

军用地面无人机动平台技术发展综述

陈慧岩, 张玉

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 地面无人机动平台对发展高机动地面无人战斗系统具有重要的战略意义,是当前各国国防科技领域的研究热点。文中综述了军用地面无人机动平台的发展历程与最新进展,分别阐述和分析了其基本组成和发展特点,然后从环境感知、运动规划、跟踪控制等方面总结了军用地面无人机动平台发展中的关键技术,并对军用无人机动平台的研究方向和研究重点进行了展望。

关键词: 兵器科学与技术; 军用地面无人机动平台; 环境感知; 运动规划; 路径跟踪

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2014)10-1696-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.10.026

An Overview of Research on Military Unmanned Ground Vehicles

CHEN Hui-yan, ZHANG Yu

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Unmanned ground vehicles (UGVs), which are of great strategic significance for developing high maneuvering unmanned ground combat systems, have become a research hotspot of defense technology. The development and current progress of UGVs for military application are reviewed. The fundamental components and development characteristics of military UGVs are stated and analyzed. The key technologies of military UGVs are also summarized in the areas of sensing and perception, motion planning and path tracking. In addition, the future research direction and focus of military UGVs are suggested.

Key words: ordnance science and technology; military maneuvering unmanned ground vehicle; environmental perception; motion planning; path tracking

0 引言

地面无人机动平台,作为智能交通系统(ITS)和未来战斗系统的一个重要组成部分,在民用领域和军用领域都具有广泛的应用前景^[1]。广义上来说,地面无人机动平台指的是任何能够在地面上移动,并进行承载或运输装备或人员,但是不搭载驾驶员的机器设备^[2];狭义上讲,指的是能感知环境并与环境交互、能自主行驶的地面移动机器设备^[3]。在军用领域,地面无人机动平台通常也叫做无人地

面车辆(UGV)、自主地面移动平台(ALMP)、自主地面车辆(ALV)等,主要包含军用无人战斗车辆、通用后勤服务无人车辆和小型单兵机器人^[4]。上述相关领域的技术研究对发展高机动地面无人战斗系统具有重要的战略意义。军用地面无人机动平台在战场上能够完成获取情报、监视、侦察任务,运输与后勤任务,排雷、安置简易爆炸装置任务,提供火力支援任务,通信中转、医疗转移任务等,在战斗中对保护士兵生命有着不可替代的作用。在民用领域,地面无人机动平台通常是指无人驾驶汽车,也叫做

收稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(91120010)

作者简介: 陈慧岩(1961—),男,教授,博士生导师。E-mail: chen_h_y@263.net;

张玉(1989—),男,博士研究生。E-mail: yu.zhang.bit@gmail.com

智能汽车、智能车、无人车,其关键技术的发展对改善交通拥堵、节能减排、提高出行效率、减小交通事故等方面有着重要作用。军用和民用地面无人机动平台的基本组成部分大致相同,都包括感知、规划、控制和平台底盘等子系统,但是由于应用场景不同,相应部分的研究侧重点及需求有所不同。本文侧重于阐述军用地面无人机动平台的相关研究内容。

1 军用地面无人机动平台的发展历程

军用地面无人机动平台的研究要早于无人驾驶汽车,最早可以追溯到 20 世纪 30 年代前苏联开发的无线遥控坦克。第二次世界大战期间,英国和德国也相继研发出无线遥控履带战斗车辆^[4]。后来军用无人机动平台的研究逐步扩展到半自主地面无人机动平台和自主地面无人机动平台。

20 世纪 80 年代,美国国防部(DOD)专门制定了无人作战系统发展的战略规划,对地面无人作战平台的研究进行大规模资助^[2]。此后的 20 年,美国先后制定了联合机器人(JRP)计划^[5]、Demo 计划^[6-7]、战术移动机器人(TMR)计划^[8]、无人地面战斗车辆(UGCV)计划、越野机器人感知(PerceptionOR)计划^[9-10]、FCS 计划^[11]、LAGR 计划^[12]、UPI 计划^[13]等,力求发展由地面无人机动平台和武器系统构成的无人作战系统^[14]。美国国防高级研究计划局(DARPA)分别于 2005 年和 2007 年举办了越野挑战赛^[15]和城市挑战赛^[16],极大地推动了传感器、相关算法和地面无人机动平台系统集成技术的发展^[17]。UGCV 计划中由卡耐基梅隆大学(CMU)国家机器人工程中心(NREC)研发的 Crusher(前身为 Spinner)是一种针对于大范围复杂越野路面的下一代无人高机动平台。它利用航拍地图评估运动风险,进行轨迹规划,使用车载传感器来检测从地图数据无法辨别的或是后出现的障碍^[18],通过特殊的悬挂系统和驱动系统设计适应各种路面的行驶要求。截至 2007 年,该平台已经能在岩石、壕沟、陡坡、灌木丛等各种类型路面自主行驶超过 250 km^[13]。另一项比较瞩目的研究便是美国陆军坦克机动车辆研发与工程中心研制的 APD 地面无人机动平台。该平台采用混合电驱动技术,以柴油机为原动机,装备锂离子电池,通过 6 个轮毂电机驱动平台前进^[19];除此之外,该平台配备自主导航系统,能以 80 km/h 速度行进中躲避障碍,具有实时人工操纵和自主机动的能力。Crusher 和 APD 地面无人机动平台在极端环境下具有较好的燃油经济性、

较高的生存能力和较强的承载能力,展现了下一代军用无人机动平台对各种类型越野路面突出的适应能力和机动性能。2013 年 CMU NREC 与奥什科什国防公司合作研发了为美国海军陆战队提供后勤保障的 Cargo 地面无人车辆,该平台有 3 种工作模式——自动驾驶模式、影子模式和遥控模式,并且可以与有人驾驶车辆混编成车队,使得一个操作者可以操控多辆无人机动平台,能保证在较低风险的情况下使用较少的人力完成后勤补给任务^[20]。除上述平台外,美国现役或在研的地面无人机动平台还包括洛克希德·马丁公司的 AMAS 平台^[21]、SMSS 平台^[22]和 MULE ARV-A(L)平台^[23],波士顿动力公司的 Big Dog^[24-25]、LS3 仿生机器人^[26]等。

