

DOI: 10.3901/JME.2012.20.103

简单城市环境下地面无人驾驶系统的设计研究*

姜 岩¹ 赵熙俊² 龚建伟¹ 熊光明¹ 陈慧岩¹

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京 100081;

2. 中国兵器科学研究院 北京 100089)

摘要: 由于需要在统一的软硬件配置下满足各类场景的工作要求, 因此具有开放性的智能驾驶系统对于地面无人平台而言至关重要。全面介绍参加 2011 中国智能车未来挑战赛的北京理工大学 BIT-III 智能驾驶系统。该系统具有两方面的突出特点: 设计具备纵横向规划能力的局部路径规划算法并将其作为系统核心功能, 从底层实现安全、平顺和稳定的自动驾驶; 围绕路径规划的需求, 根据输出模态对环境感知功能进行分类, 便于融合不同传感器的信息。比赛和测试结果表明, BIT-III 具有简单城市环境下全无人自动驾驶的能力, 而开放式的系统设计使其能够在保证已有功能的基础上进化式地提高智能化水平, 满足更为复杂的工作要求。

关键词: 无人驾驶 系统设计 局部路径规划 环境融合

中图分类号: U461

System Design of Self-driving in Simplified Urban Environments

JIANG Yan¹ ZHAO Xijun² GONG Jianwei¹ XIONG Guangming¹ CHEN Huiyan¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;

2. China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089)

Abstract: System design is of great importance for intelligent vehicle which is aimed at driving in diverse scenarios under specific hardware and software configuration. The entry of Beijing Institute of Technology in the 2011 Intelligent Vehicle Future Challenge (11'FC) – BIT-III is presented. The open design of BIT-III's autonomous driving system reflects in two aspects. Safety and stability in driving are guaranteed even when driving in unknown and complex environment by embedding them in the deliberately designed local motion planner. Environmental sensing components are virtualized and fused according to their output mode, which realizes the modularization of the system and considerably simplifies the extension of system functions. The performance of BIT-III in the 11'FC implied that the system is able to drive autonomously in simplified urban environments and is ready to extend functions for more complicated scenarios.

Key words: Autonomous driving System design Local motion planning Environmental fusion

0 前言

随着软硬件技术的成熟, 无人驾驶技术正逐步完成由半自主无人驾驶到全自主无人驾驶的转变。早期的相关研究主要在高速环境下进行半自主行驶。美国卡耐基梅隆大学的 NavLab-5 智能驾驶系统在 1995 年完成了不用手横穿美国的无人驾驶^[1]。该系统由机器控制转向盘, 而由驾驶员负责节气门制动操作。2011 年荷兰举办的 Grand Cooperative

Driving Challenge 中, 驾驶员操作转向盘, 机器控制车速实现编队行驶^[2]。2011 年意大利 VisLab 车队完成了从罗马到上海的无人驾驶。车辆纵横向控制均由机器完成, 但是主要通过跟随头车中的驾驶员指定路线完成行驶^[3]。在国内, 国防科技大学于 2011 年 8 月在长沙到武汉之间 286 km 的高速公路上完成了无人驾驶试验。纵横向控制均由机器实现, 而且增加了超车并道功能。试验过程中仍然有驾驶员坐在转向盘后并在个别情况下进行了人工干预。

与环境相对单一的高速环境不同, 城市中的行驶虽然速度相对较低(5~40 km/h), 但是环境却更加复杂。除了结构化道路外, 还可能遇到结构化特

* 国家自然科学基金资助项目(51275041, 91120015)。20120305 收到初稿, 20120826 收到修改稿

征不明显的路口等。这要求无人驾驶系统必须具有各类工作环境的识别和工作能力。据报道, Google 智能车已经完成了 30 万 km 各类环境中的无人驾驶。车辆纵横向控制均由机器完成, 但是自动驾驶依赖于 Google 精细完备的环境地图数据, 而且车上仍配备了驾驶员以保证安全^[4]。

由于技术水平的限制, 全自主无人驾驶目前还只能在封闭性的比赛中演示验证。美国 DAPRA 于 2004 年和 2005 年举办的 Grand Challenge 智能车比赛考验了全自主无人车辆在越野环境下的高速行驶能力^[5]。随后 DAPRA 于 2007 年在封闭的城市环境下举办了 Urban Challenge 比赛, 第一次将全自主无人驾驶放在城市环境下实现^[6-7]。然而这三届比赛都提供了比赛路线的准确路点信息, 对参赛车辆规划系统的要求较低。

2011 年中国智能车未来挑战赛(2011 Future Challenge, 下面简称 11'FC) 在全自主无人驾驶平台上展示视听觉技术研究的最新成果^[8]。比赛过程中不允许驾驶员干预车辆行驶。与往届相比, 11'FC 将比赛由人工环境转移到真实城市环境下进行。虽然对道路环境进行了简化, 但是设置的诸多场景对参赛车辆的自动驾驶能力仍然是极大的考验。比赛全程长约 10 km, 除了直弯道行驶外, 参赛车辆还需要完成超越动静态车辆、路口左右转及掉头、根据锥桶排成的导向通道行驶等操作。比赛并没有提供赛道的精确地图, 而只是提供了包含若干个关键点的任务文件作为已知信息。北京理工大学 BIT-III 智能驾驶平台耗时 28 min 完成。驾驶过程中没有进行人工干预, 顺利通过所有考点, 车道内行驶稳定平顺, 并依据交规要求选择正确车道完成超车换道。

本文介绍了 BIT-III 的智能驾驶系统及其功能组成。首先分析了 BIT-III 开放式系统架构的设计。与前两届 FC 中采用的系统相比^[8-9], 新系统在架构上具有两个突出特点: ① 通过对功能模块的分级实现了不同级别的功能复用, 便于系统功能的维护, 避免系统和环境复杂化对系统基本性能的影响; ② 通过系统的模块化设计实现多模态环境感知与路径规划的集成, 便于系统功能的扩展。随后详细讨论了参加 11'FC 时系统中各功能模块的算法实现及集成方式。随后针对 BIT-III 在比赛中若干典型场景的表现分析了其在简单城市环境下自主行驶的工作性能。最后根据该智能驾驶系统目前的工作能力讨论了进一步研究的方向。

