

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.01.019

两步纯追踪航向校正模型算法

陈康¹, 周志峰¹, 王永泉², 陈宁¹

(1. 上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 上海司南卫星导航技术有限公司, 上海 201103)

摘要:为了提高农业机械导航精度,在纯追踪算法的基础上,设计了两步纯追踪航向校正模型算法,通过校正车体的航向角,减小车体的横向误差。在 MATLAB 环境下仿真结果表明,该算法比纯追踪算法的精度高,最大误差和标准差均有所减小。在 4 轮电动车上,搭建液压系统和卫星接收系统,进行现场试验,验证了两步纯追踪航向校正模型算法的可行性和有效性。

关键词:导航控制;纯追踪模型;两步纯追踪航向校正算法;前视距离;航向角

中图分类号:S221;TP273 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)01-0076-05

Trajectory Tracking Method Based on Two-Step Pure Pursuit Heading Calibration Model for Agricultural Vehicle

CHEN Kang¹, ZHOU Zhifeng¹, WANG Yongquan², CHEN Ning¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China;
2. ComNav Technology Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: On the basis of pure pursuit algorithm analysis published or used in recently years, a model of two-step pure pursuit course correction algorithm was designed, vehicle heading angle was corrected, thereby reducing the lateral error of the vehicle body. The simulation results under Matlab show that the algorithm is more accurate than the pure pursuit algorithm, and the maximum error and standard deviation are all reduced. In the four-wheel electric car, a set of hydraulic system and a set of satellite receiving systems were built, and the algorithm field test was carried out to verify the feasibility and effectiveness.

Key words: navigation control; pure pursuit model; two-step pure pursuit heading calibration model; look-ahead distance; steering angle

为提高农业机械导航精度,需要对农业机械的导航参数如定位坐标、航向角度、运动姿态角等进行必要的处理。国内外许多学者对处于农机自动导航控制系统中核心地位的农机路径跟踪方法进行了大量的研究。李逃昌博士提出了基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法^[1],但采用模糊控制需要专家的经验制定模糊控制规则,跟踪误差大,难以快速修正。张志刚提出了基于 Kalman 滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制^[2]。黄沛琛采用 BP 神经网络实现动态调节前视距离,提出了改进纯追踪模型的农业机械地头转向控制方法^[3],但采用神经网络控制需要大

量的高质量训练样本,实现起来比较困难并且泛化能力较弱。黎永键提出了基于 Kalman 滤波的田间导航车辆定位校正方法^[4]。尹晓红提出了基于卡尔曼滤波的自动引导车串级轨迹跟踪控制^[5]。周建军提出了基于模糊控制的农用车辆路线跟踪^[6]。籍颖提出了基于改进粒子滤波的农用车辆导航定位方法^[7]。白晓鸽提出了基于神经网络的拖拉机自动导航系统^[8]。周俊提出了基于时间序列分析的卡尔曼滤波组合导航算法^[9]。

针对纯追踪模型方法在跟踪路径时候的航向问题,本文提出一种可减小车体的横向跟踪误差的两步

收稿日期:2014-03-31;修回日期:2014-09-18

作者简介:陈康(1988),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事单片机、智能农机、自动驾驶等方面研究。E-mail:chk0812@163.com

纯跟踪航向校正算法。

1 纯跟踪模型的前视距离 L 因素分析

纯跟踪方法是当车体偏离预设的规划路径时, 根据当前车体横向偏差、车体航向角和前视距离, 通过计算确定车体下一步的前轮期望转向角, 如此循环, 不停校正, 从而慢慢靠近预设规划路径。横向偏差和航向角是不可控的, 前视距离是可控的, 前视距离 L 与速度 v 和控制周期 T 相关。

1.1 前视距离 $L = v \cdot T$ 时跟踪误差

当前视距离 $L = v \cdot T$ 时, 车体将在 1 个控制周期时间 T 内到达直线上, 而此时车体的转向角 β 和航向角 ψ 均不为零, 且转向角将继续增大航向角, 导致横向误差将迅速增大, 车体将迅速偏离规划路径, 横向距离不能得到稳定的控制。在 MATLAB 中仿真结果如图 1 所示, 车体的跟踪平均误差为 0.196 m, 最大误差为 0.694 m, 跟踪效果不理想。

