

文章编号: 1002-0446(2008)02-0097-05

移动机器人路径规划方法研究

曲道奎^{1,2}, 杜振军^{2,3}, 徐殿国¹, 徐方²

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 针对室内动态非结构化环境下的移动机器人路径规划问题, 提出了一种能够将全局路径规划方法和局部路径规划方法相结合、将基于反应的行为规划和基于慎思的行为规划相结合的路径规划方法。全局路径规划器采用 A* 算法生成到达目标点的子目标节点序列; 局部路径规划器采用改进的人工势场方法对子目标节点序列中相邻两节点进行路径平滑和优化处理。在考虑了移动机器人运动学约束的前提下, 该方法不但能够充分利用已知环境信息生成全局最优路径, 而且还能及时处理所遇到的随机障碍信息。仿真研究与在室内复杂环境下的实际运行结果验证了该方法的有效性。

关键词: 移动机器人; 路径规划; 动态环境

中图分类号: TP24

文献标识码: B

Research on Path Planning for a Mobile Robot

QU Dao-kui^{1,2}, DU Zhen-jun^{2,3}, XU Dian-guo¹, XU Fang²

(1. Harbin Institute of Technology Harbin 150001, China;

2. Shenyang Institute of Automation Chinese Academy of Sciences Shenyang 110016, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China)

Abstract A path planning method based on both the benefits of global and local path planners and those of deliberate and reactive behavior planners is proposed for indoor mobile robot path planning in dynamic and unstructured environments. The global path planner uses A* algorithm to generate a series of sub-goal nodes to the target node, and the local path planner adopts an improved potential field method to smooth and optimize the path between the adjacent sub-goal nodes. Taking into full consideration the kinematical constraints of the mobile robot, this method can not only effectively generate a global optimal path using the known information, but also handle the stochastic obstacle information in time. Results of simulations and realistic running in complex indoor environments validate the effectiveness of the presented algorithm.

Keywords mobile robot; path planning; dynamic environment

1 引言 (Introduction)

移动机器人的路径规划问题是移动机器人研究领域的热点问题, 可以描述为: 移动机器人依据某个或某些优化准则 (如工作代价最小、行走路线最短、行走时间最短等), 在运动空间中找到一条从起始状态到目标状态、可以避开障碍物的最优或者接近最优的路径^[1,2]。在以往的研究中, 移动机器人路径规划方法大体上可以分为三种类型: 其一是基于环境模型的路径规划, 它能处理完全已知环境 (障碍物的位置和形状预先给定) 下的路径规划, 而当环境变化

(出现移动障碍物) 时, 此方法效果较差, 具体方法有: A* 方法、可视图法和拓扑图法等; 其二是基于传感器信息的局部路径规划方法, 其具体方法有: 人工势场法、模糊逻辑法等; 其三是基于行为的路径规划法, 它把导航问题分解为多个相对独立的导航行为单元, 如避碰、跟踪、目标制导等, 这些单元彼此协调工作, 完成总体导航任务。此外, 一些学者将一些人工智能方法应用到路径规划中, 也取得一定的研究进展^[3]。

一个好的路径规划方法需要满足如下指标^[3]:

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA041700); 山东省科技发展计划资助项目 (2006GG1104014)。

收稿日期: 2007-04-29

合理性——返回的任何路径都是合理的,或者说任何路径对控制机器人运动都是可执行的.

完备性——如果客观上存在一条从起点到达终点的无碰路径,该算法一定能找到;如果环境中没有路径可通行,会报告规划失败.

最优性——算法规划的结果路径在某个测度(如时间、距离、能量消耗等)上是最优的.

实时性——规划算法的复杂度(时间需求、存储需求等)能满足机器人运动的需要.

环境变化适应性——算法具有适应环境动态改变的能力,随着环境改变,不必全部重新计算.

满足约束——支持移动机器人运动时的完整性和非完整性运动约束.

对于在未知的(或部分已知的)、动态的非结构环境下的服务机器人而言,传统的路径规划方法很难达到前面提出的指标要求.本文提出了一种将全局路径规划方法和局部路径规划方法相结合、将基于反应的行为规划和基于慎思的行为规划相结合的路径规划方法,其思路如下:机器人采用 A^* 算法进行全局路径规划,生成到达目标点的子目标节点序列,同时采用改进的人工势场方法对子目标节点序列中相邻两节点进行路径平滑和优化处理.该方法不但能够充分利用已知环境信息生成全局最优路径,而且还能及时处理所遇到的随机障碍信息,从而提高机器人整体路径规划的性能.

