

基于多传感器多路径规划 自动泊车系统仿真及实车验证

高航^{1,2,3}, 梁华为³

(1 中科院合肥智能机械研究所 安徽合肥, 230027)

(2 中国科学技术大学自动化系 安徽合肥, 230027)

(3 中国科学院合肥物质研究院先进制造技术研究所 江苏常州, 213000)

摘 要: 针对无人驾驶汽车比赛进行的研究和设计。根据阿克曼转向几何建立汽车运动学模型, 采用多种传感器构建感知系统识别车位, 为不同车位设计了平行、垂直和单段三种泊车路径, 籍由触角算法控制汽车跟踪规划路径, 用Matlab 仿真, 在VC2005 平台上实车测试。比赛中, “智能先锋号” 车位检测与车身控制准确, 避免了其他参赛队漏检错检或碰到障碍物的失误, 为拿下最终比赛的胜利垫定了基础。

关键词: 无人驾驶汽车; 自动泊车; 运动学模型; 传感器路径规划

Abstract: The research and design is directed towards the unmanned vehicle race. Establish the kinematic model of vehicle under the Ackermann steering geometry; construct multiple-sensor frame about sensing system to identify parking spaces; design three kinds of parking paths--parallel park, vertical park single segment park--for different parking spaces; track the path in terms of tentacles algorithm; emulated on the Matlab platform; test on the vehicle with the program running on VC2005. In the competition, Smart Pioneer detected parking spaces and tracked the planning path correctly, avoiding the failure of other teams who undetected, error-detected and even met the obstacle, won first place both in the whole competition and the individual competition of auto parking finally.

Key words: Autonomous vehicle ; Auto parking ; Kinematic model ; Sensor ; Path planning

中图分类号: TP273+.5; TP249

文献标识码: B

文章编号: 1001-9227(2011)04-0162-05

0 前言

无人驾驶汽车研究中的自动泊车技术, 不仅让汽车更加智能化, 还能解决现实生活中的泊车难问题。一个简洁有效的自动泊车系统, 替代驾车者安全、快速、准确地完成泊车操作, 不仅节省时间降低驾驶难度, 还有助于减少泊车过程中发生的交通事故, 对提高道路安全有重要意义, 而一款带有自动泊车系统的高性价比汽车也将拥有良好的市场前景^[1]。

2010年广汽丰田杯“中国智能车未来挑战赛”(Future Challenge 2010)于10月16日—10月18日在西安举行, 由中国科学院合肥物质科学研究所先进制造技术研究所研制的无人驾驶汽车“智能先锋号”从全国10支参赛队中脱颖而出, 摘得桂冠^[2], 其基本驾驶能力测试中的定点泊车部分也获得单项第一。这里将该车使用的泊车技术作一下全面叙述, 分汽车运动学建模、车位检测、路径规划、控制泊车四个部分加以介绍。

1 汽车运动学建模

1.1 车身和车位的简化模型

影响泊车的参数很多。汽车静态参数如车身尺寸大小和轮轴构造对影响泊车路径规划; 汽车动态参数如加速度性能和速度控制影响路径跟踪。泊车环境参数如车位的

大小, 有无障碍, 路面摩擦系数等, 既影响路径规划, 也产生干扰。

“智能先锋号”改造自瑞虎DR 2.0 AT豪华型SUV, 轴距为2510mm, 最大功率102千瓦, 最大扭矩182N·m, 外观均称小巧, 加速平稳和驾驶安全。宽敞的顶棚和后备箱为汽车平台改造留下足够的空间。表1列出了该款汽车的部分参数。

表1 奇瑞瑞虎的部分参数(单位: 毫米)^[3]

车长	车宽	轴距	前轮轮距	后轮轮距
4285	1765	2510	1524	1519
最小转弯半径	前悬	后悬	轮胎规格	
5500	750	1025	235/60R16	