1 系统框架设计

全自主无人驾驶应用主要分为两种类型。一是

针对各种场景设计专用的智能驾驶应用, 然后将其集成为一套完整的智能驾驶系统。前两代 BIT 号自动驾驶平台便是采用这种方式。研究过程中发现, 这种方式存在以下问题。

(1) 各专用智能驾驶应用是相对完整且封闭的, 集成时难以实现基本功能的复用, 易造成系统庞大且难于维护。

(2) 系统依赖环境感知结果决定使用何种智能驾驶应用。一旦发生场景判断错误, 可能导致智能驾驶系统实施危险行为。

针对这些问题, BIT-III 号无人驾驶系统采用生物进化式方式进行研发。首先使系统具有实现智能驾驶的各基本功能, 然后在此基础上逐步增加高级功能提高智能性。进化式体现在两个方面。

(1) 需要对功能进行分类, 按照从低级到高级的方式开展研究。功能分类的初衷是为了快速实现无人驾驶行为。低级功能提供了实现智能驾驶应用所必需的基本功能, 高级功能通过集成低级功能实现高级的智能驾驶应用。通过对基本功能的复用, 可以加快实现新的智能驾驶应用的研发周期。

功能分类的另一个作用在于通过对低级功能的继承可以使系统优先保证低级功能中的基本性能。这一机制可以避免由于系统自身和工作环境的复杂化对重要性能产生影响。

BIT-III 无人驾驶系统将安全性、平顺性和稳定性作为核心特性, 而将智能性作为非核心级特性。核心特性的相关功能优先级更高, 但是智能化程度较低。在成熟的核心功能的基础上, 非核心功能是实现真实环境下智能驾驶的关键(图 1)。对于全自主无人驾驶系统而言, 将安全性作为最核心的性能是必要的。即使在较高级功能出现严重问题时, 也必须保证系统对自己和环境都是安全的。

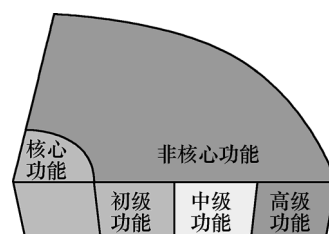


图 1 功能分级

具体说, BIT-III 的核心功能包括局部定位、线控和状态测量、局部路径规划以及静态环境网格创建等。论文第 2 节将对核心功能进行详细介绍。具有核心功能的 BIT-III 能在未知环境中安全行驶, 并为较高级功能提供安全可靠的底层平台, 通过输入接口方便地实现较高级功能的智能行为。

BIT-III 的非核心功能按照算法智能化程度进一步划分。初级功能包括诸如车道线、交通灯和交通

标示牌识别等模式识别功能,结构化车道规划和路口规划等简单规划。中级功能包括大范围全局路径规划、运动障碍物检测等。高级功能更加体现逻辑分析能力,如对附近其他车辆的行为进行分析判断其驾驶意图。在 11'FC 中 BIT-III 集成并实现了核心功能和初级功能,能够完成简单城市环境下的自主驾驶。

(2) 系统需要具有良好的扩展性。进化式的研究方式要求核心功能为高级功能预留接口以便于功能的扩展。

智能驾驶系统一般由环境感知、规划和定位控制等部分组成。由于定位控制尤其是底层控制功能不存在特别多的变化选择,因此整套系统的扩展性主要取决于对环境感知和规划的集成能力。

规划根据车辆实时运动状态和环境信息确定车辆控制参数。无人驾驶车辆的工作环境复杂且存在动态障碍,容易造成规划的期望路径不可行,加之车辆运动速度较快,不可能停下车等待规划完成,因此无人驾驶系统要求规划系统具有良好的实时性。BIT-III 的规划功能由全局路径规划和局部路径规划两部分组成。其中,全局路径规划功能计算车辆的期望路径,局部路径规划功能在避障的同时对期望路径进行跟踪。由于车辆周围障碍物大多是车辆或行人等较小障碍物,因此这种先避障再跟踪路径的局部路径规划算法能够避免大部分需要重启全局路径规划的情况,从而提高规划系统的实时性。此外,局部路径规划同时具有纵向规划能力,根据实时运动状态和加速度约束确定满足行驶平顺性和稳定性的期望速度。作为核心功能,局部路径规划为 BIT-III 提供了安全、平顺和稳定等基本性能。针对不同场景的智能驾驶应用可以通过设计相应的全局路径规划算法并调用局部路径规划加以实现。

智能驾驶系统中常用的环境感知传感器有机器视觉和主动视觉两大类。不同设备不仅测量原理不同,而且应用方式各异。为了便于在系统中集成不同传感器,从路径规划的需求出发,根据输出结果的模态对环境感知功能进行以下分类:① 面向网格的环境信息将以环境占据网格(Occupancy Grid Map)形式的环境信息输出给局部路径规划,用于避障分析,包括路沿、静态障碍物等影响可通过性的信息;② 面向对象的环境信息将以具有特定属性的对象形式的环境信息输出给规划系统,为之提供必需的辅助信息,如车道线、路面标志、交通标示牌、信号灯和拓扑地图等。

与面向对象的环境信息相比,环境网格相对原始,并不进行特征提取和识别等较复杂操作。这在

一定程度上避免了环境感知算法中的不确定性对系统安全性的影响。将这类信息用于核心级局部路径规划,可以保证系统的可靠和安全。不同输出模态的环境信息的融合方式也不同。各种环境网格数据可以融合到车身局部坐标下统一的网格中作为完整的可通过性区域。而面向对象的环境感知信息具有独占性,所以只能通过增加环境对象的方式实现信息融合。

