

自主车技术¹⁾

韩献光 席裕庚 张钟俊

(上海交通大学自动化研究所, 200030)

摘 要

本文简要介绍了自主车研究工作的进展,详细介绍了自主车研究中的四个关键技术,即传感技术,路径规划、制导技术和运动控制,并对自主车技术的发展作了展望。

关键词 自主车,传感技术,路径规划,制导,运动控制。

一、引 言

自主车 (ALV—Autonomous Land Vehicle) 是指在室内、道路或野外环境中无须人工干预可自主完成行驶任务的车辆。室内无人小车以及军事、核工业、探矿、航天等领域的移动机器人都要采用自主车技术。它已成为智能机器人和 CIMS 领域中均予以高度重视的一项高新技术。

自主车的雏形可追溯到本世纪 60 年代末^[1], 然而其重大进展却发生在 1985 年以后。这一方面是由于计算机、通讯、图象处理等技术的迅速发展为自主车趋于实用化提供了基础, 另一方面则是现代大工业和高技术对自主车的需要日趋迫切。近年来, 许多国家有计划地开展了自主车技术的研究, 有关成功样车及试验结果的报导也陆续出现, 如 Stanford 大学的室内自主小车在立体视觉制导系统引导下能以慢速步行速度行驶^[2], 西德研制的高速公路自主车最高速度可达 96 km/h^[3], 美国 Martin Marietta 公司的自主车 Alvin 可行驶于一般道路, 最高速度达 20 km/h 并具有一定的避障功能^[4], 1987 年美国的 Hughes 人工智能中心还首次成功进行了自主车越野试验^[5]。

自主车涉及到当前高技术领域内的许多先进技术, 其中最主要的是传感技术、路径规划、制导技术和运动控制。本文将在综合国内外文献的基础上, 对上述关键技术的研究现状作一介绍, 并对自主车技术的发展作出展望。

二、传 感 技 术

自主车传感技术用于车体自身以及外部环境信息的检测和处理。车体自身的参数主要为位置和指向, 一般可用计程表、差分计程表、磁罗盘和陀螺等直接检测^[6]。外部环境信息主要为距离和图象, 由于其检测手段复杂, 信息处理方法繁多, 所以本文主要讨论外

本文于 1991 年 10 月 7 日收到。

1) 国家“863”计划资助的课题。

部信息传感器及其信息处理方法。

1. 传感器件

用于测距的传感器件通常分为声学、光学和电磁波三类,它们都属于非接触型测距传感器。

声学测距传感器中较典型的为 Polaroid 超声波传感器^[7],其测距范围为 1—35 英尺,发散角大致为 30° 。声学测距传感器的主要优点是结构简单、价格便宜,但其角精确度差,且存在镜面反射现象。

光学测距传感器的可选范围较大,如 Banner 近红外接近觉传感器的有效距离从几英寸到 6, 7 英尺,可用于检测地面异常和避碰;ERIM 传感器^[7]的最大距离可达 64 英尺,其视场 $80^\circ \times 30^\circ$ (256×64 象素),波宽 0.5° ,速度 2 幅/秒。光学测距传感器的主要优点是很少或没有发散,并对大多数物体无镜面反射现象。但所有激光测距传感器都存在潜在安全问题(首先是人眼安全问题),且不适用于透明物质。

电磁波测距传感器目前很少用于自主车,有一种 VRSS (Vehicle Radar Safety System) 避碰雷达^[7]可用于检测在车辆正前方道路上的物体。

自主车图象传感器件通常为获取视频图象的摄象机。最近密执安环境学院 (ERIM) 研制出了一种光学距离成象传感器,其性能参数已在光学测距传感器中作了介绍。

2. 传感信息处理

由测距传感器得到的传感信息,一般都存在某种程度的不可靠性和不准确性,造成对实物的存在与否作出误判或对其距离的检测产生误差,因此必须首先对原始传感信息进行预处理。通常可采用滤波方法^[8]滤除测量噪声,如在激光测距传感器中设计带通滤波器,在超声波测距传感器中使用数字滤波等。此外,针对多值性问题还可采用启发性判断法^[8]。经以上预处理后的物理传感信息还不能保证完全的可靠性和准确性,这时可用概率方法^[9]、综合多次观测法^[10]、多传感器信息综合等方法作进一步处理。其中,多传感器信息综合已成为当前研究的热点,出现了大量理论研究和实际应用的报导^[11,12],它并不局限于测距传感器,还可包括图象传感器件。文献[11]列举了这类系统的多种结构框架。