2 相关研究 (Related research)

2.1 A^* 原理

在最佳优先搜索的研究中,最广为人知的形式称为 A^* 搜索.其基本思想^[4]是:它把到达节点的代价 $g(n)$ 和从该节点到目标节点的代价 $h(n)$ 结合起来对节点进行评价:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

因为 $g(n)$ 给出了从起始节点到节点 n 的路径代价,而 $h(n)$ 给出了从节点 n 到目标节点的最低代价路径的估计代价值,因此 $f(n)$ 就是经过节点 n 到目标节点的最低代价解的估计代价.因此,如果想要找到最低代价解,首先尝试找到 $g(n) + h(n)$ 值的最小节点是合理的.并且,倘若启发函数 $h(n)$ 满足一定的条件,则 A^* 搜索既是完备的又是最优的^[4].

采用 A^* 方法用于移动机器人的路径规划时,机器人首先按照已知的环境地图规划出一条路径,然后沿着这条轨迹运动,当机器人传感器探测到的环境信息和原有的环境信息不一致的时候,机器人重

新规划从当前位置到目标点的路径.如此循环直至机器人到达目标点或者发现目标点不可达^[5].但如果机器人在动态环境或者未知环境中运动的时候,机器人很可能非常频繁地遇到当前探测环境信息和先验环境信息不匹配的情形,这就需要进行路径再规划.重新规划算法仍然是个从当前位置到目标点的全局搜索的过程,运算量较大.在重新规划期间,机器人或者选择停下来等待新的生成路径,或者按照错误的路径继续运动.因此,快速的重新规划算法是非常重要的^[6,7]. A^* 方法采用栅格表示地图,栅格粒度越小,障碍物的表示也就越精确,但是同时算法搜索的范围会按指数增加.采用改进人工势场的局部路径规划方法对 A^* 方法进行优化,可以有效增大 A^* 方法的栅格粒度,达到降低 A^* 方法运算量的目的.

对于移动机器人而言,不仅需要采用上述方法规划出二维路径点序列,还需要能够控制机器人按照所生成的序列点运动,并且尽量保证机器人的运动轨迹是最优的和平滑的. A^* 方法是在二维 XY 平面进行路径规划的,相邻两点之间的夹角一定是 $\pi/4$ 的整倍数^[7],如图 1 所示.采用 A^* 方法规划出的最优路径并没有考虑到机器人的运动学约束,即使机器人可以采用 A^* 方法规划出一条最优路径,机器人也未必可以沿着这条路径运动.

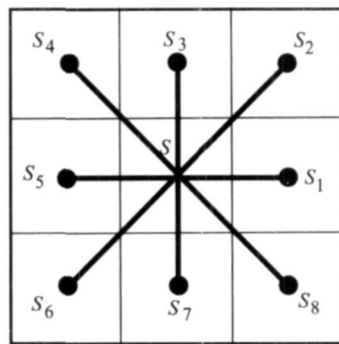


图 1 A^* 方法中相邻节点角度示意图

Fig 1 Diagram of angles between adjacent nodes in A^* method

2.2 人工势场法原理

人工势场法是由 Khatib 提出的一种虚拟力法^[8].其基本思想是将机器人在环境中的运动视为一种机器人在虚拟的人工受力场中的运动.障碍物对机器人产生斥力,目标点产生引力,引力和斥力的合力作为机器人的加速力,来控制机器人的运动方

向和计算机器人的位置.

人工势场方法结构简单, 便于低层的实时控制, 在实时避障和平滑的轨迹控制方面得到了广泛的应用, 但是人工势场法存在 4 个固有缺陷^[9]:

- (1) 存在陷阱区域;
- (2) 在相近的障碍物群中不能识别路径;
- (3) 在障碍物前振荡;
- (4) 在狭窄通道中摆动.

除此之外, 人工势场法还存在着障碍物附近目标不可达问题^[10].

根据人工势场方法原理可知, 引力势场的范围比较大, 而斥力的作用范围只是局部的, 当机器人和障碍物的距离超过障碍物影响范围的时候, 机器人不受排斥势场的影响. 因此, 势场法只能解决局部空间的避障问题, 它缺乏全局信息, 这样, 它就很容易陷入局部最小值. 所谓局部最小值点, 就是在引力势场函数和斥力势场函数的联合分布的空间内, 在某些区域, 受到多个函数的作用, 造成了局部最小点. 当机器人位于局部最小点的时候, 机器人容易产生振荡或者停滞不前. 障碍物越多, 产生局部最小点的可能性就越大, 产生局部最小点的数量也就越多. 如前所述的人工势场法的 4 种固有缺陷以及障碍物附近目标不可达问题, 根源也就在于此^[2].

