

DOI: 10.3901/JME.2008.10.277

视觉导航智能车辆的路径跟踪预瞄控制*

陈无畏¹ 李进¹ 王檀彬¹ 李碧春²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009;

2. 中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

摘要: 视觉导航智能车辆通过机器视觉获取导航路径信息并进行自动跟踪。常规的反馈控制仅利用当前的路径信息,在复杂条件或突发状况下难以有效工作。通过对在线获取的具体路径信息进行预瞄,可以对未来的路径信息加以利用,从而提高智能车辆行驶的安全性和有效性。为此,在获取的路径信息中确定当前路径和未来路径分别用于反馈和预瞄,并设计预瞄加反馈的控制器。该控制器能够自动根据预瞄路径的弯曲程度调整智能车辆的预瞄距离和行驶速度,从而提高跟踪精度和行驶稳定性。仿真和试验结果表明,该控制器与一般反馈式控制器相比跟踪误差较小,行驶更稳定。

关键词: 视觉导航 智能车辆 路径跟踪 反馈控制 预瞄控制

中图分类号: TP242.6

Preview Control for Road Following of Vision Guided Intelligent Vehicle

CHEN Wuwei¹ LI Jin¹ WANG Tanbin¹ LI Bichun²

(1. School of Mechanism and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. Institution of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The vision-guided intelligent vehicle acquires the road information by machine vision, and follows the road automatically. Ordinary feedback control only uses the present road information, so the intelligent vehicle can hardly work efficiently in complicated or emergent conditions. By previewing the on-line acquired road information, future navigation information can be utilized in order to improve safety and efficiency. So road information is classified into present information and future information, and they can be used in feedback and preview respectively. A preview-feedback controller is designed. The controller can automatically adjust the preview distance and the vehicle speed according to the previewed road, so tracking accuracy and driving stability can be improved. The simulation and experiments show that this controller has better accuracy and stability than the ordinary feedback controller.

Key words: Vision-guided navigation Intelligent vehicle Road following Feedback control Preview control

0 前言

近年来,基于视觉导航的智能车辆导航获得了广泛应用,其关键技术是计算机视觉技术和智能控制技术,即首先利用机器视觉获取智能车辆前方的路面环境信息,然后通过智能控制技术使智能车辆沿规划的路径行走。国内外在智能车辆控制方面已做了大量的研究工作^[1-4],这方面研究目前面临的主要问题是:在跟踪控制策略上多采用反馈式控制,即根据视觉传感系统获得的信息,确定当前路径轨

迹和理想路径轨迹的偏差,然后由合适的控制器给出纠正偏差的控制量,以达到路径跟踪的目的。例如文献[5]中提出的基于路径直线模型的导航机理;文献[6]中研究的移动机器人的饱和反馈控制器设计。

这些反馈式控制方法只把当前的路径信息作为控制依据,因此无法利用未来的环境信息,在控制和规划方面缺乏智能性和鲁棒性。智能车辆在动态的环境中工作可能遇到各种复杂或突发状况(导航路径的急剧变化),如果智能车辆只能“看见”靠近它的当前路径,将难以保证其安全、有效地完成任务。

通过模仿人工预瞄驾驶行为,本文提出一种智能预瞄控制方法。同时,在机器视觉获取的路径信息中确定当前路径和未来路径,分别用于反馈和预瞄,设计出预瞄加反馈的跟踪控制器。

* 安徽省自然科学基金(050420302)和清华大学汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF2007-06)资助项目。20071225 收到初稿,20080614 收到修改稿

1 智能车辆路径跟踪的预瞄

考虑到驾驶员在开车时,总是不断地对前方的路径信息进行预瞄,然后根据前方路径的弯曲程度决定车辆的转弯方向、转角大小及车速大小^[7]。对于视觉导航智能车辆的路径跟踪,应该与汽车驾驶员的驾驶行为相似。因此,智能车辆路径预瞄的基本思想是根据前方路径的弯曲程度来调整智能车辆的行驶速度和预瞄距离。