除了美国,其他国家也积极开展无人机动平台的相关研究,比较著名的有英国 BAE 系统公司的角斗士(Gladiator)新型战术地面无人车辆^[27]、黑骑士(Black Knight)无人装甲车^[28],德国 Diehl BGT 防务公司的 CANGURU 地面自主车辆,克罗地亚 DOK-ING 公司的 MV 系列无人扫雷车^[29],以色列 G-NIUS 无人地面系统公司的 GUARDIUM MK 系列高机动性能无人战斗车辆^[30]和中国兵器工业集团公司的混合动力无人地面车辆。其中,黑骑士无人装甲车体现了目前无人战斗机动平台技术的最高水准。该平台拥有 30 mm 速射火力系统、全地形通过能力、先进的全频谱传感系统(由 NREC 提供)、完善的战术数据链和自主导航系统,可加装通用导弹发射装置等重型武器,其实战化色彩远远超过全球正在服役的各类地面无人机动平台。图 1 列出了上文提到的部分军用地面无人机动平台。

2 地面无人机动平台的组成和特点

2.1 基本组成

无人机动平台虽然在机构、传感器配置、功能实现上各不相同,但是在无人驾驶系统组成上有着显著的共同点,都包含环境感知系统(含定位)、运动规划系统、跟踪控制系统、平台底盘系统等子系统。这些共同点构成无人机动平台的基本组成部分。

环境感知系统是指通过各种传感器设备的输入建立无人车辆周围包含二维或三维环境特征的环境模型的系统。它主要由硬件和软件处理程序组成。硬件主要包括二维激光雷达、三维激光雷达、毫米波雷达、彩色相机、立体相机、声纳、惯性导航元件、GPS 等各种类型的传感器。软件处理程序实现的功能主要为路面识别、障碍物检测、目标识别与跟踪、



图 1 军用地面无人机动平台

Fig.1 Military maneuvering unmanned ground platforms

建立地图与定位等。它的主要作用是建立地面无人机动平台周围的环境模型,为无人系统的决策、规划和控制提供地图、环境约束和定位信息。

运动规划系统是指根据环境感知系统输入的环境模型,考虑任务约束、环境约束、平台自身的运动学和动力学约束等,生成能够驱动动态非线性系统从初始状态到达指定目标状态的控制参考输入序列的系统^[31]。该子系统的主要功能是根据任务要求、环境地图或是先验知识生成待执行的无碰撞路径或轨迹,作为控制系统的参考输入,通常包括路径规划和轨迹规划两部分。

跟踪控制系统是指根据控制参考输入序列和控制律生成控制指令使得动态系统达到期望输出结果的控制器^[32]。对于地面无人机动平台而言,跟踪控制是指根据参考轨迹输入和控制律生成车辆执行器(如方向盘、电子油门、制动器)的控制命令使执行器产生影响车辆运动的力或力矩。

平台底盘系统是指由车辆底盘及相应执行器构

成受控的机械执行系统。

除了包含上述必要组成部分,根据无人机动平台所实现功能的不同和智能化程度的差异,有的系统还会包含**遥控站、多车通信系统、任务规划系统、人机交互系统**等。

2.2 特点

作为移动机器人技术的一个分支和发展方向,地面无人机动平台技术继承了诸多机器人学的研究方法和研究成果,并在不断发展和实际应用中呈现出自己独特技术特点。

2.2.1 移动速度比普通移动机器人更快,变化范围更大

普通移动机器人的速度大多为 $0 \sim 10 \text{ km/h}$ ^[33],而军用地面无人机动平台的行驶速度大多在 $10 \sim 60 \text{ km/h}$,有的甚至达到 70 km/h 以上^[29]。无人机动平台的行驶速度高,速度变化范围大,这对感知系统和运动规划系统的**处理速度**,控制系统的控制精度提出了更高的要求。在有扰动的环境中或高速情

况下,点质量模型、运动学模型已经不能满足规划控制的需求,需要建立考虑平台特性、轮胎(或履带)模型、更精确的动力学模型,以适应复杂场景和满足高速情况下的控制需求。

2.2.2 操作的环境更复杂,范围更大

与普通移动机器人活动的室内环境或是范围较小的室外环境相比,军用地面无人机动平台不仅能够行驶在结构化道路环境(城市环境)中,也要能够行驶在非结构化道路环境(越野环境)中,这使得其活动的环境更复杂,范围更大。上述特点要求环境感知系统不仅要能够识别出城市环境下可行驶的道路区域、交通信号灯、交通标志、行人和车辆等,也要求其能够识别出越野环境下可跨越的障碍(植被)、不可跨越的正障碍(如岩石、树木等)、潜在的负障碍(如壕沟、悬崖)^[18]。这对面向无人机动平台应用的环境感知研究提出了新的挑战。

2.2.3 具有更强的承载能力和更长的续航能力

普通移动机器人大多承载能力有限,不能载人或载货,并且续航能力较弱。军用无人机动平台由于军事应用需要,通常会搭载武器系统、搭载防护系统或用于运输物资,同时,大部分任务也要求平台能长时间运作(物资运输、侦查、通信中转)。这些军事应用需要无人机动平台具有更强的承载能力和更长的续航能力。例如,DARPA 和陆军对于 UGCV 项目的评估要求就包括:能够完成为期 14 d 的任务;一次加注燃料行驶里程不少于 450 km;载荷比大于 25% 等。

2.2.4 对可靠性要求更高

军用地面无人机动平台通常工作在野外极端恶劣环境下,复杂地形、震动、冲击载荷、灰尘、高低温等因素给平台的机械执行系统和电控系统的可靠性与稳定性带来了严峻的挑战。这就要求军用地面无人平台在设计之初就必须考虑系统结构的设计、系统集成设计、甚至是平台的机构设计,以确保平台是自依赖的、可调整和可容错的^[34],从而保证系统的可靠与稳定。

另外,军用地面无人机动平台主要功能、搭载武器系统、补给物资运输或是作业,其工作时难免会与人或有人驾驶车辆交互,那么平台控制系统的可靠性和稳定性对于确保人的安全就显得尤为重要。无人机动平台从研究之初到现在,大部分平台的自动控制系统都是通过外加电机、液压控制阀等执行机构来实现纵向、横向、档位等的运动控制。这些额外的执行机构本身并不属于原车底盘控制系统,其