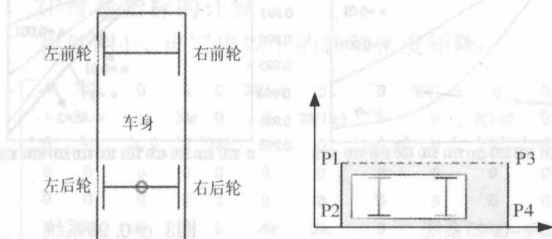


图1 车身和车位简化模型(红圈为后轴中心)

为了使泊车过程的便于理解与控制, 先对车身和车位建立如图1所示的简化模型。忽略汽车外边界的轮廓形

收稿日期: 2011-02-02

作者简介: 高航(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向为模式识别与智系统。

状,只考虑与运动相关的特性,将车身简化为前轮可自由转向的矩形刚体。以目标车位附近的障碍物最突出部分为边界,将车位简化为矩形边框,得到四个角点 $P_1 \sim P_4$ 。

1.2 基于阿克曼转向几何的运动学模型

运动学模型是汽车运动研究的理论基础,一般基于阿克曼转向几何(Ackermann steering geometry)^[4]建立。阿克曼转向几何是一种为了解决交通工具转弯时内外转向轮路径指向的圆心不同的几何学。依据阿克曼转向几何设计的车辆,沿着弯道转弯时,利用四连杆的相等曲柄使内侧轮的转向角比外侧轮大 $2 \sim 4$ 度(图2中, $\varphi_1 - \varphi_2 \approx 2^\circ \sim 4^\circ$),使四个轮子路径的圆心大致上交会于后轴的延长线上瞬时转向中心 O 。这样的设计避免了汽车转向时,路面对汽车产生的附加阻力以及轮胎的过快磨损,转向系统能保证汽车在转向时,所有车轮均作纯滚动运动顺畅的转弯。

根据阿克曼转向几何,阿克曼转角约等同于前轴中心转角 φ ,而前轴中心转角与方向盘转角 γ 近似成线性关系,可由公式(1)计算阿克曼转角。

$$\gamma = K \cdot \varphi \quad (1)$$

K 为比例系数,可以通过实验标定得到。

图2中所示后轴中心对应的转弯半径 R 为:

$$R = \frac{l}{\sin \varphi} \quad (2)$$

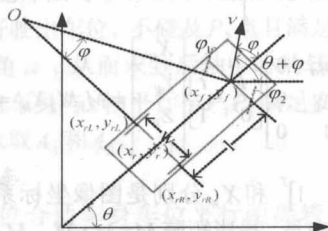


图2 基于阿克曼转向几何的运动学模型

其中,

(x_f, y_f) 为前轮轴中心点坐标; (x_r, y_r) 为后轮轴中心点坐标; v 指前轴中心点的速度; l 为轮轴距,即汽车前后轮轴中心点连线之间的距离; w 为车身宽度; φ 为前轴中心点转向角,即前轮方向与车身方向的夹角; θ 为航向角,即汽车中心轴与水平方向的夹角。

汽车泊车是一个低速(约5km/h)行驶的过程,可以忽略不计车轮的侧向滑动,车轮只做滚动和侧转,由此推导汽车运动学模型,推出后轴中心的运动轨迹为:

$$(x_r - a)^2 + (y_r - b)^2 = (l \cdot \cot \varphi)^2 \quad (3)$$

这里, (x, y, φ) 为汽车当前的位姿(横纵坐标和转向角), (a, b) 为转向中心坐标。汽车实际行驶中,车身上任意点的轨迹均是以 (a, b) 为圆心标准圆,汽车的运动轨迹就是一段段圆弧串联而成。

2 车位检测

2.1 汽车系统架构

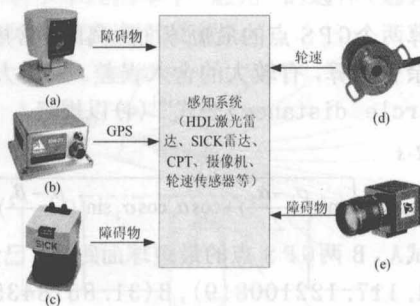
《“智能车未来挑战”比赛评价规则》要求“无人驾驶车辆必须能够进入一个指定泊车位。路网文件中含有泊车位的位置信息,但无法预知邻近车位是否已被其它车辆占用。”^[5]