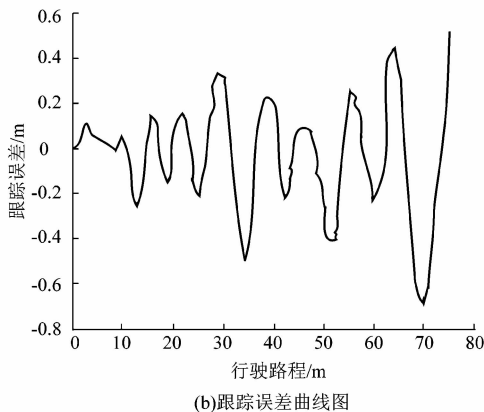
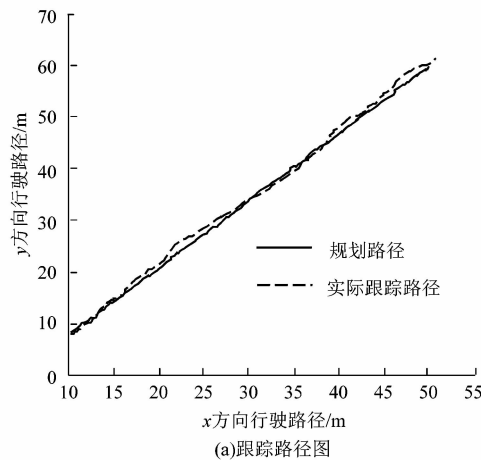


图 1 $L = v \cdot T$ 车体的跟踪效果

Figure 1 Vehicle tracking results when $L = v \cdot T$

1.2 前视距离 $L = 2v \cdot T$ 时跟踪误差

当前视距离 $L = 2v \cdot T$ 时, 如图 2 所示, 车体在 1 个控制周期 T 内将只行驶到一半的 L 上, 即点 $P'(x, y)$,

然后再由 $P'(x, y)$ 处计算出期望转向角 θ , 由公式^{[2]9}

$$\theta = \arctan \frac{2H(P_e \cos \Psi_e - \sqrt{L^2 - P_e^2} \sin \Psi_e)}{L^2} \quad (1)$$

其中: Ψ_e 为车体当前航向角与预设路径之间的夹角, P_e 为车体质心与预设路径的横向跟踪误差, H 为车体轴距。可知此处将得到更小的转向角, 此时航向角变化将变小, 转向角也变小, 在另 1 个周期 T 后, 车体将靠近到规划路径上, 此时车体的转向角和航向角将比 1.1 中的值小。在 MATLAB 中仿真结果如图 3 所示, 车体的跟踪平均误差为 0.061 m, 最大误差为 0.243 m, 可见 $L = 2v \cdot T$ 的跟踪效果均比 $L = v \cdot T$ 时的效果好。

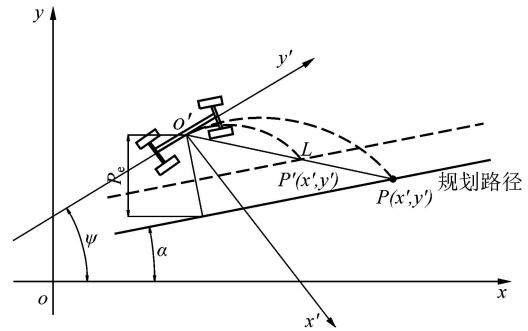


图 2 $L = 2v \cdot T$ 车体行驶路径

Figure 2 Vehicle travel path when $L = 2v \cdot T$

由于车体到达 $P'(x, y)$ 处后, 航向角已经慢慢开始靠近规划直线了, 在响应下 1 个期望转向角时, 车体会快速地跟踪误差而穿过规划直线, 因此实际的前视距离 L 取值大于 $2v \cdot T$ 时将会得到更好的跟踪结果。