根据这一思想,预瞄的第一步是确定路径的弯曲程度。如图 1 所示, y 轴为智能车辆当前行驶方向,预瞄路径包含在矩形框内。将路径沿 y 轴方向等分为 $n+1$ 个矩形区域。在每个区域内,将路径视为直线,从而得到第 $i+1$ 个区域路径相对于第 i 个区域路径的夹角 $\gamma_i (n \geq i \geq 1)$ 。

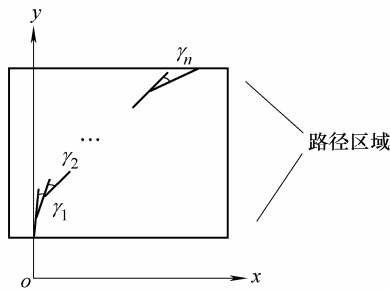


图 1 路径弯曲度计算示意图

路径弯曲度 C 定义为

$$C = \sum_{i=1}^n |\gamma_i| \quad (1)$$

弯曲度得到后,由其确定智能车辆的行驶速度和预瞄距离,基本原则是:当 C 较大时,车速较低,预瞄距离较近;当 C 较小时,车速较高,预瞄距离较远。

2 预瞄控制及导航参数提取

如前所述,反馈控制仅考虑当前的路径信息,而预瞄则能够利用未来的信息。为此,可建立反馈加预瞄的控制(以下如无特别说明简称预瞄控制)。同时,考虑到两种控制的输入信息来源都是视觉传感器获取的路径信息,因此没必要设计两个控制器,而仅须要对路径信息进行划分,确定哪些信息是用作反馈,哪些用作预瞄,并把两部分信息进行综合,作为跟踪控制器的输入。预瞄控制原理如图 2 所示。

视觉导航智能车辆路径跟踪的原理是:通过对包含路径信息的图像进行处理以识别出路径;再进一步得到智能车辆与路径的相对位置关系,即导航参数(位置偏差和角度偏差),并根据导航参数进行

跟踪控制。因此,以上提到的利用路径信息实际上就是获取和利用导航参数。

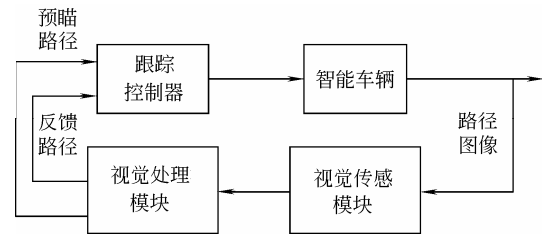


图 2 预瞄控制原理图

2.1 反馈控制的导航参数提取

图 3 为反馈控制导航参数提取图。该图显示了使用纯反馈控制的导航参数提取方法,即把获得并经过处理的一帧图像信息全部用作反馈控制输入。图 3 中建立了两个图像处理区域,路径识别时仅对这两个区域进行处理以降低图像数据处理量,并把识别出的路径近似为直线。

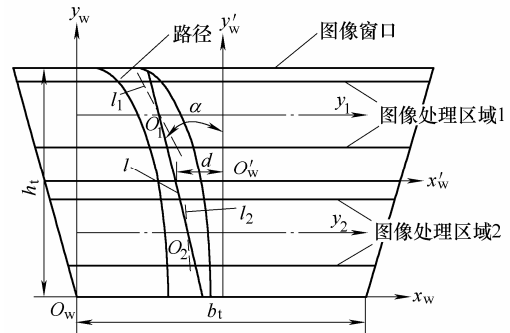


图 3 反馈控制导航参数提取图

图 3 中, h_t 、 b_t 为整个图像区域的高度和宽度。 l_1 、 l_2 为识别出的上下两段路径中心线;将 l_1 和 y_1 的交点 O_1 与 l_2 和 y_2 的交点 O_2 连接起来(y_1 、 y_2 分别平分上下两处理区域),得到直线 l 。 l 与 y'_w 的夹角 α 和 l 在 x'_w 轴的截距 d , 为智能车辆相对于路径的角度偏差和位置偏差,即导航参数。

这种反馈控制方法通过连接上、下两个图像处理区域内的两点 O_1 和 O_2 来提取导航参数。由于 y_1 轴和 y_2 轴位置始终固定,由这种方法获得的导航参数始终是整个图像区域内的“平均值”,无法适应路径的弯曲度变化。

