

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.11.004

自主车辆发展概况及关键技术

黄岩, 吴军, 刘春明, 李兆斌

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了更有效地开发新型自主车辆, 对自主车辆发展概况及关键技术进行研究。简述了自主车辆的相关概念及其优缺点, 详细介绍了当前国内外无人自主车辆的研究发展现状, 分析了自主车辆的结构组成, 并分别阐述了环境感知、定位导航、规划决策、控制体系和交通仿真五大模块的关键技术, 最后提出了自主车辆未来的发展趋势及需要努力的方向。

关键词: 自主车辆; 环境感知; 控制; 规划决策; 交通仿真; 发展

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Overview and Key Technologies of Autonomous Vehicles

Huang Yan, Wu Jun, Liu Chunming, Li Zhaobin

(School of Mechatronics Engineering & Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to effectively develop the autonomous vehicle, this paper studies the development situation and key technology of autonomous vehicles. We introduced the related concepts of autonomous ground vehicle and their advantages and disadvantages. We also offered the details about the research and development of autonomous vehicles in the world and analyzed the structure and composition of autonomous vehicles. What's more, we described the five key technology modules: environmental perception, positioning navigation, planning decision-making, control systems and traffic simulation. At last, we point out the future development of autonomous vehicles and the way for us to go forward.

Keywords: autonomous vehicle; environmental perception; control; planning decision-making; traffic simulation; development

0 引言

随着社会的不断发展, 人们对交通工具的要求越来越高, 新军事变革对车辆的影响也愈发突出, 智能自主车辆应运而生。自主地面车辆 (Autonomous Ground Vehicle, AGV), 是指具有环境感知和自主导航能力的地面运载工具^[1-2]。它以车载的主控计算机为核心, 利用车载传感器来感知周围环境, 获得道路及障碍信息, 以自主决策、规划路径, 自动控制车辆的速度和方向, 使其能够安全、可靠地在道路上行驶。相对于有人驾驶车辆, 自主车辆具有使车辆行为规范化、减少了因驾驶员精神和体力的原因而引起的交通事故、提高了环境的感知能力、提高了反应时间等优点。智能自主车辆体现了车辆工程、人工智能、自动控制、计算机等多学科领域理论技术的交叉与综合, 是未来车辆发展的趋势。故对其发展概况及关键技术进行研究。

1 国内外自主车辆技术发展现状

1.1 国外自主车发展状况

西方发达国家对于无人车方面的研究起步较早, 20世纪60年代, 美国Ohio大学的一些研究工

作者开始进行汽车侧向跟踪控制和纵向跟踪控制研究^[3-4], 该项研究持续二十多年, 取得了一系列研究成果。在20世纪80年代, 美国就提出自主地面车辆计划, AGV样车于1989年问世, 在较平坦的越野环境中以10 km/h的速度行驶了20多千米。著名大学如卡耐基-梅隆大学、斯坦福大学、麻省理工学院^[5]等都先后于20世纪80年代开始研究无人驾驶车辆。美国国防部下属的联合机器人项目 (Joint Robotics Projects) 从1990至今统一协调和管理各军种的无人地面车辆项目和计划。在自主车方面最具代表性的是Demo III系统, 该系统直接针对越野环境, 在感知、智能控制与决策、人机接口、建模、仿真和试验等方面取得了一定进展。但由于技术上的局限性和预期目标过于复杂, 到20世纪80年代末90年代初, 各国都将研究重点逐步转向问题相对简单的民用车辆的辅助驾驶项目上。1995年, 由卡耐基-梅隆大学研制的无人驾驶车辆Navlab2V^[6-8], 完成了长达5 000 km穿越美国东西部的自动驾驶试验。整个行程约96%以上的路程是自动驾驶的, 平均车速达50~60 km/h。这次试验中的Nablab2V只是进行了方向控制 (速度由人控

收稿日期: 2010-06-10; 修回日期: 2010-07-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90820302)

