

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.04.017

一种纯追踪模型改进算法

陈宁¹, 周志峰¹, 王永泉², 陈康¹

(1. 上海工程技术大学机械工程学院, 上海 201600; 2. 上海司南卫星导航技术有限公司, 上海 201103)

摘要:为了提高农业机械自动导航控制系统的精度,根据纯追踪模型和农业机械运动学模型的特点,提出了一种纯追踪模型改进算法。在重点分析纯追踪模型算法误差原理的基础上,指出纯追踪模型误差主要来源于车体的航向角和转向角。采用该算法可以校正车体的航向角和转向角,减小车体跟踪规划路径时的横向误差。根据算法推导和电控液压阀性能等因素得出前视距离 $L \geq 3 \cdot v \cdot T$ 才能取得较好的跟踪效果。Matlab 仿真结果表明,该算法比纯追踪算法的精度提高了 30.24%,最大误差减小了 4 cm,标准差也有所减小。

关键词:农业机械;纯追踪算法;改进算法;导航控制

中图分类号:TP273.5

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)04-0069-05

Improved Algorithm of Pure Pursuit Model

CHEN Ning¹, ZHOU Zhifeng¹, WANG Yongquan², CHEN Kang¹

(1. College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Shanghai Compass Satellite Navigation Technology Co., Ltd., Shanghai 201103, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of agricultural machinery automatic navigation control system, according to the characteristics of pure tracking model and agricultural machinery kinematics model, an improved algorithm of pure pursuit model was proposed. On the basis of analytical focus tracking error model algorithm principle, it pointed out that pure heading angle tracking model error came mainly from the heading angle and the steering angle. The algorithm could calibrate the vehicle's heading angle and steering angle, and could reduce the lateral error when the vehicle tracking path planning. According to the algorithm derivation and electronically controlled hydraulic valve performance and other factors, visibility distance should be $L \geq 3 \cdot v \cdot T$ to achieve better tracking results. Matlab simulation results show that the algorithm is more accurate than pure tracking algorithm by improving 30.24%, and the maximum error is reduced by 4cm, also the standard deviation decreases.

Key words: agricultural machinery; pure tracing algorithm; improved algorithm; navigation control

随着农业装备智能化进程的加快,农业机械自动导航控制技术受到了广泛的重视,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。尹晓红,黎永键,籍颖,周俊提出了基于滤波的跟踪控制方法^[1-4],卡尔曼滤波和粒子滤波都可以取得很好的定位效果。李逃昌和周建军提出了基于模糊自适应的农业机械路径跟踪方法^[5-6],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。黄沛琛、白晓鸽采用 BP 神经网络实现动态调节前视距离方法^[7-8],但采用神经网络控制需要大量的高质量训练样本,实现起

来较困难并且泛化能力较弱。罗锡文院士在东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统^[9]的文中设计了基于 PID 算法的导航控制器, PID 控制是基于误差来生成消除误差的控制策略,应用广泛,但是控制参数整定困难,需要一定的经验和大量的参数整定实验。张志刚和李逃昌在纯追踪模型的农业机械导航控制^[10]的文中实现了磁航向传感器偏移误差的在线辨识与航向校正,但是纯追踪模型方法控制参数少,不能很好地控制车体在跟踪路径时的航向角和转向角。

本文针对纯追踪模型方法中跟踪路径的航向角和转向角问题,提出一种纯追踪改进算法,该算法可有效

收稿日期:2014-02-24;修回日期:2014-03-25

作者简介:陈宁(1988),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事单片机、智能农机自动导航等研究。E-mail:jxchenning2012@126.com

校正车体在跟踪路径上的航向角和转向角,减小车体的横向跟踪误差。精度比原来的纯追踪算法精度提高了 30.24%。

1 纯追踪模型理论

纯追踪模型路径跟踪方法是一种几何方法,它根据农机的当前位置确定农机到达目标位置所需行驶的圆弧。如图 1 所示,在车体坐标 $o'x'y'$ 中, $P(x', y')$ 为规划路径上的点, L 为农机所行驶圆弧的弦长, R 为该弧段的半径, ψ 为车体的航向角, α 为路径航向角, ψ_e 为车体当前航向角和规划路径航向角之间的夹角,规定角度逆时针方向为正,横向距离在车体沿着规划路径右侧为正,则可得

