

绪 论

当今世界正经历百年未有之大变局,新一轮科技革命和产业变革方兴未艾,智能汽车已成为全球汽车产业发展的战略方向^[1]。我国在《中国制造 2025》中明确提出,汽车智能化技术将改变传统交通体系结构,改变驾驶人与汽车之间的关系,缓解驾驶人在驾驶过程中单调、烦琐、持久的驾驶负担。智能汽车可以提供更安全、更节能、更环保、更舒适的出行方式和综合解决方案,是城市智能交通系统的重要环节,是构建绿色汽车社会的核心要素^[2]。

在韦氏词典中,“智能的”这一术语被定义为“拥有或表明一种高级的或者满足要求的智能或精神能力”,“智能”是指“学习、理解或者处理新的或者困难的处境的能力”,引入到机械领域中,又被进一步定义为“由计算机引导或控制——尤指利用嵌入式处理器进行自动操作、数据处理或是实现更为广泛的功能”。由此,智能汽车可定义为“自动执行某些方面的驾驶任务,或者帮助驾驶人更有效地发挥驾驶功能的汽车”,其功能有利于提高安全性、效率并减轻对环境的影响^[3]。

智能汽车应具有“智慧”和“能力”两层含义,所谓“智慧”是指汽车能够像人一样智能地感知、综合、判断、推理、决断和记忆;所谓“能力”是指智能汽车能够确保“智慧”的有效执行,可以实施主动控制,并能够进行人机交互与协同。自动驾驶是智慧和能力的有机结合,二者相辅相成,缺一不可^[4]。根据 2020 年 2 月 24 日发改委等 11 部委联合发布的《智能汽车创新发展战略》中的表述:“智能汽车是指通过搭载先进传感器等装置,运用人工智能等新技术,具有自动驾驶功能,逐步成为智能移动空间和应用终端的新一代汽车。”智能汽车通常又称为智能网联汽车、自动驾驶汽车等^[5]。

1.1 智能汽车的基本模块与分级

自动驾驶技术是指人类驾驶员在长期驾驶实践中,对“环境感知—决策与规划—控制与执行”过程的理解、学习和记忆的物化,其框架如图 1-1 所示,其中:

(1) 环境感知:类似于人类驾驶员在驾驶过程中,通过视觉、听觉、触觉等感官系统感知行驶环境和车辆状态,自动驾驶系统通过配置内部传感器和外部传感器获取全方位自身状态及周边环境信息。内部传感器主要包括车辆速度传感器、加速度传感器、轮速传感器、横摆角速度传感器等;主流的外部传感器包括摄像头、激光雷达、毫米波雷达以及定位系统等。不同传感器的量测精度、适用范围都有所不同,为有效利用这些传感器信息,需要利用传感器融合技术将多种传感器在空间和时间上的独立信息、互补信息以及冗余信息按照某种准则组合起来,从而提供对环境综合的准确理解。

(2) 决策与规划模块:决策与规划模块代表了自动驾驶技术的认知层,包括决策和规划两个方面。决策体系定义了各部分之间的相互关系和功能分配,决定了车辆的安全行驶模式;规划部分用以生成安全、实时的无碰撞轨迹。

