

◎ 工程与应用 ◎

室外自主移动机器人 AMOR 的导航技术

杨唐文¹, 韩建达², KUHNERT K D³

YANG Tang-wen¹, HAN Jian-da², KUHNERT K D³

1.北京交通大学 计算机与信息技术学院,北京 100044

2.中国科学院 沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室,沈阳 110016

3.德国锡根大学 电气与计算机科学系,锡根 57068

1.School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2.State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

3.Elektrotechnik und Informatik, Universitaet Siegen, Siegen 57068, Germany

E-mail: twyang@bjtu.edu.cn

YANG Tang-wen, HAN Jian-da, KUHNERT K D. Navigating an autonomous mobile outdoor robot AMOR. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(22): 206-209.

Abstract: Motion planning is a very challenging issue of navigating a mobile outdoor robot, especially when it moves in unstructured environments. In this paper, based on grid maps updated in real time, a fast, suboptimal planning algorithm is proposed to implement collision-free navigation of an autonomous mobile outdoor robot AMOR, who is the winner of autonomous reconnaissance in the 2007 C-ELROB competition. The grid map is established with the obstacle information around the outdoor robot, mainly from the scanning data of a SICK laser finder. A new A* based searching algorithm provides a practically effective solution to the path planning problem. Reliable and safe navigation is achieved, and proved through urban and non-urban tests and competitions.

Key words: autonomous mobile outdoor robots; grid map; path planning; collision-free navigation

摘要:在非结构化环境,移动机器人行驶运动规划和自主导航是非常挑战性的问题。基于实时的动态栅格地图,提出了一个快速的而又实效的轨迹规划算法,实现机器人在室外环境的无碰撞运动导航。AMOR是自主研发的室外运动移动机器人,它在2007年欧洲C-ELROB大赛中赢得了野外自主侦察比赛的冠军。它装备了SICK的激光雷达,用来获取机器人运动前方的障碍物信息,建立实时动态的环境地图。以A*框架为基础的改造算法,能够在众多的路径中快速地找到最佳的安全行驶路径,实现可靠的自主导航。所有的测试和比赛结果表明所提方案是可行的、有效的。

关键词:室外自主移动机器人;栅格地图;路径规划;无碰撞导航

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2008.22.062 **文章编号:**1002-8331(2008)22-0206-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP24

1 引言

自主移动机器人是研究机电、计算机和人工智能等技术的理想平台,集机器人传感、视觉、信息处理和导航为一体。它在计算机的控制下,基于各种信息进行自主决策和学习,实现在复杂环境下的自动导航。它不仅可以在博物馆里完成导游工作,在办公室之间传递物品。作为家庭服务机器人,还能够帮助行动不太方便的老人。应用在军事上,能够在战斗区域执行侦察任务。毫无疑问,移动机器人技术有着非常广阔的应用前景,且吸引了众多的兴趣。开始,移动机器人的研究主要集中在室内环境,现在更多的研究转移到室外移动机器人。一方面是应用需求使然;另一方面是室外移动机器人的研究更有

挑战性。

移动机器人的运动规划和自动导航一直是该领域研究的核心问题。移动机器人在火星、森林、沙漠等环境下工作时,面对一个未知的情形,存在无法预测的各种障碍。在这类复杂的非结构室外环境里,传感系统获得的信息和数据不完整又难处理,这是移动机器人自动导航困难的重要原因。文献[1-3]综述了国内外的一些研究成果,分别讨论了势场法^[4]、栅格法^[5]和遗传进化算法^[6]等全局和局部运动规划方法以及相应导航技术的优缺点。近几年,强化学习^[7]和基于概率方法^[8]在移动机器人运动规划和导航研究中也引起了一些关注。

避开障碍是移动机器人的一个本能的、是实现其自动

基金项目:德国亚历山大·洪堡基金会(the Alexander von Humboldt Foundation);中科院沈阳自动化所机器人学国家重点实验室基金(No.RL200702);北京交通大学科技基金。