安装位置和控制参数很难调校,也无法保证外加机构控制系统能与原车控制系统兼容^[35];另外,这些外加的执行器及其控制系统也会导致整个无人系统变得庞大、复杂,出错概率大大增加。DARPA 两届挑战赛各个车队出现的事故也证明这种实现方式并不合理。理想的、适用于无人驾驶的控制系统应该采用线控方式实现,有人驾驶与无人驾驶控制系统采用两套不同的控制策略,但是共用一套出厂配置的电控执行机构。近年来越来越多的地面无人机动平台采用线控方式实现自动控制,如牛津大学移动机器人小组的 Robot Car 无人驾驶汽车、北京理工大学智能车辆研究所的 Ray 无人驾驶汽车、戴姆勒股份公司的 Bertha Benz 无人驾驶汽车等。

3 地面无人机动平台的关键技术

3.1 环境感知技术

环境感知技术是无人机动平台中最重要的一环,无人机动平台安全、稳定行驶的首要前提是环境感知提供的世界环境模型、运动状态和定位信息准确、可靠。这里的环境感知不仅包括各种雷达和相机等构成的能够提供世界环境模型的视觉系统,也包括由惯性导航元件、GPS 等传感器构成的能提供平台自身姿态、与环境相对位置或绝对位置信息的状态估计系统。

3.1.1 视觉系统

地面无人机动平台视觉系统的主要功能是障碍物检测、可通行区域提取、运动估计、地图创建等,其主要使用的传感器包括主动视觉传感器(激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达等)和被动视觉传感器(单目相机、立体相机、全景相机、红外相机等)。主动视觉传感器因其能提供相对精确的距离信息,比较适合用于障碍物检测和地图构建等。被动视觉传感器因其数据包含的特征信息较多,比较适合用于路面提取、特征检测与跟踪、路标的识别与匹配以及基于特征检测的运动估计和定位等。

得益于传感器技术和计算机视觉技术的飞速发展,针对地面无人机动平台在越野环境下的视觉系统的研究取得了诸多进展,近些年的研究重点主要集中在越野路面识别与分类、各种类型的障碍物检测。卡耐基梅隆大学的 Lalonde 等采用局部点云统计分析方法并结合贝叶斯分类器识别车身周围的网状障碍物、线状障碍物和面状障碍物,用于 Demo-III XUV 无人机动平台的野外行驶路面分类^[36]。美国喷气推进实验室(JPL)的 Rankin 等只使用立体相机

采用二值化方法和通过性成本分析来构建地图,该方法可以检测出树干、树枝、陡坡、负障碍和水面等^[37]。Milella 等提出了一种基于毫米波雷达数据特征的自学习路面分类器^[38],该方法包含在线自适应学习阶段和分类阶段,能够适应远距离、长航时和变化环境下的路面分类。

由于无人机动平台行驶的环境较复杂,只依赖一种传感器不可能完成所有的识别任务。构建实时、多视角传感器系统,利用多模态传感信息融合技术为地面无人机动平台导航提供可靠、有效的信息成为当今研究的热点。Stentz 等采用比较简单的通过性成本估价函数来融合激光雷达和立体视觉等不同通道的传感信息,形成地图,供导航系统使用,该方法可以识别较大的正障碍和负障碍^[39]。Bagnell 等使用三维激光雷达点云信息结合多光谱颜色信息和纹理特征来提高越野路面检测和路面分类的准确性^[40]。Peynot 等通过多传感器融合形成冗余以减小单传感器在野外极端条件下(扬尘、雾天、雨天)检测错误对系统的影响,提高感知系统的可靠性^[41]。Zhao 等设计了一个分层式传感器融合系统,采用卡尔曼滤波来实现物理层数据的融合,以便获得统一、更精确详细的特征信息;然后采用 D-S 证据理论进行上层数据融合,以提高识别效率和减小计算复杂度^[42]。

3.1.2 状态估计

为了更好地控制地面无人机动平台的运动,准确的平台运动估计是必要的,特别是地面无人机动平台装备有悬挂系统,行驶环境也较复杂,高速行驶在不平路面上时,必然会出现俯仰、侧倾、横滚、纵滑和侧滑等。无人机动平台的状态估计主要是融合多种传感器(陀螺仪、GPS、加速度计、罗盘等)信息,估计平台的姿态、速度以及相对或绝对位置。平台状态估计主要分为两大类:基于全球定位系统(GNSS)—惯性导航系统(INS)的组合导航系统和基于视觉的状态估计。

在无遮挡的空旷环境下,GNSS(如 GPS、北斗、伽利略定位系统)能为无人机动平台提供长时准确的定位信息^[43]。然而城市环境、峡谷、密林等环境都可能导致 GPS 信号的瞬时丢失,使得定位效果变差或定位失败。INS 是指通过使用惯性测量元件(陀螺仪、加速度计、罗盘等)测量平台的横摆角速度和加速度等,通过积分获取平台相对定位信息的定位系统。INS 自依赖,不受外界环境干扰,然而其惯性测量数据存在漂移现象,长时间累积会产生较大误

差,且无上界,因此 INS 只能保证短时定位精度。通过卡尔曼滤波算法、扩展卡尔曼滤波算法^[44]或无迹卡尔曼滤波算法^[45]融合两系统定位数据,结合两种定位系统优势的组合导航系统成为无人机动平台定位系统的主流。2007 年,DARPA 城市挑战赛中,完成比赛的无人驾驶车辆几乎都使用了 GPS-INS 组合导航系统^[46-49]。但是,由于 GPS-INS 组合导航系统仍然依赖 GPS,当 GPS 丢失时间较长时,其定位精度也会变差。Ilyas 等提出了一种利用集中式卡尔曼滤波根据传感数据质量有选择地融合来自 GPS、INS 和里程计数据的组合导航方法,该方法在 GPS 信号较差的地方(密林、楼群里)也能保证可靠的定位结果^[50]。

基于视觉的状态估计主要是指视觉里程计(VO)和同时创建地图与定位(SLAM)。传统里程计主要是根据来自编码器(光电式、磁电式、霍尔式等)的数据随时间变化来估计平台的位置或航向。这种方法在城市平坦道路上的估计精度较高,而在不平路面上,当车辆出现纵滑或侧滑时,误差较大。根据图像特征估计车辆运动状态的 VO 则不受滑移和其他因素影响,并且 VO 成本较低、紧凑,相对位置误差范围较小,为 0.1%~2%,因此 VO 被广泛用于越野环境下和城市环境下的车辆定位^[51]。典型的 VO 算法主要包括:可被跟踪的特征点的检测、连续帧图像间的特征关联或跟踪、利用特征匹配进行运动参数估计。Nourani-Vatani 等利用平台非完整性约束和特征跟踪进行运动估计的单目 VO,并将其成功应用于大型工业叉车和越野车的定位^[52]。Howard 等提出了一种使用立体视觉进行运动估计的 VO,其误差范围限制到 0.25% 以内。该里程计采用更完善更简单的内点检测算法,对预处理过后的视差图进行特征提取和特征匹配,然后再进行运动估计,实时性和可靠性都较高^[53]。该方法已被用到 DARPA LAGR 项目平台上和 Big Dog 军用机器人上。为了提高定位系统的精度,Perlin 等将 VO 和惯性测量单元(IMU)数据进行融合,提出了一种实时、适用于越野和城市环境下高速行驶应用场景下的集成定位系统^[54]。