2.2 预瞄控制的导航参数提取

为降低图像处理量,仍把获得的路径图像划分为两个区域,并把上区域路径作为预瞄路径(预瞄区),下区域路径作为反馈路径(反馈区),分别提取导航参数,如图 4 所示。上下区域位置及宽度根据智能车辆车体情况及实验条件确定。

首先对路径图像进行处理,得到识别出的两区域路径 l_1 、 l_2 。这时,可直接获得反馈区的导航参数为 α_2 、 d_2 。 α_2 为 l_2 与 y'_w 的夹角, d_2 为 l_2 在 y_2 轴

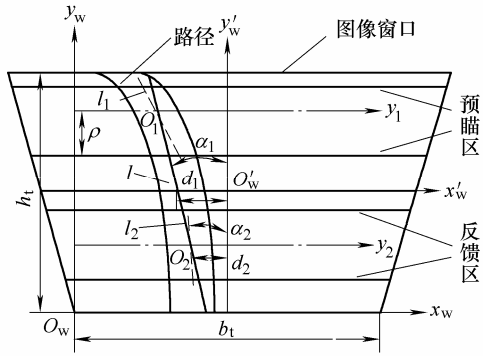


图 4 预瞄控制的导航参数提取

上的截距。预瞄区的导航参数提取方法与反馈区类似，只是 y_1 轴的位置不再固定，而是随预瞄距离 ρ 的变化而变化(从预瞄区底部向上到 y_1 轴的距离，见图 4)。现在只要 ρ 确定，就可确定图 4 中 y_1 轴的位置，从而确定 y_1 轴与路径 l_1 的交点 O_1 。连接 O_1O_2 得到 l ， l 与 y'_w 的夹角 α_1 和 l 在 x'_w 轴上的截距 d_1 ，即为预瞄区的导航参数。由此得到整个图像处理区域的导航参数 α 、 d 为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \\ d = \frac{d_1 + d_2}{2} \end{cases} \quad (2)$$

这样得到的导航参数可以随着路径变化而变化，使其更接近实际路径，从而提高跟踪精度。

3 预瞄距离和智能车辆速度的确定

为获得预瞄距离 ρ ，须根据式(1)计算预瞄区路径 l_1 的弯曲度 C ，同时根据 C 确定车速 v 。首先，确定 C 的两个临界值 C_1 、 C_2 ($C_1 < C_2$)。当 $C_1 \leq C \leq C_2$ 时，车速 v 和预瞄距离 ρ 随 C 的变化而变化，且遵循 C 越大， v 和 ρ 越小的原则；当 $C < C_1$ 或 $C > C_2$ ， v 和 ρ 不再随 C 变化。即 C_1 对应 v 和 d 的最大值， C_2 对应 v 和 ρ 的最小值。然后，在 $C_1 \leq C \leq C_2$ 间选取 v 和 ρ 随 C 变化的函数。为保证变化的连续性和平稳性，选取二次多项式函数；并使其在 $C_1 \leq C \leq C_2$ 内单调减。由此得到车速 v 和预瞄距离 ρ 的计算公式

$$v = \begin{cases} v_{\max} & C \leq C_1 \\ a_1(C - C_2)^2 + b_1 & C_1 \leq C \leq C_2 \\ v_{\min} & C \geq C_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho = \begin{cases} D_{\max} & C \leq C_1 \\ a_2(C - C_2)^2 + b_2 & C_1 \leq C \leq C_2 \\ D_{\min} & C \geq C_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中， a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为常数，且 a_1 、 a_2 非负。 v_{\max} 、

v_{\min} 为智能车辆速度的最大值和最小值， D_{\max} 、 D_{\min} 为预瞄距离的最大值和最小值，单位为像素个数。因为 C 的两个临界值 C_1 、 C_2 分别对应 v 和 ρ 的最大值和最小值，可得

$$\begin{cases} v_{\max} = a_1(C_1 - C_2)^2 + b_1 \\ v_{\min} = b_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} D_{\max} = a_2(C_1 - C_2)^2 + b_2 \\ D_{\min} = b_2 \end{cases} \quad (6)$$

在 C_1 、 C_2 、 v_{\max} 、 v_{\min} 、 D_{\max} 、 D_{\min} 确定后， a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 即确定。