2 功能模块的算法实现和集成

BIT-III 智能驾驶系统的具体功能组成和数据流如图 2 所示。

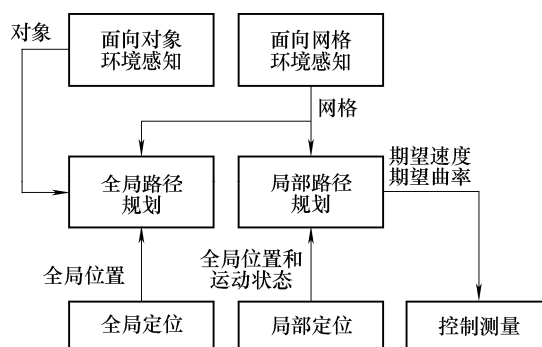


图 2 功能组成和数据流

参加 11'FC 的 BIT-III 的传感器配置如图 3 所示,具体功用如下表所示。系统使用 5 台计算机分别用来进行图像处理、路沿检测、障碍物检测、规划和定位控制。



图 3 BIT-III 的传感器布置

表 传感器配置

传感器	作用
相机 1	车道线和停车线检测
相机 2	标识牌和红绿灯检测
Sick-291 雷达	障碍物检测
IBEO 四线雷达	路沿检测

2.1 底层控制系统(核心级)

BIT-III 的底层控制系统由线控与状态测量两部

分功能组成(图4)。线控系统使用三个电动机分别控制转向盘、制动踏板和加速踏板。其中,转向盘由电动机带动齿轮控制,踏板则由各自电动机拉线控制。用传动轴上安装的霍尔传感器测量实时车速,用前轮转向节的连接轴上安装的电位计测量前轮偏角。

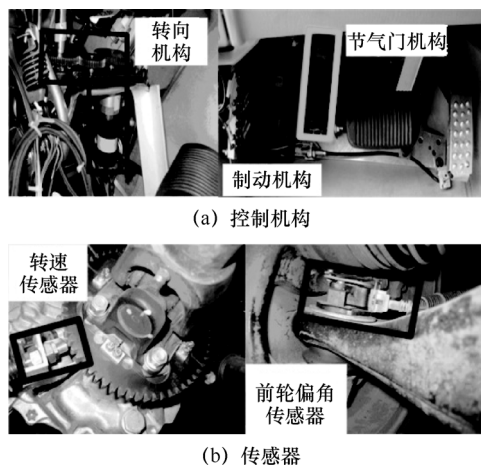


图4 控制机构和传感器

底层控制系统由6个单片机组成的CAN网络实现数据传输和共享,并通过串口与上位计算机进行通信。控制参数包括期望前轮偏角和期望车速。输出的状态参数包括实时的前轮偏角、车速和轮速传感器的脉冲数。

由于横向控制输出与期望前轮偏角之间是线性对应关系,因此只需要根据预先标定结果输出控制量即可完成横向控制。

与之相比,由于上位机以期望车速的形式下发纵向控制命令,线控系统需要根据实时车速与期望车速确定加速踏板与制动踏板电动机各自的控制量,因此纵向控制的实现比较复杂。线控系统采用自整定比例微分(Proportional-differential, PD)控制实现节气门和制动的协调控制^[10]。根据当前车速和目标车速之间的速度偏差,由增量式PD算法计算得到控制量 U ,并通过试验根据对加速度和减速度的需求确定控制量、节气门与制动控制电动机之间的关系(图5)。若控制量 $U > U_0$,则控制节气门;若控制量 $U < U_c$,则控制制动;若 $U_0 > U > U_c$,则节气门与制动点击均不控制,而通过阻力实现自然减速。判断条件中的参数 U_0 和 U_c 通过道路试验来确定。与文献[10]采用同一电动机同时控制加速踏板和制动踏板不同,BIT-III线控系统使用独立的电动机分别控制节气门和制动,但是由于制动加速采用同一套PD控制参数,因此可以避免出现同时踩下节气门和制动的问题。

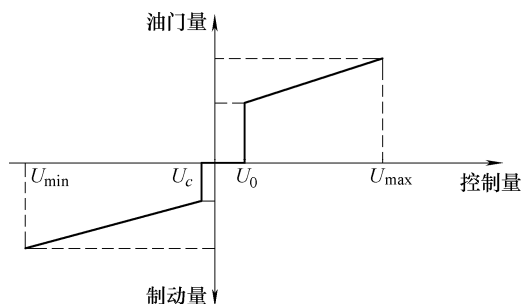


图5 纵向控制量与加速踏板和制动踏板电动机输出的关系

2.2 局部路径规划(核心级)

局部路径规划根据车辆实时运动状态和环境信息确定使车辆沿期望路径运动的纵横向控制参数。

与全局路径只规划一次不同,局部路径规划以100 ms的规划周期执行。局部路径规划一方面计算满足路径跟踪要求的可行无碰路径,保证行驶的横向安全,另一方面在由最大加减速度和侧向加速度约束的速度容许空间中进行速度规划,保证行驶的纵向安全和稳定平顺。

车辆运行的实际环境可能造成期望路径不可行。比如当期望路径上出现较小障碍物时,希望车辆能够自动避开障碍物后继续跟踪期望路径,从而避免频繁进行全局规划。BIT-III局部路径规划算法原理如图6所示,在期望路径上的预瞄位置,沿其法线方向确定若干个目标状态,各目标状态使用与预瞄状态相同的航向。计算当前车辆状态和各目标状态之间的行驶曲线,通过避障分析排除其中不满足安全要求的,将剩余曲线中最接近期望路径的可行路径作为局部路径规划结果。