“智能先锋号”的系统架构分为感知系统、决策系统和控制系统三大块(图3),各块为定点泊车充当不同的角色。



图3 自动泊车系统构架

感知系统(图4)是汽车的耳目,通过HDL激光雷达、SICK雷达、CPT惯导等传感器设备获取路面环境和车身姿态信息,上传决策系统。决策系统是汽车的大脑,需要分析路网文件(Road Network Definition File, RNDF),识别场景,规划运行策略,协调各系统资源,提供交互功能;自动泊车部分决策主要完成车位检测和路径规划。控制系统接受决策系统的指令,驱动电机完成汽车速度、方向等控制。



(a)HDL激光雷达;(b)惯性导航系统 SPAN-CPT;(c)SICK雷达;
(d)轮速传感器;(e)摄像机

图4 感知系统

下面对使用到的传感器及处理方法加以介绍。

2.2 HDL激光雷达及其应用

Velodyne公司生产的高分辨率激光雷达(High Definition Lidar Sensor, HDL-64E S2,图4(a)所示)含有上下共64个激光器,可以提供水平 360° ,垂直 26.8° 视野,1~120m范围的3维立体信息。顶装于车顶,由大容量蓄电池为其提供12~16V直流电源,额定电流4~6A,额定功率70W,加电旋转,转速为5~15Hz,有低速保护功能。环境适应良好,防水防风。

HDL采集场景3维数据后,以UDP(User Datagram Protocol,用户数据报协定)形式串行传输到工控机。每一帧数据(图像)包含 512×512 个栅格,每个栅格表示大小为 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ 的区域,即能检测车身四周51.2m范围。每个栅格的值表示该处障碍物距离地面的最大高度。为简化数据处理,以0.5m为阈值二值化栅格的值(图5),高于0.5m标为1表示有障碍物,低于0.5m标为0表示没有。

若以GPS坐标给定泊车位,将该坐标投影在HDL栅格图像中,并在其中扫描代表泊车位的那些栅格,值全0表示无障碍物,随即向决策系统返回该车位有效。



图5 二值化HDL的栅格值(局部截图,1表示障碍物)

2.3 惯性导航系统SPAN-CPT

NovAtel 惯性导航系统SPAN-CPT(图4(b)所示)是为数不多不受出口限制的高端惯性导航产品,用以进行车身姿态监测。得益于基站校正技术和SPAN技术,它的检测精度可以达到厘米级并且在卫星被遮蔽时仍连续稳定工作。

基站校正技术通过架设的广播基站实现对接收机GPS信号的差分校正。SPAN技术是为了提高导航的性能而在NovAtel高精度GNSS基础上集成iMAR FSAS-EI-SN IMU的一种技术。NovAtel的SPAN技术集合了两种不同的但是又互为补充的技术:GNSS定位和惯性导航。GNSS定位的绝对精度加上IMU陀螺和加速计测量的稳定性就可以提供一个3D的位置、速度和姿态解算结果。不像单GNSS导航系统,即使在GNSS信号被遮挡的时候,其解算的结果也是稳定连续的。

在计算两个GPS点的最短球面距离时,常规几何方法使用了反余弦运算,有较大的舍入误差。采用大圆弧距离(great-circle distance)公式^[6](4)以规避。

$$\begin{aligned} \widehat{AB} &= R \cdot s \\ &= R \cdot 2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} \right) + \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \sin^2 \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2} \right)} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

如测试A、B两GPS点的最短球面距离,已知A(31.85188964, 117.122100819), B(31.851843555, 117.122100168), R=6378.137, PI=3.1415926535897932, 普通计算公式:

$$\begin{aligned} \widehat{AB} &= R \cdot r \\ &= R \cdot \arccos(\cos \beta_1 \cos \beta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \beta_1 \sin \beta_2) \end{aligned} \quad (5)$$

