

基于运动微分约束的无人车辆纵横向协同规划算法的研究

姜 岩¹ 龚建伟¹ 熊光明¹ 陈慧岩¹

摘 要 为了满足在动态环境中快速行驶的要求, 现有无人车辆普遍采用在传统规划系统的两层结构(路径规划-路径跟踪)之间增加局部规划的方法, 通过在路径跟踪的同时进行避障来减少耗时的全局路径重规划. 本文针对这种三层结构规划系统存在的问题, 提出基于运动微分约束的纵横向协同规划算法, 在真实环境中实现速度不超过 40 km/h 的无人驾驶. 根据车辆的实时运动状态, 用高阶多项式模型在预瞄距离内对可行行驶曲线进行建模, 不仅使行驶过程中的转向平稳, 而且在较高速时仍具有良好的路径跟踪能力. 由横向规划提供横向安全性的同时, 在动力学约束的速度容许空间中进行纵向规划, 实现平顺的加速与制动, 并保证了纵向安全性和侧向稳定性. 该算法根据实时的局部环境自动决定纵横向期望运动参数, 不需要人为设定行驶模式或调整参数. 采用该算法的无人驾驶平台在 2011 年和 2012 年智能车未来挑战赛的真正交通环境中, 用统一的程序框架顺利完成全程的无人驾驶.

关键词 无人车辆, 运动微分约束, 纵横向规划, 车辆控制

引用格式 姜岩, 龚建伟, 熊光明, 陈慧岩. 基于运动微分约束的无人车辆纵横向协同规划算法的研究. 自动化学报, 2013, 39(12): 2012–2020

DOI 10.3724/SP.J.1004.2013.02012

Research on Differential Constraints-based Planning Algorithm for Autonomous-driving Vehicles

JIANG Yan¹ GONG Jian-Wei¹ XIONG Guang-Ming¹ CHEN Hui-Yan¹

Abstract For better timing performance, existing autonomous driving platforms generally introduce local planner into the conventional two-layer path panner scheme (path planning – path following) to reduce the requirements for costly global replanning by avoiding collision with obstacles while keeping tracking the desired path. This paper presents an improved three-layer planning algorithm for fully autonomous driving in real scenarios at a speed up to 40 km/h. Compared with general algorithms, differential constraints are taken into account in the local planner to improve the elegance in steering control and provide a better tracking ability at high speed. Longitudinal planning based on speed profile under dynamic constraints is involved in the planner as well so as to provide the smoothness safety and stability in driving. Desired motion commands are generated based on the local environment without manually tuned parameters, which is helpful for a general-purpose autonomous driving system. The algorithm was implemented on the BIT self-driving platform in 2011 and 2012 Intelligent Vehicle Future Challenge.

Key words Autonomous driving, differential constraints, longitudinal and lateral planning, vehicle control

Citation Jiang Yan, Gong Jian-Wei, Xiong Guang-Ming, Chen Hui-Yan. Research on differential constraints-based planning algorithm for autonomous-driving vehicles. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(12): 2012–2020

无人驾驶不仅可以提高驾驶安全性, 而且是解决交通拥堵、提高能源利用率的有效途径, 是汽车技术的主要发展趋势之一. 经过数十年的研究, 无人驾

驶技术正在逐步实现由半自主无人驾驶^[1–3]到全自主无人驾驶的进化^[4–5].

作为无人驾驶系统的智能核心, 规划系统在各种约束下确定平台的期望运动参数. 这些约束包括环境约束(如平台周围的动静态障碍物)、导向约束(如运动的目标位姿)、平台运动学约束以及动力学约束.

在机器人应用中, 规划系统一般由路径规划和路径跟踪两部分组成^[6]. 路径规划计算连接初始位姿和目标位姿的可行无碰路径. “可行”体现了平台运动约束, “无碰”则体现了环境约束. 常用的路径规划算法主要包括基于随机采样和基于搜索两

收稿日期 2012-08-24 录用日期 2013-01-11
Manuscript received August 24, 2012; accepted January 11, 2013
国家自然科学基金(51275041), 教育部博士点基金(20121101120015)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (51275041) and Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20121101120015)
本文责任编辑 席裕庚
Recommended by Associate Editor XI Yu-Geng
1. 北京理工大学机械与车辆学院智能车辆研究中心 北京 100081
1. Intelligent Vehicle Research Center, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

类^[7-8]. 前者每次迭代时在构形空间中随机选取位姿、根据平台运动微分方程从初始位姿开始逐步生长至目标位姿, 获得规划路径^[9-10]. 后者在离散化的构型空间内根据各单元格的通过性成本, 从起点逐层计算直至终点, 得到最优的期望路径^[11-13]. 路径跟踪根据平台与期望路径的相对运动关系确定沿路径行驶的期望运动参数. 由于环境感知具有前瞻式特点, 加上平台自身和控制系统的时滞性, 路径跟踪一般采用预瞄的方式^[14], 以使车辆与期望路径在预瞄位置的横向位置偏差或航向偏差为零作为控制目标确定横向控制参数, 常用控制方法有 Pure pursuit、PID 或智能控制方法等^[15]. 使用这类规划系统的平台在行驶过程中能够与期望路径保持较高的一致性, 适合于工作环境较复杂的机器人应用. 然而由于环境约束、导向约束和运动微分约束等都在路径规划中实现, 一旦环境变化导致期望路径不可行便需要重启路径规划, 因此并不适合环境动态性强且实时性要求高的无人驾驶应用. 例如使用快速扩展随机树算法 (Rapidly-exploring random tree, RRT) 在区域为 50 m × 50 m 范围内进行规划, 所需的时间在 200 毫秒到 1 分钟之间不等. 而在相同的区域内使用 AD* 规划算法, 用边长为 10 cm 的单元格对环境进行离散化, 规划时间在 100 毫秒左右, 如果采用 Lattice 状态空间, 规划时间则会达到 1 秒左右, 且耗时随基本运动轨迹的细化会相应增加. 这说明频繁的路径重规划难以保证车辆以较高速连续行驶.