视频图象的信息处理,实际上属于图象处理领域中的内容,目前已有大量方法,但它在自主车应用中所面临的最严峻挑战是对方法的实时性要求。目前,利用图象处理技术提取道路边界已使自主车能在道路上成功行驶^[4]。此外,边界提取、图象匹配等技术也已应用在具有一定速度的室内自主车制导系统中^[2]。

三、路 径 规 划

路径规划是自主车的最基本任务之一,它包括三个层次:任务规划、全局路径规划和局部路径规划^[13]。

1. 任务规划

任务规划的目的是根据所提供的任务书确定自主车的执行目标,它并非对所有自主车都是必要的。任务规划一般属于人工智能的应用范畴,其常用方法可见人工智能方面的专著。目前较典型的任务规划系统有:采用消解定理证明器的 STRIPS 系统^[14]、具有

一定学习功能的 PULP-I 系统^[15]、机器人规划专家系统 ROPES^[16] 等。

2. 全局路径规划

全局路径规划实际上就是通常文献中所称的“路径规划”。它是根据先验环境模型,找出从起始点到目的地的符合一定性能指标的可行或最优路径。它涉及的基本问题是世界模型(World Model)表示和搜索策略。

世界模型表示指的是对环境的规范化描述,目前的主要方法有

1) 轮廓空间法。其基本思想是将被规划对象缩小为一点,同时根据对象形状拓展障碍物。为了将其用于路径搜索,有关文献提出了视程图^[17]、空间分割^[18]、圆形表示障碍物^[19]、轮廓空间细分^[20]等多种方法。需要指出的是采用该方法所得到的最短路径通常十分靠近实际障碍物。

2) 自由空间法,即采用预先定义的基本形状(如广义锥^[21]、凸多边形^[22]等)构造自由空间,并将自由空间表示为连通图,进行启发式路径搜索。其算法的时间复杂度往往与障碍物个数成正比。

3) 格子表示法^[23],其基本思想是将室内环境模型或室外地面的数字地图转化为格子或分层格子表示,并定义相应的代价函数,在此基础上进行路径规划。它是室外环境下自主车全局路径规划广泛采用的方法。

4) 其它表示方法,如针对室外不平地面的等高线表示法^[24]、多面模型表示法^[25]等。

全局路径规划中的另一基本问题是搜索策略,目前常用的方法有动态规划和 A* 算法等。

以上是全局路径规划的主要内容,它主要解决的是单个自主车在确定环境下的路径规划问题。近年来,动态环境的路径规划、多机器人的路径规划等也有人涉足^[26,27]。

3. 局部路径规划

局部路径规划实际上可理解为“制导路径规划”,它是根据自主车周围的局部环境模型,实时规划满足一定条件的可行路径。目前所采用的主要方法有

1) 人工势场法^[28,29],其基本思想是建立一种虚拟力,即目标对被规划对象存在吸引力,而障碍物对其有排斥力,根据所建立的空间势场实现局部路径规划。

2) 通道查找法^[30],这是在有效视程圆内,根据当前位置(即圆心)观察得到的阻挡墙,确定墙之间的可行通道,并进而确定局部最优路径。

3) 沿墙搜索法^[31],其原理是将所有障碍物边界都当作墙,并顺着墙搜索路径。

此外,全局路径规划中的格子地图规划法同样也适用于局部路径规划,只需将环境模型和格子都相应地缩小即可。

四、制导技术

文献[32]通俗地解释了制导的概念,一般来说,自主车制导包含了车体定位、制导路径规划和路径执行三个主要功能。

1. 车体定位

自主车的常用车体定位技术有以下几种:

1) 惯性定位^[6], 这是通过累积测量值增量来确定自主车相对于初始时刻位置和指向的过程, 所用的器件有计程表、差分计程表、磁罗盘、陀螺等。目前惯性定位已广泛用于自主车, 但它有一个严重的缺点, 即误差具有累积性, 所以过一段时间必须通过其它定位方式修正一次。

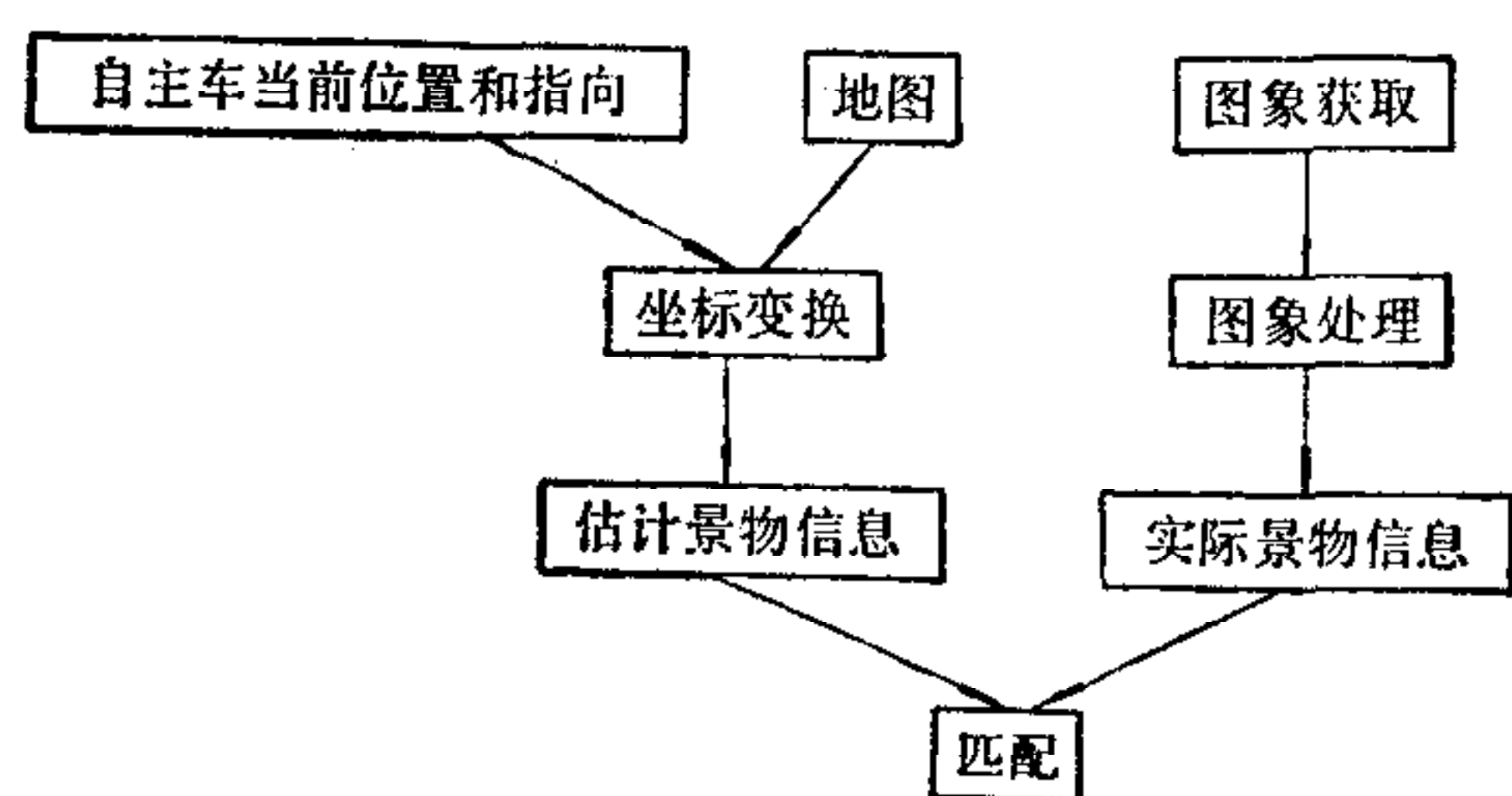


图1 图象匹配过程

2) 地图匹配^[33]. 一个实时地图匹配过程可由图1简单加以说明。

目前, 将地图匹配技术应用于自主车还只做了一些探索性的工作^[2], 但它将是今后车体定位技术中的一个重要方向。

3) 信标 (beacon) 定位, 这是利用光、电磁波信号对自主车定位。目前已有许多实际的信标定位系统^[34], 但光信标定位系统一般受活动空间限制较严, 而无线电接

近觉信标定位系统也只能在预定位置发挥作用。

4) 远距离导航定位, 它是一种利用多对陆基主从发射机的双曲线导航技术。与信标定位相比, 其覆盖区域较大, 但定位精度较差, 如文献[6]所介绍的定位系统精度在 600 英尺数量级上。

5) 卫星定位, 这是利用接收机对经过导航卫星发射的信号进行分析而定位, 如美国海军研制的 Navstar 全球定位系统^[6], 其军用定位精度可达 50 英尺, 民用定位精度不超过 300—500 英尺。卫星定位的一个最大优点是可构成全球定位系统 (GPS)。

2. 制导路径规划

制导路径规划包括局部地图的建立或更新以及基于地图的局部路径规划两部分内容, 后者已在上节讨论过, 所以下面简单地介绍前者。

局部地图的建立或更新是指利用当前传感信息对自主车周围环境建立地图或对该环境原有地图进行修正。它与采用何种传感器密切相关。目前所采用的传感器有超声波测距传感器^[9]、视觉传感器^[2]、激光测距仪^[35]等。

作为制导路径规划的特殊情况, 道路行驶自主车只需确定在其前方一段道路的空间位置, 或在交叉路口选择一个确定的方向, 目前用于完成该功能的基本上为视觉制导系统。