同时建立地图与定位(SLAM)是指无人机动平台在未知环境中,根据传感器信息在线增量式建立环境地图,或是更新部分已知的地图,同时确定车辆在地图中的位置。其原理是利用扩展卡尔曼滤波^[55]、无迹卡尔曼滤波^[56]、稀疏扩展信息滤波^[57]、Rao-Blackwellized 粒子滤波^[58]等技术实现路标估

计、轨迹估计和车辆位置估计。经过近 30 年的发展,在理论层面上,SLAM 问题已经基本被解决^[59],然而其在具体应用中仍呈现出诸多问题,目前其相关研究重点主要集中在计算复杂度、环境表示、数据关联等方面的改进^[60]。与其他增量式的位置估计方法相比,SLAM 因使用更多的传感器历史信息,其定位结果产生的**增量误差更小**。另外,SLAM 采用数据关联解决闭环问题,可以消除位置估计的累计误差^[61]。SLAM 在解决大范围动态环境,特别是 GPS 信号较弱或是不稳定区域中无人机动平台的长时间地图重建和定位问题方面有着巨大潜力。因此,越来越多的研究者将 SLAM 用于地面无人机动平台在复杂环境中的定位。Moosmann 等提出一种只使用 Velodyne 三维激光雷达数据的 SLAM 方法,该方法被证明在不使用速度传感器和其他信息的情况下,SLAM 算法也能精确地建立地图和定位,并且比组合导航精度更高,可用于精细的城市地图构建^[61]。Cho 等提出了针对无人机动平台野外环境行驶的 SLAM 算法。该算法采用双模糊 C-均值聚类方法提取野外树木特征点,并使用扩展卡尔曼滤波进行同时定位和建立地图^[62]。Tamjidi 等融合激光雷达数据和单目相机数据,提出了基于单点 RANSAC-扩展卡尔曼滤波方法 SLAM 算法,用于无人机动平台在无 GPS 信号环境下的位置估计,其估计误差小于总路径长度的 1.9%^[63]。Su 等提出了一种结合扩展卡尔曼滤波-无迹卡尔曼滤波的无人机动平台的 SLAM 算法,该方法被证明比传统扩展卡尔曼滤波-SLAM 算法有更高的**位置精度和航向精度**^[64]。

3.2 运动规划技术

可靠和数值高效的运动规划算法是无人机动平台导航技术的核心,也是体现无人机动平台智能化水平的关键技术。单一环境下的运动规划问题已经很具有挑战性,在**复杂(城市与越野)环境**下的无人机动平台的运动规划需要考虑更多的约束:平台底盘的运动学、动力学约束、环境约束、扰动的操作环境、状态空间的高度不确定性等等。与此同时,无人机动平台通常**行驶速度较高**,而且需要适应动态环境的特点要求运动规划系统能够在有限的时间里生成一条满足**运动学、动力学约束的无碰撞轨迹**。从运动规划系统的结构框架来说,运动规划算法可以分成**全局运动规划方法、局部运动规划方法、分层式运动规划方法**。

基于计算机图形学的全局运动规划方法^[65],由

于其**不可接受的计算复杂度**^[66],要求已知完备的环境信息、重规划耗时等原因,不适用于解决实际应用中**带时间约束**的运动规划问题。与全局运动规划方法相比,**局部运动规划方法**^[67-68]更高效,不需要完备的环境信息,并且可以考虑车辆的非完整性约束和动力学约束,但是这种方法只使用了局部环境信息或是局部最优,极有可能使规划算法陷入局部最小。考虑到纯全局和反应式运动规划方法的局限,一种**分层式的运动规划方法**^[13 20 69-70]被提出。这种分层式的规划架构由全局路径规划器和局部轨迹规划器组成,**全局路径规划器主要生成满足运动学约束的无碰撞路径**,提供引导信息来防止车辆陷入困境,局部轨迹规划器**主要考虑车辆运动学、动力学约束和安全性约束生成可行、平滑、无碰撞的候选轨迹**,根据目标函数选取最合适的待执行轨迹。分层式运动规划方法近年来被大量使用并取得了很好的效果。

从采用的技术来看,应用于无人机动平台的运动规划方法主要有:**基于搜索的运动规划方法和基于最优控制的运动规划方法**。

基于搜索的运动规划方法主要是指采用搜索技术进行**几何运动单元**拼接生成距离最短的无碰撞路径,这种方法多用于全局路径规划和自由区域的路径规划。通过这种方法生成的路径能保证满足车辆运动学约束,距离最短且无碰撞。DARPA 举办的两届挑战赛中,大部分队伍使用了基于搜索的运动规划方法。基于搜索的运动规划方法所采用的运动单元主要是直线(4、8、16 连接栅格等使用的运动单元)、Dubin 运动单元^[71]、Reeds-Shepp 运动单元^[72]、**状态网格运动单元**^[73]等。这种方法通过将车辆运动学和动力学约束嵌入到运动单元中离线生成,减少路径生成过程中的计算量,同时保证生成路径的可行性;所采用的搜索方法主要是 Dijkstra^[74]、A*^[75]、D*^[76]及其变种等。其中 AD*^[77]算法同时具有实时性和增量性,适合于解决动态、复杂环境下的路径规划问题,在 DARPA 城市挑战赛中成功应用于 BOSS 智能车自由空间、停车场内、错误恢复场景下的路径规划系统中^[78]。**基于搜索的运动规划的方法的局限是,不适合用于解决带时间约束和密集动态障碍场景下的运动规划问题**和高维运动规划问题。