(3) 车辆控制模块：车辆控制模块用以实现车辆的纵向车距、车速控制和横向车辆位置控制等,是车辆智能化的最终执行机构。

“感知”和“决策与规划”对应于自动驾驶系统的“智慧”；而“车辆控制”则体现了其“能力”。

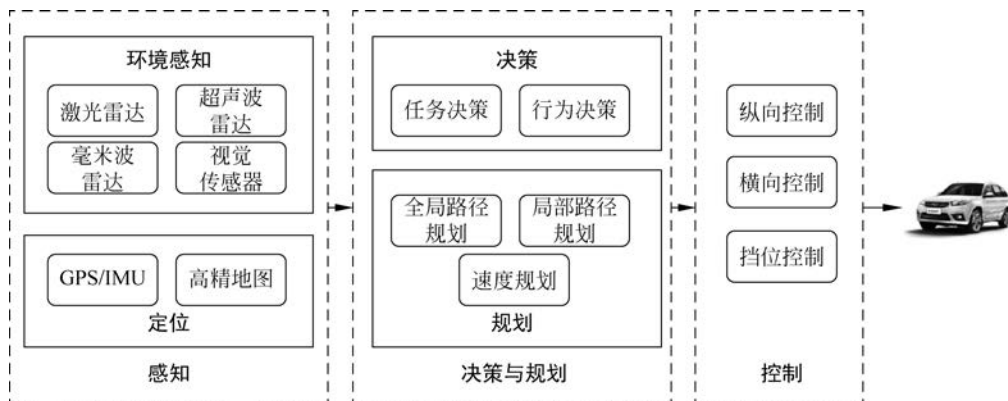


图 1-1 自动驾驶系统的主要模块及其关系

不同的国家或机构,根据智能化水平将智能汽车分为不同等级。表 1-1 为美国高速公路安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)、美国汽车工程师学会(Society of Automotive Engineers, SAE)和中国对智能汽车的分级。《中国制造 2025》将智能汽车分为 DA, PA, HA, FA 四个等级,并划分了各自的界限。其中,DA 指驾驶辅助,包括一项或多项局部自动功能,如 ACC, AEB, ESC 等,并能提供基于网联的智能提醒信息;PA 指部分自动驾驶,在驾驶员短时转移注意力仍可保持控制,失去控制 10s 以上予以提醒,并能提供基于网联的智能引导信息;HA 指高度自动驾驶,在高速公路和市内均可自动驾驶,偶尔需要驾驶员接管,但是有充分的移交时间,并能提供基于网联的智能控制信息;FA 指完全自动驾驶,驾驶权完全移交给车辆。

表 1-1 智能化等级的划分

NHTSA	SAE	中国分级	名称	定义	驾驶操作执行者	环境监控执行者	汽车/驾驶人参与程度
0 级	0 级	—	人工驾驶	完全由驾驶人完成驾驶操作	驾驶人	驾驶人	
1 级	1 级	DA	辅助驾驶	车辆仅能控制横纵向一个	驾驶人+机器	驾驶人	
2 级	2 级	PA	部分自动驾驶	车辆能协同控制转向和驱动/制动	驾驶人+机器	驾驶人+机器	
3 级	3 级	HA	有条件自动驾驶	能实现特定环境下自动驾驶,需要驾驶人随时响应	驾驶人+机器	驾驶人+机器	
4 级	4 级	FA	高度自动驾驶	车辆完成特定环境下的自动驾驶,驾驶人不一定需要响应	机器	机器	
	5 级		完全自动驾驶	车辆完成全工况下的完全自动驾驶	机器	机器	

1.2 国外智能汽车发展历程

在汽车问世不久之后,科研工作者和工程师们便开始着手研究自动驾驶汽车。

1.2.1 从“机”到“电”——无线电遥控汽车

18 世纪末期到 19 世纪初,无线电技术取得了飞速的发展,人们开始尝试利用无线电控制汽车。根据“Unmanned Systems of World Wars I and II”的作者埃弗里特(Everett)的说法,第一辆无人地面车辆是西班牙发明家莱昂纳多·托雷斯·奎韦多(Leonardo Torres-Quevedo)于 1904 年制造的无线电遥控三轮车。在第一次世界大战期间,军队使用了各种小型无线电控制的车辆来运送和引爆火药。

1925 年,发明家 Francis Houdina 展示了一辆用无线电控制的汽车,如图 1-2 所示。该车由一辆“1926 Chandler”改装而成,车辆的后座上安装了无线电接收天线,并配置了一系列小型电动机对汽车进行控制,Houdina 坐在后方的另一辆装有发射器的汽车上发射无线电信号,前方车辆接收信号并生成指令,电动机根据相应指令控制车辆启动、转向、制动、加速等,在没有人控制方向盘的情况下行驶在曼哈顿的街道上。Houdina 将他发明的汽车命名为“美国奇迹”(American Wonder)。根据《纽约时报》当时的报道,这种无线电控制的车辆不仅可以发动引擎,转动齿轮,还能按响喇叭,“就好像一只幽灵的手在方向盘上”。惹得当时的人们惊叹不已。