$$D + x' = R \quad (1)$$

$$D^2 + y'^2 = R^2 \quad (2)$$

$$x'^2 + y'^2 = L^2 \quad (3)$$

联合(1),(2),(3)式可得

$$R = \frac{L^2}{2x'} \quad (4)$$

其中 x' 是跟踪路径上目标点在车体坐标下的横坐标,文献^[11]给出了在直线跟踪情况下 x' 的计算公式

$$x' = P_e \cos \psi_e - \sqrt{L^2 - P_e^2} \sin \psi_e \quad (5)$$

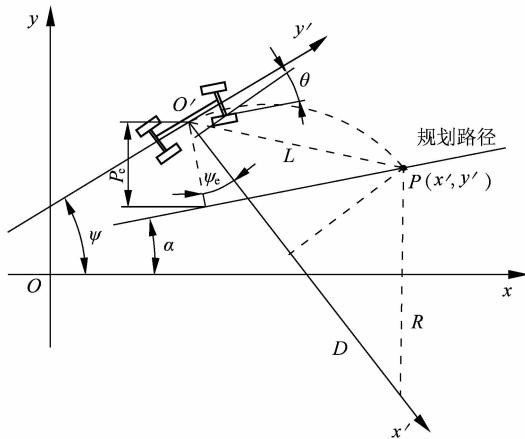


图 1 纯追踪模型几何解析

Figure 1 Analytic geometry of pure pursuit model

采用 A. J. Kelly 提出的简化二轮车运动学模型,如图 2 所示,将轮胎看作刚性轮,不考虑轮胎与地面的侧向滑动^[12],由运动学分析可得:

$$\dot{x}'(t) = v(t) \cos \psi(t) \quad (6)$$

$$\dot{y}'(t) = v(t) \sin \psi(t) \quad (7)$$

$$\dot{\psi}'(t) = \frac{v(t) \tan \theta(t)}{H} \quad (8)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{H}{R} \right) \quad (9)$$

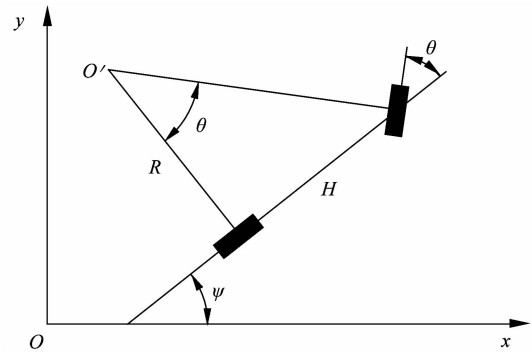


图 2 简化二轮车运动学模型分析

Figure 2 Simplified analysis of two-wheeled vehicle kinematic model

其中 v 为车体速度, H 为轴距, θ 为前轮转向角,由(5)~(9)式可得

$$\theta = \arctan \frac{2H(P_e \cos \psi_e - \sqrt{L^2 - P_e^2} \sin \psi_e)}{L^2} \quad (10)$$

其中 P_e 为车体与规划路径之间横向距离, L 为前视距离, H 为车体轴距。

2 纯追踪模型跟踪误差因素分析

由纯追踪模型可知,当车体偏离规划路径一定距离时,纯追踪方法通过当前横向偏差、当前航向角和前视距离确定下一步的期望转向角。

由纯追踪模型的推导可知,前视距离 L 与车体速度 v 、控制周期 T 、航向误差及位置误差相关,其中车体速度 v 和控制周期 T 影响最大。

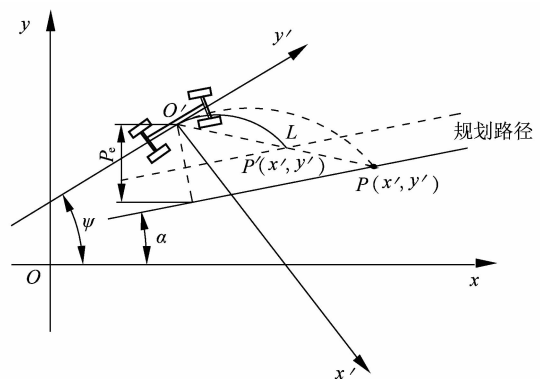


图 3 纯追踪算法车体路径跟踪图

Figure 3 Vehicle path tracking map of pure pursuit algorithm

如图 3 所示,在第 1 个控制周期 T 内,由纯跟踪模型原理知,当车体到达 $P'(x', y')$,此时车体的航向角和转向角均偏向规划路径,且转向角继续增大航向角。然后根据式(10)得出第 2 个控制周期 T 所需的期望

转向角,由公式可知,这个期望转向角比第1个周期 T 的转向角要小,但是仍然是相同方向,这个转向角会继续增大航向角。如此这样,当车体到达规划路径时,车体的航向角偏差较大,转向角不为零且将继续增大航向角,车体将快速偏离规划路径,车体的跟踪误差不能得到稳定控制。

3 纯追踪改进算法

由车体行驶特点知,车体在规划路径上行驶时,车体的航向角和转向角为零时,车体会稳定地跟踪规划路径,此状态称为车体跟踪的稳态。针对纯追踪算法在规划路径上的航向角和转向角不为零的情况,本文提出一种纯追踪改进算法,校正车体的航向角和转向角,使车体趋向稳态。