2 两步纯跟踪航向校正模型

由 1.2 知, 在车体到达 $P'(x', y')$ 点时, 车体的航向角并不为 0, 且继续计算 1 个期望转向角校正跟踪误差, 由式(1)和图 3 可知, 这个期望转向角将继续增大车体的航向角, 这将导致当车体到达规划路径上时, 车体的航向角会比较大, 且转向角也将继续增大航向角, 这将会迅速增大车体的跟踪误差。

由于车体在规划路径上时, 当其航向角为 0, 车体的跟踪误差不会变化很大。因此, 本文提出一种两步纯跟踪航向校正模型算法。车体在 $P'(x', y')$ 处, 由于车体航向角已经偏向规划路径, 为使车体在下 1 个控制周期 T (即靠近规划路径) 时的航向角为 0, 应该使车体的期望转向角减小它的航向角到 0。可得

$$\varphi = \int_0^T \frac{v \tan \theta(t)}{H} dt \quad (2)$$

$\theta(t)$ 为期望转向角随着时间 t 变化的函数, 若 θ

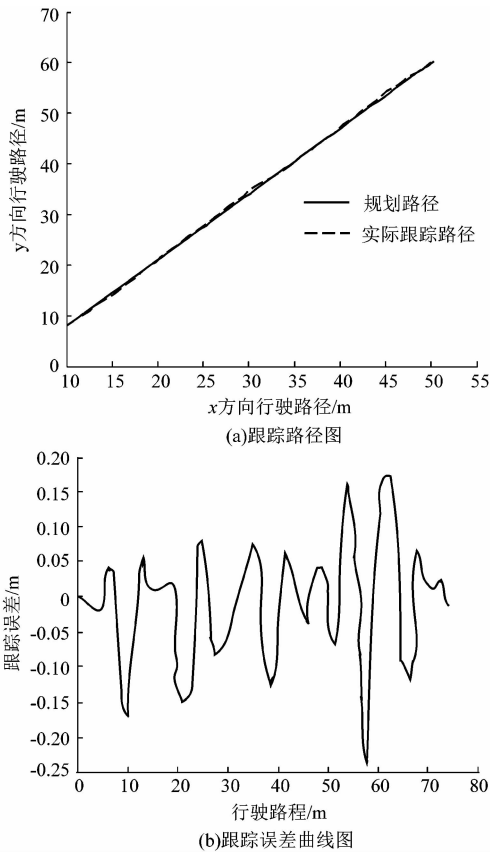


图3 $L = 2v \cdot T$ 车体的跟踪效果

Figure 3 Vehicle tracking results when $L = 2v \cdot T$

在直线跟踪时非常小,且液压控制阀与动态响应性能成线性关系^[10],因此上式可改为

$$\varphi \approx \frac{v \cdot T \cdot (\theta + \theta_0)}{2H} \quad (3)$$

由式(2)和(3)得出

$$\theta = \frac{2H \cdot \varphi}{v \cdot T} - \theta_0 \quad (4)$$

其中: φ 为车体在 $P'(x', y')$ 点处的航向角, θ 为期望转向角。

得出两步纯跟踪航向校正模型的算法公式为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{2H(P_e \cos \Psi_e - \sqrt{L^2 - P_e^2} \sin \Psi_e)}{L^2} & \text{第1步纯跟踪校正} \\ \theta_2 = \frac{2H \cdot \Psi_e}{v \cdot T} - \theta_0 & \text{第2步航向校正} \end{cases} \quad (5)$$

其中: θ_0 是校准前的转向角, θ_1 第1步纯跟踪校正后的转向角, θ_2 是第2步航向校正后的转向角。

3 仿真试验

在 MATLAB 中,设置仿真初始条件如下:假设预

设的规划路径为 AB 线,起点 $A(9, 9)$,为车体的起点,终点 $B(180, 150)$,为车体最终停止的地点。用纯跟踪模型算法进行仿真,仿真结果如图 4 所示;按照公式(5)进行两步纯跟踪航向校正模型算法仿真,仿真结果如图 5 所示。对比图 4 和图 5,可明显看出,图 5 的最大跟踪误差小于图 4 的最大跟踪误差,因此两步纯跟踪航向校正算法相比于纯跟踪算法是更加有效的。