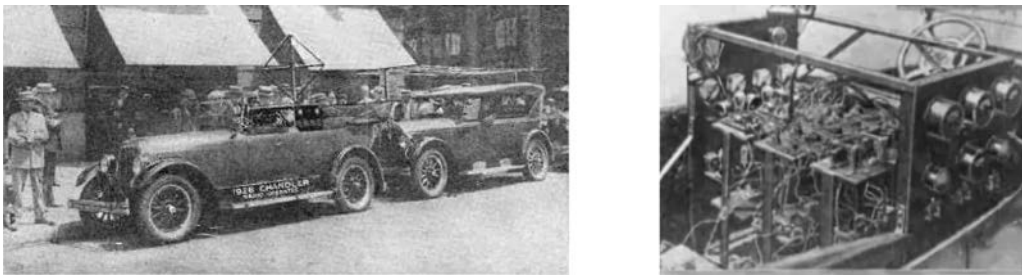


图 1-2 美国奇迹(American Wonder)

无线电控制汽车的发展历程如表 1-2 所示。尽管 Houdina 的无线电遥控汽车并不是真正的自动驾驶,但他的“美国奇迹”给公众留下了深刻的印象,使无人驾驶汽车的魅力日益浓厚,一定程度上推动了无人驾驶汽车的发展。

20 世纪 50 年代,伴随着第二次世界大战后的经济繁荣,多数美国家庭购买了汽车,但是人们在享受汽车带来的出行便利时,其实并不想承担驾驶任务。因此,美国电气照明与动力公司的一个平面广告生动地展现了人们对无人驾驶汽车的设想:一家人面对面坐在车后座上玩多米诺骨牌游戏。配图的文字说明如下:有一天,你的爱车会疾驰在一条电子化超级高速公路上,它的加速和转向全都由嵌入公路里的电子设备自动控制。高速公路将会变得安全可靠:没有拥堵、没有碰撞、没有疲劳驾驶。广告如图 1-3 所示。

表 1-2 无线电控制汽车的发展历程

时间	车名	发明人	国家
1904 年	无线电遥控三轮车	莱昂纳多·托雷斯·奎韦多 (Leonardo Torres-Quevedo)	西班牙
1912 年	战争狗	小约翰·哈蒙德 (John Hammond Jr.) 和本杰明·密斯纳 (Benjamin Miessner)	美国
1920 年	无线电遥控汽车	Raymond E. Vaughn	美国
1925 年	美国奇迹 (American Wonder)	Francis Houdina	美国



图 1-3 无人驾驶汽车设想广告

1958 年,通用汽车公司和美国无线电公司(RCA)的研究团队合作,在一款雪佛兰汽车上组装出一套车辆侦测与引导系统,实现了前后车距保持以及自动转向的功能。其后,由于 20 世纪 70 年代爆发的石油危机和汽车安全事故,汽车油耗和安全等成为亟待解决的问题,因此各汽车公司逐渐放弃了对自动化高速公路的研究。虽然通用汽车和美国无线电公司合作的研究成果最终未能用于无人驾驶,但是电子化高速公路方案中车辆侦测系统的核心理念在今天的智能运输系统(Intelligent Transportation System,ITS)得以体现。

1.2.2 新希望的出现——机器视觉的引入

随着计算机科学技术的迅猛发展,计算机变得更小、更加可靠、功能更强大,它能完成很多复杂的任务,如图像处理、运算等,这为无人驾驶技术的发展创造了条件。

1961 年斯坦福大学的博士候选人詹姆斯·亚当斯制造了一辆“斯坦福推车”,但实验失败。1966—1972 年,美国斯坦福国际研究所(SRI)成功研制了世界上第一个真正可移动和感知的机器人 Shakey,如图 1-4 所示。Shakey 装备了电视摄像机、三角法测距仪、碰撞传感器、驱动电机以及编码器,能够自主进行感知、环境建模、行为规划和控制,这也成为后来机器人和无人驾驶的通用框架。