2007 年 DARPA Urban Challenge 中各无人驾驶平台针对城市环境下的无人驾驶, 对传统规划系统进行改进, 为之后的无人驾驶研究奠定了基础.

TerraMax 对场景进行细致的划分, 根据不同模式设计了车道跟踪规划器、模板规划器 (用于路口和车道超车)、基于规则的规划器和非结构化环境规划器^[16]. 这种设计思路在早期的高速公路无人驾驶系统中比较常见, 好处是在特定的场景下具有最高的运算效率 (例如在没有障碍物的车道内行驶时, 单纯的车道跟踪算法的计算效率比考虑避障的规划算法高). 但是随着工作环境日益复杂, 这种规划系统会变得相当复杂且难以维护, 而且一旦模式识别发生问题, 极易造成安全隐患.

Junior 将城市环境下的无人驾驶分为车道行驶和非结构化环境行驶两类^[17]. 车道规划算法在路径规划与路径跟踪之间加入了局部规划. 用车道中心线作为全局期望路径, 将其向两侧平移不同距离得到一簇可行路径, 从中选择满足避障要求的一条作

为待执行路径进行跟踪. 局部规划使车辆在沿全局路径行驶的同时能够躲避较小的障碍物, 而不需要对全局路径进行重规划. 然而 Junior 并没有交代如何解决车体与局部路径连接处的平台运动微分约束问题. 此外, 在非结构化环境中 Junior 仍然使用了两层结构的规划系统, 这一方面限制了非结构化环境中的行驶速度, 另一方面模式切换并不利于实现具有环境适应性的无人驾驶系统.

BOSS 在各种环境内都采用了全局规划-局部规划-路径跟踪结构的规划系统^[18]. 先根据不同初始前轮偏角和目标位姿 (包括位置、航向和前轮偏角) 离线计算车辆在局部范围内所有可能的行驶路径, 局部规划时通过查表得到规划结果. 出于计算效率的考虑, 生成可能路径时会对各状态参数进行离散化, 因此局部规划用的可选路径都是近似结果, 这在一定程度上会影响规划结果的完备性.

Talos 也采用了全局规划-局部规划-路径跟踪构架的规划算法^[19]. 局部规划中使用快速扩展随机树 (RRT) 算法在线生成可行路径, 规划结果满足运动微分约束. 然而 RRT 规划结果具有一定的随机性, 易造成车辆行驶不稳定.

AnnieWay 使用触须算法进行局部规划^[20]. 触须算法用圆弧模型描述车辆期望行驶轨迹, 一旦确定待执行路径, 期望前轮偏角也就确定了. 然而由于触须上没有考虑行驶过程中前轮偏角变化, 较高速行驶时容易发生车体摆动甚至路径跟踪失败.

可见, 通过增加局部规划使规划系统满足无人驾驶对实时性的要求已经成为被广泛采用的一种做法. 综合分析这些无人驾驶平台的特点, 可以发现仍然存在以下问题需要解决:

- 1) 如何使局部规划结果满足运动微分约束. 满足运动微分约束是规划结果可行的前提. 不考虑运动微分约束会造成车辆实际运动线路与规划结果存在偏差, 从而带来安全隐患, 而且也容易造成前轮偏角的突然跳变.

- 2) 如何完成纵向规划. 文献提到的局部路径规划主要解决了横向规划问题, 然而全自主无人驾驶除了路径跟踪和避障安全之外, 还需满足纵向安全、平顺和稳定等要求, 这都通过纵向规划实现.

- 3) 如何在统一的算法框架下处理日益复杂的工作场景要求. 无人驾驶车辆最终面对的将是充满未知与不确定性的真实环境, 这对无人驾驶的系统设计提出两方面的要求. 其一, 系统必须具有对复杂环境的适应能力, 而不仅仅是不同工作模式的简单叠加. 在真实环境中, 无人车辆需要完成超车、跟随、

换道等诸多智能行为, 规划系统应尽可能地根据实时的局部环境自觉地实现这些行为. 其二, 系统需要采取保守的驾驶行为, 在面对未知环境时对自己和环境都是安全的.

1 规划算法的总体功能设计

本文在现有无人驾驶系统规划算法的基础上, 针对以上三个问题, 设计了基于运动微分约束的纵横向协同规划算法. 在局部规划中根据车辆运动微分方程在线生成一段时间内的可行路径. 可行路径上考虑了车辆的初始运动状态和前轮偏角的变化, 不仅能避免方向盘转角的剧烈甩动, 而且在较高速度下仍然具有良好的路径跟踪能力. 根据动静态障碍物信息, 在动力学约束的速度容许空间中对横向规划结果进行纵向规划, 自动实现车辆的速度调节, 满足行驶对纵向安全、稳定和平顺的要求. 为了实现具有环境适应性的无人驾驶系统设计、各工作环境中均采用全局规划-局部规划-路径跟踪的算法架构. 由不同的全局规划器结合统一的局部规划算法满足相应工作环境的要求. 安全性、稳定性和平顺性这些行驶的基本功能由局部规划算法实现, 而全局规划则主要为局部规划提供导向约束(图1). 这样系统功能的扩展主要靠加入全局规划模块实现, 即使车辆遇到设计时未曾考虑到的复杂场景, 底层局部规划也能保证基本的安全性.