作者简介: 黄岩 (1984-), 男, 河北人, 在读硕士, 正连, 从事智能驾驶行为仿真与学习技术研究。

制), 但这已经让人鼓舞了。美国国防高级项目计划署 (DARPA) 是以关键技术为牵引实现地面车辆自主化的另一个强有力支持者。21 世纪后, DARPA 分别启动了以解决环境感知问题为主的 PerceptOR (Perception for Off-Road Robotics) 项目^[9]; 以提高机器人学习能力和适应能力的 LAGR (Learning Applied to Ground Robots) 项目; 以提高无人车辆的机动性和通过能力的 UPI (Unmanned PerceptOR Integrated) 项目。2005 年, DARPA 沙漠挑战赛上, 来自斯坦福大学的 Stanley 无人自主车^[10]经过 7 个半小时的长途跋涉完成了全程障碍赛获得冠军。在赛道上, 无人驾驶车辆需要穿越沙漠、通过黑暗的隧道、越过泥泞的河床并需要在崎岖险峻的山道上行驶, 整个行程无人驾驶车辆需要绕过无数个障碍。2 年之后的城市无人车大赛^[11-15], 在经 7 个小时总共 100 km 的 3 种路段的比赛后, 综合考虑车辆在行使过程中的安全性, 路线选择的效率以及其它因素最后判定, 卡内基-梅隆大学的 Tartan 车队获此殊荣^[16-17], 斯坦福大学的 Junior 屈居亚军^[18]。

德国慕尼黑国防大学与德国奔驰汽车公司合作从 1990 年开始研制无人自主车辆。已先后开发出 VaMoRs 和 VaMoRs-P 两种实验车^[19]。1987 年, VaMoRs 在高速公路上创下当时无人驾驶的最高速度 96 km/h。该系统采用机器视觉实现车辆的横向和纵向控制, 并安装了 UBM 视觉系统, 具有极高的稳定性。VaMoRs-P 无人自主车采用的是双焦距的视觉系统, 不同焦距的摄像机跟踪各自目标、分工协作。通过广角摄像机实现道路检测, 同时利用具有高分辨率的短角摄像机来实现障碍物检测。1992 年, 德国 Dornier 公司以戴姆勒奔驰 300GD 越野车为平台研制了世界上的第一辆可自主行驶的越野车。由德国联邦国防部和联邦国防技术与采购局共同制订的智能机动无人系统计划 (PRIMUS) 是德国目前正在实施的最重要的地面无人车辆项目, 该项目以数字化“鼬鼠” II 装甲车为试验平台。目标是开发通用的功能模块, 以根据不同的任务选择相应的基本功能模块组成各种优化系统。

意大利的帕尔玛大学 (University of Parma) 研制了只利用摄像机作为导航传感器的 ARGO 无人自主车^[20]。其开发的 GOLD 视觉导航系统能够完成高速公路的视觉导航, 利用一台黑白摄像机进行道路检测, 同时使用立体视觉来检测道路前方的障碍物。1999 年, 该车进行了长达 1 000 余公里的自主驾驶试验, 最高车速达到了 112 km/h。

日本 20 世纪 90 年代初也开始了无人自主车辆的研究^[21], 丰田汽车公司在 2000 年开发出无人驾驶公共汽车。这套公共汽车自动驾驶系统主要由道路诱导、车队行驶、追尾防止和运行管理等方面组成。安装在车辆底盘前部的磁气传感器将根据埋在道路中间的永久性磁石进行导向, 控制车辆行驶方向。

自主车辆的研究在欧洲已经初具成效, 并已经成立了统一的合作组织。其中, 欧盟的代表性研究项目包括第五框架的 CyberCars 和 CyberMove 项目、第六框架的 CyberCars-2 项目等^[22-23], 经过几年的研究, 已经获得了初步成功, 部分系统已投入实际运行。2006 年 5 月, 欧洲大陆举办了第一届军方背景的自主地面车辆试验赛 (ELROB)^[24], 来自德、法、英、葡萄牙和瑞士 5 国的大学和公司组成的共 20 个队伍参加了该比赛。比赛全程穿越 240 km 的沙漠。此比赛对欧洲无人自主车辆的发展起到了重大促进作用。2007 年和 2008 年在瑞士的 Ticino 和德国的汉堡分别举行, 第二和第三次比赛, 2009 年将在波兰举行第四次比赛。

1.2 国内自主车辆发展状况

我国的自主车辆研究还处在初级阶段, 20 世纪 80 年代才开始相关方面的研究, 整体研究水平与西方发达国家还有一定差距, 但到目前为止已经取得了可喜的成果。

国防科技大学从 20 世纪 80 年代就开始了自主车辆的相关研究。1989 年, 在国防科技大学诞生了我国首辆智能小车, 该车长 1 m、宽 0.6 m、重 175 kg, 有 3 个轮子, 前轮为转向轮, 后轮为 2 个驱动轮。这台最早的自主车包含了自动驾驶仪、环境感知系统、定位系统、路径规划及运动控制系统, 还有通信、车体结构及配电系统。1991 年, 国防科技大学又成功研制了我国真正意义上的第一辆无人驾驶汽车。该车以一辆面包车为车体, 搭载了由计算机及其配套的检测传感器和控制系统组成的自动驾驶系统, 可使用计算机进行自动驾驶。2000 年, 该大学研制的以 BJ2020 为车体的第四代自主车辆 CITAVT-IV^[25-26]实现了高速公路的车道跟踪实验, 其最高速度达到了 75.6 km/h, 创下了当时国内的最高纪录。之后学校和中国第一汽车集团公司联合研发了红旗 CA7460 自动驾驶轿车。该车搭载了 2 台摄像机提供视觉导航, 对道路环境、障碍物进行判断识别, 自动调整, 不需要进行人为操控, 而且全部设备均在车内, 外观与其他轿车无异。与电子巡航、GPS 导航不同的是, 其定位更加精确, 转弯和遇到复杂情况也不需要人来控制。该车自主