由此，可以得到导航参数 α 、 d 和智能车辆速度 v ，其获取流程如图 5 所示。

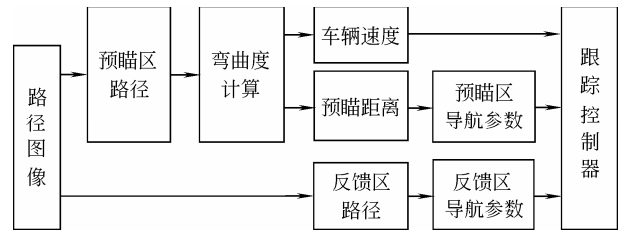


图 5 导航参数和车速获取流程

4 智能车辆控制器设计和仿真计算

4.1 智能车辆模型

智能车辆模型如图 6 所示。其两个前轮为独立驱动轮，通过调节各自的转速，实现对路径的跟踪。后轮为万向轮，其主要作用是支撑车体和导向。 Oxy 坐标系为世界坐标系， $O'x'y'$ 坐标系为智能车辆车体坐标系。 b_w 为左右驱动轮的轮距， v_l 和 v_r 分别为左右驱动轮的速度。点 O' 为前轴中心点， R 为 O' 点的转弯半径。 v 为 O' 点的速度，并将其视为智能车辆的速度。 β 为智能车辆车体纵轴 y' 与世界坐标系 x 轴的夹角， S 为智能车辆相对 Oxy 坐标系的位移。因此，智能车辆任一时刻 t 的状态可以用变量 $(\beta(t), S(t))$ 表示。

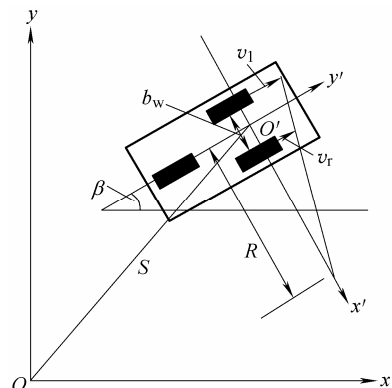


图 6 智能车辆运动模型

假定智能车辆在平面内运动且忽略车轮侧滑，则智能车辆在平面内做圆周运动，并有

$$\begin{cases} v = \frac{v_1 + v_r}{2} \\ \omega = \frac{v_1 - v_r}{b_w} \end{cases} \quad (7)$$

式中 ω 为横摆角速度。以 Δt 为时间周期，可得

$$\begin{cases} \Delta\beta = \omega\Delta t \\ R = \frac{b_w(v_1 + v_r)}{2(v_1 - v_r)} \\ \Delta S = 2R \sin \frac{\omega\Delta t}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中， $\Delta\beta$ 为 Δt 时间内智能车辆方向变化量， ΔS 为 Δt 时间内智能车辆的位移变化量。因此，根据上一时刻的车辆状态可以得到其下一时刻状态。智能车辆对路径的跟踪，是通过确定每个 Δt 时间内的 ω 和速度 v 实现的。它们都与 v_1 、 v_r 有关，为此引入 v_1 、 v_2 ，并有

$$\begin{cases} v_1 = v_1 + v_2 \\ v_r = v_1 - v_2 \end{cases} \quad (9)$$

因此结合式(7)，当 Δt 很小时，式(8)可写为

$$\begin{cases} \Delta\beta = 2v_2\Delta t/b_w \\ \Delta S = v_1\Delta t \end{cases} \quad (10)$$

这样， ω 、 v 即智能车辆的转速和速度就可以分别通过确定 v_2 和 v_1 来确定。

4.2 控制器设计及仿真结果

为检验预瞄控制的效果，分别对智能车辆进行反馈控制和预瞄控制的路径跟踪仿真计算。对于两种控制方法，控制器输入均为 v_1 、 v_2 ；且 v_2 均根据导航参数 α 、 d ，采用 PID 控制算法确定

$$\begin{aligned} v_2(k) = & v_2(k-1) + K_{I\alpha}(\alpha(k) + K_{P\alpha}[\alpha(k) - \alpha(k-1)] + \\ & K_{D\alpha}(\alpha(k) - 2\alpha(k-1) + \alpha(k-2)) + K_{Id}d(k) + K_{Pd} \times \\ & [d(k) - d(k-1)] + K_{Dd}(d(k) - 2d(k-1) + d(k-2))) \end{aligned} \quad (11)$$

