

智能驾驶研究的重要进展

蔡自兴

湖南省自兴人工智能研究院，中南大学智能系统与智能软件研究所

内容提要: 本文介绍蔡自兴和贺汉根领导的研究团队在智能车辆驾驶和智能移动机器人领域的研究概况以及取得的主要创新成果和技术方法，为智能驾驶提供一份有价值的参考资料，与同行共享与参考。

关键词: 智能驾驶，移动机器人，感知，建图，目标跟踪，协调。

1. 概况

智能交通是一种新型的交通系统或装置，是人工智能技术与现代交通系统融合的产物，也是人工智能和智能机器人的一个新具有蓬勃发展与广泛应用前景的科技与产业领域。随着国民经济的发展和科学技术的进步，人民群众的生活水平逐渐提高，他们期盼更为便捷和舒适的交通工具；智能交通能够提供这种保障。智能车辆是一个集环境感知、规划决策、跟踪控制、通信协调和多级辅助驾驶等功能于一体的综合系统。它集中运用了计算机、传感器、信息融合、通讯、人工智能及自动控制等技术，是典型的高新技术综合体。智能驾驶车辆能够执行一系列的关键功能，必须知道它的周围发生了什么，它在哪里和它想去哪里，必须具有推理和决策能力从而制定安全的行驶线路，而且必须具有驱动装置来操纵车辆的转向和控制系统^[1-3]。

中南大学蔡自兴、国防科技大学贺汉根和吉林大学陈虹牵头的三校科研合作团队，在蔡自兴教授和贺汉根教授的领导与主持下，自 2003 年以来长期合作，历时 15 年先后进行与完成了多项涉及智能驾驶的国家自然科学基金重点和重大项目以及国防科技基础研究项目，包括国家自然科学基金重点项目“未知环境中移动机器人导航控制理论与方法研究”

（2003-2006）、国家自然科学基金重大专项重点项目“高速公路车辆智能驾驶中的关键科学问题研究”（2009-2012）、国家自然科学基金重大专项《视听觉信息的认知计算》子项目“自动驾驶车辆关键技术与集成验证平台”（2013-2017）、国家自然科学基金面上项目“异质进化算法集成研究”（2012-2015）和“面向动态约束优化问题的进化算法：设计与应用”（2013-2016）、国家国防科学基础研究项目“异质多移动体协同 xxxx 与重构技术基础研究”（2007-2008）以及国防 973 项目“复杂环境 xxxx 自主感知、路径规划基础研究”（2011-2015）等。在进行上述研究过程中，已在国内外发表了上百篇高水平论文，并在此基础上，编著出版了 5 部专著^[4-8]。这些著作作为移动机器人导航控制和智能车辆驾驶提供新的理论和方法，已成为研究智能驾驶不可多得的参考资料，得到广泛参考。

2. 创新成果

这些研究项目取得了如下突出的理论、技术和应用创新成果：

- （1）提出了一种四层递阶式智能导航控制体系结构。
- （2）基于核策略迭代增强学习、多目标进化学习等机器学习理论取得了重要研究进展。
- （4）基于微分平坦理论提出了能满足非完整约束和控制量约束的轨迹生成方法。
- （5）提出了基于进化算法的多移动体协同机制和一种基于改进的免疫算法的协同进化机制，用于障碍环境下的多移动体任务分配和路径规划。
- （6）提出一种基于概率的多移动体协作环境感知的方法。
- （7）提出了一种可重构的多移动机器人通信方法，解决了多机器人网络的故障检测、故障修复和网络重构。

- (8) 提出一种基于有限状态自动机的多移动体动态多目标协作跟踪方法。
- (9) 提出了一种兼顾精度与效率的自适应粒子滤波框架，用于轮式移动机器人故障诊断与补偿。
- (10) 提出一种基于全局抑制视觉注意力模型和一种新的注意力模型的评价机制。
- (11) 建立高可靠性高速公路环境感知模型和速度控制技术。
- (12) 在高速公路上密集的交通车流中实现国内首次安全长距离自动驾驶^[9]。
- (13) 设计与实现了城市环境中的交通信号灯的实时检测和识别算法。
- (14) 设计并开发了多个高级验证演示系统和仿真平台，验证了各项关键技术。
- (15) 参加全国“未来挑战”竞赛和国防无人车大赛，多次获得第一名。
- (16) 编著专著 5 部，系统全面地总结了研究成果，获得国家科学技术学术著作出版基金和中国科学院科学出版基金资助出版，并得到专家高度评价^[10-11]。

