

拖拉机沿曲线路径的跟踪控制

陈 军¹, 朱忠祥², 鸟巢 谅², 武田纯一²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 杨凌 712100; 2. 岩手大学农学部, 日本盛冈 0208550)

摘 要: 近年关于农业用车轮型移动机器人的研究很多, 但主要集中在直线行走方面。该研究进行了沿给定的曲线路径跟踪控制的研究。首先由给定的曲线路径生成四元状态空间, 其次在利用预见控制求得车辆的未来值和目标值的基础上, 利用最优控制理论设计跟踪控制器。最后在牧草地上对正弦路径和圆形路径进行了跟踪实验。试验结果为: 车辆以 1.5 m/s 的速度行驶时, 在很小转弯半径时最大误差可控制在 35 cm 以内。

关键词: 拖拉机; 曲线路径; 跟踪控制; 预见控制; 最优控制

中图分类号: S219.01

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)11-0108-04

陈 军, 朱忠祥, 鸟巢 谅, 等. 拖拉机沿曲线路径的跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 108-111.

Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu Ryo, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 108-111. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

现在关于农用车辆自动行驶的研究受到各国的重视^[1-8]。这些研究可以分为车辆的行驶轨道的设计和沿所给定轨道自动行驶的跟踪控制两个方面。另一方面, 在车辆工学方面, 驾驶员对车辆驾驶时操纵模型的研究中, 很早就引入了人的预测、预见动作。行驶路径为近似直线时, 在车辆行驶的前方一定距离 L_Q 处的注视点和目标路径存在偏差 ϵ , 近藤建立了和偏差 ϵ 比例的方向盘操纵模型^[9]。该模型很好的反映了人对车辆驾驶特性。但是, 当行驶轨道为曲线时, 近藤的模型误差就不能够正确反映操纵特性。吉本提出的二次预测模型考虑了车辆的现在位置时的曲率^[10], 因此, 在很大的范围内具有良好的适应性。

车辆的跟踪控制就是沿着给定轨道行驶的反馈控制。其控制方法有利用车辆的现在位置和目标位置的偏差的控制方法及利用车辆的未来位置和目标位置的偏差控制方法^[11,12]。

本研究中, 将预见控制和最优控制理论应用到车辆沿曲线路径的跟踪控制中。当车辆行驶的曲线路径给定时, 利用预见控制的概念来实现车辆的跟踪控制。为此, 首先由给定的曲线路径生成车辆行驶可行的状态空间; 其次, 利用最优控制理论设计车辆沿曲线行走的跟踪控制器; 最后, 利用所设计的控制器控制车辆沿所给定的路径自动行驶。

1 车辆行驶可能的四元状态空间的构成

1.1 车辆运动的数学模型

对象拖拉机为前轮导向、后轮驱动。在不考虑车辆

行驶时的离心力和侧滑的前提下, 车辆的运动模型如图 1 所示。行驶中车辆的离心力和侧滑等所造成的误差有反馈控制来消除。车辆的后轮车轴的中心点为所选定的代表点。状态变量由式 (1) 表示。

$$x = [x, y, \theta, \alpha]^T \quad (1)$$

车辆的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \theta \\ \dot{y} = V \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{V}{L} \tan \alpha \\ \dot{\alpha} = u \end{cases} \quad (2)$$

式中 x, y ——拖拉机后轮轴中心点的坐标, m; θ ——拖拉机的横摆角, rad; α ——拖拉机的转向角, rad; V ——拖拉机的速度, m/s; u ——转向角速度, rad/s; L ——拖拉机的轴距, m。拖拉机的横摆角和转向角逆时针为正。

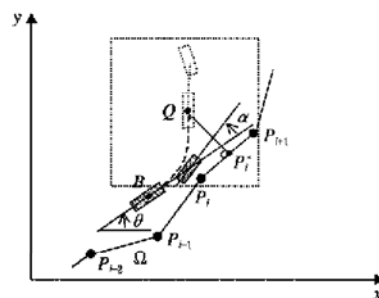


图 1 车辆运动模型及前方注视点

Fig. 1 Vehicle kinematical model and headway view points

1.2 给定路径曲线向车辆运动空间的扩张

为了以下描述引入作业空间 R^2 (W 空间) 和状态空间 $R^2 \times S^2$ (C 空间) 两个名词。作业空间 R^2 为实际作业的平面。目标路径以 $f(x, y) = 0$ 的形式给出。但是, 车辆在平面上运动时, 由于为刚体, 不会像质点运动那样用位置坐标 (x, y) 表示就能满足, 四元状态空间 ($R^2 \times S^2$) 的一部分由 θ 和 α 构成的 S^2 也是必需的。控制车辆