3. 路径执行

路径执行包含路径上的障碍物避碰和路径控制两部分内容。后者实际上可归入下节的运动控制, 前者指的是在路径执行过程中的避障, 它与制导路径规划中的避障(高级避障)是有区别的, 它对实时性有更高的要求。事实上, 它的任务是根据实时检测的传感器信息和车辆状态信息, 确定自主车的加速、减速、转向或保持原方向, 以避免与障碍物相碰, 是直接与指挥车辆运行的命令发生联系的执行过程。

五、运 动 控 制

自主车的运动控制是要解决车辆按规划的路径行进的问题, 与通常把车体简化为质

点或矩形的路径规划、制导等宏观研究截然不同,在运动控制中,自主车本身是作为一个物理实体来看待的,因而势必涉及到车体的结构、运动学及动力学性质。由于它与自主车的具体物理特性密切相关,目前在这方面的研究还不够普遍,但它是实用自主车研究中必须高度重视的问题。

1. 自主车运动学

自主车的行驶机构一般有常规轮、全方向轮和履带轮等,其运动学性质是不同的。

1) 常规轮式自主车运动学。

常规轮式自主车拥有两个行驶自由度,其运动学研究车体运动状态变量间的关系,其中一个基本内容是自主车的位置积算 (dead reckoning),即已知自主车的转向角 δ 和轮子转速 ω (或等价的独立驱动轮的左轮转速 ω_l 和右轮转速 ω_r),要求确定自主车位置和指向的变化量^[36]。此外,借助于自主车运动状态变量间的关系和特定的数学描述,可进行自主车的轨迹规划^[36]。

2) 全方向轮式自主车运动学。

全方向轮式自主车拥有三个行驶自由度,即在转向角和轮子转速外,还增加了横向位移。但由于其控制复杂,实际中并不常用。其运动学建模可参见文献[37]。

3) 履带式自主车运动学。

履带式自主车的转向特点与轮式自主车不同,其转向方式通常有滑移、铰接、曲轨等,其中以滑移转向最为常见。它的位置积算与常规轮式自主车类似。由于履带结构的复杂性,通常在研究其运动时必须作某些简化假设。