作者简介:杨唐文(1971-),男,博士,主要研究领域为机器人、图像处理和人工智能。

收稿日期:2008-01-08 **修回日期:**2008-03-07

导航和在复杂环境下生存的基本要求。移动机器人要实现避障和自动导航,首先要探测环境里的所有障碍信息以及机器人本身所处的位置。这两个任务由移动机器人的传感系统完成。移动机器人常用的传感系统包括摄像机、激光雷达、数字罗盘、全球定位系统、惯性传感器、光码盘、里程计等。视觉一直被认为是人类获得环境大量和主要信息的一种重要途径,如何使移动机器人具有象人一样的视觉功能是一个非常热门的研究领域^[9-12]。然而,处理视觉图像数据需要大量计算,消耗很多的计算资源。现在的计算机还不能够象人的大脑一样快速、精确地提取非常有用的信息,这就限制了计算机视觉的应用。特别对室外移动机器人的视觉信息处理,许多问题都在进一步研究中。其中,提高图像处理速度是需要解决的首要问题,因为在导航应用中在线数据处理直接影响机器人的运动速度。数据处理消耗时间越多,意味其实时应用性越差。纵观近几年的发展及室外机器人大会,激光雷达的应用十分广泛^[13-15]。抛开价格因素外,与它的距离传感器相比,如超声传感器,激光雷达具有更多的优点。首先它的探测距离可以更远,能够发现 80 m 以内的障碍物,能够提供更多的、高分辨率的和稳定的环境数据。而且,这些数据可以直接用于建立二维和三维的环境地形。可见,激光雷达的实时性和在室外环境的适用性比其它的传感器更好。对移动机器人 AMOR,激光雷达是其实现避障和自动导航的主要环境感知工具。

本文重点讨论移动机器人的运动路径规划和导航控制问题,并简要介绍室外移动机器人 AMOR 的系统结构及完成的实验。在结论部分,总结所完成的工作和获得的成果。

2 路径规划和自主导航

势场法在移动机器人的路径规划和导航中广泛应用。其基本思路是将移动机器人的运动视为在环境的虚拟力场中合力作用下的加速度运动。力场的虚拟力来自障碍物对机器人产生的斥力和自目标位置产生的引力。势场法比较适合室内、静态障碍的导航问题。但是,局部最小的缺点限制了它在复杂动态环境下的应用。近年,势场法不断地改正,衍生出不同的版本^[16],但运动振荡,以及不能获得优化轨迹的问题难以解决。既然激光雷达能够获得环境的丰富信息,加上栅格法在运动规划中的实效性,下面基于栅格图来设计 AMOR 的自动导航方案。

2.1 栅格地图

栅格图实质上是移动机器人运动区域的立体地图。运动区域被横线、竖线划分成一系列的单元,每个单元根据获得的障碍信息赋予不同的数值,即移动机器人穿越该单元的障碍所付出的成本。栅格图建立以后,移动机器人的运动规划问题则可以看成是在立体地图上寻找总的穿越成本最低的运动路径过程。建立栅格地图时,栅格单元的空间大小、数量以及成本值需认真加以考虑。因为,前面提到的路径规划问题实质上是一个寻优搜索过程,而栅格单元的定义对搜索算法的影响很大,包括搜索时间和占用的计算资源,直接影响到移动机器人的导航性能。

栅格图描述移动机器人前方运动的复杂环境,它的建立是实现路径规划和导航的基础。下面,用 $G(s,c)$ 描述一幅栅格图。其中, $s \in S$, S 为移动机器人运动状态集合,移动机器人的状态是指它在栅格图上所处单元的空间坐标位置。 c 表示移动机器人从一个状态到另一个状态的穿越成本。每个栅格单元的

穿越成本定义是基于自主移动机器人工作环境的障碍信息,以及考虑移动机器人本身的穿越性能。比如:栅格单元为树木所占据时其成本比灌木丛占据时高,凹凸的地面比平坦的穿越成本要高。有时,栅格单元虽为灌木和石块,但对移动机器人不足以构成障碍时,其穿越成本可定义为零。移动机器人运动过程中,激光雷达不断地对前方环境实施扫描,根据新的环境扫描数据,栅格图上的各单元成本可得到及时更新。

移动机器人规划的核心问题是在众多的可能里寻找一条不会与前方障碍发生碰撞的、成本最低的、最好的通行路径。而获得的路径是否最优与对环境的及时和正确认知以及搜索算法有关。前面提到,移动机器人导航过程中,传感系统获得的环境信息时刻发生变化,比如前方的运动物体或者移动机器人前进方位变化。在这种情况下,建立的栅格地图必须得到实时更新。这就意味着,前面规划的路径在目前形势下就不再一定是最低成本和最优,需要规划新的路径。只有这样,即使在传感系统数据不完整或者不精确的情况下,移动机器人的运动可以得到修正的机会,从而保证它至少能够在次优的路径上运动。在移动机器人进行路径重规划时,如果能有效利用以前的栅格地图信息,可以减少重新规划时间,提高移动机器人的运动速度。