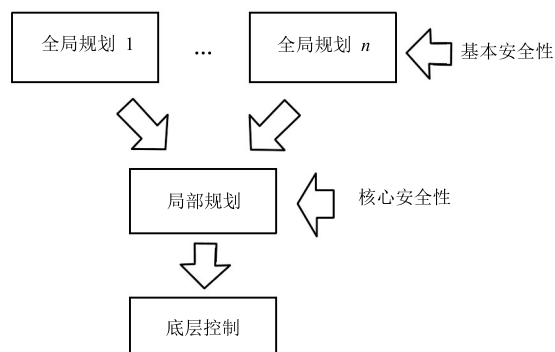


图1 三层结构的规划算法

Fig.1 Structure of three-layer planning system

2 算法实现

规划算法的基本结构如图2所示. 局部路径生成模块得到一簇满足平台运动微分方程且能够跟踪期望路径的行驶曲线, 路径选择模块从中确定待执行路径, 纵向规划模块在待执行路径上增加速度信息将其转换为待执行轨迹并由纵横向控制模块最终

确定车辆控制参数.

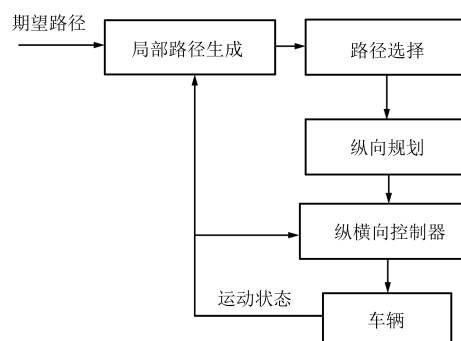


图2 规划算法的组成

Fig.2 Predictive model-based motion planning algorithm

2.1 基于运动微分方程的纵横向规划

1) 设 P 为全局期望路径. P 是一组位姿 p_i (包括位置和航向) 的序列, 来自于全局规划或环境感知结果.

在 P 上用不同预瞄距离确定若干个预瞄位姿. 对每个预瞄位姿, 沿其法线方向按照不同横向位置偏差再确定若干个目标位姿, 各目标位姿航向与预瞄位姿相同. 计算当前车辆位姿和各目标位姿之间的行驶曲线作为候选曲线集合(图3).

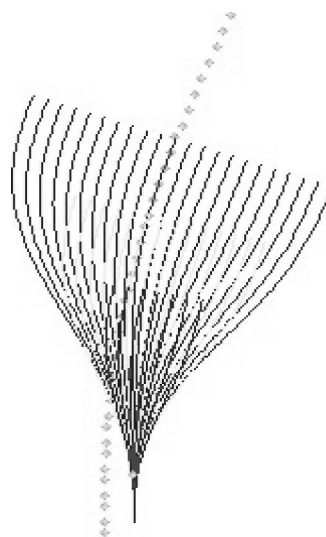


图3 候选曲线集合

Fig.3 Candidate curves

行驶曲线需要满足车辆运动微分约束:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= v \times \cos(\theta) \\ \dot{y} &= v \times \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= v \times \frac{\tan(\delta)}{L}\end{aligned}$$

其中, (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 [21], 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. 多项式参数方程将车辆位置表示为无量纲参数 u 的多项式方程形式: $x = x(u)$, $y = y(u)$, $u \in [0, 1]$, $(x(0), y(0))$ 对应起点坐标, $(x(1), y(1))$ 对应终点坐标. 参数方程将求解行驶曲线的问题转化为求解参数方程系数的问题. 根据车辆当前位姿 $(x_A, y_A, \delta_A, \theta_A)$ 和目标位姿 $(x_B, y_B, \delta_B, \theta_B)$, 可有边界条件如下:

$$x(0) = x_A, \quad x(1) = x_B$$

$$y(0) = y_A, \quad y(1) = y_B$$

$$\delta(0) = \delta_A, \quad \delta(1) = \delta_B$$

$$\frac{\begin{bmatrix} \dot{x}(0) \\ \dot{y}(0) \end{bmatrix}}{\sqrt{(x^2(0) + y^2(0))}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_A \\ \sin \theta_A \end{bmatrix}$$

$$\frac{\begin{bmatrix} \dot{x}(1) \\ \dot{y}(1) \end{bmatrix}}{\sqrt{(x^2(1) + y^2(1))}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_B \\ \sin \theta_B \end{bmatrix}$$

这些边界条件能够唯一地确定 3 次多项式参数方程的解. 为了使行驶曲线具有更多的自由度, 同时减少曲线上的冲击度, 选择使用 5 次多项式参数方程对行驶曲线进行建模:

$$x(u) = x_0 + x_1 u + x_2 u^2 + x_3 u^3 + x_4 u^4 + x_5 u^5$$

$$y(u) = y_0 + y_1 u + y_2 u^2 + y_3 u^3 + y_4 u^4 + y_5 u^5$$

为了求解此不定方程组的系数, 增加额外的调节参数 $(\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4)$, 将方程组转换为系数对调节参数的显式方程组^[21], 并对其进行最优化求解. 为了使曲线在最大曲率变化率尽可能小的情况下保持较短的长度, 优化求解的目标函数选为

$$\min(\max(|\dot{\kappa}|) \times k + s)$$

其中, κ 是曲线曲率, s 是曲线长度, k 是权重系数.