基于优化的运动规划方法,指的是把路径规划问题转化成带约束的最优化数值求解问题的一类方法。这类方法因为能生成满足车辆**动力学约束**、最

优或局部最优的路径和轨迹而受到广泛关注。其中一种方法是将无人机动平台的运动规划问题转化成两点边界值问题求解。这种方法为了简化运动规划问题,通常采用固定类型的曲线,如 B 样条曲线^[79]、五次多项式曲线^[80]、立体螺旋线^[81],连接起始点和目标点。这种方法的难点是如何满足边界约束(如曲率上界)。Kelly 等将从起始点到达目标点的运动规划问题首先转化为最优控制问题,通过参数形式表示车辆系统动力学方程,进而将问题转化成参数优化问题,不断迭代优化参数,直至生成到达终点状态的轨迹^[82],但是其生成的轨迹只是空间曲线,只包含横向控制量,没有纵向控制量。Delsart 等后来在此基础上提出 Tiji 算法^[83],加入时间约束,同时进行横向和纵向规划,使得车辆能在指定的时间内到达目标点或目标点附近。这种方法采用参数方程表征轨迹簇,降低了搜索空间的维数,大大提高了轨迹生成的效率,而且可以加入非线性不等式约束,适用于解决带非完整性约束的智能车辆运动规划问题,其难点是初始轨迹的估计。

除了上述两大类方法外,应用于无人机动平台的运动规划的方法还有 RRT 及其变种^[84-85]、道路图^[86]、支持向量机^[87]等方法。

3.3 跟踪控制技术

无人机动平台跟踪控制技术是实现自动控制的保障,也是实现自主导航的关键部分,大部分智能行为都必须依赖跟踪控制技术实现。无人机动平台属于控制输入量比状态变量少的欠驱动系统,其高度的非线性、子系统间强耦合的特性,使得研究者较难建立精确的车辆系统动力学模型用于设计控制律。地面无人机动平台的动力系统通常比较复杂,具有强非线性和迟滞性,而转向系统相对较简单,也较灵敏,所以为了达到更好的控制效果,跟踪控制系统通常会采用两种控制方法分别实现对横向(转向)和纵向(速度)的控制。

比例-积分-微分(PID)控制器是一种在工程上广泛采用并取得成功的线性控制器。其优点是不需要建立系统模型,控制参数可以通过试凑法得出。其缺点是耗时,需要大量的实验工作。这类方法中 PI 控制器通常用于无人机动平台的纵向跟踪控制,而 PD 控制器通常用于无人机动平台的横向控制。2007 年,在 DARPA 举办的城市挑战赛中,Leonard 等使用低频宽 PI 控制器对纵向速度进行跟踪控制^[88],Bacha 等将 map-linearized PID 控制器用于车辆的速度控制,采用速率控制 PID 跟踪转向角和转

向速率^[89]。

基于几何分析的路径跟踪控制器主要是通过根据车辆与参考路径或轨迹的几何位置关系,设计控制律来解决跟踪问题的一类控制方法。这类方法被主要应用于无人机动平台的横向控制。纯跟踪控制器^[90-91]是其中典型的代表,其实质是一种将自身位置与预瞄处的期望位置的横向偏差转化为横向控制量的比例控制器。该方法鲁棒性较好,即使是在有较大横向偏差和参考路径曲率不连续的情况下也能达到很好的跟踪效果。其缺点是预瞄距离受较多参数(参考路径曲率、车速、横向偏差等)的影响,较难选取,很难在保证较强跟踪能力的同时也保证稳定性。Urmson 等将该方法应用于越野环境下 CMU 两辆无人车的路径跟踪^[92]。Leonard 等将其应用于城市环境下 MIT 无人车的横向跟踪控制^[88]。Valois 等将其用于黑骑士无人装甲车在越野环境下有 GPS 路点引导的路径跟踪^[28]。另一种比较有特点的控制方法是 Stanley 横向跟踪方法^[93],其实质是一种只考虑横向偏差的非线性反馈控制器。该方法在多数情况下的表现比纯跟踪更好,但是由于它没有考虑参考路径的形状,因此这种方法不适合用于非连续曲率路径的跟踪,并且在较大横向误差下的效果较差^[94]。

前馈-反馈跟踪控制器是近年来采用较多的一类跟踪控制方法,主要由一个前馈控制器和一个反馈控制器构成。前馈控制器主要进行参考路径曲率变化的干扰量补偿,反馈控制器主要通过根据车辆状态反馈调整控制输入使得扰动和模型误差对跟踪的影响最小化,使车辆更接近期望路径并保持稳定。斯坦福大学 DDL 实验室的 Kritayakirana 等将这种方法应用于无人驾驶赛车的横向跟踪控制^[95],戴姆勒股份公司的 Bertha Benz 无人驾驶汽车采用该方法用于横向跟踪控制^[96]。

基于最优化的跟踪控制器指的是基于最优化原理建立的反馈控制器。最典型的就是线性二次型调节器(LQR)跟踪控制器和模型预测控制(MPC)跟踪控制器。LQR 控制器是将非线性控制系统简化成线性控制系统,然后使用 LQR 跟踪路径。该方法最早是由 Divelbiss 等于 1997 年用于拖车的路径跟踪问题^[97],后来 Snider 设计了一种带前馈的离散有限时域 LQR 控制器用于无人机动平台的横向跟踪控制仿真^[94]。Levinson 等将这种方法应用于斯坦福大学无人驾驶汽车 Junior 的横向和纵向综合控制^[98]。LQR 控制器比较适合用于高速公路上的无

人驾驶和大部分城市场景下的路径跟踪,但是这种方法无法处理约束,并且将非线性系统进行线性化近似处理,没有考虑参考路径形状对控制系统的影响,所以该方法对曲率突变敏感,在突变曲率输入情况下会有超调。MPC 控制器也叫做滚动时域控制器,该控制器考虑控制系统的非线性动力学模型并预测未来一段时间内系统的输出行为,通过解决带约束的最优控制问题使得系统在未来一段时间内的跟踪误差最小。这种方法鲁棒性较强。Falcone 等分别使用车辆的非线性模型和在线连续线性化模型建立模型预测控制器用于无人驾驶车辆的横向跟踪控制,其在冰面上的测试速度最高可达到 21 m/s ^[99]。Yoon 等考虑非线性车辆模型和轮胎模型,设计了非线性模型预测控制器用于 XAV 无人机动平台的横纵向跟踪控制,同时实现了避障功能^[100]。Ziegler 和 Geiger 等采用模型预测控制器进行 Beta Benz 和 AnnieWay 无人驾驶汽车的纵向跟踪控制^[96,101]。