2.2 运动规划

移动机器人路径规划和导航可以看作为基于前面建立的栅格图进行位置序列搜索和动作切换的全过程。第一步,根据移动机器人当前的位置和传感系统获得的障碍物信息,搜索移动机器人的位置转换序列;第二步,根据移动机器人自身状态和路况信息,确定其动作切换序列。如果移动机器人在整个运动过程中每次规划都能获得最优的位置和动作序列,则移动机器人的运动在全局上是最优的。然而实际上,在动态非结构环境下,移动机器人获得全局最优的路径和运动是非常困难的,甚至是不可能的。但在保证局部运动最优的情况下,在全局上获得次优是可能的,也是现实的方案。

下面,提出一个以 A^* 为基础的路径搜索算法,实现室外移动机器人的运动规划。以 A^* 为框架开发的搜索算法得到广泛应用。在某种程度上,它保证移动机器人从某一初始状态 $s_{st} \in S$ 到目标状态 $s_{tg} \in S$ 间获得一条成本最低的最优路径。一般的 A^* 算法占用较多的计算机内存资源,导致较长的搜索时间。为了克服这些问题,也就是说,减少 A^* 算法对内存的占用和路径搜索时间,这里提出一个改进算法。在介绍算法之前,先来定义两个函数。 $g(s_{st},s)$ 为机器人从初始状态到某一状态 $s \in S$ 的路径成本估算函数; $h(s,s_{tg})$ 为机器人从状态 s 到目标状态 s_{tg} 的探索估算(heuristic estimate)函数。这两个函数之和 $f(s)=g(s_{st},s)+h(s,s_{tg})$ 称之为移动机器人从初始到目标状态的路径估算成本。同样的,算法的结果是生成两个状态序列 OPEN 和 CLOSED。OPEN 序列存储移动机器人可能经历的所有状态,CLOSED 序列存储机器人的转换状态序列,即移动机器人的实际运动路径。下面给出了算法的伪代码。

```
//main( )
Begin
    build the graph map  $G(s,c)$ ;
    set the start state  $s_{st}$  and the target state  $s_{tg}$ ;
    insert  $s_{st}$  into OPEN list with value of  $0+h(s_{st},s_{tg})$ 
    SearchShortestPath( );
End
//SearchShortestPath( )
```

```

pop the front state  $s$  from the OPEN list;
if  $s \neq s_{tg}$ 
  get the successors of the state  $s$ ;
  for  $s' \in Succ(s)$ 
    compute the  $g$  value of  $s'$ ;
    if  $s'$  on the OPEN list
      if the new  $g$  value of  $s'$  is bigger than the old one
        continue;
      end if
    end if
  if  $s'$  on the CLOSED list
    if the new  $g$  value of  $s'$  is bigger than the old one
      continue;
    end if
  end if
  compute the  $h$  value of  $s'$ ;
  compute the  $f$  value of  $s'$ ;
  push  $s'$  into the OPEN list
  sort the OPEN list;
end for
push  $s$  into the CLOSED list;
end if

```

根据前面的介绍,算法在静态栅格图里能够快速找到一条最短、最优的路径。可是,室外移动机器人运动的环境是动态变化的,传感信息也是变化的,有时甚至是不确定的。因此,前面的算法必须做相应的拓展和改进,以适应动态环境路径规划的需要。文献[17,18]提出了几个对 A^* 算法框架的改进方案。在这些方案里,无一例外地利用新栅格地图更新原有的运动路径。为了避免非连续的运动切换($0, \pi/4, \pi/2$),文献[18]还提出线性插值的平滑技术,也进一步讨论了非均匀栅格地图的规划和重规划问题。这里,使用均匀栅格地图,对栅格单元的空间大小和数量进行了精心的设计。一方面,避免占用过多的计算资源和减少规划时间;另一方面,实现有效的、在线的局部路径规划问题。与其它方案不同的是,这里提出的改进方案不一定寻求绝对的、最短、最优的路径,但保证在找到的运动路径上没有任何障碍物,是一条非常安全的路径。否则,重新进行运动路径规划。在重规划过程里,利用前面的栅格信息,减少规划时间和计算资源消耗,是考虑的重要因素。

激光雷达是室外移动机器人 AMOR 装备的主要传感系统之一。它设计为在各种气象条件下均能正常工作,通过它获得前方 180° 视野范围的所有障碍信息,包括障碍与移动机器人的距离和所在的方位。如前所述,利用激光雷达数据建立和更新栅格地图,通过搜索算法可以找到移动机器人的最佳运动路径。同时,综合惯性传感器、数字罗盘等传感系统信息,确定移动机器人部件的各种动作,即方向盘操作、档位、油门和刹车等。在移动机器人运动时,基于实时传感数据,不断更新 OPEN 状态序列里仅受影响的状态成本,重新搜索机器人的最佳路径。下面描述了室外移动机器人 AMOR 的运动规划和导航的整体方案。利用这个方案,在一个动态的非结构环境里,室外移动机器人 AMOR 可以避免与环境障碍发生碰撞,实现安全的自动导航。

```

//main( )
Begin
  initialize AMOR;