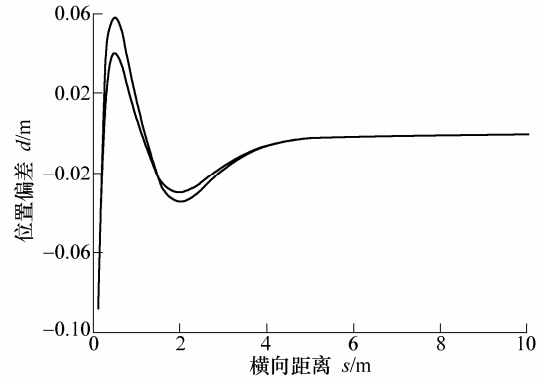
并有 $v_2 \leq \omega_{\max} b_w / 2$ 。 $\alpha(k)$ 、 $d(k)$ 为 k 时刻智能车辆相对于路径的角度偏差和位置偏差，其单位分别为 ($^\circ$) 和 cm ； ω_{\max} 为智能车辆横摆角速度的最大值。

v_1 的确定方法如下：对于反馈控制， v_1 根据 v_2 确定，即 v_1 随 v_2 的增大而减小，以保证智能车辆转向平稳，其控制律为

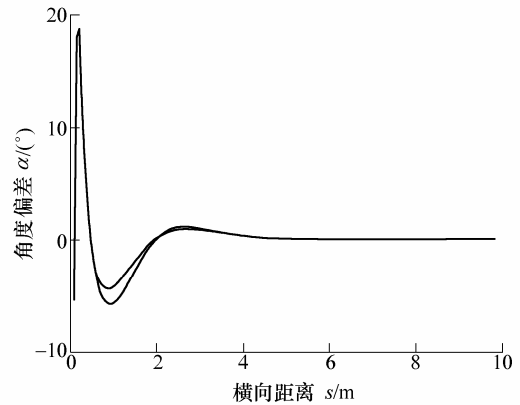
$$\begin{cases} v_1(k) = v_0 - p|v_2(k)| \\ v_1(k) \geq v_{\min} \end{cases} \quad (12)$$

式中 p 为可调参数，表示车速随转向控制量的变化；对于预瞄控制， v_1 由式(3)计算得到。图7显示了使用预瞄控制和反馈控制的智能车辆跟踪小弯曲度路径(平缓路径)和大弯曲度路径(急转路径)的仿