得 $\widehat{AB}=1.289m$ 。由公式(4)得2.829m。Google earth测得的距离是2.822m,显然大圆弧距离公式减小了计算误差。

2.4 SICK激光雷达

激光测距的原理是通过旋转镜面将脉冲激光向各个方向发射并由LMS接收反射光线,计时器计算收发时间差从而得到距离。由德国施克(SICK)制造的激光雷达传感器可用作目标测量、定位和区域监测,选用的型号为LMS291-S052(图4(c))。最大测量距离30~80m,角度分辨率最高0.25°,最快扫描频率75Hz,分辨率/系统误差10mm/typ. ±35mm,具有滤波和防雨雪干扰功能。SICK提供180度二维平面扫描,多个雷达组合安装实现全景覆盖和消除盲区。

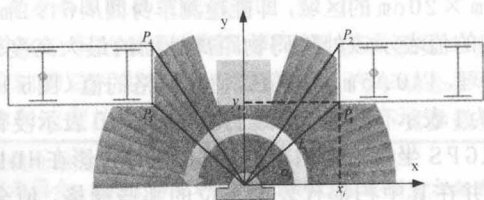


图6 SICK检测车位

雷达工作时,扫描安装平面生成测量序列,第*i*个测量的测量值为 L_i ,同起始扫描位置的夹角为 α , $\alpha_i = i * a$,其中 a 为角度分辨率。可以由下列公式得到障碍物的位置:

$$\begin{aligned} x_i &= L_i \cdot \cos \alpha_i \\ y_i &= L_i \cdot \sin \alpha_i \end{aligned} \quad (6)$$

由图6所示,SICK检测连续障碍物,并获取与泊车相关的四个角点 $P_1 \sim P_4$ 。

2.5 摄像机

彩色相机(1394CCD,见图4(e))主要用来检测交通标识和车道路沿。经过标定的相机可用来检测泊车平面的车位线,是用雷达之外识别车位的新方法。标定有两种方法。

一是分步标定。根据相机成像机理,找到真实场景中的点与图像像素点之间的对应关系(因为是泊车平面映射到图像平面,关系是一一对应),然后对相机内外部参数分步进行标定。(7)为标定公式,详细参数说明和标定方法见文献[7]。

$$\begin{aligned} s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 X_w = M X_w \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $[u \ v \ 1]^T$ 和 X_w 分别是图像坐标系和真实世界坐标系下的坐标向量,投影矩阵 $M=M_1 \cdot M_2$, M_1 与 M_2 分别是摄像机的内部和外部参数。按特定位置安装相机,即固定 M_2 ,可拟合出 M_1 。 M_1 确定后,对实际安装的相机的 M_2 进行拟合。参数拟合公式是含有多个待定参数的分式,使用MATLAB函数nlinfit进行非线性拟合,样本点越多,拟合越准确。

二是直接标定。泊车平面中的点与图像像素点一一对应,借助于BP人工神经网络^[8],忽略相机成像机理,采集大量样本点(全平面的密集栅格)参与网络训练,可以简洁地完成标定任务。

相机完成标定后,从图像中识别并提取到车位线特征点,由公式或训练好的神经网络计算实际的位置。

3 路径规划

不同的车位环境适用不同的泊车方法。常规的路边车位较宽,约有1.5~2倍车长,采用平行泊车;车位较窄且深采用垂直汽车。以上两种方法都是经典的2~3段倒车泊车。车位较宽车身车位平行距离较远时,还可以用快速驶入车位的单段泊车,适合在比赛中以最少时间完成任务。