```

```

set the start position  $s_{st}$  and the target position  $s_{tg}$ ;
do
{
  LocalPathPlanning( );
  VehicleActions( );
}while(current position  $s \neq s_{tg}$ )
stop vehicle;
End
//LocalPathPlanning( )
update the grid map  $G(s,c)$  with new sensing data;
SearchShortestPath( );
//SearchShortestPath( )
update and re-order the changing states of OPEN list with new costs;
get CLOSED list;
if CLOSED paths not cross obstacles
  search for the cheapest path;
end if

```

3 室外自主移动机器人 AMOR

AMOR,如图1所示,是德国 Siegen 大学实时学习系统研究所开发的一台室外自主移动机器人系统。该系统旨在用于研究和探索自主移动机器人系统在室外非结构环境、各种气象条件下的自动导航技术,以及相关的计算机、人工智能和机电技术等。



图1 室外自主移动机器人 AMOR

AMOR 由一辆 Yamaha YFM400 四轮野外运动摩托车改造而得,适合在森林、丘陵等室外环境各种复杂路况下的驾驶。车辆采用一个四冲程 90cc 引擎,动力强大,最快行驶速度可达 150 km/h。车辆的点火、方向盘操纵、刹车、挂档和油门经改造后,均由计算机实现自动控制。目前,机器人装备的传感器系统包括激光雷达、数字罗盘、里程计、编码器、惯性传感器、温度传感器、摄像机和 GPS 等。这些传感器件满足 AMOR 对周围环境探测和本身各种状态感知的需要,帮助它实现避障和自主导航。

AMOR 的操纵方式有两种:一是利用遥控器的手动操纵;另外是完全由计算机控制的自动操纵。其中,计算机控制下的操纵又分两类情况,即车载计算机的自主控制和基于无线网的遥计算机控制。遥计算机控制主要在系统开发和程序设计阶段采用。在系统功能和程序运行稳定后,相关程序代码就可转移到车载计算机,由它实现 AMOR 的自动导航控制。整个室外移动机器人系统是一个实时控制系统,快速、可靠的数据通讯是十分重要的。图2给出了 AMOR 的整个数据通讯模块。一方面,它充分利用计算机串、并口的数据交换功能,将激光雷达、温度、惯性、数字罗盘和里程计等传感系统数据传递给车载计算机;另一方面,同时将决策系统产生的动作指令传递给各个微控制器单元,由执行机构完成移动机器人的各种动作,从而实现自动驾驶。

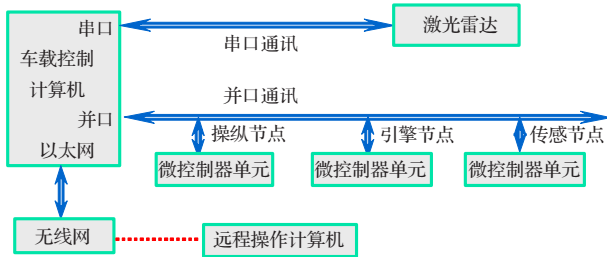


图2 AMOR的数据通讯模块

下面,简单介绍一下激光雷达数据和CAN总线数据通讯的特点。激光雷达数据以电报的方式经串口与计算机实现通讯,数据量比较大。传输波特率低时,易引起数据交换的滞后,在进行数据采集和处理时需要格外的小心。CAN总线是分布式的控制域网,所有的外围器件皆可挂在该总线上。这里,AMOR的数字罗盘、超声传感器、惯性传感系统、里程计等设备通过传感节点联结到CAN总线上,引擎点火和温度测量以及方向盘操纵、刹车、油门和挂档控制则分别通过引擎节点和操纵节点在CAN总线完成数据交换。CAN总线的实时性、可靠性和灵活性使得它在分布式控制系统领域大有用武之地。