除了上述介绍方法,用于地面无人机动平台的跟踪控制算法还包括滑模控制^[102],模糊控制^[103],神经网络控制^[104]等。

4 总结和展望

地面无人机动平台在过去几十年间取得了突飞猛进的发展,展现出其在军用和民用领域潜在的应用前景。本文首先从广义和狭义上定义了地面无人机动平台,然后阐述了军用地面无人机动平台的发展历程,分析了军用地面无人机动平台的基本组成和发展特点,总结了军用地面无人机动平台各子系统在发展过程中的关键技术。军用无人机动平台今后的研究重点将集中在:

1) 多传感器多模态传感器信息融合方法的研究;基于机器学习技术的障碍物、路面检测和分类方法的研究。

2) GNSS、INS、VO 和 SLAM 各定位子系统互补的高精度、长航时、大范围动态场景下的组合导航定位系统的研究。

3) 考虑欠驱动系统动力学模型、带约束的最优控制实时轨迹规划算法的研究;针对动态场景的快速动态重规划路径规划算法的研究。

4) 考虑精确车辆动力学的多约束非线性模型预测控制算法的研究;基于机器学习的路径跟踪智能控制方法的研究。

5) 面向用途和任务的高集成度、模块化的通用

无人机动平台机电一体化设计技术的研究;以混合动力为主的电驱动技术、电传动技术,轻量化、高通过性、高机动性的底盘设计技术的研究。

参考文献 (References)

- [1] 陈慧岩,熊光明,龚建伟,等.无人驾驶汽车概论[M].北京:北京理工大学出版社,2014.
CHEN Hui-yan, XIONG Guang-ming, GONG Jian-wei, et al. Introduction to self-driving car [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014. (in Chinese)
- [2] Gage D W. UGV history 101: a brief history of unmanned ground vehicle (UGV) development efforts, ADA422845 [R]. San Diego: Naval Command Control and Ocean Surveillance Center, 1995.
- [3] Carlson J. Analysis of how mobile robots fail in the field [D]. Florida: University of South Florida, 2004.
- [4] Liu X, Dai B. The latest status and development trends of military unmanned ground vehicles [C] // 2013 Chinese Automation Congress. Changsha, Hunan: IEEE, 2013: 533 - 577.
- [5] Toscano M. Department of defense joint robotics program [C] // AeroSense 2000. Orlando, FL, US: SPIE, 2000: 192 - 200.
- [6] Spofford J R, Rimey R D. Description of the UGV/Demo II system [C] // Proceedings of Association for Unmanned Vehicle Systems International Conference. US: AUVSI, 1997: 255 - 264.
- [7] Shoemaker C M, Bornstein J A. Overview of the Demo III UGV program [C] // Robotic and Semi-Robotic Ground Vehicle Technology. US: SPIE, 1998: 202 - 211.
- [8] Krotkov E, Blitch J. The defense advanced research projects agency (DARPA) tactical mobile robotics program [J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(7): 769 - 776.
- [9] Fish S. Overview of UGCV and PerceptOR status [C] // Unmanned Ground Vehicle Technology V. Orlando, Florida: SPIE, 2003: 336 - 339.
- [10] Van Fosson M H, Fish S. Role of robotics in ground combat of the future: UGCV, PreceptOR, and FCS [C] // Unmanned Ground Vehicle Technology III. Orlando, Florida: SPIE, 2001: 323 - 327.
- [11] Fish S. UGVs in future combat systems [C] // Defense and Security Symposium. Orlando, Florida: SPIE, 2004: 288 - 291.
- [12] Jackel L D, Krotkov E, Perschbacher M, et al. The DARPA LAGR program: goals, challenges, methodology, and phase I results [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(11/12): 945 - 973.
- [13] Stentz A, Bares J, Pilarski T, et al. The crusher system for autonomous navigation [C] // AUVSIs Unmanned Systems North America. Las Vegas: Association for Unmanned Vehicle Systems International-Unmanned Systems North America Conference, 2007: 972 - 986.
- [14] 张浩杰. 不确定环境下基于启发式搜索的智能车辆路径规划研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
ZHANG Hao-jie. Research on path planning for intelligent vehicle with heuristic search under uncertain environments [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012. (in Chinese)