收稿日期: 2005-12-31 修订日期: 2006-04-05

基金项目: 西北农林科技大学人才基金资助项目 (01140501); 西北农林科技大学科研专项项目 (05ZR085)

作者简介: 陈 军, 博士, 副教授, 杨凌 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 712100. Email: chenjun_shx@yahoo.com.cn

沿着由平面曲线 $f(x, y) = 0$ 给定的目标路径行走时, 不仅要使平面曲线和车辆的位置 (x, y) 一致, 同时必须使状态量 $(\theta, \alpha) \in S^2$ 也要一致。因此, 必须从给定的轨迹中求出 θ 和 α 。

目标路径用函数 $f(x, y) = 0$ 给出时, 横摆角 $\bar{\theta}$ 和转向角 $\bar{\alpha}$ 由以下的方法求出。

由式(2) 可得出

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \tan \bar{\theta} \\ \bar{\theta} &= \tan^{-1} \left[\frac{dy}{dx} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3) 微分可得下式

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dx^2} &= \frac{1}{\cos^2 \bar{\theta}} \frac{V}{L} \tan \bar{\alpha} \frac{1}{V \cos \bar{\theta}} \\ \bar{\alpha} &= \tan^{-1} \left[\frac{d^2y}{dx^2} L \cos^3 \bar{\theta} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

如图 1 所示, 将给定的曲线路径 $f(x, y) = 0$ 分为 N 个闭区间, 其端点用 $P_i (0 < i \leq N-1, N-1$ 总数) 表示, 其连接成的折线轨道称为离散化轨道 $\Omega = [x_i, y_i]^T$ 。用中心差分公式求解横摆角 $\bar{\theta}_i$, 并用二阶中心差分公式求解转向角 $\bar{\alpha}_i$ 。最终将平面作业空间(W 空间) 的轨道 $f(x, y)$ 转化为状态空间(C 空间) 的车辆行驶轨道 $\Gamma(x_Q, y_Q, \bar{\theta}_Q, \bar{\alpha}_Q)$ 。

2 沿曲线路径跟踪控制器的设计

2.1 未来点和目标点的设定

驾驶员在驾驶车辆时不仅要考虑车辆的现在位置, 同时要使前方注视点(未来点) 和目标路径的偏差为零^[13, 14]。

本研究中, 如图 1 所示, 将车辆中心线前方到后轮轴中心点距离为 L_Q 的点 Q 定义为未来点。即 Q 为车辆保持当前的转向角经过时间 τ 后到达的位置 (x_Q, y_Q) 。设未来点 Q 的状态量为 $x_Q = [x_Q, y_Q, \bar{\theta}_Q, \bar{\alpha}_Q]^T$, 则可由下式求出。

$$\begin{cases} \alpha_Q = \alpha \\ \theta_Q = \theta + \frac{V\tau}{L} \tan \alpha \\ x_Q = x + \frac{2LV\tau \cos \theta - V^2\tau \tan \alpha \sin \theta}{2L} \\ y_Q = y + \frac{V^2\tau^2 \tan \alpha \cos \theta + 2LV\tau \sin \theta}{2L} \end{cases} \quad (5)$$

式中 x, y, θ, α ——当前车辆的状态值; τ ——自动跟踪测距仪的采样时间的平均值。

将近似曲线路径的折线集合 Ω 上距离未来点 Q 最近的点 P_i^* 定义为目标点。目标点 P_i^* 的状态量为 $x_P = [x_P, y_P, \bar{\theta}_P, \bar{\alpha}_P]$ 。如图 1 所示, 以 Q 点的位置坐标 (x_Q, y_Q) 为中心点作边长为 1 m 的正方形, 求出正方形中距离 Q 点最近的折线上的点 P_i 。在线段 $P_{i-1}P_i$ 和 P_iP_{i+1} 上求解距离 Q 点最近的点 P_i^* 。并用差分法求解点 P_i^* 处的横摆角 $\bar{\theta}_P$ 和转向角 $\bar{\alpha}_P$ 。