3. 主要技术

这些项目主要研究移动机器人和智能车辆驾驶的如下关键技术。

(1) 体系结构技术

提出一种四层递阶式智能导航控制体系结构，具有时间和空间上的多分辨率特点，已成功应用于结构化环境下的高速无人车驾驶系统、中等起伏地形条件下的自主越野车的安全行驶以及未知环境中移动机器人的自主导航。

(2) 感知、定位与建图技术

针对多移动机器人建图和定位的不确定性，提出了一种基于概率的多移动体协作环境感知的方法。采用声纳弧的 RCD 方法描述和处理声纳的不确定信息，引入粒子群优化进行同时定位与建图，并通过多移动体的相对观测量和粒子滤波器相结合进行合作定位，利用栅格相似度的地图融合实现多机器人合作建图。特别是使用视觉传感器，包括激光雷达，进行道路和环境感知，获取环境信息，为车辆定位和地图构建提供保障。

(3) 规划与目标跟踪技术

规划与决策系统可以认为是智能车辆的“大脑”，担任全局与局部路径规划、产生控制策略的任务。路径规划是智能车辆信息感知和车辆控制的桥梁，是智能车辆自动驾驶的基础，可分为全局路径规划和局部路径规划。

提出一种基于有限状态自动机的多移动体动态多目标协作跟踪方法，能有效地实现异质多移动体协同目标跟踪任务。在最大后验概率框架中融入连续标记场的时域信息、颜色信息和每个标记场的空域信息，提高了目标检测的准确度；应用模糊核直方图，减少目标模型内的背景像素的影响和 Bhattacharyya 系数误差，适合于快速目标的跟踪。

针对障碍环境下的多移动体任务分配和路径规划问题，提出了基于进化算法的多移动体协同机制：采用一种新的正交遗传分簇方法进行多移动体的任务规划，实现多移动体对多个目标点的协同探测；提出了一种基于改进的免疫算法的协同进化机制，解决了多移动体的无碰、避障和最小代价的路径规划这一约束优化问题。

(4) 控制、导航与协调技术

对自动驾驶车辆或者辅助驾驶车辆来说，利用环境感知信息进行规划决策后需要对车辆进行控制，比如对路径的自动跟踪，此时性能优良的控制器成为了智能车辆必不可少的部分，成为智能车辆的关键。

基于微分平坦理论提出了能满足非完整约束和控制量约束的轨迹生成方法。提出了滚动时域跟踪控制策略，当有意外的大干扰作用于系统时，控制器能自动降低性能指标使得满足约束，当大干扰消失后，控制器能自动提高性能指标。在非完整控制理论方面，得到了不确定二次曲面上单轮车模型的鲁棒的统一控制律、打滑情形下能同时完成实际镇定和跟踪任务的统一控制律，以及单链式系统有限时间镇定控制律。

在基于核的策略迭代增强学习、多目标进化学习等机器学习理论方面取得了重要研究进展,提高了机器学习求解复杂优化决策问题的效率。提出了基于增强学习的移动机器人控制器设计与自优化框架,成功应用于汽车倒车、移动机器人六轮协调控制等问题。

运用对偶四元代数研究捷联式惯性导航问题,将传统算法中的圆锥、划船和卷轴修正整合到一起,简化了算法结构,降低了计算复杂度。

(5) 通信与重构技术

智能车辆需要与智能交通系统进行信息交互,将各种传感设备获取的数据传输给数据处理中心或其它车辆及基础设施进行分析和处理。通过建立机器人簇结构,维护邻居机器人节点表,提出了一种可重构的多移动机器人通信方法。该模型解决了多机器人网络的故障检测、故障修复和网络重构。新型通信方式体现了分级通信速度快、延时小、参与机器人数量少的特点,并有效地减少路由建立过程中所造成的能量消耗。

(6) 动态建模与车辆状态估计

建立高可靠性高速公路环境感知模型和速度控制技术,建立了面向自动驾驶汽车的高速公路二维局部环境模型,建立了汇入车流安全距离和安全速度与环境感知性能参数间的定量关系。提出了基于道路结构约束的高速公路道路环境综合感知技术,极大地提高了感知结果的可靠性。提出了基于道路宽度约束的转向指令优化方法和基于数值加减速模型的自适应速度调节技术等。

建立基于全局抑制的视觉注意力模型 从视觉皮层抑制现象出发,提出了全新的基于全局抑制视觉注意力模型。在该模型中,提出了频谱尺度空间的概念和一种新的注意力模型的评价机制。

为了对车辆进行有效的控制,必须全面准确地获取车辆的自身状态参数,如车辆横摆角速度估计、汽车轮胎与路面之间的摩擦系数估计、以及车辆侧面碰撞模型的非线性动力学参数的辨识等。