自动驾驶的理论研究,来自人工智能的创始人之一的约翰·麦卡锡 1969 年发表的一篇文章为“电脑控制汽车”的文章,这篇文章详细描述了与现代自动驾驶汽车类似的想法。麦卡

锡提出：一名“自动司机”可以通过“电视摄像机输入数据，并使用与人类司机相同的视觉输入”来帮助车辆进行道路导航。

1977 年，日本筑波工程研究实验室的 Tsugawa 和他的同事们开发出了第一个基于摄像头来检测导航信息的自动驾驶汽车，如图 1-5 所示。这辆车内配备了两个摄像头，并用模拟计算机技术进行信号处理，在高架轨道的辅助下时速能达到 30km。这是所知最早的开始使用“视觉设备”进行无人驾驶的尝试，由此翻开了无人驾驶的新篇章。



图 1-4 机器人 Shakey



图 1-5 日本的自动驾驶汽车

1.2.3 自动驾驶技术的推进——美国 ALV 计划

最早的自动驾驶尝试来自军事需求。当时，美国 DARPA(美国国防部高级研究计划局)旗下操持着一个“战略计算计划”(Strategic Computing Program, SCP), 计划为期 10 年,DARPA 希望以此从计算机架构、软件以及芯片设计领域的高速发展中获益,并推动 AI 技术达到新的高度。

1984 年,DARPA 与美国陆军合作,发起投资 6 亿美元的自主地面车辆(ALV)计划,作为战略计算机的研究项目之一,并制订了年度计划,如表 1-3 所示^[6]。

表 1-3 自主地面车辆(ALV)计划年度计划

时间	项目内容	目标
1985 年	道路跟踪试验	车辆以 10km/h 的速度在铺好的公路上行驶 2km,只向前行驶,不设置障碍
1986 年	避障试验	车辆以 20km/h 的速度行驶 5km,能识别和避开小于路面宽度的固定障碍物
1987 年	越野路线规划试验	规划车辆行驶路线,并以 5km/h 的速度通过 5km 开阔的沙漠地带
1988 年	公路网路线规划及避障试验	规划车辆行驶路线,并实现以 20km/h 的速度借助路标导航行驶于公路网上,以及完成地图校正和从路边绕过障碍物

1985 年,美国自主地面车辆首辆样车在丹佛西南部的一个秘密工厂被研制出来,如图 1-6 所示。经过试验发现,ALV 的图像处理和计算机技术并不能够满足军用无人地面平台的使用需求。自主地面车辆行进时所需的信息处理量和软件系统的复杂程度过大,使得 ALV“眼睛看不清、脑子反应慢”,机动性能并不理想,最终 ALV 样车只能以 4.8km/h 的速度沿平坦道路自主行驶 0.96km。

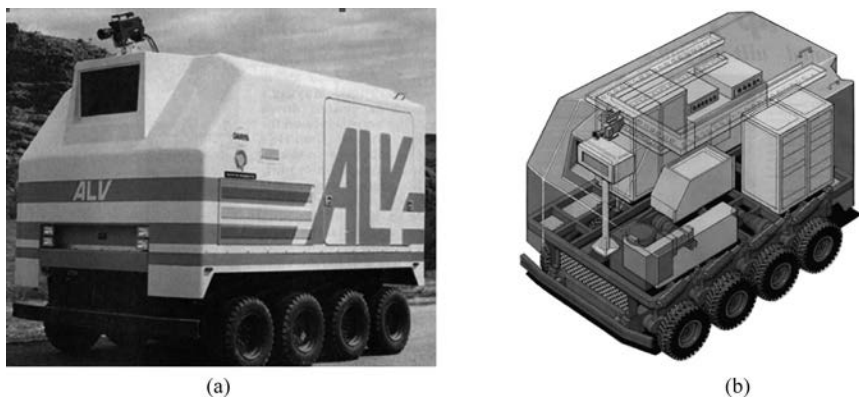


图 1-6 美国自主地面车辆(ALV)首辆样车
(a) 外形; (b) 仪器布置

1988年4月,DARPA正式取消了ALV项目,1989年美国国会削减了对陆军新型装备的研制经费,1990年自主地面车辆计划宣告结束。但是它为后来的无人地面平台研制打下了良好的基础,也积累了不少经验。