图 4 中给出了根据相同的起点位姿和终点位置, 不同终点航向计算得到的一组行驶曲线.

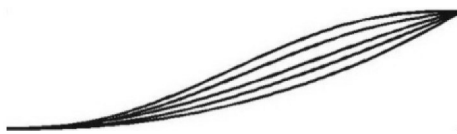


图 4 行驶曲线计算结果举例

Fig. 4 Samples of trajectory curve

候选曲线集合包含了用不同预瞄距离生成的行驶曲线, 而对于同一预瞄距离处的多条行驶曲线, 其目标位姿相对于期望路径是对称分布的. 首先对各条行驶曲线进行碰撞分析. 在行驶曲线上的每一位姿处增加车辆的宽度和长度信息, 与构形空间中的障碍物检测结果进行对比, 判断行驶曲线与障碍物发生碰撞的位置, 仅保留此位置以前的行驶曲线. 最后, 在具有相同横向位置偏差的行驶曲线中保留最长的一条用于路径评价 (图 5). 经过碰撞安全性分析, 在每个横向位置偏差仅保留了一条满足横向安全和路径跟踪要求的行驶曲线. 车辆的实际驾驶行为, 如跟随或超车, 则由选择哪一条行驶曲线作为待执行路径实现.

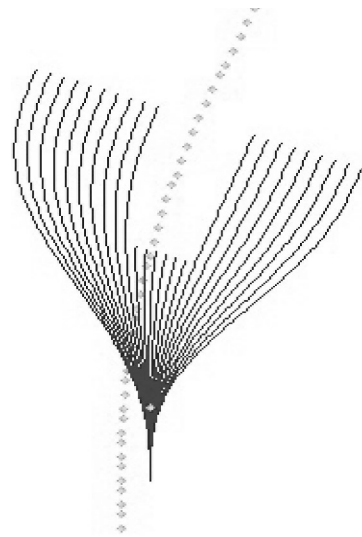


图 5 完成碰撞安全分析的候选行驶曲线

Fig. 5 Candidate curves after crash check

2) 纵向规划. 待执行路径是一组位姿的序列, 并不具备时间和速度属性, 为了确定纵横向控制参数, 需要在其上进行速度规划, 将待执行路径转换为待执行轨迹. 无人驾驶要求在保证足够制动距离的前提下尽可能地高速行驶. 考虑到局部规划结果的有效性仅维持一个规划周期, 假设规划范围外的环境都是危险的, 只有使待执行路径末端车速为零才能保证不会因为制动距离不足而发生正面碰撞. 如果待执行路径末端是运动障碍, 则末端车速给为运动障碍的向前速度, 可以实现对运动障碍的跟随行为.

根据车辆实时车速 v_0 , 末端车速 v_1 和预定参数 (最大加速度 acc , 最大减速度 dec 和最大速度 v_{\max}) 能够计算待执行路径上各处的期望速度 (图 6 (a) 给出了图 5 中某条行驶曲线初始速度为 0 时的纵向规

划结果). 此外, 为了保证车辆行驶过程的横向稳定性, 根据待执行路径的曲率 $\kappa(u)$ 和预定的最大横向加速度 $acc_{lateral}$, 按照 $v(u) = \sqrt{(acc_{lateral})/(\kappa(u))}$ 对速度容许空间进行进一步约束, 可以得到最终的纵向规划结果 (如图 6 (b)).

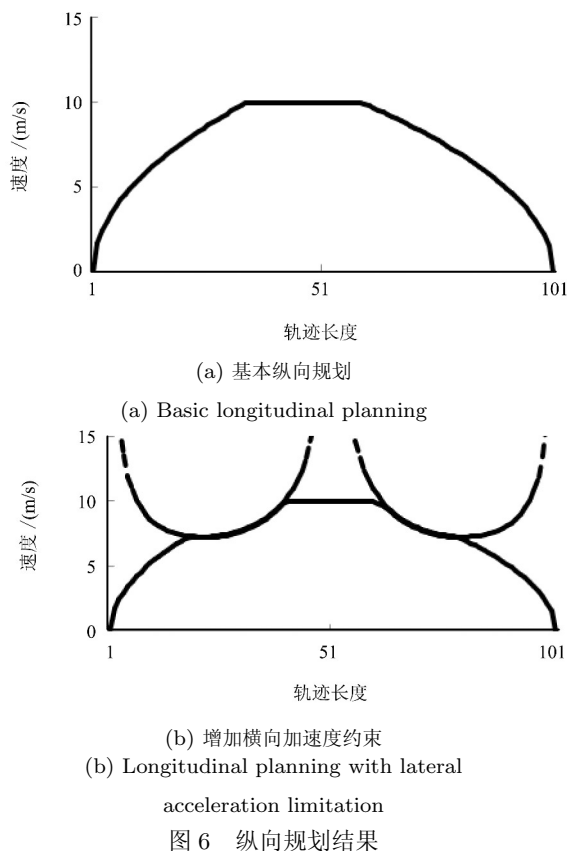


图 6 纵向规划结果

局部规划得到了整条待执行路径上的纵横向期望运动参数, 但是每个规划周期中只会执行一个规划结果. 在前方没有障碍物时, 路径长度较长, 车辆能够逐渐加速到最高速度并保持匀速行驶. 当车辆逐步接近障碍物时, 待执行路径长度持续变短, 输出的期望速度也将逐渐减小. 可见与传统的预瞄式路径跟踪算法需要根据速度确定合适的预瞄距离不同, 本规划算法由路径长度决定期望速度. 纵横向运动参数的确定依赖于环境信息和期望路径自动完成, 不需要人为设定过多参数进行干预.