2. 自主车动力学

车辆动力学大致包括驱动和制动动力学、车辆振动动力学和转向动力学三部分内容。以常规轮式车辆的简化模型为例,其直线运动的动力学方程为

$$F = R_r + R_a + R_g + \gamma_m ma,$$

其中, F 为总驱动力或制动力, R_r , R_a , R_g 分别为总滚动阻力、空气阻力和上坡阻力, γ_m 为质量因数, $\gamma_m ma$ 为惯性力。

其转向动力学方程在转向角 δ_f , 前后轮侧偏角 α_f 、 α_r 均较小的假设下,可用下列状态方程表示:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{Q}_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} v_y \\ Q_z \end{bmatrix} + b\delta_f,$$

其中 v_y 为横向速度, Q_z 为横摆角速度, A 为 2×2 矩阵, b 为 2×1 向量。

应该说明的是,由于诸多不确定因素的存在,目前车辆动力学方程应用于自主车尚存在着一定困难。

3. 自主车运动控制

自主车运动控制一般包括路径控制和伺服控制两级,其简单原理如图 2 所示。

图中, P_r 、 P_d 分别为参考位置及积算位置, α 、 ω 分别为表示自主车运动状态的转向角和轮子转速。由图 2 可见,这

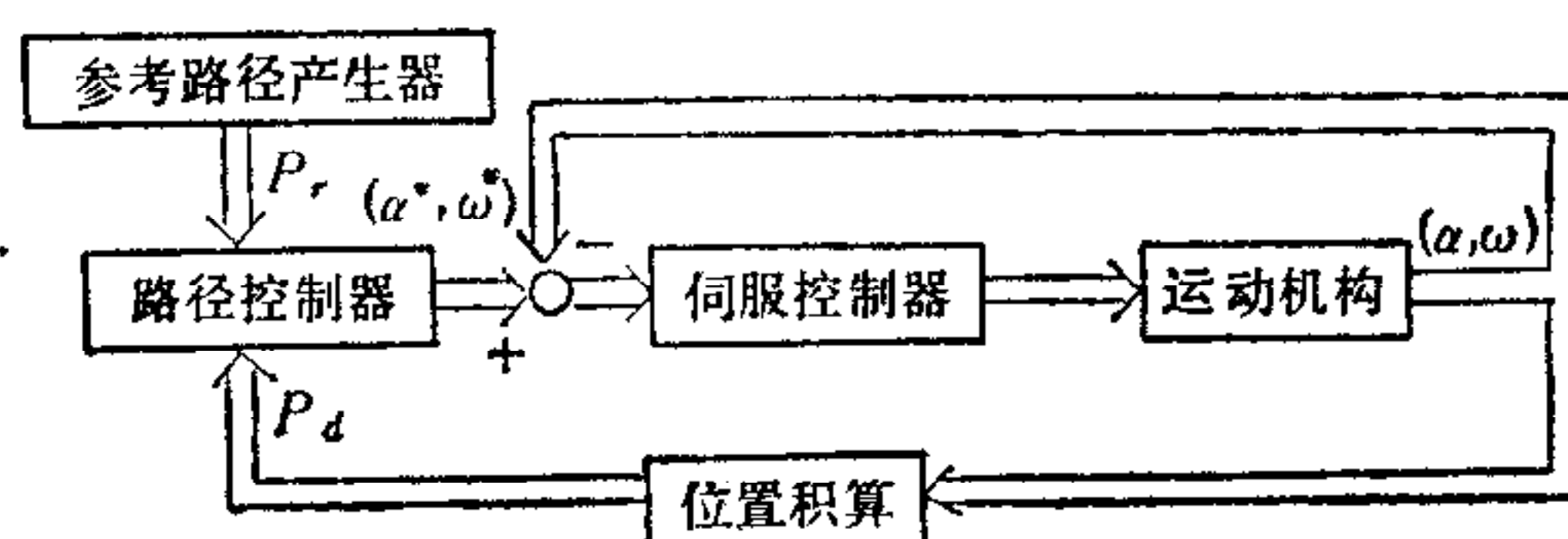


图 2 自主车运动控制

是一种多层控制结构,路径控制器是在伺服控制的基础上,根据实际积算位置与参考位置的差异,实时修正伺服控制级的设定值 α^* 、 ω^* 。

自主车的运动控制通常采用经典的 PID 控制, Nelson^[38] 和 Kanayama^[39] 分别在 Blanche 和 YAMABICO-II 自主小车上采用比例反馈和 PID 反馈设计了路径控制器。此后 Hamami^[40] 在比例反馈算法的基础上又提出了一种非线性反馈控制算法。可以预料,今后对自主车运动学和动力学研究的深入,将会出现更多的新算法。至于在伺服控制级,则通常采用 PID 控制算法^[38,39]。

六、自主车技术的展望

自主车技术是一门综合性很强的高新技术,它涉及到计算机、自动控制、人工智能、力学等广泛学科领域中的许多前沿技术。由于自主车的研制可有力地推动高技术的发展,80 年代以来,它已被列入世界各国的高技术发展计划。如美国国防高级研究计划局(DARPA)的“战略计算与生存能力”工程、日本通产省的“极限环境下作业的机器人”发展计划、欧洲共同体的“尤里卡”计划,以及我国的“863”高技术计划中,都把有害环境如核工厂或战场使用的移动机器人作为重要的研究内容。