3.1 平行泊车

从平行于泊车位的 A_1 点开始,以 O_1 为圆心,右打满方

向盘匀速倒车,行驶到 A_2 点。然后以 O_2 为圆心,左打满方向盘匀速倒车到 A_3 点。

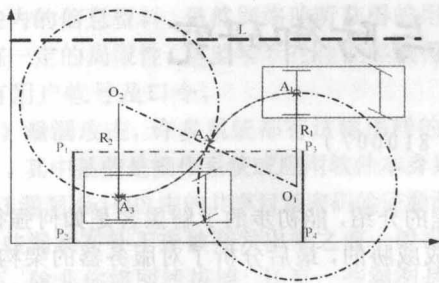


图7 平行泊车示意图

泊车过程和驶出车位过程是互逆的,由驶出车位过程反推 A_1 、 A_2 、 A_3 三点。首先根据车位大小和安全距离的要求,确定泊车终点的位置 A_3 ^[9]。左打满方向盘行驶到 A_2 再右打满方向盘行驶到 A_1 ,附加约束是两曲线相切,不碰及 P_3 点,不触及车道线 L ,保证安全距离 δ ,路程最短作为最优原则,从而确定 A_2 、 A_3 。实际泊车中,可能离 A_3 有较小的差距,需要附加一段前行或后行。

3.2 垂直泊车

2段垂直泊车如图8所示, A_1 到 A_2 以 O_1 为圆心,左打满方向盘正向行驶, A_2 到 A_3 以 O_2 为圆心, R_3 为半径倒车。 A_1 、 A_2 、 A_3 的确定方法与平行泊车类似。先确定理想的泊车终点 A_3 ,以刚好驶出车位,不碰及 P_3 点且满足安全距离 δ_2 ,确定最小转弯角 α ,从而求到后轴中心的转弯半径 R_3 ,两曲线两切, A_1 点车身与 x 轴平行与 P_1P_2 满足安全距离 δ_1 ,半径为 R_1 ,如此求取 A_1 和 A_2 。

3.3 单段泊车

如果车位合适车身车位平行距离较远,单段泊车可以快速完成泊车,如图9所示,计算理想泊车终点 A_2 ,以不碰及 P_1 、 P_2 ,满足保证安全距离 δ ,右打满方向盘实现最快泊车为约束条件,求取 A_1 点。

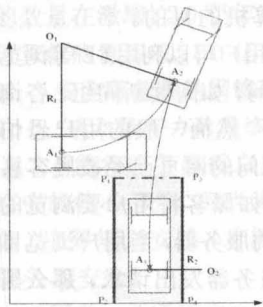


图8 垂直泊车示意图

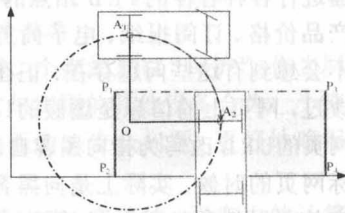


图9 单段泊车示意图

4 控制泊车

模仿甲壳虫利用其触角在地面避开障碍物爬行,车辆运行和路径保持采用触角算法。激光雷达用来扫描汽车周围环境,使用虚拟“触角”(图10)来搜索以汽车为中心的栅格地图,寻找可用的栅格。每个速率对应一套“触角”,把速度机制和基于“碰撞距离”的机制相结合,可以使车辆顺利安全地通过不规则的狭窄路面。

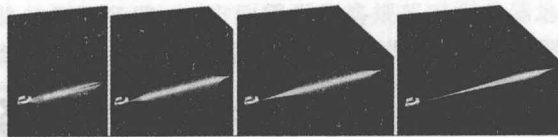


图10 触角的几何形状

触角是一条从汽车重心出发的圆弧。每条圆弧对应一个前轮转角(即阿克曼转角)。汽车速度越低,圆弧曲率越大;速度越高,圆弧越长。系统共标定和使用了16套“触角”(对应0~10m/s间16个特定速率),每套包括81条。边上的“触角”要比前方的短,以免曲率大而指向汽车的后方。指向前方的直线触角定长,可以在危险发生前检测到障碍物以即时制动。

