求和时间消耗,可以快速准确地检测导航基准线,为车辆提供导航信息;设计了基于模糊决策逻辑和 PID 控制的导航控制系统,该导航系统可以有效地实现直线路径跟踪。车速为 0.3 m/s 时,最大跟踪横向偏差不超过 5 cm,平均偏差不超过 2 cm;车速为 0.6 m/s 时,最大跟踪横向偏差不超过 8 cm,平均偏差不超过 4 cm。

参 考 文 献

- 1 Tijmen Bakker, Hendrik Wouters, Keesvan Asselt, et al. A vision based row detection system for sugar beet[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2008, 60(1):87~95.
- 2 Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(3):155~167.
- 3 Rovira-Ma's F, Zhang Q, Reid J F, et al. Hough-transform-based vision algorithm for crop row detection of an automated agricultural vehicle[J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2005, 219(8): 999~1 010.
- 4 赵颖, 陈兵旗, 王书茂, 等. 基于机器视觉的耕作机器人行走目标直线检测[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(4):83~86.
Zhao Ying, Chen Bingqi, Wang Shumao, et al. Fast detection of furrows based on machine vision on autonomous mobile robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(4):83~86. (in Chinese)
- 5 张磊, 王书茂, 陈兵旗, 等. 基于机器视觉的麦田边界检测[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(2): 111~114.
Zhang Lei, Wang Shumao, Chen Bingqi, et al. Edge detection for wheat field based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(2): 111~114. (in Chinese)
- 6 Lei Xu, Erkki Oja. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanism, algorithms, and computational complexities [J]. *CVGIP: Image Understanding*, 1993, 572(2): 131~154.
- 7 Lei Xu, Erkki Oja, Pekka Kultanen. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT)[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331~338.
- 8 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, Zhan 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)
- 9 周俊, 姬长英. 视觉导航轮式移动机器人横向预测模糊控制[J]. *农业机械学报*, 2002, 33(6):76~79.
Zhou Jun, Ji Changying. Lateral predictive fuzzy logic control for wheeled mobile robot navigated by machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2002, 33(6):76~79. (in Chinese)
- 10 陈无畏, 施文武, 王启瑞, 等. 基于动力学模型的自动引导车智能导航控制研究[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(4): 90~93.
Chen Wuwei, Shi Wenwu, Wang Qirui, et al. Intelligent navigation and control method based on dynamic model of an automatic guided vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(4): 90~93. (in Chinese)
- 11 赵博, 王猛, 毛恩荣, 等. 农业车辆视觉实际导航环境识别与分类[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7):166~170.
Zhao Bo, Wang Meng, Mao Enrong, et al. Recognition and classification for vision navigation application environment of agricultural vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(7): 166~170. (in Chinese)