- [15] Buehler M , Iagnemma K , Singh S . The 2005 DARPA grand challenge [J]. Springer Tracts in Advanced Robotics , 2007 , 36(5) : 1 - 43.
- [16] The DARPA urban challenge: autonomous vehicles in city traffic [M]. Berlin Heidelberg:Springer International Publishing , 2009.
- [17] Wilson J R . Driving Force: DARPA' s Research efforts lead to advancements in robotics and autonomous navigation [M] // DARPA: 50 years of bridging the cap. US:Faircount LLC Publishing , 2008 : 45 - 57.
- [18] Bagnell J A , Bradley D , Silver D , et al . Learning for autonomous navigation [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine , 2010 , 17(2) : 74 - 84.
- [19] Kerbrat A . Autonomous platform demonstrator 21395 [R]. US: Army Tank Automotive Research Development and Engineering Center , 2010.
- [20] Zych N , Silver D , Stager D , et al . Achieving integrated convoys: cargo unmanned ground vehicle development and experimentation [C] // SPIE Defense , Security , and Sensing. US:International Society for Optics and Photonics , 2013.
- [21] Theisen B . Autonomous Mobility Applique System (AMAS) , 22434 [R]. US: Army Tank Automotive Research Development and Engineering Center , 2011.
- [22] Satterfield B , Choxi H , Salamon A , et al . Advancing robotics: the urban challenge effect [J]. Journal of Aerospace Computing , Information , and Communication , 2008 , 5(12) : 530 - 542.
- [23] Czapla T , Wrona J . Technology development of military applications of unmanned ground vehicles [M] // Nawrat A , Kus Z . Vision based systems for UAV applications. Germany:Springer International Publishing , 2013 : 293 - 309.
- [24] Raibert M , Blankespoor K , Nelson G , et al . Bigdog , the rough-terrain quadruped robot [C] // Proceedings of the 17th World Congress. Seoul:The International Federation of Automatic Control 2008 : 10823 - 10825.
- [25] Playter R , Buehler M , Raibert M . BigDog [C] // Unmanned Systems Technology VIII. US:International Society for Optics and Photonics , 2006.
- [26] Holste S T , Ciccimaro D A , Dudenhoeffer D D . Increasing the mobility of dismounted marines small unit mobility enhancement technologies: unmanned ground vehicles market survey , ADA513828 [R]. San Diego:Space and Naval Warfare Systems Center Pacific , 2009.
- [27] ELIÁŠ J , RAKÚSOVÁ D . Trends of development in unmanned military motor vehicles [J]. University Review , 2013 , 7(3) : 8 - 14.
- [28] Valois J S , Herman H , Bares J , et al . Remote operation of the Black Knight unmanned ground combat vehicle [C] // SPIE Defense and Security Symposium. US:International Society for Optics and Photonics , 2008.
- [29] Czapla T , Wrona J . Technology development of military applications of unmanned ground vehicles [M] // Nawrat A , Kus Z . Vision based systems for UAV applications. Germany:Springer International Publishing , 2013 : 293 - 309.
- [30] Kilitci S , Buyruk M . An analysis of the best available unmanned ground vehicle in the current market with respect to the requirements of the turkish ministry of national defense ADA555973 [R]. Monterey:Naval Postgraduate School , 2011.
- [31] LaValle S M . Planning algorithms [M]. Cambridge:Cambridge University Press , 2006.
- [32] Kendoul F . Survey of advances in guidance , navigation , and control of unmanned rotorcraft systems [J]. Journal of Field Robotics , 2012 , 29(2) : 315 - 378.
- [33] Kobilarov M , Sukhatme G , Hyams J , et al . People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser [C] // 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando:IEEE , 2006 : 557 - 562.
- [34] Nguyen-Huu P N , Titus J , Tilbury D , et al . Reliability and failure in unmanned ground vehicle (UGV) , GRRC Technical Report 2009-01 [R]. US:GRRC , 2009.
- [35] Appelqvist P , Knuuttila J , Ahtiainen J . Mechatronics design of an unmanned ground vehicle for military applications [J]. Mechatronic Systems Applications , 2011 , 1(3) : 237 - 261.
- [36] Lalonde J F , Vandapel N , Huber D F , et al . Natural terrain classification using three-dimensional lidar data for ground robot mobility [J]. Journal of Field Robotics , 2006 , 23(10) : 839 - 861.
- [37] Rankin A L , Huertas A , Matthies L H . Stereo-vision-based terrain mapping for off-road autonomous navigation [C] // SPIE Defense , Security , and Sensing. US:International Society for Optics and Photonics , 2009.
- [38] Milella A , Reina G , Underwood J . A self-learning framework for statistical ground classification using radar and monocular vision [J]. Journal of Field Robotics , 2014 , 31(4) . doi: 10.1002/rob.21512.
- [39] Stentz A , Kelly A , Rander P , et al . Real-time , multi-perspective perception for unmanned ground vehicles [C] // AUVSI Unmanned Systems Symposium. US:AUVSI , 2003.
- [40] Bagnell J A , Bradley D , Silver D , et al . Learning for autonomous navigation [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine , 2010 , 17(2) : 74 - 84.
- [41] Peynot T , Underwood J , Scheduling S . Towards reliable perception for unmanned ground vehicles in challenging conditions [C] // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. US:IEEE , 2009 : 1170 - 1176.
- [42] Zhao Y , Li J , Li L , et al . Environmental perception and sensor data fusion for unmanned ground vehicle [J]. Mathematical Problems in Engineering , 2013 , 2013(9) : 903951 - 903963.
- [43] Silver D , Stentz A . Monte Carlo localization and registration to prior data for outdoor navigation [C] // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Francisco: IEEE , 2011 : 510 - 517.
- [44] Guo H D . Neural network aided kalman filtering for integrated GPS/INS Navigation System [J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering , 2013 , 11(3) : 1221 - 1226.
- [45] Qian H , An D , Xia Q . IMM-UKF based land-vehicle navigation with low-cost GPS/INS [C] // IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). US: IEEE , 2010 :

- 2031 – 2035.
- [46] Urmson C, Anhalt J, Bagnell D, et al. Autonomous driving in urban environments: boss and the urban challenge [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(8): 425 – 466.
- [47] Montemerlo M, Becker J, Bhat S, et al. Junior: the stanford entry in the urban challenge [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(9): 569 – 597.
- [48] Leonard J, How J, Teller S, et al. A perception-driven autonomous urban vehicle [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(10): 727 – 774.
- [49] Patz B J, Papelis Y, Pillat R, et al. A practical approach to robotic design for the DARPA urban challenge [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(8): 528 – 566.
- [50] Ilyas M, Cho K, Park S, et al. Dependable navigation in GPS denied environment: a multi-sensor fusion technique [C] // 2013 44th International Symposium on Robotics. Seoul: ISR, 2013: 1 – 6.
- [51] Scaramuzza D, Fraundorfer F. Visual odometry (tutorial) [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2011, 18(4): 80 – 92.
- [52] Nourani-Vatani N, Roberts J, Srinivasan M V. Practical visual odometry for car-like vehicles [C] // 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. US: IEEE, 2009: 3551 – 3557.
- [53] Howard A. Real-time stereo visual odometry for autonomous ground vehicles [C] // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. France: IEEE, 2008: 3946 – 3952.
- [54] Perlin V E, Johnson D B, Rohde M M, et al. Fusion of visual odometry and inertial data for enhanced real-time egomotion estimation [C] // SPIE Defense, Security, and Sensing. Prague: International Society for Optics and Photonics, 2011: 80450K–80450K-12.
- [55] Thrun S, Burgard W, Fox D. Probabilistic robotics [M]. Massachusetts: MIT press, 2005.
- [56] Chekhlov D, Pupilli M, Mayol-Cuevas W, et al. Real-time and robust monocular SLAM using predictive multi-resolution descriptors [M] // Bebis G, Molineros J, Theisel H, et al. Advances in visual computing. Berlin Heidelberg: Springer International Publishing, 2006: 276 – 285.
- [57] Thrun S, Liu Y, Koller D, et al. Simultaneous localization and mapping with sparse extended information filters [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(7/8): 693 – 716.
- [58] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(1): 34 – 46.
- [59] Durrant-Whyte H, Bailey T. Simultaneous localization and mapping: part I [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(2): 99 – 110.
- [60] Bailey T, Durrant-Whyte H. Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006, 13(3): 108 – 117.
- [61] Moosmann F, Stiller C. Velodyne slam [C] // 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Spain: IEEE, 2011: 393 – 398.
- [62] Cho K, Baeg S H, Park S. Natural terrain detection and SLAM using LIDAR for an UGV [M] // Lee S, Yoon K J, Lee J. Frontiers of intelligent autonomous systems. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 263 – 275.
- [63] Tamjidi A, Ye C. A pose estimation method for unmanned ground vehicles in GPS denied environments [C] // SPIE defense, Security, and Sensing. USA: International Society for Optics and Photonics, 2012: 83871K-83871K-12.
- [64] Su K J, Dong Z D, Huang Z. Novel SLAM algorithm for UGVs based on unscented Kalman filtering [C] // 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE). Zhangjiajie: IEEE, 2012.
- [65] Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation [M]. Massachusetts: MIT press, 2005.
- [66] Petti S, Fraichard T. Safe motion planning in dynamic environments [C] // 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton: IEEE, 2005: 2210 – 2215.
- [67] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 1997, 4(1): 23 – 33.
- [68] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(7): 760 – 772.
- [69] Cowlagi R V, Tsiotras P. Hierarchical motion planning with dynamical feasibility guarantees for mobile robotic vehicles [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(2): 379 – 395.
- [70] Ferguson D, Howard T M, Likhachev M. Motion planning in urban environments [J]. *Journal of Field Robotics*, 2008, 25(11/12): 939 – 960.
- [71] Dubins L E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents [J]. *American Journal of Mathematics*, 1957, 79(3): 497 – 516.
- [72] Reeds J, Shepp L. Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards [J]. *Pacific Journal of Mathematics*, 1990, 145(2): 367 – 393.
- [73] Pivtoraiko M, Kelly A. Kinodynamic motion planning with state lattice motion primitives [C] // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Francisco: IEEE, 2011: 2172 – 2179.
- [74] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs [J]. *Numerische mathematik*, 1959, 1(1): 269 – 271.
- [75] Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, 4(2): 100 – 107.
- [76] Stentz A. The focussed D* algorithm for real-time replanning [C] // 1995 International Joint Conferences on Artificial Intelligence. Montreal: IJCAI, 1995, 95: 1652 – 1659.
- [77] Likhachev M, Ferguson D I, Gordon G J, et al. Anytime dynamic A*: an anytime, re-planning algorithm [C] // 2005 Interna-