HDL的扫描频率为10Hz,即每100ms刷新一次栅格地图。在当前100ms里,汽车执行上次选定的“触角”,以5m/s的速率行驶,留下的就是0.5m长的圆弧轨迹(汽车最终的轨迹就是这样的圆弧片段串联而成);同时选择最新的“触角”。选择“触角”需要考虑尽可能地逼近规划的路径,预知碰到障碍物之前行驶的距离防碰,行驶路线尽量平坦。图11表示单段泊车中“触角”的选择(选择了最右边的“触角”以跟踪规划的路径)。

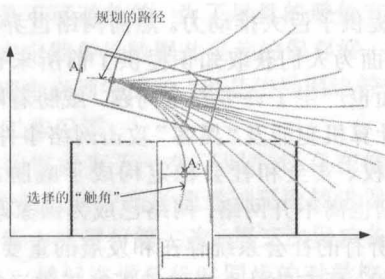


图11 触角的选择

图13表示了整个泊车流程。

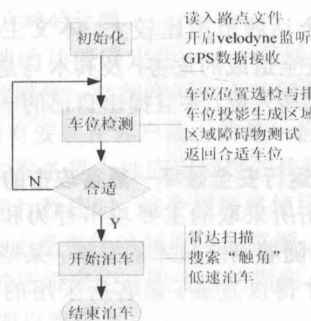


图12 泊车流程

5 仿真与实车验证

在Matlab 2009a上用GUI搭建仿真平台,用VC2005搭建控制平台运行在工程机上。两平台的界面如图13所示。



图13 Matlab仿真界面和VC控制界面

(下转第168页)

与外部网络进行通信,安装防火墙等安全设备是必须的。防火墙等安全设备既能将计算机与来自外部网络的非法入侵者隔离开来,实现物理隔离,又能保证与外部通讯的通畅。为了保护内网的安全,应当确定防火墙等安全设备不会向外界开放任何IP地址,特别是服务器及客户端的IP地址必须隐藏起来。IP地址开放的越多,网络受到攻击的可能性就越大,服务器就越会危险。当然,至少要有个IP地址对外进行通讯,如果有Web服务器或邮件服务器,它们的IP也是要公开的。一个IP地址与外界通讯是通过端口来实现的,而端口有很多,因此通过软件来看端口,排查您不必要开放的端口,将其屏蔽掉,尽可能的减少由于操作系统或其他软件漏洞而带来的危机。

2.7 建立安全管理规章制度

加强网络的安全管理,建立有关规章制度并落到实处,对确保网络安全、可靠地运行,将起到十分有效的作用。首先要建立操作人员及管理制度的管理制度。各种人员负责本人用户名、口令管理,并自行保密,不得借与他人使用,不得私自进入他人账户,不得通过黑客等非法手段试图攻击系统、获取系统权限、修改系统设置、删除数据等影响或危害系统正常运行的行为,调离岗位时应采取相应的安全管理措施。另外,还要建立系统运行维护管理制度、计算机处理控制管理制度、文档资料管理制度、计算机机房的网络安全管理制度、上网信息登记审核制度等。

2.8 加强对各种网络设备的安全管理

首先,要保证网络设备的物理安全,这是指网络设备

周围环境的安全及网络设备硬件的安全,是网络安全体系中最为重要的部分。通常可以从以下几个方面加以提高。提供正确的物理环境,正确的物理环境应该对场地的封闭、防火、防盗、防静电、适当的通风、温度的控制以及电源的安全等提供符合网络设备要求的安全保证。然后,控制到设备的直接访问,在可能的情况下为机架上锁,并且在控制台和辅助端口设置口令等方式。

接着,要建立健全各种安全管理的规章制度和岗位责任这个层面的建设最为复杂,但当前国际上有成熟的安全管理方法,如ISMS信息安全管理体系就为各类的企事业单位提供了一个标准的信息安全管理办法,依照这个体系来完善各个企事业单位的安全管理制度,就能最大的程度保护网络的完全运行,并防止网络技术滥用对企事业单位网络造成的危害。