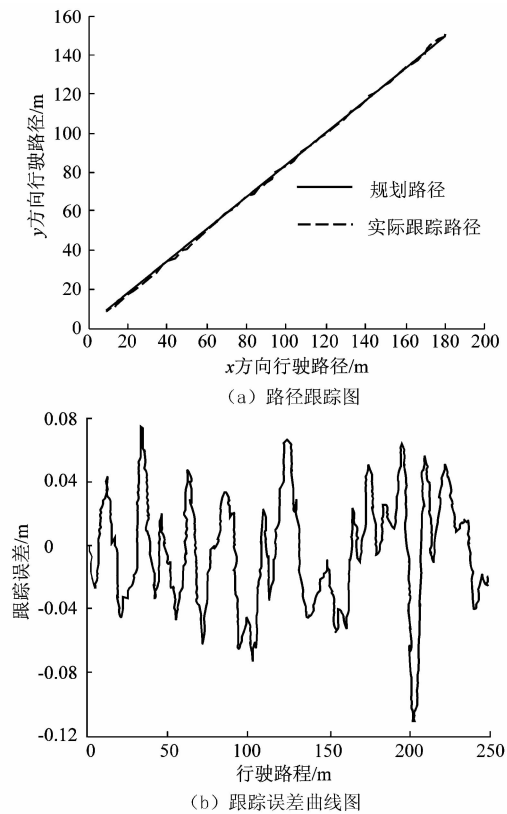


图4 纯跟踪模型跟踪效果

Figure 4 Tracking results of pure tracking model

4 现场实验

购买了1个4轮电动车如图6所示,在其上搭建1个控制系统^[11],系统框架如图7所示,作为现场实验的硬件平台。控制系统:

- 1) 液压系统(作用为自动驾驶时控制电动车自动转向),包括油缸、油箱、油泵、无刷直流电机、压力表、限流阀、油管 and 电磁比例换向阀。
- 2) GNSS 卫星接收系统(作用为实时定位电动车位置),包括卫星接收机、基站、电台和天线。
- 3) 角度传感器 1 个(作用为实时测量电动车偏转角),安装在左前轮。

为检测两步纯跟踪航向校正模型算法应用于实际情况的效果^[12],用所设计的电动车在跑道上进行现场实验。在控制器上设定好将要行驶的路线,进行自动

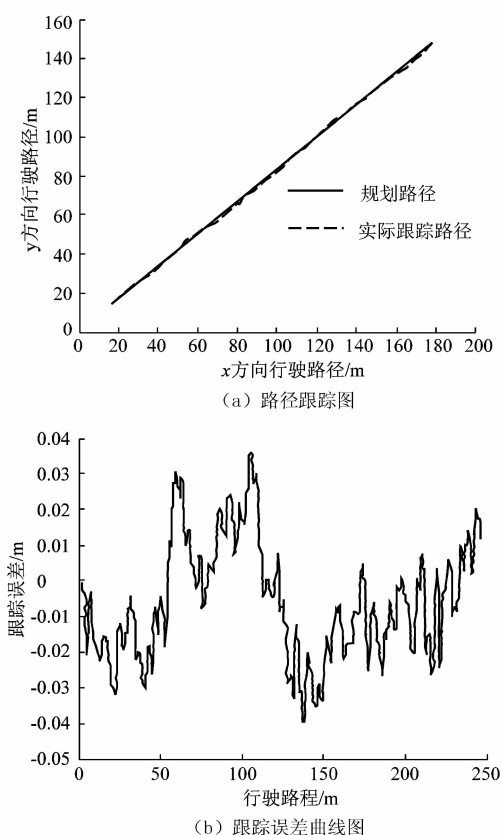


图 5 两步纯跟踪航向校正模型跟踪效果
Figure 5 Results of two-step pure pursuit heading calibration model