图6 局部路径规划

为了保证规划结果的可行性,行驶曲线需要满足车辆运动微分方程

$$\dot{x} = v \cos \theta$$

$$\dot{y} = v \sin \theta$$

$$\dot{\theta} = v \tan \delta / L$$

式中, (x, y) 是车辆位置, θ 是航向角, v 是车速, L 是轴距, δ 是前轮偏角。

根据文献[11],满足上述车辆运动微分方程的曲线可以用 $n(n \geq 3)$ 次多项式参数方程描述。多项

式参数方程中车辆的坐标分别用量纲一参数 u 的多项式方程 $x(u)$ 和 $y(u)$ 表示。实数 $u \in [0, 1]$, $(x(u), y(u))|_{u=0}$ 对应起点坐标, $(x(u), y(u))|_{u=1}$ 对应终点坐标。已知车辆当前状态 $(x_A, y_A, \delta_A, \theta_A)$ 和目标状态 $(x_B, y_B, \delta_B, \theta_B)$ 。根据边界条件

$$\begin{aligned} x(0) &= x_A & y(0) &= y_A & x(1) &= x_B & y(1) &= y_B \\ \begin{pmatrix} \dot{x}(0) \\ \dot{y}(0) \end{pmatrix} / \sqrt{x^2(0) + y^2(0)} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_A \\ \sin \theta_A \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \dot{x}(1) \\ \dot{y}(1) \end{pmatrix} / \sqrt{x^2(1) + y^2(1)} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_B \\ \sin \theta_B \end{pmatrix} \\ \delta(0) &= \delta_A & \delta(1) &= \delta_B \end{aligned}$$

能够求解 3 次多项式参数方程。为了使曲线具有更多的自由度, BIT-III 选择使用 5 次多项式参数方程描述行驶曲线

$$\begin{aligned} x(u) &= x_0 + x_1 u + x_2 u^2 + x_3 u^3 + x_4 u^4 + x_5 u^5 \\ y(u) &= y_0 + y_1 u + y_2 u^2 + y_3 u^3 + y_4 u^4 + y_5 u^5 \end{aligned}$$

确定车辆行驶曲线实际上是求解方程组中 12 个系数。为了解此不定方程组, 增加 4 个调节参数 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4)^{[11]}$, 将参数方程组转化为系数对调节参数的显性方程组, 并对其优化求解确定行驶曲线。目标函数选取的原则如下: 曲线上最大曲率尽可能小, 以使行驶平顺; 曲线长度尽可能短。为此, 设计如下目标函数并用单纯形法求解

$$\min(\max(|\kappa(u)|)k + s(u))$$

式中, s 是曲线长度, k 是权重系数, κ 是曲线曲率。

$$\kappa(u) = (\dot{x}(u)\ddot{y}(u) - \ddot{x}(u)\dot{y}(u)) / (\dot{x}(u)^2 + \dot{y}(u)^2)^{3/2}$$

只有最大曲率不超过车辆曲率限制的行驶曲线才被认为是真正可行的行驶曲线。图 7 给出了以相同初始和目标位置, 不同目标航向角计算得到的一组行驶曲线。

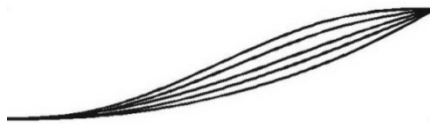


图 7 由初始和目标状态计算行驶曲线

为了保证行驶的安全性, 需要根据实时环境信息确定行驶曲线是否满足避障要求。曲线并不包含车辆的几何尺寸信息, 为了在复杂环境下准确判断车辆的可通过性, 在行驶曲线上根据航向计算车身实际占据的区域(图 8), 并与环境网格进行比对, 判断车身区域中是否存在障碍物。最终在所有满足避障安全性的行驶曲线中选择与期望路径一致性最好的作为局部路径规划结果。

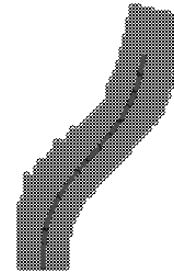
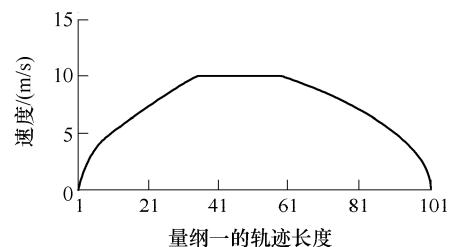


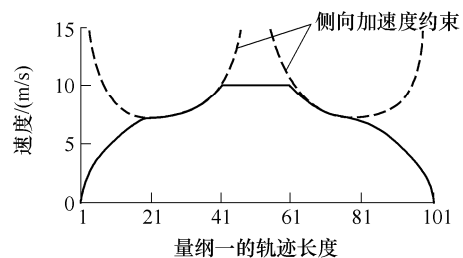
图 8 增加车身宽度信息的行驶曲线

局部路径规划以曲率的形式提供了车辆的横向控制参数。为了确定车辆纵向控制参数, 在路径上进一步进行速度规划。速度规划的原则如下:

① 为了保证纵向碰撞安全性, 车辆能够以最大减速度在路径终点处减速为零; ② 车辆尽可能以最快速度行驶。根据初始速度、最大加减速度和最高速度计算得到的速度容许空间, 能够得到路径上每一处位置对应的期望速度。以图 8 中的路径为例, 初始速度为零时, 速度规划首先判断路径长度是否能够达到最高速度, 然后确定加速段和减速段的位置, 最终确定的规划结果是首先以最大加速度提高到最高速度, 平稳行驶一段时间后以最大减速度进行减速到零(图 9a)。为了保证车辆转弯时的侧向安全性和平顺性, 纵向规划根据最大侧向加速度对速度容许空间进行进一步约束(图 9b), 得到最终的速度规划结果。



(a) 根据最大加减速度得到的基本速度规划结果



(b) 增加侧向加速度约束后的速度规划结果

图 9 初速度为零的速度规划

虽然纵向规划得到了整条路径上各处的期望速度, 但是实际只会执行下一个控制周期处的期望速度。这样在车辆正常行驶时, 路径长度较长, 会平稳的输出加速段或匀速段速度, 不会造成行驶时快时慢。当车辆逐步接近障碍物时, 规划路径长度