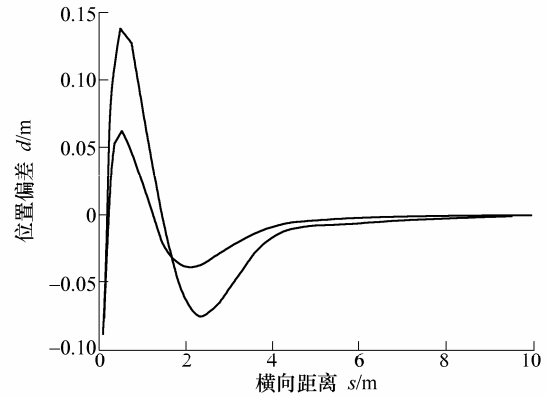
真结果。



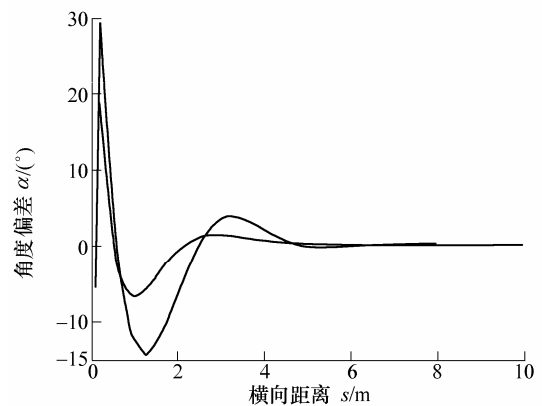
(a) 平缓路径跟踪位置偏差



(b) 平缓路径跟踪角度偏差



(c) 急转路径跟踪位置偏差



(d) 急转路径跟踪角度偏差

图7 反馈和预瞄控制跟踪偏差图

由图 7 可见两种路径条件下，预瞄控制器都具有较小的跟踪偏差，在大弯曲度时效果更加明显。这是因为路径弯曲度较大时，预瞄控制的预瞄距离较小，从而提取的导航参数较接近当前路径；同时行驶速度降低，所以跟踪精度提高。图 8 显示了平缓路径下的预瞄路径弯曲度和车速曲线。可见使用预瞄控制器的智能车辆车速变化较为平缓，因此行驶稳定性较好。仿真计算中相关参数为： $v_{max}=4\text{ m/s}$ ， $v_{min}=0.2\text{ m/s}$ ， $p=0.1$ ， $K_{I\alpha}=4$ ， $K_{P\alpha}=14$ ， $K_{D\alpha}=0.4$ ， $K_{Id}=6$ ， $K_{Pd}=13$ ， $K_{Dd}=0.2$ 。

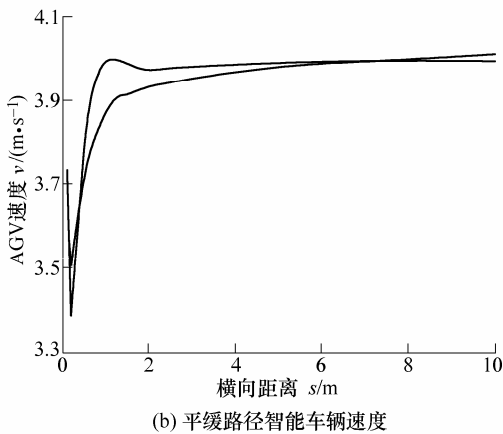
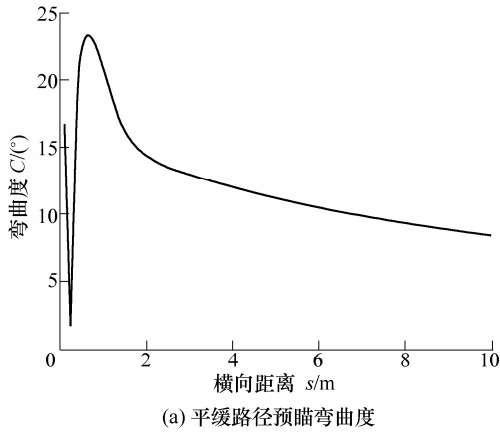


图 8 平缓路径预瞄弯曲度和车速曲线

5 智能车辆试验验证

5.1 试验平台

如图 9，智能车辆试验平台由车体、图像采集和处理系统、电机控制系统等组成，并以路面铺设的白色条状标志线作为跟踪路径，具体见文献[8-9]。

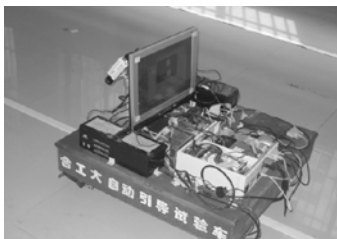


图 9 智能车辆试验平台

5.2 试验结果

通过对摄像机获得的路径图像进行滤波、最优阈值计算、二值化、数学形态学滤波和实时性处理^[9-10]，得到实时识别出的路径图像和程序运行界面如图 10 所示。其中与预瞄控制相关的各参数为 $D_{max}=80$ ， $D_{min}=0$ ， $C_1=10^\circ$ ， $C_2=70^\circ$ ，由式(5)、(6)可得 $a_1=1.06\times 10^{-3}$ ， $b_1=0.2$ ， $a_2=0.02$ ， $b_2=0$ 。



图 10 路径识别程序实时运行界面

反馈控制和预瞄控制的路径跟踪结果见下表。其中列出了智能车辆对三种不同弯曲程度的路径，即大(不小于 60°)、中($30^\circ\sim 60^\circ$)、小($0^\circ\sim 30^\circ$)的跟踪位置偏差均值。

表 跟踪位置偏差(均值)

| 弯曲度 $C/^\circ$ | 跟踪位置偏差 d/m | |
|----------------|--------------|-------|
| | 反馈 | 预瞄 |
| ≥ 60 | 0.180 | 0.138 |
| $30\sim 60$ | 0.123 | 0.092 |
| < 30 | 0.073 | 0.064 |