2.2 全局辅助纵向规划

与高速场景下车辆的前轮偏角变化范围较小不同, 城市环境下车辆行驶路径上存在曲率变化较大的位置, 如果不考虑转向执行机构转动速率的限制, 有可能造成车辆无法沿期望路径行驶. 比如车辆由直道快速进入右转路口时, 可能因转弯不及冲出路

口.

如果通过增加转向执行机构转动速率解决此问题, 一方面容易造成前轮甩动而影响行驶平顺性, 另一方面也不符合人类驾驶的习惯. 借鉴人类驾驶员在这种情况下的处理方式, 对全局路径规划结果进行辅助纵向规划, 根据全局路径的曲率变化选择合理的最大允许速度. 当车辆接近大曲率变化位置时, 通过减速为转向执行机构提供充足的响应时间; 而当行驶在曲率变化平缓的路段时, 则允许以较快速度行驶. 完成全局路径规划后, 根据相邻状态之间弧长 s 和曲率变化率 Δk , 以及转动机构转动速率 $\dot{\delta}_{max}$, 能够计算期望路径上任意两相邻状态间完成转向允许的最大速度:

$$v_{max} = s \times \frac{\dot{\delta}_{max}}{\Delta k}$$

将 v_{max} 作为局部纵向规划时的最大速度阈值, 可以实现根据曲率变化自动调整车辆的期望速度.

2.3 纵横向控制系统设计

由于局部规划结果的有效期仅为一个规划周期, 为了使车辆实际运行与规划结果保持一致, 控制系统需要尽可能地使车辆在规划周期结束时达到规划系统输出的运动状态. 为此, 控制系统需采用比规划周期 (100 ms) 更短的控制周期 (20 ms), 通过内部的闭环使控制结果接近或达到规划结果.

横向控制系统的控制目标是控制转向系快速准确的达到期望前轮偏角. 在每个控制周期根据车辆的实时位置和待执行轨迹, 用 Pure pursuit 算法确定车辆的期望前轮偏角:

$$\text{steering} = \text{atan} \left(2 \times L \times \frac{\sin(e_{\theta})}{L_d} \right)$$

其中, steering 是期望前轮偏角, L 是轴距, e_{θ} 是预瞄点处航向与车辆航向的偏差, L_d 是预瞄距离.

由于发动机和传动系的高度非线性, 加速度控制中电机控制量与加速度之间并没有确定的对应关系, 因此纵向控制与横向控制相比更为复杂. 本文中的实验平台通过电机控制油门制动踏板实现纵向控制. 考虑到无人驾驶的要求, 加速过程的控制目标主要是保证小稳态误差且不会发生大的超调, 而制动过程的首要控制目标是保证响应速度. 此外还需要避免同时踩下油门和制动踏板的情况发生. 为此纵向控制使用一个增量式 PD 控制器的输出同时进行油门制动控制. 如图 7 所示, 车辆在以 10 m/s 速度行驶时的稳态误差在 ± 0.1 m/s 以内. 根据 2012 年未来挑战赛越野赛段的行驶结果, 路面的起伏并不

会加大纵向控制系统的稳态误差. 在换挡点附近进行的纵向控制实验结果表明, 换挡可能造成幅度不超过 $\pm 0.3 \text{ m/s}$ 的误差. 从图 7 中油门制动电机控制量的结果可以看出, 控制系统仅通过控制油门电机即可维持固定速度行驶, 在控制过程中不会发生同时踩下或者频繁交替操作油门制动的情况.

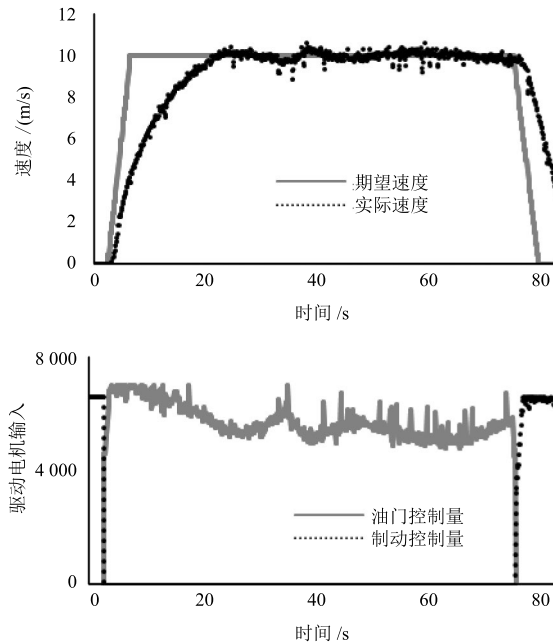


图 7 纵向控制

Fig. 7 Longitudinal control

为了防止控制系统延时造成纵向安全问题, 规划系统在确定期望速度时需要以待执行轨迹上, $t_p + t_d$ 处的速度作为该规划周期的期望速度, 其中 t_p 是规划周期, t_d 是通过实验确定的延时时间.

2.4 复杂环境自适应性的实现

局部规划算法提供了使车辆安全平顺稳定行驶的基本功能. 为局部规划提供导向约束便可实现各种场景下的无人驾驶. 导向约束为局部规划提供如下信息: 1) 全局期望路径; 2) 纵向规划参数, 比如最大速度、最大加速度、以及最大横向加速度. 最大加速减速度和最大横向加速度可以根据平台底层控制系统的性能确定预设阈值, 最大速度则可以来自环境感知的限速结果或采用预设阈值.