逐渐变短, 为了满足路径终点速度为零的要求, 输出的期望速度也逐渐减小直至最终停车。

作为 BIT-III 号智能驾驶系统的核心功能, 局部路径规划算法综合实现了行驶的纵横向安全性、平顺性和稳定性要求。上层规划只需要将全局期望路径和速度阈值输入局部路径规划算法即可实现智能驾驶应用。

2.3 定位(核心级)

BIT-III 定位系统分为局部定位与全局定位。两者用途和性能要求不同, 采用的算法也有所区别。局部定位为局部路径规划提供准确平顺的定位信息。而全局定位则为在路网内定位车辆提供绝对位置信息。定位系统由 GPS、轮速传感器和电子罗盘组成。

局部路径规划需要将期望路径根据车辆实时运动状态转换到局部坐标系内。通过推导可以得到期望路径的实时局部表示遵循

$$\begin{aligned} x^p(s) &= \cos \theta [\cos \theta_i x_i^p(s) + \sin \theta_i y_i^p(s) - x^v] - \\ &\quad \sin \theta [-\sin \theta_i x_i^p(s) + \cos \theta_i y_i^p(s) - y^v] \\ y^p(s) &= \sin \theta [\cos \theta_i x_i^p(s) + \sin \theta_i y_i^p(s) - x^v] - \\ &\quad \cos \theta [-\sin \theta_i x_i^p(s) + \cos \theta_i y_i^p(s) - y^v] \end{aligned}$$

式中, $[x^p(s), y^p(s)]$ 是期望路径上序列为 s 处的状态的实时局部坐标, $[x_i^p(s), y_i^p(s)]$ 是该状态在初始位置处局部坐标系内的位置, θ_i 是初始位置车辆航向角, θ 是车辆实时航向角, $[x^v, y^v]$ 是车辆相对于初始位置的位移。可见, 对于局部路径规划与跟踪应用, 除了航向信息外, 并不需要全局定位结果。另一方面, 局部路径规划需要较高的定位精度, 而且定位结果不能发生跳动, 以免在跟踪过程中发生横向控制参数的突变。综合考虑这些要求和各种定位技术的特点, BIT-III 采用纯航迹推算法为局部路径规划提供定位信息。纯航迹推更新频率高, 短时间内定位精度高, 适合于进行增量式定位, 虽然误差会随时间累积, 但是能够满足局部路径规划跟踪路径的要求。

全局定位采用基于互补式 Kalman 滤波的 GPS-航迹推算集成定位算法, 主要用于确定车辆在路网中的位置^[12]。全局定位并不需要定位系统提供过高精度的定位信息, 因此在 BIT-III 仅采用了单点 GPS 提供绝对位置信息。

2.4 静态环境网格(核心级)

按照输出模态, 静态环境网格属于面向网格的环境感知功能。作为核心级功能, 静态环境网格为局部路径规划提供车身周围可通行性信息。车身周围的区域被边长 20 cm 的单元格离散化为棋盘状的

环境网格, 单元格内的可通行性由障碍物检测和路沿检测结果融合确定。

2.4.1 障碍物检测

车头水平放置的 SICK LMS-291 激光雷达用于进行障碍物检测。每完成一帧测量, 将激光雷达输出点投入相应网格内, 再根据如图 10 所示的激光雷达测量的概率模型计算各个网格内存在障碍物的概率, 得到单帧的环境概率网格^[13](图 11)。使用单个激光雷达构建的单帧环境概率网格只能提供车头前方的环境信息, 为此采用同步定位与地图创建技术 (Simultaneous localization and mapping, SLAM) 重建车身局部静态环境(图 12)。BIT 采用基于局部地图的 SLAM 算法, 根据连续帧之间相似物体的匹配确定传感器与环境的相对位置关系, 并同时保留了环境中静态障碍物的历史信息。

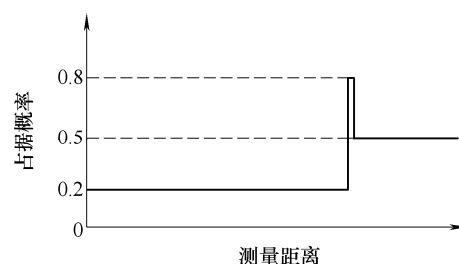


图 10 激光测量的概率模型

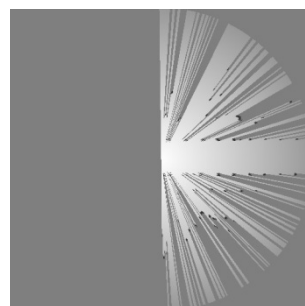


图 11 单帧激光雷达检测结果

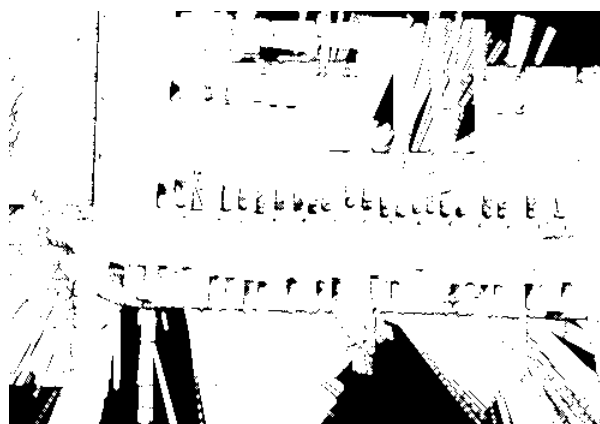


图 12 SLAM 重建结果

2.4.2 路沿检测

水平布置的激光雷达能够检测到高出地面一

定高度的障碍物,但是对于城市环境中常见的路沿却无能为力。为了防止车辆在车道线不明显时开上路沿,按一定俯仰角在车头安装了一部四线激光雷达用于检测路沿的相对位置。

路沿检测以路沿垂直面为目标,原理如图 13 所示。首先用边长 10 cm 的单元格将车身局部的水平面划分网格。将四线雷达扫描结果转换到车身局部三维空间,并根据其水平坐标投入网格内。如果某网格内只有来自一层激光的扫描点,则该网格位于水平面上;如果某网格内同时包含来自多层激光的扫描点,则该网格位置为垂直面。试验结果证明,与利用激光扫描结果的斜率突变确定路沿位置的方法相比,这种基于投票原理的路沿检测算法具有更好的准确率和可靠性。