目前,自主车的研究虽然已取得了不少理论成果和成功的实验结果,但离开其完全的实用化和智能化还有较大距离,仍有许多基本问题有待于解决,如为自主车研制综合的传感器系统便是一例。从行驶车辆上识别静止和运动的物体要比用静止的摄像系统辨识工件复杂得多,同时对于多传感器的信息综合也有待于研究。这里不仅需要传感器、通讯、计算机的实体支持,而且需要面向实际自主车更深入地开展理论和方法的研究。

作为今后自主车技术的发展方向,作者认为以下三个方面是十分重要且必须予以重视的。

1) 向智能化的发展,即把学习功能和人工智能技术结合到自主车的规划和制导系统中,其主要对象是室内自主小车。

2) 向不平地面发展,这是因为野外环境的自主车具有重大的应用价值,如防核防化机器人、探矿机器人、扫雷机器人等,而在野外不平路面上的自主车研究还相当薄弱。这方面的研究重点将在传感技术和环境描述上。

3) 向多自主车系统发展,因为一个较复杂的任务往往需要多个自主车协调完成,而多自主车的规划、制导等,将因协调的要求而带来一系列新问题。

参 考 文 献

- [1] Nilsson, N. J., Mobile Automation: An Approach of Artificial Intelligence Techniques, Proc. 1th IJCAI, 1969, 509—520.
- [2] Triendl, E., Kriegman, D. J., Stereo Vision and Navigation within Buildings, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 1725—1730.
- [3] Dickmanns, E. D., Zapp, A., Autonomous High Speed Road Vehicle Guidance by Computer Vision, IFAC 10th World Congress, 9(1988), 221—226.
- [4] Turk, M. A. et al., Video Road-following for the Autonomous Land Vehicle, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 273—280.
- [5] Daily, M. et al., Autonomous Cross-country Navigation with the ALV, IEEE Int. Conf. Robotics and