为了在统一的程序框架下实现能够适应环境变化的无人驾驶, 我们将工作环境分为强约束区域和弱约束区域两大类. 强约束区域指无人车辆仅依靠环境感知便能够为局部规划提供导向约束的工作区域. 具有车道线的结构化道路是典型的强约束区域,

将车道线中心线作为全局期望路径, 选择不同的待执行路径便可实现车道跟随、超车换道等驾驶行为 (图 8(a)). 弱约束区域则需要由全局规划生成全局路径才能为局部规划提供导向约束, 典型场景如路口行驶. 在弱约束区域中, 全局规划根据车辆实时位姿和在路网中确定的目标位姿得到全局期望路径并输入局部规划 (图 8(b)).

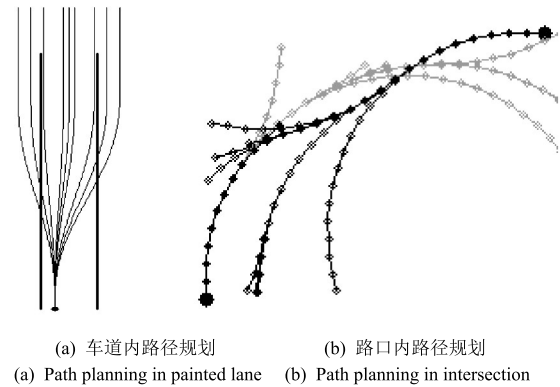
(a) 车道内路径规划 (b) 路口内路径规划
(a) Path planning in painted lane (b) Path planning in intersection

图 8 上层路径规划结果举例

Fig. 8 High-level path planning

当环境感知系统确认环境存在强约束元素时 (如车道线被检测), 规划系统将优先使用强约束区域工作模式. 一旦环境中的强约束元素消失, 系统将自动切换回默认的弱约束区域工作模式. 可见该规划系统的环境自适应能力体现在能够根据环境实现两种工作模式的切换, 而且局部规划能够根据环境自动调整纵横向运动参数. 在行驶的过程中, 当车辆偏离全局路径过远或者没有可行路径满足安全性要求时, 规划系统会输出停车指令并重新启动全局规划, 保证系统的安全性.

3 实验结果分析与讨论

3.1 实车实验

3.1.1 纵向控制实验

该实验验证规划系统的加速匀速行驶性能, 以及在障碍物前制动的能力. 首先使车辆从静止加速到最高速度 (10 m/s), 然后以检测到的停车线作为前方障碍实施制动. 从图 9 中可以直观地看到局部规划如何控制车速变化. 在每个规划周期内局部纵向规划根据实时车速与预设加速度或减速度计算新的期望速度, 牵动车辆逐步加速或制动. 为了保证制动响应及时, 采用了较大的最大减速度用于减速规划. 如图 9 所示, 车辆的运动状态与期望值之间存在明显的延时, 为了避免发生制动不及时的情况, 规

划系统在确定期望运动参数时必须增加延时因素的考虑. 本系统中使用 1 s 的延时时间, 实验结果表明, 采用 1 m/s^2 的预设减速度, 车辆以最高速度 10 m/s 行驶时, 能够停止在障碍物前 5 米处.

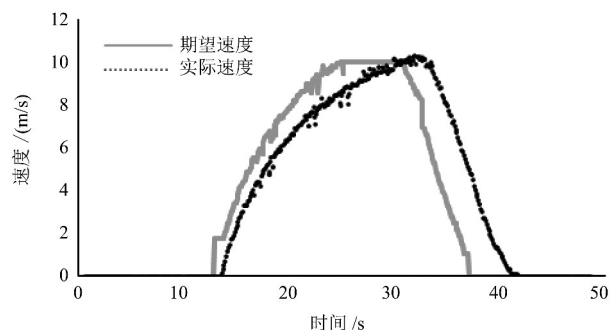


图 9 纵向控制实验

Fig. 9 Longitudinal control

3.1.2 路径跟踪实验

该实验验证规划算法的横向规划控制能力. 虽然规划算法原理上能够兼顾避障和跟踪, 但是必须指出, 由于每次规划结果的有效期只有一个规划周期, 是否能够跟踪复杂路径还需要通过实验加以验证. 本实验用规划算法控制车辆对 S 型路径进行跟踪 (图 10). 比较车辆的实际位置与期望路径发现, 当期望路径为直线时, 车辆实际位置逐渐收敛于期望路径 (实验路径的最后部分). 而在期望路径的曲率变化率较大的位置, 实际路径与期望路径之间会产生较大的横向偏差, 然后逐渐收敛到期望路径.

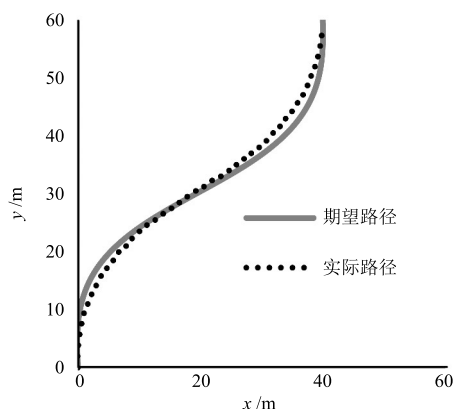


图 10 路径跟踪实验结果

Fig. 10 Path following control

当期望路径曲率变换平缓时 (如车道内行驶), 横向偏差较小且车速较快, 应采用较大的预瞄距离以避免横向震荡. 当期望路径曲率较大时 (如直行与右转弯连接处), 需要采用较小的预瞄距离以减小横

向偏差.