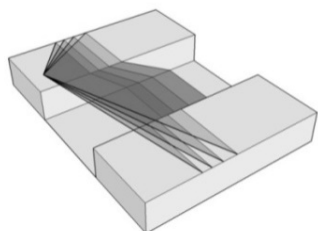


图 13 四线雷达路沿检测原理图

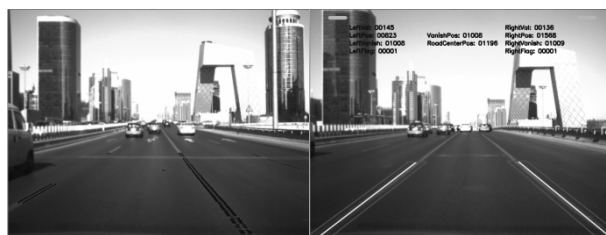
路沿检测确定了扫描区域内所有垂直面的位置,这些垂直面将扫描区域分成若干部分。根据各段内激光点的高度分布,可以将这些区域段分为可行区域(路面)和不可行区域(路沿外)。将路沿检测得到的区域可行性信息放入障碍物检测的环境网格,得到完整的静态环境概率网格输出给路径规划与跟踪模块。

2.5 直车道线识别

按照输出模态,车道线识别属于面向对象的环境感知功能。BIT-III 只实现了直车道线识别功能。在弯道内行驶时,将靠近车辆部分的弯道近似作为直道处理,通过车道偏差修正车辆在车道内的位置。

车道线识别由检测和跟踪两部分组成(图 14)。检测部分首先根据预先标定的车道线灭点位置截取感兴趣区域(ROI),在 ROI 中用基于 Hough 变换的算法识别车道线,然后利用车道宽度限制排除无检测结果。跟踪部分通过连续帧之间的检测结果,根据预定的车辆运动模型估计下一帧车道线可能出现的区域,进一步简化图像处理所需运算量,提高检测成功率。直车道识别算法检测与跟踪两部分相互配合。初启检测时,检测阈值设置较高,只有车道线比较明显时才能完成检测。一旦在连续帧中都成功的检测到车道线并实现跟踪,则检测阈值将降低。此时即使车道线由于光照、阴影或者褪色等原因不

再清晰可见,仍然能够完成识别。一旦若干帧内没有识别结果输出,则将重启检测步骤。



(a) 检测 (b) 跟踪

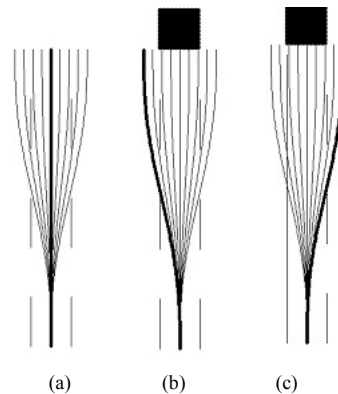
图 14 直车道线识别

车道线识别结果是面向对象的环境感知信息。在 11thFC 中车道线对象的属性包括左右车道线的顶点坐标和车道线虚实情况。其中,左右车道线端点经投影变换转换到局部平面坐标下^[14],可以直接用于结构化道路内规划。

2.6 结构化道路内规划

作为无人驾驶车辆在结构化城市环境下最为常见的工况之一,车道内行驶要求车道跟随稳定可靠,能够根据周围障碍情况和交规要求进行合理的换道避障,正常行驶和超车换道过程中平顺流畅。

由于车辆应沿客观存在的车道线行驶,因此车道线识别结果实际上为结构化道路内行驶提供了局部坐标系下的期望路径。根据局部路径规划算法,在车道中心线的预瞄距离确定若干目标状态生成行驶曲线。通过选择不同的行驶曲线实现不同的车道内行驶操作。当前方没有障碍物时选择最靠近车道中心线的行驶曲线进行正常的车道跟随(图 15a)。前方障碍物使中间的行驶曲线不可行时,则根据交规要求选择其他满足避障要求的路径作为规划结果:当左右车道线均为虚线时,优先选择左侧行驶曲线(图 15b);而左侧车道线为实线时,该侧车道线以外的轨迹全部不可行,则选择右侧超车图 15c。经过这样简单的设置便能够根据车道线的虚实情况,在前方出现障碍物是选择正确的方向完成超车。



(a) (b) (c)

图 15 结构化车道内规划

当所有的行驶曲线都不可行时,将减小预瞄距离继续进行局部规划,直到找到可行路径或使车辆停车。局部规划的纵向规划能力能够自动根据曲线曲率对速度进行限制,表现为车辆会在转向的同时通过减速保证行驶的稳定。

2.7 路口内全局规划

路口内行驶需要先由全局规划生成期望路径,再启动局部路径规划与跟踪。BIT-III 使用快速随机树规划算法生成全局期望路径^[15]。以右转弯为例,车辆在路口入口处完成路径规划,将期望路径(图16中加粗的点序列)输入局部路径规划启动车辆行驶。由于车载传感器感知范围有限,当 BIT-III 发现原规划路径完全不可行时,局部路径规划算法将控制停车,并重启全局路径规划得到新的期望路径继续行驶。



图16 全局路径规划得到的期望路径

3 性能分析

3.1 根据路网文件信息行驶

图17中用 BIT-III 记录的全球卫星定位系统(Global positioning system, GPS)位置重现了 11'FC 的比赛路线,并用旗子画出了路网文件给出的关键 GPS 位置。关键 GPS 位置可能是路口入点或者是路口出点。根据全局定位结果,如果下一个关键 GPS 位置是路口入点,则将用来判断到下一路口的大体距离。当车辆到达路口时,如果下一关键 GPS 位置是路口出点,那么将使用该位置作为路口内规划的目标状态。