研发的环境感知系统可以识别出道路状况,测量前方车辆的距离和相对速度;车载主控计算机和自主研发的路径规划软件根据视觉信息、车辆前方情况以及自身的行驶状态,决策继续前进还是换道准备超车;自动驾驶控制系统按照规划的路径优化车辆各个动力学参数,控制方向盘、油门和刹车控制器发出动作指令,操纵汽车按规划的路径行驶。红旗 CA7460 自主轿车在正常交通情况下,实现了 130 km/h 的稳定速度在高速公路上自动驾驶,其最高时速达到了 170 km/h,这项成果标志着我国的自主车辆技术以达到了国际先进水平^[27]。

2003 年,清华大学智能系统实验室研制的 THMR-V 无人自主车^[28]进行了白线跟踪实验,最高时速达到 150 km/h。该车由道奇厢式车为车体,搭载了彩色摄像机、GPS、磁罗盘和光码盘等设备来实现环境感知和定位导航,由 2 台计算机来完成视觉处理、信息融合、规划决策等功能。THMR-V 无人车具有同时面向高速公路和一般道路的功能,设计高速公路车速为 80 km/h、一般公路车速为 20 km/h,目前已经可以在校园的非结构化道路环境下,进行自动驾驶^[29-34]。

吉林大学从 90 年代也开始了自主车辆的研究^[35],到目前为止也取得了不错的成绩。其较为先进的是 JLUIV-3、JLUIV-4,前者可以自主地按照道路标识行进,后者已经达到了在区域交通平稳可靠的行驶^[36]。

1995 年研制出成功的“7B8 系统”^[37]是由清华大学、北京理工大学、南京理工大学等 5 所高校联合研制的,其设计目标是进行核化区的侦察任务,车辆采用国产跃进轻型货车改装,车上集成了一维彩色摄像机,三维激光雷达、陀螺、惯导定位、超声等传感器,直线跟踪速度达到 20 km/h,避障速度达 5~10 km/h。

另外,国内一些高校和科研单位也进行了积极探索并取得了一定的成果。如西安交通大学智能车辆研究所的高速图像处理及基于多传感器的汽车主动安全技术、北京理工大学的军用猛士自动驾驶技术等。2009 年 6 月,由国家自然科学基金委主办、西安交大承办的首届中国“智能车未来挑战”大赛在西安拉开战幕,来自国内外的 7 所高校的自主车同台竞技,展示了我国目前自主车辆最前沿的科技魅力。

2 自主车辆关键技术研究

自主地面车辆包括许多相关技术和子系统,图 1 为系统组成示意图。其中,电源、人机接口、通

讯、系统监测/维护和运动机构是地面车辆的基本组成部分,而决定车辆自主能力的是环境感知、规划决策、定位导航、控制体系和交通仿真子系统,它们决定了车辆的自主水平。



图 1 自主车构成框图

2.1 环境感知技术

自主车辆的环境感知在于获得行驶环境,包括道路、车辆、障碍物、行人等,为车辆的自动驾驶提供有效的信息。主要有主动型和被动型两种传感技术。主动型传感器是接受自身发出的感知信号,如毫米波、超声波、多普勒、雷达激光雷达等。其特点是测量直接,数据处理能力要求不高,对气候依赖性小,但传感器之间容易产生干扰。目前流行的计算机视觉技术属于被动型传感器技术^[38-40],一般有多台摄像机组成,通过求解对应点和视差得出物体表面与立体成像系统的距离。通过视觉采样就不会产生主动型传感器干扰的问题,可以获得精细的环境信息,但气候的影响非常大,并且图像采集的信息量也是巨大的,增加了计算机的运算负担,在早期很难做到实时性。随着计算机能力的提升以及图像处理的优化算法的发展,这个问题已逐步得到解决。