- tional Conference on Automated Planning and Scheduling. Monterey: ICAPS, 2005: 262 – 271.
- [78] Likhachev M, Ferguson D. Planning long dynamically feasible maneuvers for autonomous vehicles [J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(8): 933 – 945.
- [79] Komoriya K, Tanie K. Trajectory design and control of a wheel-type mobile robot using B-spline curve [C]//The Autonomous Mobile Robots and Its Applications, IROS89. Tsukuba: IEEE, 1989: 398 – 405.
- [80] Takahashi A, Hongo T, Ninomiya Y, et al. Local path planning and motion control for Agv in positioning [C]//The Autonomous Mobile Robots and Its Applications, IROS89. Tsukuba: IEEE, 1989: 392 – 397.
- [81] Kanayama Y, Hartman B I. Smooth local path planning for autonomous vehicles [M]//Cox I J, Wilfong G T, Lozano-Perez T. Autonomous robot vehicles. New York: Springer, 1990: 62 – 67.
- [82] Kelly A, Nagy B. Reactive nonholonomic trajectory generation via parametric optimal control [J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(7 – 8): 583 – 601.
- [83] Delsart V, Fraichard T, Martinez L. Real-time trajectory generation for car-like vehicles navigating dynamic environments [C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe: IEEE, 2009: 3401 – 3406.
- [84] Kuwata Y, Fiore G A, Teo J, et al. Motion planning for urban driving using RRT [C]//2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. France: IEEE, 2008: 1681 – 1686.
- [85] Karaman S, Walter M R, Perez A, et al. Anytime motion planning using the RRT* [C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE, 2011: 1478 – 1483.
- [86] Giesbrecht J. Global path planning for unmanned ground vehicles, ADA436274 [R]. US: Defence Research And Development Suffield (Alberta), 2004.
- [87] Chen Q Y, Sun Z P, Liu D X, et al. Local path planning for an unmanned ground vehicle based on SVM [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9(246). doi: 10.5772/54130.
- [88] Leonard J, How J, Teller S, et al. A perception driven autonomous urban vehicle [J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(10): 727 – 774.
- [89] Bacha A, Bauman C, Faruque R, et al. Odin: Team victortango's entry in the DARPA Urban Challenge [J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(8): 467 – 492.
- [90] Coulter R C. Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm, ADA255524 [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, the Robotics Institute, 1992.
- [91] Kelly A. A feed-forward control approach to the local navigation problem for autonomous vehicles [M]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, the Robotics Institute, 1994.
- [92] Urmson C, Ragusa C, Ray D, et al. A robust approach to high speed navigation for unrehearsed desert terrain [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(8): 467 – 508.
- [93] Thrun S, Montemerlo M, Dahlkamp H, et al. Stanley: the robot that won the DARPA grand challenge [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9): 661 – 692.
- [94] Snider J M. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking, CMU-RI-TR-09-08 [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, the Robotics Institute, 2009.
- [95] Kriyakirana K, Gerdes J C. Using the centre of percussion to design a steering controller for an autonomous race car [J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(S1): 33 – 51.
- [96] Ziegler J, Bender P, Schreiber M, et al. Making bertha drive—an autonomous journey on a historic route [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2014, 6(2): 8 – 20.
- [97] Divelbiss A W, Wen J T. Trajectory tracking control of a car-trailer system [J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1997, 5(3): 269 – 278.
- [98] Levinson J, Askeland J, Becker J, et al. Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms [C]//2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Spain: IEEE, 2011: 163 – 168.
- [99] Falcone P, Borrelli F, Asgari J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 566 – 580.
- [100] Yoon Y, Shin J, Kim H J, et al. Model-predictive active steering and obstacle avoidance for autonomous ground vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(7): 741 – 750.
- [101] Geiger A, Lauer M, Moosmann F, et al. Team AnnieWAY's entry to the 2011 grand cooperative driving challenge [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(3): 1008 – 1017.
- [102] Tran T H, Nguyen M T, Kwok N M, et al. Sliding Mode-PID approach for robust low-level control of a UGV [C]//2006 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Shanghai: IEEE, 2006: 672 – 677.
- [103] Ma Y, Xiang C, Zhu Q, et al. Design of fuzzy enhanced hierarchical motion stabilizing controller of unmanned ground vehicle in three dimensional space [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2011, 4(6): 1168 – 1178.
- [104] Xu X, He H G. Neural-network-based learning control for the high-speed path tracking of unmanned ground vehicles [C]//Proceedings of the International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002. Beijing: IEEE, 2002: 1652 – 1656.