3 结论

网络环境的复杂性、多变性,以及信息系统的脆弱性,决定了网络安全威胁的客观存在。加强安全监管和建立保护屏障不可或缺。木马是近年来兴起的一种网络攻击手段,对木马的防御是网络安全中重要的一环。本文在介绍了木马工作原理的基础上,浅析了如何搭建一个安全的网络服务器,希望对日后研究有所帮助。

参考文献

- [1] 贺雪晨.信息对抗与网络安全[M].清华大学出版社,2006年7月.
- [2] 胡昌振,李贵涛.面向21世纪网络安全与防护[M].北京:希望电子出版社,2000.

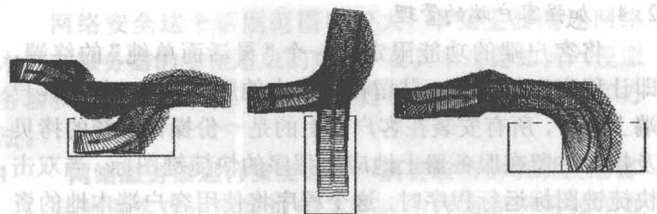
赛前实车做过多次测试,及时挖掘出潜在的问题。大量仔细而充分的准备,才有2010年广汽丰田杯“中国智能车未来挑战赛”中,“智能先锋号”获得整体以及泊车单项第一名。

参考文献

- [1] 张伦维.自动泊车不是梦[J].当代汽车,2008,(07).
- [2] 陈套,汪永安.全国智能车挑战赛:皖产“智能先锋号”无人车夺冠[EB/OL].http://www.xinhuanet.com/chinanews/2010-10/22/content_21197621.htm,2010-10-22/2010-10-29.
- [3] 瑞虎DR主要规格及价格表[EB/OL].http://www.chery.cn/web/jtsy/ggpz_jsp_catid_970_carid_815.html,2010-1-10 13:24.
- [4] 任孝平,蔡自兴.基于阿克曼原理的车式移动机器人运动学建模[J].智能系统学报,2009,4(06).
- [5] “智能车未来挑战”比赛评价规则[EB/OL].<http://ccvai.xjtu.edu.cn/FCKeditor/upload/File/g.pdf>,2011-1-20 16:03.
- [6] Great-circle distance[EB/OL].http://en.wikipedia.org/wiki/Great-circle_distance,2011-1-20 16:03.
- [7] 陈佳.CCD测距技术研究[D].长春:长春理工大学,2009.
- [8] 周波,聂楠楠,李东辉.双目摄像机定标的神经网络方法[J].自动化与仪器仪表,2009,(01).
- [9] GB50067-97汽车库、停车库、停车场设计防火规范[S].
- [10] von Hundelshausen, F; Himmelsbach, M; Hecker, F, et al.. Driving with tentacles: Integral structures for sensing and motion[J].JOURNAL OF FIELD ROBOTICS,2008,25(9):640-673.

(上接第165页)

仿真结果如图14。每次泊车,先通过一段S形曲线行驶到A点,然后按路径规划泊车到车位。



(a) 平行泊车 (b) 垂直泊车 (c) 单段泊车

图14 Matlab仿真结果

VC控制主要包括三个线程。第一个线程负责接收感知系统的数据,这些数据是由传感器原始数据经过处理后得到的;第二个负责识别和提取泊车位,设计泊车路径,向控制层输出决策信息;第三个负责选择“触角”,控制汽车跟踪规划的路径。

6 结论

根据阿克曼转向几何建立汽车运动学模型准确合理,对奇瑞瑞虎的车辆平台改造成功,软件系统架构合理,各子系统并行不悖。采用多种传感器参与检测车位,临赛前组委会通知限用GPS,在很短时间重新调整检测方案,加大了对SICK的使用,成功地应对了比赛规则的变动。三套路径规划在Matlab上仿真,节省了人力物力,加快了进度。