2.2 定位导航技术

定位导航是用来确定自主车辆的行驶位置和航向,其包括相对定位和绝对定位两种方式。相对定位由光码盘、惯性陀螺、里程计、加速度计等传感器实现,不用依赖外界信号,工作频率高,但存在漂移误差,长时间工作时必须采用绝对定位数据进行修正。绝对定位包括磁罗盘、GPS^[41]等。磁罗盘能够根据地磁场测量车辆的绝对航向,但容易受到电力线、钢结构等外界磁干扰。GPS 是目前一种广泛应用、成熟完善的定位技术,普通 GPS 的定位精度为 10 m,采用差分技术可以将精度提高到 0.5 m,但 GPS 定位技术依赖于卫星信号的接收,容易受到建筑物、山地产生的干扰,无线电波也会对 GPS 信号产生干扰,即使在良好环境中,GPS 也会周期性的失效。针对 2 种定位技术的优缺点,自主车辆的定位一般同时采用两种方式,以精确地测量车辆的位置、航向。军用车辆目前多采用惯性导航系统(INS,由陀螺和加速度计组成)和 GPS 的组合定

位方式, 其中 GPS 对惯性导航系统进行修正。

2.3 规划决策技术

随着自主车辆的不断发展, 规划决策渐渐成为了自主车智能化水平的一个重要体现。车辆的规划任务主要是路径的规划, 其分为 2 类: 一是全局规划, 根据先验环境模型找出从起始点到目标点的符合一定性能的可行或最优路径。在此领域已有许多成熟的方法, 主要方法有构型空间法^[42] (其中较成熟的方法有: 有可视图法^[43]、切线图法^[44]和 Voronoi 图法^[45])、拓扑法^[46]、栅格法^[47]、自由空间法^[48]、单元分解法^[49]等; 二是局部规划, 侧重考虑车辆探知的当前局部环境信息, 具有较好的实时性和避碰能力。局部路径规划的主要方法有人工势场法^[50]、模糊逻辑算法^[51]、神经网络方法^[52]、遗传算法^[53]、滚动窗口法^[54]等。

自主车辆的行为决策主要是根据环境(如交通、车况等)完成行为任务的决策。在此基础上根据一定的准则和策略对车辆做出最优决策, 达到规划、加减速、超车、跟随及停车等功能的优化选择^[55]。目前行为决策的方法主要分为仲裁式与命令融合式, 各有优缺点。融合式方法对计算资源的需求较高, 而仲裁式则难以适应复杂环境存在不可预测情况下的行为决策。由于智能化程度高, 系统行为决策成为制约系统发展、急需解决的关键瓶颈。

2.4 控制体系技术

自主车辆的控制系统是整个车辆实施控制的方法与策略。一个优化的控制系统结构是保证驾驶实时性和自主性的基本要求。目前, 控制体系结构主要有功能分解型和行为分解型和混合式体系结构^[56]。功能分解型结构是按照“感知—建模—规划—执行”的分级模式来实现自主车的导航控制^[57], 如图 2。其优点在于各个子系统界限分明、井然有序, 方便高级智能的实现。缺点是在信息处理过程中会有较大延迟; 系统构建初期难度较大; 模块间串联方式可靠性差, 容易导致系统瘫痪。该结构最具代表性的自主车是 Shakey^[58]。

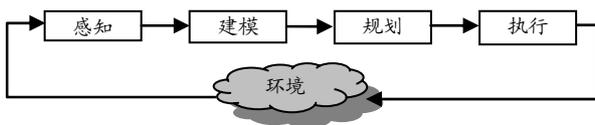


图 2 功能分解型

行为分解型结构^[59]的导航控制是按照“感知—执行”的行为模式来实现的, 如图 3。其优点在于系统可以对未知障碍和环境的变化及时做出反应,

具有灵活的环境交互能力和实时特性。但是现有的传感器技术很难使得实时性的优点体现出来, 并且这种结构很难产生复杂的智能行为。最具代表性的是 Brooks 的包容式体系结构^[59], 清华大学的 THMR-III 就是采用的这种结构^[60]。

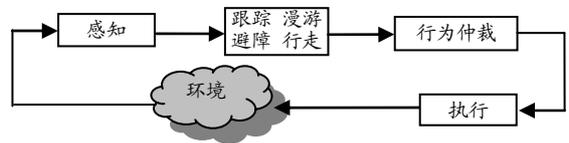


图 3 行为分解型

为了弥补不足, Gat 提出了用“规划—感知—执行”的模式来描述混合式体系结构^[61]。在混合结构中, 规划不仅包括任务和路径规划, 还包含所有的慎思(如性能监督)和全局环境模型的构建。目前, 混合式体系结构已成为移动机器人体系结构研究的重要发展趋势, 并在未知环境下移动机器人导航中得到应用。具有代表性的有 AuRA^[62]、3T^[63]、Saphira^[64]等。