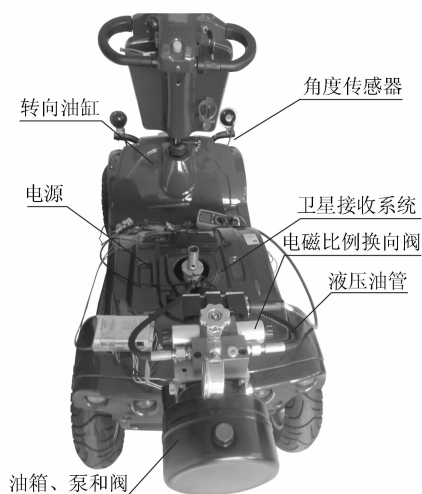


图 6 实验所使用电动车
Figure 6 Electric vehicles used for experiments

导航实验。卫星接收机实时记录电动车行走位置的经度、纬度数据,对数据进行高斯坐标转换处理,绘制实际跟踪轨迹。变换初始条件,进行多次试验,对实验结果进行分析,分析结果如表 1 所示,可以看出,该算法

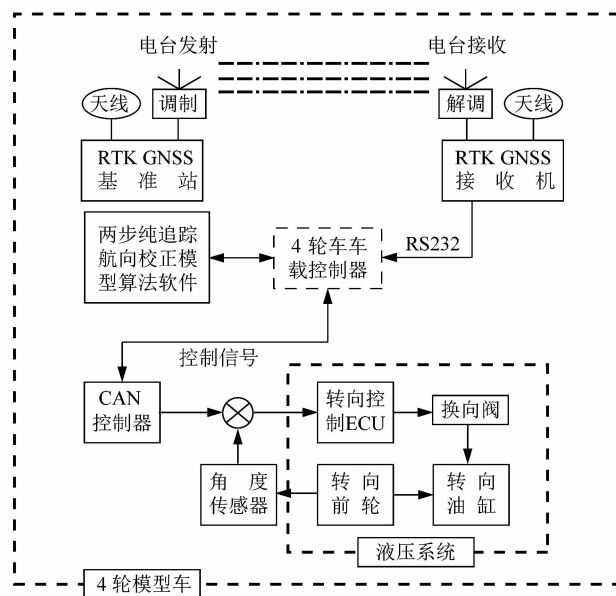


图 7 控制系统控制图
Figure 7 Diagram of control system

应用于实际情况,自动驾驶的平均最大误差维持在 10 cm 之内。

表 1 两步纯追踪航向校正算法现场实验统计结果
Table 1 Field experiments statistics results of two-step pure pursuit heading calibration model

试验次数	平均值/m	最大误差/m	标准差/m
1	0.028 4	0.112 0	0.021 6
2	0.026 3	0.075 0	0.017 5
3	0.030 3	0.105 0	0.021 7
4	0.024 3	0.110 5	0.020 7
5	0.028 2	0.093 8	0.020 2
6	0.026 5	0.097 6	0.021 4
7	0.026 8	0.099 6	0.021 0
8	0.026 6	0.121 5	0.022 1
9	0.027 0	0.090 1	0.019 7
10	0.025 6	0.083 5	0.019 8
平均	0.027 00	0.098 86	0.020 57

5 结语

1) 因为前视距离 L 是可控的,所以通过对前视距离 L 的理论分析,得出前视距离 L 大于 $2v \cdot T$ 对航向校正更是有利的结论。

2) 提出两步纯跟踪航向校正模型算法,在第 2 步对车体的航向角进行校正。

3) 在 MATLAB 中进行该算法的仿真,仿真结果表明,最大误差和标准差均有所减小。

4) 通过在 4 轮车上,进行现场实验,结果表明,平均最大误差在 10 cm 之内,标准差在 2 cm 左右。

(下转第 86 页)