- Automation, 1988, 718—726.
- [6] French, R. L., Historical Overview of Automobile Navigation Technology, IEEE Vehicular Technology Conference, 1986, 350—358.
- [7] Everett, C. H. R., Survey of Collision Avoidance and Ranging Sensors for Mobile Robots, *Robotics and Autonomous Systems*, 5(1989), 1, 5—68.
- [8] Nitzan, D., Three-dimension Vision Structure for Robot Application. *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(1988), 3, 291—309.
- [9] Gex, W. T. et al., Local Free Space Mapping and Path Guidance, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 424—431.
- [10] Kriegman, D. J. et al., A Mobile Robot: Sensing, Planning and Locomotion, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 402—408.
- [11] Luo, R. C., Kay, M. G., Multisensor Integration and Fusion in Intelligent Systems, *IEEE Trans. on Sys., Man and Cybern.*, 19(1989), 5, 901—931.
- [12] 齐继光等, 基于黑板结构的多传感器数据融合系统FS-1, *机器人*, 13(1991), 3, 54—61.
- [13] Keirse, D. M. et al., Multi-level Path Planning for Autonomous Vehicles, Proc. of SPIE on Applications of A. I., 1984, 133—137.
- [14] Fikes, R. E. et al., Strips: A New Approach to the Application of Theorem Proving to Problem Solving. Proc. 2th IJCAI, 1971, 608—620.
- [15] Tangwongsan, S., Fu, K. S., An Application of Learning to Robotic Planning, *Int. Jour. of Computer and Information Science*, 8(1979), 4, 303—333.
- [16] Cai, Zixing, Fu, K.-S., Robot Planning Expert System, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1986, 1973—1978.
- [17] Lozano-Perez, Tomas, Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements, *IEEE Trans. on Sys., Man and Cybern.*, 11(1981), 11, 681—698.
- [18] Wong, E. K., Fu, K. S., A Hierarchical-orthogonal-space Approach to Collision-free Path Planning, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1985, 506—511.
- [19] Moravec, H. P., Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover, Stanford Uni. Tech. Rep., AIM-340, 1980.
- [20] Brooks, R. A. et al., A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation, Proc. 8th IJCAI, 1983, 799—806.
- [21] Brooks, R. A., Solving the Find-path Problem by Good Representation of Free Space, *IEEE Trans. on Sys., Man and Cybern.*, 13(1983), 3, 190—197.
- [22] Chatila, R., Path Planning and Environment Learning in a Mobile Robot System, Proc. of the European Conf. on A. I., 1982.
- [23] Metea, M. B. et al., Route Planning for Intelligent Autonomous Land Vehicles Using Hierarchical Terrain Representation, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 1947—1952.
- [24] Gaw, D. et al., Minimum-time Navigation of an Unmanned Mobile Robot in a 2-1/2-D World with Obstacles, Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1986, 1670—1677.
- [25] Rowe, N. C., Ross, R. S., Optimal Grid-Free Path Planning Across Arbitrarily Contoured Terrain with Anisotropic Friction and Gravity Effects, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(1990), 5, 540—553.
- [26] Kant, K. et al., Planning Collision-free Trajectory in Time-varying Environments: A Two-level Hierarchy, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1988, 1644—1649.
- [27] Yeung, D. Y. et al., A Decentralized Approach to the Motion Planning Problem for Multiple Mobile Robots, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 1779—1784.
- [28] Khatib, O., Real-time Obstacle Avoidance for Manipulator and Mobile Robots, *Robotics Research*, 5(1986), 1, 90—98.
- [29] 金小平等, 移动机器人的动态路径规划及控制, *机器人*, 12(1990), 6, 10—16.
- [30] Chang, T. S. et al., An Obstacle Avoidance Algorithm for an Autonomous Land Vehicle, *Int. Journal of Robotics and Automation*, 2(1987), 1, 21—24.
- [31] Lumelsky, V. et al., A Paradigm for Incorporating Vision in the Robot Navigation Function, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1988, 734—739.
- [32] Leighty, R. D., Terrain Navigation Concepts for Autonomous Vehicles, Proc. of SPIE on Application of A. I., 1984, 120—125.
- [33] Tsubouchi, T. et al., Map Assisted Vision System of Mobile Robots for Reckoning in a Building Environment, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1987, 1978—1984.

- [34] McGillem, C. D. et al., Infra-red Location System for Navigation of Autonomous Vehicles, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1988, 1236—1238.
- [35] Olivier, J. L. et al., A Navigation Algorithm for an Intelligent Vehicle with a Laser Rangefinder, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1986, 1145—1150.
- [36] Steer, B., Trajectory Planning for a Mobile Robot, *Robotics Research*, 8(1989), 5, 3—14.
- [37] Muir, P. F., Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots, *Journal of Robotic Systems*, 4(1987), 2, 281—340.
- [38] Nelson, W. L. et al., Local Path Control for an Autonomous Vehicle, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1988, 1504—1510.
- [39] Kanayama, Y. et al., A Locomotion Control Method for Autonomous Vehicles, IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1988, 1315—1317.
- [40] Hemami, A., et al, A New Control Strategy for Tracking in Mobile Robots and AGV'S, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 1990, 1122—1127.