2.5 智能交通仿真技术

表 1 高速公路仿真模型

表 1 高速公路仿真模型		
微观模型	INTRAS	以网络理论为基础, 是统计的微观仿真模型, 对特等车辆, 以时间经行模拟, 完整再现交通及控制。
	FRESIM	按照结构化设计对 INTRAS 模型的改进, 可以仿真复杂的告诉公路几何模型, 如换车道、砸到汇入等行为。
	CARSIM	基于 INTRAS 模型之上, 提供了可以表现高速公路上车辆停车再启动等过程的额外模拟功能。
	WEAVSIM	基于 INTRAS 模型之上, 可以模拟交织区内细致的动态交通流。
宏观模型	FREESIM	随机性模型, 其用来模拟跟驰和换车道的一系列算法是建立在对信号标志反应基础上的。
	FREQ	用来估算特定高速公路上有限进口控制和一般进口控制, 但路线选择策略过于简单。
	FREFLO	用流体理论描述高速路上的交通流, 但不能很好的模拟拥挤条件下的交通流。
	KRONOS	用一些简单连续模型表现交通流, 能够模拟受干扰的交通流, 如换车道、合流、分流、交织、阻塞等车流。
	CORQ	高速公路仿真和交通分配的宏观模型。主要是模拟不同时间的高峰需求, 结合动态交通分配技术估算通行能力等。其把交通流近似成流体, 可以模拟自由流和拥挤情况, 把行程时间按照简单的阶梯函数来计算。

一个完善的自动驾驶系统不仅要有良好的硬件基础, 同时也要有好的软件仿真, 细致的智能交通仿真可以让自主车辆的测试工作达到事半功倍的效果。目前主要的仿真系统是针对城市交通和高速公路 2 个方面, 而对于结构化偏重的高速公路体系来说, 是当前自主车应用发展的主要方向。

高速公路仿真模型也可分为 2 大类(见表 1), 其中微观模型包括 INTRAS (Integrated Traffic

simulation) [65]、FRESIM[66]、CARSIM[67]、WEAVSIM[68]、FREESIM[69]，宏观模型包括 FREQ、FREFLO、KRON OS、CORQ(Corridor Queuing)[70]。

3 未来发展方向

由于众多领域对自动驾驶车辆有着强烈的需求，自主车辆已经成为 21 世纪车辆发展的必然方向，而各国竞相发展自主车技术的需求，无外乎来自于这两个方面：军事应用和民用领域。

随着国家的发展，各国之间的竞争也越来越激烈，面对环境复杂、危险性极高的战场，以及减少人员伤亡的需求，地面自主车辆成为未来陆军的重要力量。从广义上讲，地面自主车辆，又叫地面无人作战平台就是在地面上行驶的能执行军事任务的军用机器人，代替士兵在高危险环境下完成各种任务，如扫雷、探雷、布雷、排爆、侦察等。这就要求拓展其使用的范围，应用到搜索救援、通信中继、目标指示等方面；提高其实战的应用能力，从模拟的实验平台走向真实战场，证实其潜在的力量；增强交互能力，加强与人、空、海的智能交流；进一步提高自主能力，使得在不能有效通信的危险环境下，像人一样出色的完成任务。从美国军方公布的计划看（见表 2）[71]，达到之一水准还需要十多年的不懈努力。未来战场变化莫测地面无人作战平台对保存有生力量、提高作战效能具有重要意义，成为世界各国未来发展的重要方向。

表 2 美国军用地面自主车辆发展进程

技术领域	搜索任务	运输任务	辅助作战	攻击型杀手
感知 (Perception)	近期	近期	近期	近期
导航 (Navigation)	近期	近期	近期	近期
规划 (Planning)	近期	近期	近期	近期
行为和技能 (Behaviors&Skills)	近期	近期	近期	近期
学习能力/适应能力 (Learning)	近期	近期	近期	近期
人机接口	近期	近期	近期	近期
机动性	近期	近期	近期	近期
通讯	近期	近期	近期	近期
功率/能量	近期	近期	近期	近期
系统可靠性和维护	近期	近期	近期	近期

近期: [白框] 中期(2006~2015): [斜线框] 远期(2016~2025): [点状框]

民用车辆领域由于系统可靠性和立法等原因，自主车辆技术还需要在很长一段时间内处于辅助驾驶和主动安全提醒的方式。但将自主车使用在环境相对的结构化高速公路上，将人们从危险、枯燥的驾驶行为中解脱出来将不再遥远。与高速公路环境相比，城市道路环境更为复杂，对感知和控制提出了更高的要求，但驾驶速度低，面向范围更广泛，应用前景更广泛，而像提高可靠性、车流协调、与