2.2 在目标点附近导出线性车辆运动方程式

将车辆未来点 Q 的状态量和目标点 P_i^* 的状态量分别表示为 $\delta x = x_Q - x_P, \delta y = y_Q - y_P, \delta \theta = \theta_Q - \theta_P, \delta \alpha = \alpha_Q - \alpha_P$ 。

将式(2) 进行变分可得式(6) 的状态方程式。

$$\ddot{\delta x} = A(t) \delta x + b \delta u \quad (6)$$

式中 $\delta x = [\delta x, \delta y, \delta \theta, \delta \alpha]^T$ 为新的状态量, $\delta u = \delta \dot{\alpha}$ 为新的控制量。 $A(t), b$ 分别由下式表示。

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -V \sin \bar{\theta}_P & 0 \\ 0 & 0 & V \cos \bar{\theta}_P & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{V}{L \cos^2 \bar{\alpha}_P} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = [0, 0, 0, 1]^T$$

2.3 控制器的设计

系数行列式 $A(t)$ 中状态量 $\bar{\theta}_P = \frac{j\pi}{2} (j = 0, \pm 1, \pm 2)$ 时, $\sin \bar{\theta}_P$ 或者 $\cos \bar{\theta}_P$ 将为零, 系统将为不可控制系统。为了解决此问题, 将车速的变化量 $\delta V = V - \bar{V}$ 作为新的控制量引入就可回避系统的不可控制问题。扩张后的车辆运动方程式如下

$$\ddot{\delta x} = A(t) \delta x + B(t) u \quad (7)$$

式中

$$B(t) = \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta}_P & 0 \\ \sin \bar{\theta}_P & 0 \\ \frac{\tan \bar{\alpha}_P}{L} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} \delta V \\ \delta u \end{bmatrix}$$

利用无限调节器的设计方法设计车辆跟踪控制器时, 取目标函数如下式

$$J = \int_0^\infty (\delta x^T Q \delta x + u^T R u) dt \quad (8)$$

式中, 考虑到在跟踪控制中主要关心 x, y, θ 的跟踪精度, 且车辆行驶中的速度基本一定的情况下, 为了消除速度的影响, Q 和 R 分别作如下设定。

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 10000 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可得出 Riccati 代数方程为^[15, 16]

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (9)$$

则得出车辆行驶的反馈增益矩阵为

$$[k_v, k_u]^T = -R^{-1}B^T P \quad (10)$$

由于所求得的 k_v 非常小, 且本研究中车辆的速度不是控制量, 因此, 实际控制中的控制器为

$$\delta u = k_u \delta x \quad (11)$$

最终转向角为目标点的转向角和计算求出的偏差的和, 即由式(12) 求得

$$\alpha = \bar{\alpha}_P + k_u \delta x \tau \quad (12)$$

3 实车试验

3.1 试验车及其检测控制系统

试验车为经过改造的普通拖拉机(三菱 2501D)。采用自动跟踪测位仪(Leica TCA1105)进行拖拉机的位置监测。从自动跟踪测位仪来的信号经过无线调制解调器(八重洲无线 YRM-311),通过串行接口由计算机采集,位置采样时间的平均值为 0.65 s;用光纤螺旋仪式(FOG)姿势计测装置(日本航空电子工业株式会社 JG-35FD)进行拖拉机的横摆角测量。JG-35FD 的漂移为 $0.5^\circ/\text{h}$,分辨率为 0.01° ,能够满足拖拉机的测位要求;用位移传感器(共和 DTP-05MDS)对拖拉机的转向角进行监测;检测到的横摆角信号和转向角信号经由 A/D 转换进入计算机。由计算机发出的控制信号经过 D/A 转换,通过伺服驱动器(泽村电器工业 MS-100)驱动伺服马达(泽村电器工业 SS60E30-L4-25)对拖拉机方向盘进行驱动控制。测控装置及其在拖拉机上的配置如图 2 所示。