AUTONOMOUS LAND VEHICLE TECHNOLOGY

HAN XIANGUANG XI YUGENG ZHANG ZHONG UN

(Dept. of Automatic Control, Shanghai Jiaotong University, 200030)

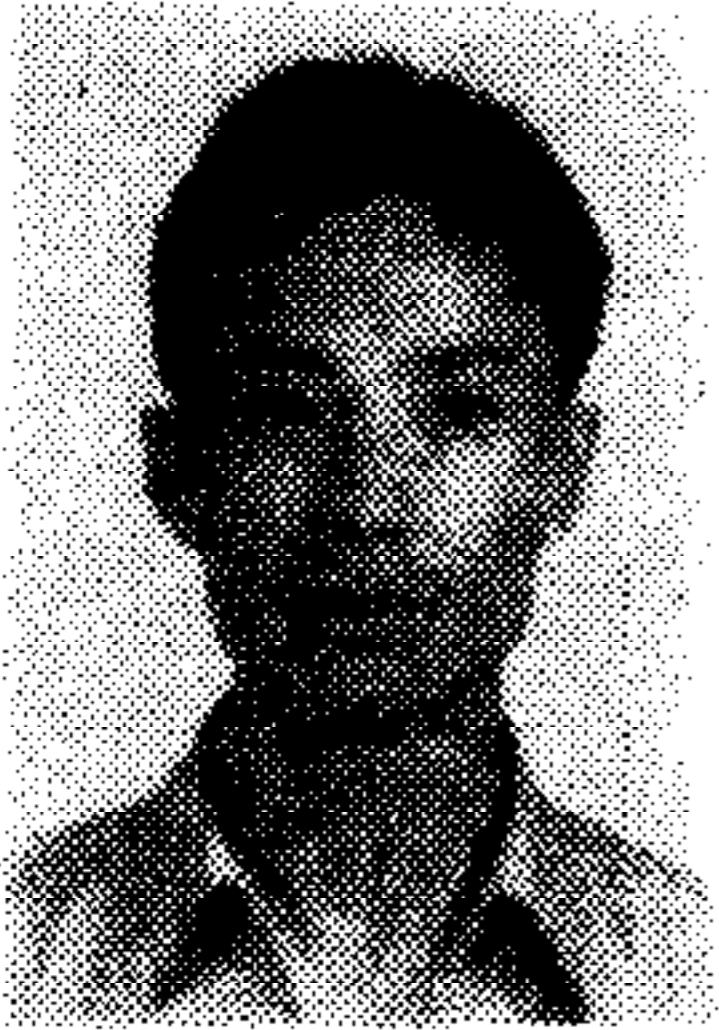
ABSTRACT

This paper gives a brief review of the state of the art of Autonomous Land Vehicle (ALV), and furthermore discusses in detail four major aspects in ALV technology, namely sensing path planning, navigation, and mobile control. Highlight on ALV research is also made in this paper.

Key words : Autonomous land vehicle; sensing; path planning; navigation; mobile control.



韩献光 1965 年出生。1986 年毕业于西北电讯工程学院，1989 年在国防科技大学获硕士学位，现在上海交通大学自控系攻读博士，研究方向为移动机器人。



席裕庚 1946 年出生，上海市人。1968 年毕业于哈尔滨军事工程学院，1984 年在慕尼黑工业大学获德国工学博士学位。现为上海交通大学教授，博士生导师。目前的主要研究方向为复杂工业过程控制和智能机器人。



张钟俊 1915 年生，浙江嘉善县人。1934 年在上海交通大学电气工程系获工学学士学位，1935 年、1938 年在美国麻省理工学院电气工程系获电工硕士、科学博士学位。现任中国科学院学部委员，博士后导师。历任中国自动化学会副理事长，中国系统工程学会副理事长等职。目前的研究方向：工业大系统理论、经济控制论、机器人控制及智能控制等。