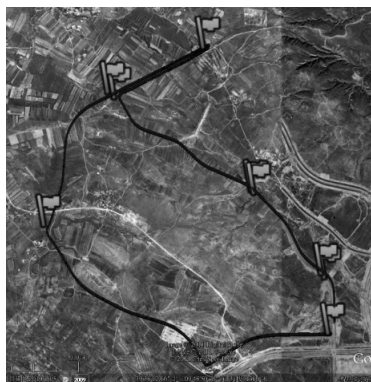


图17 11'FC 路线和 GPS 关键点

3.2 路口行驶

11'FC 中并不是每个路口处都提供了入口出口信息。如果路网文件没有提供路口出点信息,则将通过路网分析和标识牌识别结果确定该路口需要执行的转向操作,自动生成相应的目标状态。为了防止目标状态位置不准确导致路口行驶失败,将目标位置设置在距离较远处,这样可以利用局部路径跟踪能够同时实现避障和路径跟踪的特性引导车辆驶入下一段道路内(图18a)。一旦识别到车道线,将自动放弃跟踪路口内规划结果,转入结构化道路行驶模式。由于目标状态不精确以及规划控制系统的延时问题,在路口行驶时发生了三次不满足避障安全性导致没有可行路径的情况,这种情况下局部规划核心功能发挥作用,控制车辆自动停车重启全局规划,成功的避免碰撞的发生,并使车辆完成路口行驶而没有进行人工干预(图18b)。

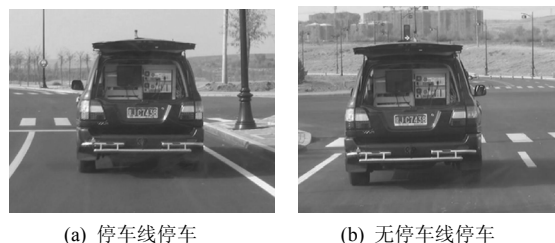


(a) 锥桶导航通道行驶

(b) 危险处自动停车

图18 路口行驶

路网信息的不完整,加上全局定位使用的是精度有限的单点 GPS,使得不可能依赖定位判断是否到达路口。BIT-III 判断到达路口的条件是发现停车线或者车道线消失。后者是为了防止路口没有停车线,或者在逆向车道行驶时没有停车线影响路口识别。在实际比赛中,共有10个路口,除了一个路口由于逆向行驶没有发现停车线外,其余9个路口全部识别到停车线并停车。逆向行驶到达的路口根据车道线消失也成功的识别到路口并完成路口行驶(图19)。



(a) 停车线停车

(b) 无停车线停车

图19 判断到达路口

3.3 结构化道路内行驶

11'FC 的场地的路面标线比较清晰,但是由于赛道是一个封闭的环形,行驶过程中阳光照射角度的变化仍然给车道识别带来很大挑战。BIT-III 车道

识别采用检测加跟踪的方法提高检测成功率和可靠性,虽然在正午的强烈阳光下进行比赛,但是全程都较好地完成了车道识别(图 20a)。行驶过程中曾经发生将路沿外的白色特征识别为车道线进行跟踪的情况,此时环境网格避障发挥作用,是车辆一直贴路边行驶,没有压上路沿,避免了人工干预(图 20b)。

BIT-III 并不具备检测弯道的能力,而是用近处的直线近似表示弯道,弯道行驶主要依靠车辆与车道之间的偏差实现。这一不足使 BIT-III 最快行驶速度被保守的限制在 30 km/h。测试结果证明在这一速度下,BIT-III 能够用直线检测完成正常城市环境下各种弯道的行驶(图 20c)。

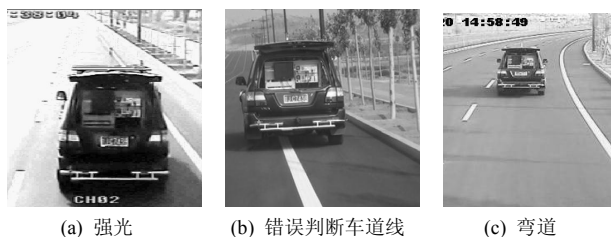


图 20 结构化车道内行驶

可靠的车道识别和车道内规划使 BIT-III 在正常行驶时始终保持在固定车道内行驶。在前方出现障碍需要避障时,能够根据左右车道线的虚实情况选择合适的车道进行换道超车。图 21a 中由于左侧为实线,因此 BIT-III 从右侧超车。图 21b 中由于左右均为虚线,因此优先选择从左侧超车。图 21c 中动态车辆在前方换道干扰,BIT-III 则根据两侧车道线虚实情况选择左右侧超车。

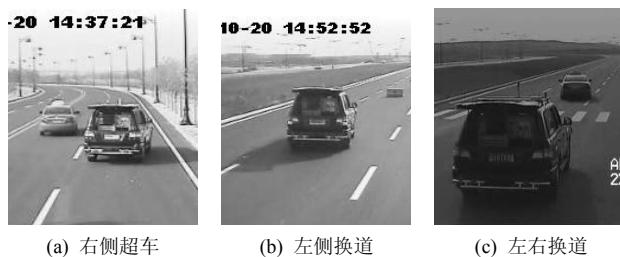


图 21 选择正确车道超车换道

由于纵向规划是在核心级的局部路径规划中完成的,因此只需要设定不同场景下的最高速度,BIT-III 便会根据局部路径规划结果和环境信息自动计算期望速度。比赛过程中需要超车换道时,BIT-III 一般会降低车速,换道完成后在恢复正常速度,保证了行驶的平顺流畅。

4 结论

虽然 BIT-III 在没有人工干预的情况下顺利完

成了比赛全程,但是这只验证了 BIT-III 集成了一些相对简单的智能驾驶功能,实现了某些场景的智能驾驶应用,并不足以说明其已经能够满足各类城市环境下的自动驾驶要求。比赛中体现出该智能驾驶系统在智能驾驶方面的不足是多方面的。