(7) 障碍检测与故障诊断

提出一种近似 Voronoi 边界网络 (AVBN) 的拓扑建模方法,采用生成虚拟障碍的方法,为存在非凸集障碍的复杂环境下边界网络的连通性难题提供了有效的解决方案。

智能化故障诊断技术的关键是基于数据处理方法的故障模式识别理论。针对轮式移动机器人故障诊断与补偿问题,提出了一种自适应粒子滤波框架,将领域依赖的建议分布自适应和领域独立的粒子数目自适应两种机制有机结合起来。为解决粒子滤波器估计精度与效率之间的矛盾提供了一种有效的解决方案。

(8) 交通信号检测与识别技术

交通标志检测算法可根据常见交通标志的颜色和形状差异,从采集的道路环境图像中分割并定位出交通标志。可以根据交通标志的颜色和形状信息,将其从道路环境中分离出来。通过交通标志检测算法可根据常见交通标志的颜色和形状差异,从采集的道路环境图像中分割并定位出交通标志。针对城市和高速公路环境中的交通标志,设计了城市环境中的交通信号灯的实时检测和识别算法,识别率在 91.16%以上。提出针对箭头形交通信号灯的高效识别方法,对城市中常见交通信号灯的识别率达到 92.41%以上,为进一步研究和应用打好基础。

(9) 自动驾驶技术

在高速公路上密集的交通车流中实现国内首次安全长距离自动驾驶,成功完成了我国于 2011 年 7 月首次正常交通状况下长距离高速公路自动驾驶实验。采用红旗 HQ3 自动驾驶轿车为实验平台,从长沙市杨梓冲收费站至武汉西收费站,无人驾驶距离 286 千米,历时 3 小时 22 分钟。实测全程自动驾驶平均速度为 85 千米/小时,全程人工干预距离为 2140 米,是自动驾驶总里程的 0.75%。在实验过程中,红旗 HQ3 无人驾驶平台成功自主超车 67 次,

成功超越车辆 116 辆，被其它非实验车辆超越 148 次。安全完成汇入密集车流 12 次，并在密集的交通车流中安全长距离驾驶，具备正常交通条件下的安全超车和汇入车流功能。

读者能够阅读研究本文参考文献[4-8]中的专著，深入地和有针对性地学习与理解上述相关技术，并用于自己的智能驾驶研究与开发，起到应有的参考与借鉴作用，助推你走上智能驾驶研究与开发之路。此外，这些专著书末所附的数以百计的参考文献，也为广大读者提供了比较全面与新颖的智能驾驶参考资料。

3. 结束语

无论是智能驾驶、自动驾驶车辆或移动机器人，都是智能驾驶的重要研究与应用领域。在国内外人工智能及其产业化发展热潮中，智能驾驶是一个热门领域，并开始取得一些研究与开发成果。多年来我们在该领域的研发成果，可供其他研究与开发人员参考，共同为发展智能驾驶做出积极贡献。我们的研究成果基本上与国际先进水平同步，但也难免存在不足之处，有待于进一步改进与完善；欢迎国内同行专家批评指正。

参考文献

1. 蔡自兴，王勇. 智能系统原理、算法与应用[M]. 北京：机械工业出版社，2014.
2. 贺汉根，孙振平，徐昕. 智能交通条件下车辆自动驾驶技术展望[J]. 中国科学基金，2016, (2): 106-111.
3. 胡国强，陈昌生，熊明洁. 世界智能车辆的关键共性技术研究现状[J]. 轻型汽车技术，2011, (3)(总 259): 3-6.
4. 蔡自兴，贺汉根，陈虹等. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法[M]. 科学出版社，2009.
5. 于金霞，王璐，蔡自兴. 未知环境中移动机器人自定位技术[M]. 电子工业出版社，2011.
6. 蔡自兴，陈白帆，刘丽珏等. 多移动机器人协同原理与技术. 国防工业出版社，2011.
7. Zixing Cai et al. Key Techniques of Navigation Control for Mobile Robots under Unknown Environment[M]. Beijing: China Science Press, 2016.
8. 蔡自兴，李仪，陈虹等. 智能车辆的感知、建图和目标跟踪技术[M]. 科学出版社，2019.
9. 无人驾驶车顺利从长沙至武汉，自主超车 67 次 [EB/OL]. (2011-07-26) <http://news.sohu.com/20110726/n314512981.shtml>.
10. 熊有伦. 移动机器人导航控制研究的重要进展——评专著《未知环境中移动机器人导航控制理论与方法》[J]. 控制理论与应用，2009 年第 7 期，第 192 页；机器人，2009 年第 7 期，第 819 页
11. 谭民. 影响深远的机器人学佳作——蔡自兴教授的机器人学著作述评[J]. 机器人技术与应用，2015 年，第 6 期，第 ? -? 页