其他交通设备交互等方面将成为重要的研究方向。随着智能交通设施和自主车辆整体水平的提高，车辆的自主化程度将会不断提高。图 4 显示了这一发展趋势和方向。

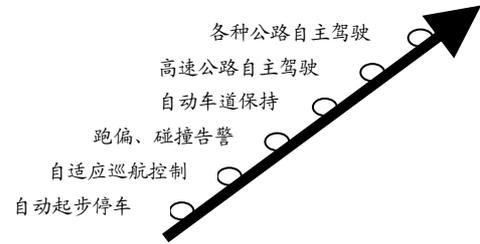


图 4 自动驾驶汽车的发展趋势

4 结论

尽管自主无人车辆的发展前景非常广阔，但是当前仍然有很多困难需要克服。下一步，将继续研究如何提高车辆在非结构化条件下的行驶能力、如何使自主车辆像人类一样决策思考、如何使车辆行驶的又稳又好等。

参考文献:

- [1] Nilsson, N.J. A Mobile Automaton: An Application of Artificial Intelligence Techniques[C]. Proceedings of the First International Joint Conference on Artificial Intelligence, Washington DC, May 1969, 509-520.
- [2] Douglas W. Gage, A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts[J]. Unmanned Systems Magazine, Special Issue on Unmanned Ground Vehicles, Summer 1995(13): 3.
- [3] A.G.Loukianov, S.J.D., W. Hosny and Jan Vittek. A robust automotive controller design[C]. IEEE International Conference on Control Applications, Hartford, CT, USA. 1997: 806-811.
- [4] 李果. 汽车自动控制系统设计与研究[D]. 国防科技大学工学博士学位论文, 1994.
- [5] Team MIT. Technical Report — DARPA Urban Challenge. Technical Report, 2007.
- [6] Pomerlean, Dean A and Jochem, Todd M. A rapidly adaptive machine vision for automated vehicle steering[J]. IEEE Expert: Special issue On intelligent system and their applications, 1996: 19-27.
- [7] Thorpe C. Toward Autonomous Driving: The CMU NavLab Part I-Perception 1991.
- [8] Thorpe C. Toward Autonomous Driving: The CMU NavLab Part II-Architecture and Systems 1991.
- [9] Eric Krotkov, Scott Fish, Larry Jackel, Bill McBride, Mike Perschbacher, Jim Pippine, The DARPA PerceptOR evaluation experiments, 2001.
- [10] Sebastian Thrun, etc. Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge[J]. Journal of Field Robotics. 2006: 6.
- [11] M.Montemerlo, et al, Junior: The Stanford entry in the urban challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008(25): 569-597.