1.2.4 从理论转变为现实——CMU 的 NavLab

DARPA资助了一些院校和制造商企业,一系列研究团队开始了无人驾驶技术从无到有的探索之路。其中之一的卡内基·梅隆大学(CMU)负责解决ALV系统复杂的感知和集成问题。为了攻克该技术,卡内基·梅隆大学的研究人员于1984年组建了导航实验室,命名为“NavLab”,专注于复杂环境中的高难度视觉感知问题研究,这也成就了包括卡内基·梅隆大学在内的一些院校和实验室,至今也是无人驾驶技术和人才诞生的摇篮。如图1-7所示为卡内基·梅隆大学研制的第一辆无人驾驶汽车“Terregator”,其创造者Whittaker说:“它像一张滚动的桌子,能够自主识别和驾驶”,其原型是CMU多年来在陆地巡航器Terrestrial Navigator(即“Terregator”)研发积累的基础上对车辆进行外观和架构设计而成,该车有6个轮子,每秒能行驶几厘米。车身配置的一系列传感器,包括声呐环、摄像头,以及一个单线激光雷达测距仪,它们负责对障碍物和环境进行感知。



图 1-7 无人驾驶汽车“Terregator”

1986 年,卡内基·梅隆大学基于拥有电动转向能力的雪佛兰厢式货车,研发了一辆改装的自动驾驶汽车,命名为 NavLab-1,如图 1-8(a)所示,这辆车也是第一辆真正意义的无人驾驶汽车。该车安装了摄像机和激光测距仪,货车内部有一间计算机房,有 20kW 的车载电源,有一台 Wrap 超级计算机、几台 Sun 3 和 4 工作站、陀螺仪、惯性导航系统以及卫星定位系统,此外还有几个英特尔 386 实时处理器,用于处理传感器信息和生成车辆运动指令,如图 1-8(b)所示。因为受到软件的限制,最初最高速度仅为 1.8km/h,直到 20 世纪 80 年代末,才能以 20 英里/小时(32km/h)的最高速度行驶。



图 1-8 CMU 改装的自动驾驶汽车 NavLab-1

(a) NavLab-1 外形; (b) NavLab-1 内部

20 世纪 90 年代初,卡内基·梅隆大学的研究人员 Dean Pomerleau 撰写了一篇基于神经网络让自动驾驶汽车实时从公路获取原始图像并输出方向控制的博士论文。神经网络的方法比其他手动将图像划分为“道路”和“非道路”类别的尝试更加有效,使得自动驾驶技术的理论研究又往前迈了一大步。

1995 年,Pomerleau 和他的同事 Todd Jochem 在公路上试驾了他们的无人驾驶汽车 NavLab-5(图 1-9)从美国东海岸的匹兹堡到西海岸加州的圣迭戈,总计行驶 2797 英里。在这段旅途里,这对伙伴在控制速度的前提下,实现了“不用手驾驶横跨美国”的任务。这是自动驾驶技术第一次从理论转变为实际。



图 1-9 CMU 改装的自动驾驶汽车 NavLab-5

NavLab-11 系统是 NavLab 系列新一代的平台。车辆基于 Wrangler 吉普车改造,车上装有工业级四核计算机,处理各种传感器采集到的信息,并把信息分别送至各个子单元,包括对象检测器、路肩检测器、防撞电子单元、控制子单元等。这款车最高车速为 102km/h。配置的传感器如表 1-4 所示,传感器布置如图 1-10 所示。NavLab-11 最具特色的地方是采用神经网络实现了对道路结构的分析,这为无人驾驶车辆道路识别提供了一种有效的方法。