4 测试实验

为了验证所提出的运动规划和导航方案,AMOR在Siegen大学Hoelderlinstr.3校区进行了一系列测试实验,并参加了欧洲C-ELROB竞赛。测试实验的场地包括地砖、草坪等坑坑洼洼的路面和小树林环境,见图3。AMOR先通过移动机器人实验室外的通道(图3右上),来到一块草坪,再经过一个下坡道,进入一片小树林(图3左下)。通道类似一个动态的室内环境,不断有行人经过,草坪周围有一些低矮的灌木丛,坡道是一个大约45°的下坡道,小树林里则有一些间隔相距2m左右、15~20cm粗的树木。在白天和晚上均进行了一系列的测试。在测试过程中,AMOR能够在两建筑之间的通道中心行驶,避开经过或者观看测试的行人,能够自动地切换档位,进行速度控制,实施刹车动作,避免碰撞树木。在行驶过程中,AMOR能够发现并按照安全的路线行驶。所有的测试结果,表明提出的运动规划和导航方案是非常有效的,AMOR已具备初步的自主导航能力。2007年8月13~16日,AMOR在瑞士Monte Ceneri举办的欧洲C-ELROB2007竞赛上一举夺得室外自主侦察赛道比赛的冠军,进一步说明整个系统的功能是稳定的,所运行的规划和导航算法是经得起考验的。

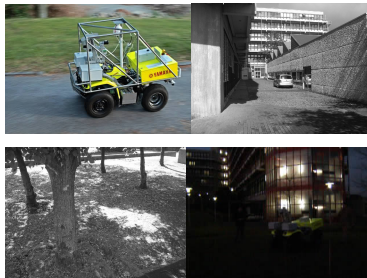


图3 AMOR的测试环境

5 结束语

本文提出了一个新的基于A*框架的运动路径规划算法,用于实现室外自主移动机器人AMOR的自动导航控制。该算法占用较少的计算机资源,能够在众多选项中快速地寻找一条

避障的、最佳的运动路径。虽然该算法在全局上难以获得最优的运动路径,但在局部运动最优的情况下,在整个移动机器人行驶过程里,可以保证获得一条次优的路径,而这才是最现实的方案。本文还概要地介绍了AMOR实验平台,以及利用它所完成的测试实验和竞赛。所有的测试结果和竞赛成绩都表明,在未知的室外非结构环境下,提出的运动规划算法和导航方案是可行的和可靠的,能够让AMOR找到安全的行驶路径及实施避障动作。

参考文献:

- [1] 徐秀娜,赖汝.移动机器人路径规划技术的现状与发展[J].计算机仿真,2006,23(10):1-5.
- [2] 蔡自兴.智能控制及移动机器人研究进展[J].中南大学学报:自然科学版,2005,36(5):721-726.
- [3] 徐国华,谭民.移动机器人的发展现状及其趋势[J].机器人技术与应用,2001(3):7-14.
- [4] Kahatib O.Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J].International Journal of Robotics Research,1986,5(1):90-98.
- [5] Elfes A.Sonar based real world mapping and navigation[J].IEEE Journal of Robotics and Automation,1987,3(3):249-265.
- [6] Holland J H.Genetic algorithms and optimal allocations of Trails [J].SIAM Journal of Computing,1973,2(2):88-105.
- [7] Zalama E,Gomez J.Adaptive behavior navigation of a mobile robot[J].IEEE Transactions on Systems,Man Cybenetics-Part A: System and Humans,2002,32(1):160-169.
- [8] Thrun S,Beetz M.Probabilistic algorithms and interactive museum tour guide robot Minerva[J].International Journal of Robotics Research,2000,19(11):972-999.
- [9] Ayache N.Artificial vision for mobile robots:stereo vision and multi-sensory perception[M].Sander P T.Cambridge:MIT Press,1991.
- [10] Desouza G N,Kak A C.Vision for mobile robot navigation:a survey[J].IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2002,24(2):237-267.
- [11] Ohya A,Kosaka A,Kak A.Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle avoidance using single-camera vision and ultrasonic sensing[J].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1998,14(6):969-978.
- [12] Kriegman D J,Triendl E,Binford T O.Stereo vision and navigation in building for mobile robots[J].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1989,5(6):792-803.
- [13] 杨明,王宏,张钺.基于激光雷达的移动机器人位姿估计方法综述[J].机器人,2002,24(2):177-183.
- [14] 于金霞,蔡自兴,郑敏捷,等.移动机器人导航中激光雷达测距性能研究[J].传感技术学报,2006,19(2):356-370.
- [15] Lingemann K,Nuechter A,Hertzberg J,et al.Surmann,high-speed laser localization for mobile robots[J].Robotics and Autonomous Systems,2005,51:275-296.
- [16] Borenstein J,Koren Y.The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots[J].IEEE Journal of Robotics and Automation,1991,7(3):278-288.
- [17] Koenig S,Furey D,Bauer C.Heuristic search-based replanning[C]//Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence Planning and Scheduling,2002:294-301.
- [18] Ferguson D,Stentz A.Using interpolation to improve path planning:the field D* algorithm[J].Journal of Field Robotics,2006,23(2):79-101.