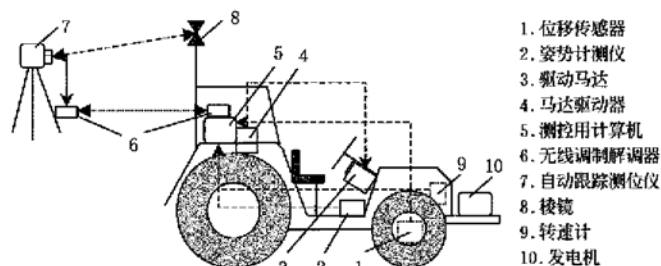


图 2 供试车辆及控制系统硬件配置

Fig. 2 Tested tractor and hardware settings

3.2 实车试验

试验是在日本岩手大学附属农场的牧草地上进行的。

路径 1 为用函数 $y = 2 \sin(x/3)$ 设定的振幅为 2.0 m, 波长为 18.8 m 的正弦波路径。路径 2 为用函数 $x^2 + (y - r)^2 = r^2$ 设定的半径分别为 $r_1 = 9.07 \text{ m}$ 、 $r_2 = 4.40 \text{ m}$ 、 $r_3 = 2.77 \text{ m}$ 的圆形路径。车辆的行驶速度设定为 1.5 m/s。

3.2.1 沿正弦波路径的跟踪控制

沿正弦波路径行驶时的目标路径和行驶轨迹如图 3 所示。图中的①~③处为正弦波的 3 个顶点处。在顶点处有较大的误差,这是由于在顶点处路径曲率的变化较大,一是由于控制时间延滞造成控制精度变差;二是车辆运动路径曲率较大时,车辆的侧滑和离心力等的影响较严重,本系统的车辆模型中没有考虑侧滑和离心力等的影响,仅是靠反馈控制来消除其影响的。从试验结果来看,利用反馈控制可以在一定程度上消除侧滑和离心力的影响。在整个行驶过程中的最大偏差为 20 cm,偏差的平均值为 1 cm,标准偏差(STD)为 10 cm。

3.2.2 沿圆形路径的跟踪控制

沿圆形路径行驶时的目标路径和行驶轨迹如图 4 所示。沿半径为 $r_1 = 9.07 \text{ m}$ 圆形路径行驶时最大偏差

为 20 cm,偏差的平均值为 8 cm,STD 值为 5 cm;沿半径为 $r_2 = 4.40 \text{ m}$ 的圆形路径行驶时,最大偏差为 13 cm,偏差的平均值为 2 cm,STD 值为 3 cm;沿半径为 $r_3 = 2.77 \text{ m}$ 的圆形路径行驶时最大偏差为 35 cm,偏差平均值为 15 cm,STD 值为 12 cm。在沿半径为 $r_1 = 9.07 \text{ m}$ 的圆形路径行驶的出现产生的偏差较大的原因是地面的坡度较大造成的。由沿圆形路径行驶的结果同样能够看出,当车辆行驶路径的曲率越大产生的偏差就越大。

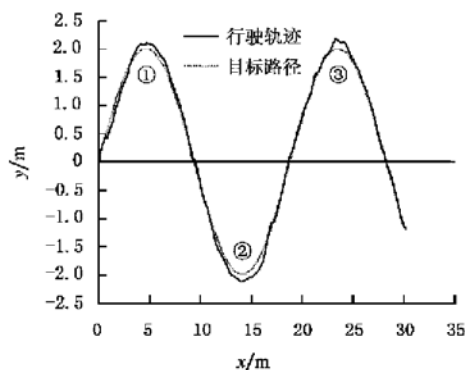


图 3 正弦波路径及行驶轨迹

Fig. 3 Sinusoidal desired path and actual trajectory

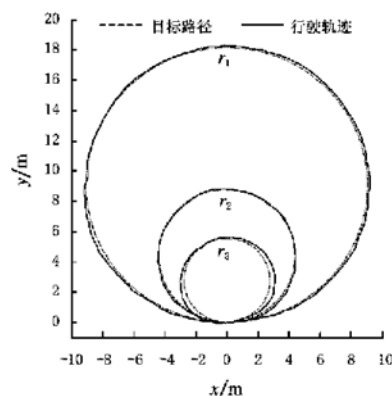


图 4 圆形路径及行驶轨迹

Fig. 4 Circular desired paths and actual trajectories

4 结论

本文首先将平面作业路径转化成车辆运动可能的状态空间轨道,在利用预见控制理论的基础上,应用最优控制理论设计了车辆沿给定路径跟踪控制的控制器。通过在牧草地上沿着正弦波路径和不同半径的圆形路径跟踪控制的实车试验表明,所采用的跟踪控制方法能够较好的控制车辆沿曲线路径跟踪行驶。