表 1-4 NavLab-11 系统配置传感器列表

序号	传感器	性能与作用
1	GPS	天宝 AgGPS 114 差分 GPS 智能天线,集高性能 GPS 和 L 波段卫星差分于一体,使用广域增强系统(WAAS)服务,亚米级精度,支持实时 DGPS 操作
2	陀螺仪和光电码盘	采用 Crossbow 的 VG400CA 惯性姿态测量系统,可以实现在动态环境中的全姿态测量
3	时间日期 GPS	基准 bc637CPCI 时间频率处理器为主机系统和外围数据采集系统提供精确的时间和频率参考。时间是通过 GPS 卫星提供的天线/接收器获取的。时间通过 IRIG-B 时间编码信号直接提供给计算机,消除来自外部仪器的串行协议的需要。输出频率为 1510MHz
4	激光扫描器	SICK LMS 221-30206,最大范围 50m,分辨率 10mm,最大扫描角度 180°,角度分辨率 0.5°
5	全景相机	SONY EVI-330 彩色摄像机一台,可全方位转动
6	激光检测装置	卡内基·梅隆大学原始研究使用激光线和 CCD 相机,使用几何限制检测障碍,有效射程达 5m(垂直目标)和视场 60°,距离分辨率约为 1%(取决于距离),角度分辨力为 0.1°

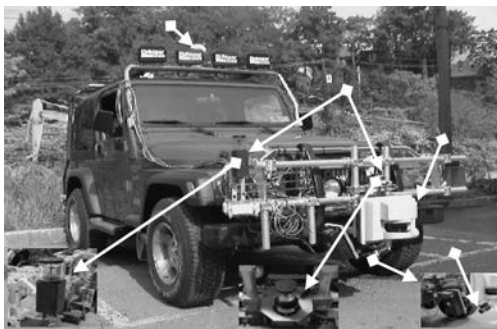


图 1-10 CMU 的 NavLab-11: a robot Jeep wrangler

卡内基·梅隆大学的研究成果对现在的无人驾驶技术提供了非常大的借鉴意义,其研制的智能车辆如表 1-5 所示。

表 1-5 NavLab 研究概况

时间	车名	实验情况
1985 年	Terregator	开展户外自动驾驶测试
1986 年	NavLab-1(基于雪佛兰厢式货车改装)	能自主控制转向实现路径跟踪,非结构化道路中行驶速度为 12km/h,典型结构化道路中行驶速度为 28km/h
1995 年	NavLab-5(基于 1990 款庞蒂亚克 Transport 改装)	车辆横向控制实现了完全自动控制,纵向控制仍由驾驶员完成,在实验场道路上的自主行驶平均速度为 88.5km/h,首次进行横穿美国大陆的长途自动驾驶公路试验,自主行驶里程达 4496km,占总行程 98.1%
2001 年	NavLab-11(基于 Wrangler 吉普车改装)	试验中最高车速达到 102km/h
2004 年	Sandstorm	完成沙漠路段 7 英里完全自动驾驶
2005 年	Highlander	完成沙漠路段 60 英里完全自动驾驶
2007 年	Boss	在城市环境中完成 60 英里的比赛,周边有机器人车和人类驾驶员驾驶的汽车,100%自动驾驶,遵守交通规则、交通标志、通过十字路口等

与此同时,德国也开展了一些卓有成效的研究。20 世纪 80 年代初,德国动态计算机视觉和自动驾驶汽车先驱——联邦国防军大学的恩斯特·迪克曼斯(Ernst Dickmanns)和他的团队利用一辆奔驰面包车改造出了无人驾驶车“VaRoS”,该车配备了 2 个 CCD 摄像头、加速度计以及角度变化等其他传感器,多个 Intel 8086 处理器构成的计算系统和用于控制方向盘、油门和刹车的底层控制执行器,有效解决了由于当时计算机运算速度较慢而无法处理快速变化的视觉街景的问题,使得高速自动驾驶可以实现。1985 年西欧一些国家共同成立了一个旨在推动各国在尖端技术领域合作的开放框架——“尤里卡”(Eureca),1986 年欧洲汽车制造业协会联合众多汽车公司、汽车电子厂商和零部件供应商、研究所和大学合作在尤里卡框架下启动了“Programe for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety”(PROMETHEUS)的智能交通项目,即普罗米修斯计划,该计划旨在推动交通的最高效率和安全性的最大化。1986 年,奔驰公司成立 100 周年,奔驰打算通过普罗米修斯计划启动开发汽车新技术,其中就包括自动驾驶技术。