由以上表中数据可看出：随着弯曲度的增大，两种控制方法得到的跟踪偏差都在增加，这是因为弯曲度增大使得图像处理得到的导航参数变化较快，而驱动电动机不能完全实时地响应这一变化。与反馈控制相比，预瞄控制的跟踪误差较小，并且其差值随着跟踪路径弯曲度的增大而增大，可见预瞄控制相对与反馈控制具有更高的跟踪精度。同时，采用预瞄控制的智能车辆在跟踪过程中行驶更为平稳，因为它可以根据路况调节车速。

6 结论

(1) 视觉导航智能车辆利用机器视觉获得路径

信息并进行自动跟踪。考虑到常规反馈控制没有将未来的路径信息加以利用,在图像路径中划分出当前路径和未来路径,分别用于反馈和预瞄。

(2) 对于预瞄路径,根据其弯曲程度确定预瞄距离和智能车辆速度。根据实验室智能车辆平台建立运动学模型,并设计预瞄跟踪控制器。

(3) 仿真和试验结果表明与反馈控制器相比,使用预瞄控制器的智能车辆,具有较准确的跟踪精度和较好的稳定性。

参 考 文 献

- [1] KEHTARNAVAZ N, GRISWORLD N, LEE J. Visual control for an autonomous vehicle (BART)-the vehicle following problem[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(3): 654-662.
- [2] FUJIMORI A, NIKIFORUK P N, GUPTA M M. Adaptive navigation of mobile robots with obstacle avoidance[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1997, 13(4): 596-601.
- [3] FIERRO R, LEWIS F L. Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks[J]. IEEE Transactions on Neural Network, 1998, 9(4): 589-600.
- [4] 齐国光, 郭木河, 马少平. 轮式机器人最优控制的研究[J]. 机器人, 1996, 18(1): 21-27.
 QI Guoguang, GUO Muhe, MA Shaoping. Research on optimal control of wheeled mobile robot[J]. Robot, 1996, 18(1): 21-27.
- [5] LI Bing, WANG Rongben. Modeling of steering system of high speed intelligent vehicle by system identification[C]// Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference, Changchun. 1999: 243-246.
- [6] 王荣本, 李兵, 徐友春, 等. 基于视觉的智能车辆自主导航最优控制器设计[J]. 汽车工程, 2001, 23(2): 97-100.
 WANG Rongben, LI Bing, XU Youchun, et al. Optimal controller design for an intelligent vehicle based on vision navigation[J]. Automotive Engineering, 2001, 23(2): 97-100.
- [7] 李庆中, 顾伟康, 叶秀清, 等. 移动机器人路径跟踪的智能预瞄控制方法研究[J]. 机器人, 2002, 24(3): 252-255.
 LI Qingzhong, GU Weikang, YE Xiuqing, et al. A study of intelligent preview control method for mobile robot road following[J]. Robot, 2002, 24(3): 252-255.
- [8] 李碧春, 李进. 基于视觉导航的自动引导车设计[J]. 汽车科技, 2006(5): 34-37.
 LI Bichun, LI Jin. The design of vision-based automatic guided vehicle[J]. Automotive Technology, 2006(5): 34-37.
- [9] 陈无畏, 孙海涛, 李碧春, 等. 基于标识线导航的自动引导车跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 164-170.
 CHEN Wuwei, SUN Haitao, LI Bichun, et al. Tracking control of automatic guided vehicle based on lane marker navigation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(8): 164-170.
- [10] 李进, 陈无畏, 李碧春, 等. 自动引导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.

作者简介: 陈无畏, 男, 1951 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。研究方向为车辆动力学、智能机器人。

E-mail: cww@mail.hf.ah.cn

李进, 男, 1982 年出生, 博士研究生。研究方向为智能车辆技术。

E-mail: lijn8203@eyou.com

王檀彬, 1982 年出生, 博士研究生。研究方向为智能车辆技术。

E-mail: forttop124@163.com

李碧春, 1980 年出生, 硕士。研究方向为车辆动力学与控制技术。

E-mail: libc21@sohu.com