- [12] C.Crane, et al, Team gator nation's autonomous vehicle development for the 2007 DARPA Urban challenge [J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2007(4): 1059-1085.
- [13] J.Hurdus, et al, VictorTango architecture for autonomous navigation in the DARPA urban challenge [J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2008(5): 506-529.
- [14] J.Bohren, et al, Little Ben: The Ben Franklin Racing Team's entry in the 2007 DARPA Urban Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008(25): 598-614.
- [15] C.Reinholtz,et al, Odin: Team Victor Tango's entry in the DARPA Urban Challenge[C]. Springer Tracts in Advanced Robotics, Tiergartenstrasse 17, Heidelberg, D-69121, Germany, 2009: 125-162.
- [16] Chris Urmson, etc. Tartan Racing: A Multi-Modal Approach to the DARPA Urban Challenge[J]. Technical Report, 2007.
- [17] Chris Urmson, etc. Autonomous Driving in Urban Environments: Boss and the Urban Challenge[J]. Journal of Field Robotics, 2008.
- [18] Stanford Racing Team. Stanford's Robotic Vehicle "Junior:" Interim Report[J]. Technical Report. 2007.
- [19] E.D.Dickmanns and Muller, Scene Recognition and Navigation Capabilities for Lane Changes and Turns in Vision-Based Vehicle Guidance[J], Control Engineering Practice, 4(5): 589-599.
- [20] Alberto Broggi, The ARGO Autonomous Vehicle's Vision and Control Systems[J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 1999, 3(4): 409-441.
- [21] 立明. 日本未来多功能无人地面车[J]. 国外坦克, 2004(8).
- [22] Yang Ming, Parent Michel, Cybernetic technologies for cars in Chinese cities[R]. In Proceedings of CityTrans China 2004, Vov. 17-18, 2001.4, Shanghai, China.
- [23] Parent Michel, New technologies for sustainable urban transportation in Europe[R]. In Proceedings of 4th Asia Pacific conference on transportation and the environment, November 8-10, 2005, Xi'an, China.
- [24] www.rts.uni-hannover.de/images/b/b3/ELROB_Technical Paper_RTS_University_of_Hannover.pdf
- [25] 安向京. 自动驾驶汽车视觉导航系统研究—理论、方法和系统实现, 国防科技大学工学博士学位论文[D]. 2001.
- [26] 孙振平, 安向京, 贺汉根. CITAVT-IV视觉导航的自主车[J]. 机器人, 2002, 24(2).
- [27] 孙振平. 自动驾驶汽车智能控制系统[D]. 国防科技大学工学博士学位论文, 2004.
- [28] 国防科技预研重点项目《临场感遥控系统技术报告》[R]. 清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室, 1998.
- [29] 何克忠. 智能移动机器人技术研究[J]. 机器人技术与应用, 1996(2): 11-13.
- [30] He K Z. Sun H H. Guo M H. Wang H, Research of Intelligent Mobile Robot[J]. In:Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology. Shanghai, China: 191996: 503-507.
- [31] 于元隆, 樊铁锟, 何克忠, 等. 移动机器人 THMR-V 遥控系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2003(25).
- [32] 樊铁锟, 丁冬花, 何克忠, 等. THMR-V 视觉临场感遥控系统的设计与实现[J]. 计算机工程与应用, 2003(04).
- [33] 张军宇, 何克忠. 移动机器人 THMR-V 的组合定位系统[J]. 计算机工程与应用, 2001(15).
- [34] 李华, 丁冬花, 何克忠, 等. THMR-V 导航控制算法的研究[J]. 机器人, 2001(6).
- [35] 徐友春, 王荣本, 李兵, 等. 一种机器视觉导航的智能车辆转向控制模型设计[J]. 中国公路学报, 2001(14): 3.
- [36] 王荣本, 张荣辉, 金立生, 等. 区域交通智能车辆导航控制技术[J]. 农业机械学报, 2007(07).
- [37] 欧青立, 何克忠. 室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究[J]. 机器人, 2000, 22(6).
- [38] A.Kelly A. S. Rough terrain autonomous mobility - Part 2: An active vision, predictive control approach[J]. Autonomous Robots, 1998, 5(2): 163-198.
- [39] Massimo Bertozzi, Alberto Broggi. A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection[J]. IEEE Transaction on Image Processing, Jan. 1998: 62-81.
- [40] Dickmanns Ernst Dieter, The Development of Machine Vision for Road Vehicles in the Last Decade[J]. Proceedings of IEEE IVS'2002.
- [41] 徐友春. 智能车辆视觉与 GPS 综合导航方法的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2001.
- [42] 蔡佐军, 孙德宝, 秦元庆, 等. 基于构型空问法的机器人路径规划研究[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(4): 88-90.
- [43] Neus M, Maouche S. Motion planning using the modified visibility graph [C]. Conf on Sys Man and Cybern, Tokyo: IEEE Publish Society, 1999.
- [44] Doyle A B, Jones D I. A tangent based method for robot path planning A [C]. 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation C, San Die go: IEEE Computer Society Press, 1994.
- [45] Takahashi O, Schilling R J. Motion planning in a plane-using generalized voronoi diagrams [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1989, 5(2): 143-150.
- [46] 袁曾任, 高明. 在动态环境中移动机器人导航与避障的一种新方法[J]. 机器人, 2000, 22(2): 81-88.
- [47] 马兆青, 基于栅格方法的移动机器人实时导航避障[J]. 机器人, 1996, 18(6): 344-348.
- [48] Brooks R A. Solving the Find-path problem by good repress-sensation of free space [J], IEEE Trans on Sys Man and Cyber, 1983, 13(3): 190-197.
- [49] Choset H, Acar E, Rizzi A A, et al. Exact Cellular Decompositions in Trams of Critical Points of Morse Functions[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.
- [50] Khatib O, Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots[J]. Robotics Research, 1986, 5(1): 90-98.
- [51] Tu Kuo-Yang. Design of fuzzy potential energy(FPE)for control of a soccer robot[C]. IEEE Int Conf on Networking, Sensing and Control, 2004.