1986 年 12 月,Dickmanns 在奔驰位于斯图加特的环形试车场里利用 VaRoS 展示了它的动态视觉技术,最高速度 36km/h,如图 1-11 所示。1987 年,改进的 VaRoS(增加了不少 8086 处理器以支持更快的计算速度),在巴伐利亚州丁戈尔芬附近的一条封闭的高速公路上进行了测试,总共行驶了超过 20km,测试车速达到 90km/h,并成功获得欧洲尤里卡普罗米修斯计划的资金资助。1988 年,Dickmanns 为他的 VaRoS 继续增加大量 8086 处理器(实现垂向检测障碍物),在奔驰位于德国巴登-符腾堡州 Rastatt 的试车场,成功地利用单目摄像头进行了障碍物识别和跟踪的测试。



图 1-11 奔驰面包车改装的无人驾驶车“VaRoS”

1994 年 10 月,Dickmanns 的团队改装的 VITA-1 和 VITA-2(图 1-12)在三车道高速公路上以高达 130km/h 的速度行驶了 1000 多千米,成功演示了在自由车道上驾驶、识别交通标志、车队根据车速保持距离驾驶、自动通过左右车道变换等。

1995 年,Dickmanns 团队基于一辆奔驰 W140S,应用第三代动态视觉系统构建了一辆自动驾驶原型车,他们从慕尼黑一路行驶到哥本哈根,自动驾驶行驶里程超过 1600km,最高时速达到了 180km/h。

随后,因戴姆勒等德国厂商的市场定位,这个投入高达 7.49 亿欧元,进行长达 8 年的研究终止。20 世纪 90 年代末,Dickmanns 将眼光转向海外,拿到了美国陆军研究实验室一份为期四年的合约,研究出能掌控更为复杂地形的新一代自动驾驶汽车。并且他的一篇论



图 1-12 VITA-1(a)和 VITA-2(b)

文吸引了 DARPA 的注意,DARPA 决定举办自动驾驶挑战赛。

1998 年,由意大利帕尔马大学视觉实验室 VisLab 在 EUREKA 资助下完成的 ARGO 项目,利用立体视觉系统,通过摄像头来检测周围的环境,通过计算机制定导航路线,进行了 2000km 的长距离试验。其中 94% 路程使用自动驾驶,平均时速为 90km,最高时速 123km。该系统成功证明了利用低成本的硬件和成像系统,依然可以在视觉输入的情况下实现无人驾驶。其试验车如图 1-13 所示,其研究进程如表 1-6 所示。

表 1-6 ARGO 项目研究进展

	时间	实 验 情 况
ARGO 试验车	1998 年	意大利汽车百年行活动中,ARGO 试验车沿意大利高速公路网进行 2000km 长距离道路试验,无人驾驶里程为总里程的 94%,最高车速达到 112km/h
	2010 年	ARGO 试验车沿马可波罗旅行路线全程自动驾驶来到中国上海参加世博会,行程达 15900km,全程采用太阳能作为辅助动力源
	2013 年	车辆在无人驾驶情况下成功识别了交通信号灯、避让行人、驶过十字路口和环岛等



图 1-13 意大利 ARGO 项目试验车

1.2.5 以竞赛促技术发展——美国的 DARPA 挑战赛

为了鼓励自动驾驶技术的发展,2002 年,DARPA 宣布了一项重大挑战:如果有人建造一辆能够在莫哈维沙漠行驶 142 英里的无人驾驶汽车,将获得 100 万美元的奖金。可惜的是 15 个参赛者中没有一个能够完成任务。为了推进无人驾驶技术更快、更好地发展,