3.2 真实环境下的行驶结果分析

应用本规划算法的无人车参加了 2011 年和 2012 年中国智能车未来挑战赛. 本部分通过该车在若干典型场景下的驾驶行为分析该规划算法的工作性能.

由国家自然科学基金委主办的未来挑战赛在真实城市环境下进行. 参赛车辆需要在全无人状态下完成比赛. 在城市环境赛段, 除了直弯道行驶之外, 车辆还需要完成超越动静态车辆、路口左右转和掉头、以及沿由锥桶组成的导向通道行驶等操作. 在越野赛段需要在起伏路面上完成长距离行驶. 2011 年用时 28 分钟完成 10 公里全程, 人工干预 0 次, 2012 年各用时 37 分钟完成 7 公里城市环境和 16 公里越野环境全程.

3.2.1 车道内行驶

1) 直弯道行驶平顺

车辆能够平稳地完成车道内行驶, 同时纵横向协同规划功能使车辆在弯道内行驶时会根据路线曲率变化对车速进行调整, 在保证路径跟踪效果的同时实现良好的操纵稳定性和行驶平顺性 (图 11). 车道内行驶时的正常车速为 40 km/h .



图 11 车道保持

Fig. 11 Lane keeping tasks

2) 车道内避障

当检测到车辆前方有停止车辆时, 规划系统首先确定完成避障的待执行路径, 然后对其进行纵向规划. 如图 12 所示, 避障过程并不是制动停车再缓



图 12 避障换道

Fig. 12 Obstacle avoidance tasks

慢转弯, 而是在适当减速的同时采取与车速相协调的转向操作, 平顺稳定地完成避障, 并在换道完成后马上加速超越. 由于发现左侧车道为双黄实线, 因此选择右侧超车.

在图 13 中, 前方动态车辆反复换道对无人车进行干扰. 由于前方车辆的速度较慢, 车辆选择避让超车. 按照通法交规要求, 当左侧虚线时优先选择左侧超车. 当前方车辆再次驶入相同车道时, 由于左侧实线, 无人车先慢速跟随, 等待右侧车道空出后选择右侧超车.



图 13 与运动车辆的交互

Fig. 13 Interactive with a moving vehicle

3.2.2 路口内行驶

路口是典型的弱约束区域, 需要全局规划提供期望路径, 然而由于路网和定位系统精度的限制, 期望路径可能并不在路口以内, 此时兼顾避障和路径跟踪的局部规划发挥作用, 尽可能地期望路径进行跟踪, 一旦发现期望路径完全无法执行, 再重新估计目标位姿并重启全局规划.

图 14(a) 中路口内设置了锥桶通道, 虽然期望路径在锥桶之外, 但规划算法使车辆沿着锥桶跟踪期望路径. 图 14(b) 中当车辆发现继续沿期望路径行驶将无法避免碰撞时, 规划系统首先控制车辆制动, 然后通知全局规划在路网内重新估计目标位姿并重新规划, 使车辆安全恢复正常行驶.



(a) 锥筒导向行驶

(b) 避障重规划

(a) Driving in cones

(b) Replanning to avoid collision

图 14 路口内行驶

Fig. 14 Autonomous driving in intersections

3.3 总结

本文介绍了基于运动微分约束的纵横向协同规

划算法. 与现有方法相比, 该算法采用高阶多项式曲线对车辆可行轨迹进行建模, 在较高速度下具备较好的路径跟踪能力. 在动力学约束的速度容许空间内进行纵向规划, 实现安全平顺稳定的行驶. 将工作环境划分为强约束区域和弱约束区域, 根据实时环境情况为局部规划提供导向约束, 该规划算法具有一定的环境自适应能力.

实车实验和采用该算法的无人驾驶平台在 2011 年和 2012 年智能车未来挑战赛中的表现证明: 首先, 规划算法的核心安全功能保证在不确定环境中的自动驾驶行为是安全的; 其次, 该算法能够在简单城市环境中以 40 km/h 的速度完成全自主无人行驶; 最后, 通过封装纵横向规划等基本驾驶功能, 该规划算法简化了实现不同自动驾驶行为所需全局规划的难度, 便于实现模块化的开放式无人驾驶系统.

References

- 1 No Hands Across America [Online], available: http://www.ri.cmu.edu/research_project_detail.html?project_id=178&menu_id=261, January 1, 2013
- 2 Hashimoto N, Ozguner U, Sawant N. Evaluation of control in a convoy scenario. In: Proceedings of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011. 350–355
- 3 VIAC: the VisLab Intercontinental Autonomous Challenge [Online], available: <http://viac.vislab.it>, January 1, 2013
- 4 How Google's self-driving car works [Online], available: <http://news.discovery.com/autos/how-google-self-driving-car-works-111018.html>, January 1, 2013
- 5 DARPA Grand Challenge [Online], available: http://en.wikipedia.org/wiki/DARPA_Grand_Challenge. January 1, 2013
- 6 Laumond J P. *Robot Motion Planning and Control*. Berlin: Springer, 1998. 10–13
- 7 LaValle S M. *Planning Algorithms*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 36–37
- 8 Choset H, Lynch K M, Hutchinson S, Kantor G A, Burgard W, Kavraki L E, Thrun S. *Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations*. Cambridge: The MIT Press, 2005. 100–115
- 9 Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The International Journal of Robotics Research*, 2011, **30**(7): 846–894
- 10 LaValle S M, Kuffner J J Jr. Randomized kinodynamic planning. *The International Journal of Robotics Research*, 2001, **20**(5): 378–400
- 11 Misra J. A walk over the shortest path: Dijkstra's algorithm viewed as fixed-point computation. *Information Processing Letters*, 2001, **77**(2–4): 197–200
- 12 Likhachev M, Ferguson D. Planning long dynamically feasible maneuvers for autonomous vehicles. *The International Journal of Robotics Research*, 2009, **28**(8): 933–945