如图4所示,第1步通过纯追踪算法给出的期望转向角行驶,第1个控制周期后,车体到达 $P_1(x', y')$ 处,转向角和航向角不为零且偏向于规划直线,在接下来的2个控制周期内通过对转向角的控制,使航向角和转向角变为零,因此综合下两步所需改变的航向角和当前航向角和转向角计算出当前期望转向角 θ_2 。第2个周期后,车体到达 $P_2(x', y')$ 处,车体的期望转向角为0。第3个周期后,车体到达 $P(x', y')$ 处,此时车体的转向角和航向角均为0,满足车体稳态。

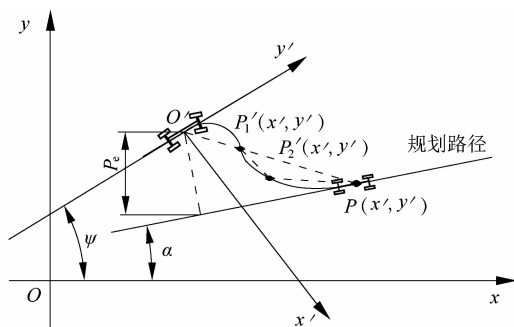


图4 纯追踪改进算法车体路径跟踪图

Figure 4 Vehicle path tracking map of improved pure pursuit algorithm

根据式(9)和上述第2步说明可得

$$\Delta\psi = \int_0^T \frac{v}{H} \tan(\theta(t)) dt + \int_0^T \frac{v \tan \theta(t)}{H} dt \quad (11)$$

其中 $\theta(t)$ 是转向角与时间的关系。

进一步假设, θ 在直线跟踪时是很小的。由文献[9]知,液压控制阀的动态响应性能接近一条直线,因此上式可改为

$$\Delta\psi \approx \frac{v}{2H} \cdot (2\theta + \theta_0) \cdot T \quad (12)$$

由式(12)得出期望转向角为

$$\theta = \frac{H \cdot \Delta\psi}{v \cdot T} - \frac{\theta_0}{2} \quad (13)$$

因此纯追踪改进算法的计算公式为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{2H(P_e \cos \psi_e - \sqrt{L^2 - P_e^2} \sin \psi_e)}{L^2} \\ \theta_2 = \frac{H \cdot \Delta\psi}{v \cdot T} - \frac{\theta_0}{2} \\ \theta_3 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

θ_1 为第1个控制周期期望转向角, θ_2 为第2个控制周期期望转向角, θ_3 为第3个控制周期期望转向角。 θ_0 是第1步校正后的实际转向角, $\Delta\psi$ 是第1步校正后的实际航向角。

由文献[9]知,车体的液压控制阀不能瞬间响应所给定的转向角,它可视为一个二阶系统。又因如图4所示,前视距离 L 分为3个控制周期控制车体转向,因此车体的前视距离 L 需要大于 $3 \cdot v \cdot T$ 才能取得好的跟踪效果。

4 Matlab 仿真结果

1) 在 Matlab 环境下进行纯追踪改进算法直线跟踪动作的仿真,仿真初始条件设置如下:AB 线起点 A(10,8),终点 B(250,200),车体起点与 AB 线起点相同,位置定位误差为 0.3 m,航向角测量误差为 0.5°,转向角测量误差为 0.6°,速度误差在 0.2 m/s。最大转向角为 20°,控制周期 $T=1$ s,轴距 $L=2$ m。在速度 $v=1$ m/s, $L=4$ m 时,纯追踪算法和纯追踪改进算法的仿真跟踪误差如图5和图6所示,多次仿真结果如表1和表2所示。

表1 纯追踪算法横向误差统计结果

Table 1 Pure lateral error statistics of pure pursuit algorithm

试验次数	平均值/m	最大误差/m	标准差/m
1	0.0286	0.1186	0.0229
2	0.0256	0.0923	0.0213
3	0.0246	0.0978	0.0198
4	0.0267	0.1124	0.0228
5	0.0278	0.0836	0.0193
6	0.0307	0.1070	0.0233
7	0.0292	0.1135	0.0222
8	0.0293	0.1062	0.0211
9	0.0313	0.1105	0.0221
10	0.0289	0.0999	0.0213
平均	0.02827	0.10418	0.02161