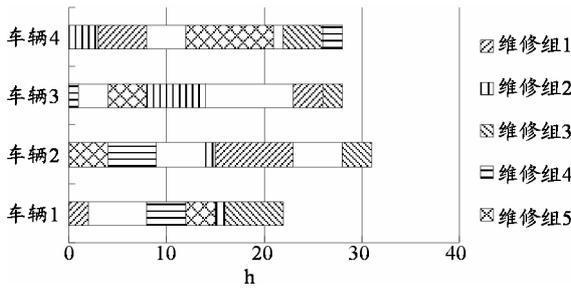


图 1 任务甘特图

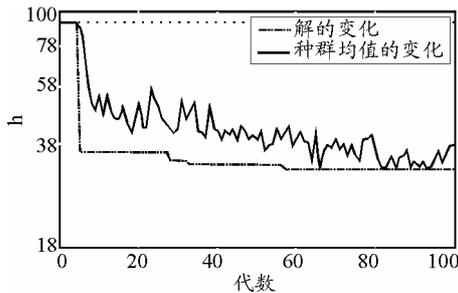


图 2 迭代曲线图

4 结论

示例分析表明，该模型能有效处理装备维修任

(上接第 13 页)

[52] Simon X Yang, Max Meng. An Efficient Neural Network Approach to Dynamic Robot Motion Planning[J]. Neural Networks, 2000, 13(2): 143-148

[53] Lianfang Tian, Curtis Collins. An effective robot trajectory planning method using a genetic algorithm[J]. Mechatronics, 2004(14): 455-470.

[54] 张建英, 刘曦. 基于人工势场法的移动机器人最优路径规划[J]. 航空学报, 2007(28).

[55] Roy B.V. Learning and Value Function Approximation in Complex Decision Processes[D]. PhD. Thesis, MI.T., 1998.

[56] 蔡自兴, 陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 385-390.

[57] R.M.Robin H. K., M.Alisa, et al.. Integrating explicit path planning with reactive control of mobile robots using trulla[J]. Robotics & Autonomous Systems, 1999, 27(4): 225-245.

[58] N.Nilsson. Artificial Intelligence: A New Synthesis[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

[59] Brooks R., et al. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot[J]. IEEE Trans. Robotics and Automation, RA-2(1986), 14-23.

[60] Yang X.He K.Guo M. A Prototype Toward Autonomous Navigation: The THMR-III[C]. In: Proceedings of 1998 International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety—AVCS'98 Amiens·France, 1998.

[61] E.Gat. Integrated planning and reacting in a heterogeneous asynchronous architecture for controlling real world mobile robots[C]. Proc of the AAAI-92, Menlo Park, 1992: 809-815.

务规划问题，验证了遗传算法的可行性和收敛性。但由于遗传编码方式的缺点，遗传算法在求解过程中会产生不可行解，对算法的收敛性产生了很大影响。下一步将对算法进行改进和完善。

参考文献:

[1] Goldberg D. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning[M]. Boston: Addison-Wesley, 1989.

[2] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

[3] 李敏强, 寇纪松, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[4] 李小平. 用定解最优保存遗传算法解决 Job-shop 调度问题的研究[J]. 飞机设计, 2007, 27(3): 19-22.

[5] 彭勇, 田澎, 蒋馥. 不平衡设备流维修与遗传算法设计[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(3): 491-493.

[6] 安晶, 秦珂. 一种基于遗传算法的车间调度算法求解[J]. 盐城工学院学报, 2007, 20(1): 33-36.

[7] 李阳, 武昌, 雷志雄. 装备维修保障信息化建设的若干问题[J]. 四川兵工学报, 2009(4): 113-115.

[62] R.Arkin. An Architecture for Vision Based Robot Navigation[C]. Proceedings of the 1987 DARPA Image Understanding Workshop, Los Angeles, 1987: 417-431.

[63] E.Gat. On Three-Layer Architectures. Artificial Intelligence and Mobile Robots[M]. MIT Press, 1998.

[64] K.Konolige e. a.. The saphira architecture: A design for autonomy[J]. Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence, 1997, 9(1): 215-235.

[65] Fazio J and Roupail N., Conflict Simulation in INTRAS:Application to Weaving Area Capacity Analysis, Transportation Research Record No.1287,Transportation Research Board,Washington DC. 1990.

[66] Halati A,Torres J, Freeway Simulation Model Enhancement and Integration FRESIM Calibration/Validation[C]. Federal Highway Administration, Report No.DTFH61-85- -C-00094, 1990.

[67] Mechanical Simulation Corporation. CarSim 5.14 User Manual. 2002, 9.

[68] Zarean M. and Nemeth. WEAVSIM: A Microscopic simulation model of freeway weaving sections[C]. Transportation Research Record, 1990: 48-54.

[69] K. Rathi, Nemeth. FREESIM:A Microscopic Simulation Model of Freeway Lane Closures[C]. Transportation Research Record 1112, TRB, 986.

[70] 杜晓晖. 高速公路系统的仿真模型及其应用研究[D]. 北京工业大学, 2003(5): 8-13.

[71] Hebert M, Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2002.

[72] 宁俊帅, 李军, 李灏, 等. 军用车辆机动性评估方法[J]. 四川兵工学报, 2009(5): 49-51.