- 13 Pitvoraiko M, Knepper R A, Kelly A. Differentially constrained mobile robot motion planning in state lattices. *Journal of Field Robotics*, 2009, **26**(3): 308–333
- 14 Snider J M. Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking, Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, USA, 2009
- 15 Guldner J, Utkin V I, Ackermann J. A sliding mode control approach to automatic car steering. In: Proceedings of the 1994 American Control Conference. New York, NY, USA: IEEE, 1994. 1969–1973
- 16 Chen Y L, Sundareswaran V, Anderson C, Broggi A, Grisleri P, Porta P P, Zani P, Beck J. TerraMax™: Team Oshkosh urban robot. *Journal of Field Robotics*, 2008, **25**(10): 841–860
- 17 Montemerlo M, Becker J, Bhat S, Dahlkamp H, Dlogov D, Ettinger S, Haehnel A, Hilden T, Hoffmann G, Huhnke B, Johnston D, Klumpp S, Langer D, Levandowski A, Levinson J, Marcil J, Orenstein D, Paefgen J, Penny I, Petrovskaya A, Pflueger M, Stanek G, Stavens D, Vogt A, Thrun S. Junior: the Stanford entry in the urban challenge. *Journal of Field Robotics*, 2008, **25**(9): 569–597
- 18 Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, Baker C, Bittner R, Clark M N, Dolan J, Duggins D, Galatali T, Geyer C, Gittleman M, Harbaugh S, Hebert M, Howard T M, Kolski S, Kelly A, Likhachev M, McNaughton M, Miller N, Peterson K, Pilnick B, Rajkumar R, Rybski P, Salesky B, Seo Y W, Singh S, Snider J, Stentz A, Whittaker W, Wolkowicki Z, Ziglar J, Bae H, Brown T, Demitrish D, Litkouhi B, Nickolaou J, Sadekar V, Zhang W D, Struble J, Taylor M, Darms M, Ferguson D. Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge. *Journal of Field Robotics*, 2008, **25**(8): 425–66
- 19 Leonard J, How J, Teller S, Berger M, Campbell S, Fiore G, Fletcher L, Frazzoli E, Huang A, Karaman S, Koch O, Kuwata Y, Moore D, Olson E, Peters S, Teo J, Truax R, Walter M, Barrett D, Epstein A, Maheloni K, Moyer K, Jones T, Buckley R, Antone M, Galejs R, Krishnamurthy S, Williams J. A perception-driven autonomous urban vehicle. *Journal of Field Robotics*, 2008, **25**(10): 727–774
- 20 Von Hundelshausen F, Himmelsbach M, Hecker F, Mueller A, Wuensche H J. Driving with tentacles: integral structures for sensing and motion. *Journal of Field Robotics*, 2008, **25**(9): 640–673
- 21 Broggi A, Bertozzi M, Fasciolia A, Guarino C, Lo Bianco C G, Piazzzi A. The ARGO autonomous vehicle's vision and control systems. *International Journal of Intelligent Control and Systems*, 1999, **3**(4): 409–441



姜 岩 北京理工大学智能车辆研究所讲师. 2010 年获北京航空航天大学车辆工程系博士学位. 主要研究方向为智能车辆的路径跟踪及计算机视觉技术.

E-mail: piuzuzu@gmail.com

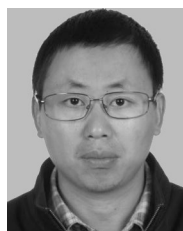
(**JIANG Yan** Lecturer at the Intelligent Vehicle Research Center, Beijing Institute of Technology. He received his Ph. D. degree from Beihang University in 2010. His research interest covers path following and computer vision for intelligent vehicles.)



龚建伟 北京理工大学智能车辆研究所副研究员. 2002 年获北京理工大学机械电子工程系博士学位. 主要研究方向为智能车机器人的路径规划及控制技术. 本文通信作者.

E-mail: gongjianwei@bit.edu.cn

(**GONG Jian-Wei** Associate professor at the Intelligent Vehicle Research Center, Beijing Institute of Technology. He received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2002. His research interest covers planning and control for autonomous mobile robots. Corresponding author of this paper.)



熊光明 北京理工大学智能车辆研究所副教授. 2005 年获北京理工大学机械电子工程系博士学位. 主要研究方向为智能车机器人的控制及视觉技术.

E-mail: xionguangming@bit.edu.cn

(**XIONG Guang-Ming** Associate professor at the Intelligent Vehicle Research Center, Beijing Institute of Technology. He received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. His research interest covers control and computer vision.)



陈慧岩 北京理工大学智能车辆研究所教授. 主要研究方向为智能车辆技术, 车辆信息技术.

E-mail: Chen_h_y@bit.edu.cn

(**CHEN Hui-Yan** Professor at the Intelligent Vehicle Research Center, Beijing Institute of Technology. His research interest covers intelligent vehicle and information technologies.)