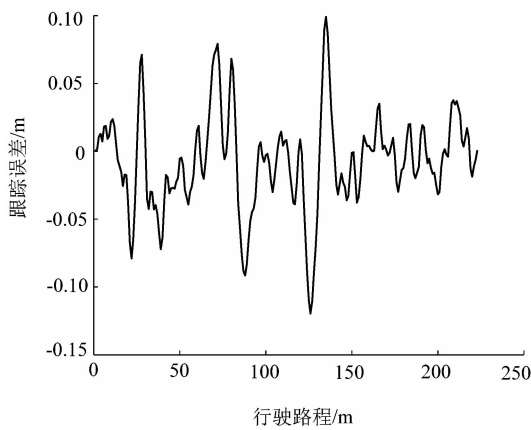


图5 纯追踪算法跟踪误差图

Figure 5 Tracking error chart of pure pursuit algorithm

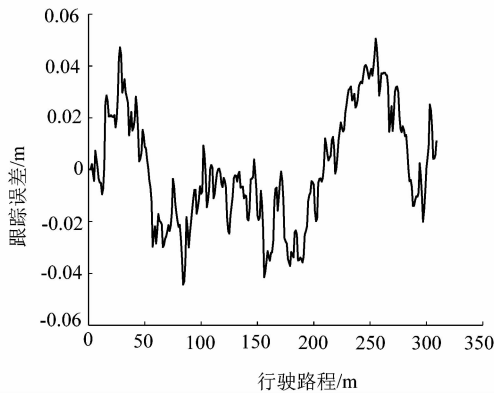


图6 纯追踪改进算法跟踪误差图

Figure 6 Tracking error chart of improved pure pursuit algorithm

表2 纯追踪改进算法横向误差统计结果

Table 2 Pure lateral error statistics of improved pure pursuit algorithm

试验次数	平均值/m	最大误差/m	标准差/m
1	0.0204	0.0603	0.0145
2	0.0166	0.0581	0.0142
3	0.0185	0.0727	0.0168
4	0.0177	0.0630	0.0143
5	0.0189	0.0723	0.0145
6	0.0255	0.0742	0.0187
7	0.0222	0.0739	0.0152
8	0.0146	0.0433	0.0103
9	0.0242	0.0714	0.0184
10	0.0186	0.0566	0.0136
平均	0.01972	0.06458	0.01505

对2组仿真误差结果进行统计对比分析,如表1和表2所示,纯追踪改进算法比纯追踪算法的平均值精度提高了 $\frac{0.028\ 27 - 0.019\ 72}{0.028\ 27} \times 100\% = 30.24\%$,最

大误差减小了约4 cm,标准差也小一些,因此纯追踪改进算法是有效的。

2) 将终点改为 $B(20\ 000, 25\ 000)$,车体起点改为 $(0,0)$ 做纯追踪稳态算法仿真,其它条件不变,仿真结果如下图。

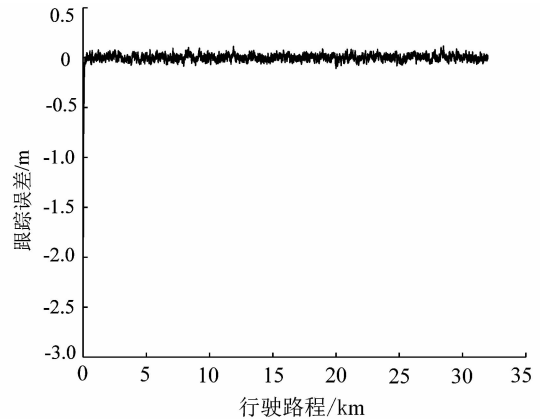


图7 长距离大初始误差改进算法跟踪误差图

Figure 7 Long distance and large initial error on tracking error chart of pure pursuit algorithm

仿真结果平均误差为0.023 3 m,标准差为0.065 8 m。在车体进入稳定追踪路径后,车体的最大误差是0.105 3 m。说明纯追踪改进算法在长距离和大初始误差规划路径跟踪是有效的。

5 结 语

1) 对纯追踪模型的跟踪误差进行分析,得出纯追踪模型的误差主要来源于车体跟踪规划路径时的航向角和转向角。

2) 针对纯追踪模型的跟踪误差来源提出纯追踪改进算法,算法可以校正车体的航向角和转向角,使车体在跟踪规划路径时处于稳态,并得出前视距离 L 需要大于 $3 \cdot v \cdot T$ 才能取得较好的跟踪效果。

3) 在 Matlab 环境下进行2种模型仿真对比,当行进速度为1 m/s,前视距离为4 m时,两步纯追踪航向校正模型算法比纯追踪模型的精度提高30.24%,最大误差减小了4 cm,标准差也有所减小。纯追踪改进算法在长距离和大初始误差规划路径跟踪的平均误差为0.023 3 m,标准差为0.065 8 m,最大误差是0.105 3 m,可见算法的稳定性。

参考文献:

- [1] 尹晓红,赵韩,吴焱明,等.基于卡尔曼滤波的自动引导车串级轨迹跟踪控制[J].农业机械学报,2010,41(2):180-184.
- [2] 籍颖,张漫,刘刚,等.基于改进粒子滤波的农用车导航定位方法[J].农业工程学报,2011,27(8):227-231.

(下转第76页)