[参考文献]

- [1] Reid J F, Zhang Q, Noguchi N, et al. Agricultural automatic guidance research in North America[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2000, 25: 155- 167.
- [2] Torii T. Research in autonomous agriculture vehicles in Japan[J]. Computers and Electronics in Agriculture,

- 2000, 25: 133– 153.
- [3] Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25: 169– 194.
- [4] 于海业, 马成林, 并河 清, 等. 利用内部信息的农用自动引导行走车的研究(第 4 报)(适应农业环境的控制系统)[J]. *农业工程学报*, 1997, 13(4): 35– 39.
- [5] 陈 军, 鸟巢 谅. 拖拉机行驶路线的自动变更研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 83– 86.
- [6] 陈 军, 鸟巢 谅, 武田纯一. 带单轴拖车拖拉机自动倒车行驶的研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 82– 85.
- [7] Han S, Zhang Q, Ni B, et al. A guidance directrix approach to vision-based vehicle guidance system [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 43: 179– 195.
- [8] Chen B, Tojo S, Watanabe K. Machine vision based guidance system for automatic rice transplanters[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 19(1): 91– 97.
- [9] 大野俊一. 曲线路における操舵[J]. *自動車技术*, 1966, 20(5): 413– 419.
- [10] 吉本坚一. 人間-自動車系のシミュレーション[J]. *自動車技术*, 1971, 25(10): 1058– 1064.
- [11] Athans M, Falb P. *Optimal control*[M]. New York: McGraw-hill book company, 1966: 793– 801.
- [12] Egami T, Shinada K, Tsuchiya T. Partial state feedback control system synthesis method with preview feedforward compensation[J]. *The Collection of the Society of Instrument and Control Engineers Papers*, 1987, 23(12): 1260– 1267.
- [13] Hayase M, Ichikawa K. Optimal servosystem utilizing future value of desired function[J]. *The Collection of the Society of Instrument and Control Engineers Papers*, 1969, 5(1): 86– 94.
- [14] Kumamoto H, Nishihara O, Tenmoku K, et al. Automated robust vehicle steering on smoothly connected arc course -non-linear reduced-dimension sliding mode controller[J]. *The Collection of the Society of Instrument and Control Engineers Papers*, 1999, 35(3): 340– 348.
- [15] Ogata K. *Modern control engineering*, fourth edition [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002: 779– 783.
- [16] 吴受章. *应用最优控制*[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987: 78– 94.

On-tracking control of tractor running along curved paths

Chen Jun¹, Zhu Zhongxiang², Torisu Ryo², Taketa Jun-ichi²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling 712100, China; 2. Faculty of Agriculture, Iwate University, Morioka 0208550, Japan)

Abstract: Aging of farmers and shortage of agricultural workforce have necessitated the development of agricultural automation in the world. Many automatic vehicle guidance researches have been done, however, most of them are related to navigating a wheel-type farm mobile robot along rectilinear paths. This paper proposes an automatic tractor guidance system that enables the tractor to run autonomously along the curved path on meadow. First, a curved path was given in the form of a plane figure. Four-dimension state-vector space was reconstructed from a given path using kinematics vehicle equation. Second, linearization for vehicle equations was performed in the neighborhood of "future points", as defined in preview control theory. Then linear quadratic(LQ) method was utilized to design the on-tracking controller. Finally, field tests were conducted with the proto type tractor equipped with the developed controller. The travel speed was set at 1.5 m/s. Results indicated that the maximum deviations were 35 cm when the tractor follows sinusoidal path and circular paths.

Key words: tractor; curved path; tracking control; preview control; optimal control