(1) 首先在现有传感器配置下,软件算法部分还有提高的余地。① 还没有实现多车道识别、车道线颜色识别。颜色识别和多车道识别能够判断当前是否在逆向车道行驶;② 没有实现运动障碍检测。比赛时还是依靠静态环境网格完成动静态避障。静态环境网格可以应对运动障碍物运动较慢且密度不大的情况,但是在存在多个快速移动的障碍物时却难以实现与交通的交互。

(2) 其次需要增加传感器配置以满足更为复杂的工作要求。① 路口识别较为简单。比赛时接近路口依赖路网文件,到达路口依赖车道线和停车线,路口行驶主要依赖路沿和障碍物。不可否认,用这种方法完成路口行驶存在相当大的偶然性。事实上,在缺乏精确路点引导的情况下进行可靠路口识别和行驶需要更完整的车身环境重建结果和相对定位信息,为此仅仅依靠当前的传感器配置已经无法满足要求,需要增加立体激光雷达或视觉等传感器,并辅之以更复杂的环境感知算法;② 不平路面和越野环境下行驶要求更为完整的路面可通行性描述。比赛使用的静态环境网格用障碍物和路沿来判断不可行区域。这基于“平坦路面上造成区域不可行的因素只有路沿和障碍物”的假设。这种环境网格是对路面可通过性网格的简化,无法满足不平路面和越野环境下安全行驶的要求;③ 更完整的环境重建需要辅以环境理解才能发挥最大效应。随着传感器和感知功能增加,智能驾驶系统掌握的环境信息越来越多,如何根据这些信息对环境进行理解,判断车辆应该进行的操作,是实现复杂环境下全自主无人行驶的必然要求,也是对车辆智能性提出的更高的要求。

BIT-III 比赛测试结果说明,使用 20%的设备和功能,能够实现 80%的无人驾驶功能,但是余下 20%的功能,则是实现全自主无人驾驶的关键。这一方面说明目前实现全自主无人驾驶的主要瓶颈仍然在各单项关键技术的发展水平,另一方面说明研究了能够集成当前各单项关键技术已有成果并发挥其最大效应的智能驾驶系统的必要性。BIT-III 并不是为了某次具体比赛设计,而是通过开放式的智能驾驶系统,实现目前已有技术的快速集成并实现上路行驶,进而在系统框架协议下进行单项技术研究,避免系统的重复设计,实现智能驾驶系统进化式发展。

参 考 文 献

- [1] No hands across America, vision and autonomous systems center at Carnegie Mellon University [EB/OL]. [1999-03-20]. http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=178&menu_id=261.
- [2] LAUER M, GERRITS A. Next steps for the grand cooperative driving challenge [ITS Events] [J]. Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE, 2009, 1(4): 24-32.
- [3] VIAC: the VisLab intercontinental autonomous challenge [EB/OL]. [2011-03-05]. <http://viac.vislab.it>.
- [4] GUIZZO E. How google's self-driving car works [EB/OL]. [2011-10-18]. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/artificial-intelligence/how-google-self-driving-car-works>.
- [5] BEHRINGER R, SUNDARESWARAN S, GREGORY B, et al. The DARPA grand challenge - development of an autonomous vehicle[C]//2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 14-17 June 2004, Parma, Italy, 2004: 226-231.
- [6] MILLER I, LUPASHIN S, ZYCH N. Cornell University's 2005 DARPA grand challenge entry[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(8): 625-652.
- [7] URMSON C, ANHALT J, BAGNELL D. Autonomous driving in urban environments: Boss and the urban challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(8): 425-466.
- [8] XIONG Guangming, ZHOU Peiyun, ZHOU Shengyan. Autonomous driving of intelligent vehicle BIT in 2009 future challenge of China[C]//2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. 21-24 June 2010, San Diego, CA, USA, 2010: 1049-1053.
- [9] GONG Jianwei, JIN Xiaolong, JIANG Yan, et al. BIT: An autonomously driving vehicle for urban environment [J]. Communications of CAA, 2010, 32(2): 43-51.
- [10] LEONARD J, BARRETT D, HOW J, et al. Team MIT urban challenge technical report[R]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory, MIT-CSAIL-TR-2007-058.
- [11] BROGGI A, BERTOZZI M, FASCIOLI A, et al. The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems[J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 1999, 3(4): 409-441.
- [12] JAY F, MATTHEW B. The global positioning system and inertial navigation[M]. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 1999.
- [13] WEISS T, SCHIELE B, DIETMAYER K. Robust driving path detection in urban and highway scenarios using a laser scanner and online occupancy grids[C]//2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. 13-15 June 2007, Istanbul, Turkey, 2007: 184-189.
- [14] 姜岩, 高峰, 徐国艳. 基于角点特征的立体视觉车辆环境感知系统研究[J]. 机械工程学报, 2010, 47(14): 99-107.
JIANG Yan, GAO Feng, XU Guoyan. Corner-based stereo vision system for vehicular surroundings sensing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 47(14): 99-107.
- [15] LAVALLE S, KUFFNER J. Randomized kinodynamic planning[J]. International Journal of Robotics Research, 2001, 20(5): 378-400.

作者简介: 姜岩, 男, 1981 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为地面无人车辆。

E-mail: jiangyan@bit.edu.cn

赵熙俊, 男, 1984 年出生, 博士。主要研究方向为无人驾驶规划与控制。

E-mail: heejun@bit.edu.cn

龚建伟(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为地面无人车辆、机器人技术。

E-mail: gongjianwei@bit.edu.cn

熊光明, 男, 1975 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为地面无人车辆, 机器人技术。

E-mail: xiongguangming@bit.edu.cn

陈慧岩, 男, 1961 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为地面无人车辆, 自动传动技术。

E-mail: chen_h_y@263.net