3 路径规划方法 (Path planning method)

3.1 路径规划方法描述

如果 S 表示机器人起始点状态, G 表示机器人目标点状态, X 表示当前机器人状态, M 是栅格地图表示的环境地图, 那么本文所提出的路径规划方法可以描述为:

- (1) 保存当前已知的和估计的环境信息到 M ; 令 $X=S$
- (2) 基于环境信息 M , 规划出从 X 到 G 的全局最优路径, 生成子目标节点序列; 如果没有最优路径, 则返回搜索失败;
- (3) 确定当前子目标节点;
- (4) 机器人以第 (3) 步生成的子目标节点作为当前目标点, 按照局部路径规划方法进行运动控制, 直到到达目标点所在的栅格, 进入步骤 (3); 或者机器人传感器探测到新的环境和原有地图 M 不匹配, 并且环境变化会影响到机器人后续路径规划的执行;
- (5) 按照传感器信息更新地图 M , 令 $S=X$, 跳转到第 (1) 步.

其中序列子目标节点的生成是在全局路径规划

器中实现的, 更新子目标节点以及控制机器人不断朝向子目标节点运动并最终到达总目标节点是在局部路径规划器中实现的. 下面分别介绍.

3.2 全局路径规划方法

全局路径规划器采用栅格地图来描述环境模型, 采用 A^* 方法进行路径规划. 由于局部路径规划器具有躲避动态障碍物的功能, 所以栅格粒度可以较大, 以降低系统的存储空间和 A^* 方法的搜索空间.

在用 A^* 搜索最优路径时, A^* 搜索起始点设为机器人当前位置在栅格坐标系下的坐标, A^* 搜索目标点设为机器人目标点位置在栅格坐标系下的坐标. 在栅格坐标系下, A^* 方法生成一条从初始点到目标点的目标序列子节点. 序列中除了全局目标节点外, 每个节点都有一个指向其父节点的指针. 然后把这子节点投影到机器人所在的世界坐标系下, 就是子节点在世界坐标系下的坐标. 在机器人没有达到最终目标点所在栅格的时候, 机器人受到引力的节点是机器人所在栅格的父节点在世界坐标系下的位置; 当机器人达到最终目标点所在栅格的时候, 机器人受到的引力是机器人目标节点的引力.

A^* 方法生成的只是子目标节点序列, 还需要对于 A^* 方法所生成的路径点进行平滑优化. 本文采用改进的人工势场方法进行目标序列点之间的局部路径规划, 使机器人的整条运动轨迹显得比较平滑并达到实时避障的目的.

3.3 局部路径规划方法

局部路径规划方法以人工势场方法为基础, 采用了三种改进策略, 使之更适合于动态环境下移动机器人的实时控制, 并使得运动轨迹更为平滑.

3.3.1 设置有效障碍区域

在机器人运动过程中, 并不是周围的所有障碍物都会对机器人产生影响, 例如, 与机器人运动方向夹角在 $\pm\alpha$ rad 之间的障碍物可能会影响到机器人的运动, 如 $\alpha=\pi/2$ 在此范围之外的障碍物影响到机器人的运动的可能性就很小. 在局部路径规划中, 我们认为与机器人运动方向夹角在 $\pm\alpha$ rad 之间的障碍物会对机器人产生排斥势场, 其它的障碍物不会对机器人产生排斥势场. 采用这种方法可以有效地让机器人快速穿越障碍物群, 减少由势场方法产生的局部最小点 (见图 5). 当机器人进入目标终点所在的栅格时, 忽视机器人周围障碍物斥力的影响, 即机器人仅仅受到目标终点的引力作用, 就可以解决障碍物附近目标点不可达问题^[10] (见图 5).

果图,从图中可以看出,本文提出的方法能够克服人工势场法存在的 4 个固有缺陷^[9],机器人能够有效绕过陷阱区域,在相近的障碍物群中不仅能识别路径,而且还能避免在在障碍物群附近振荡,同时,在狭窄通道中也不会出现摆动现象.当目标点在障碍物附近的时候,机器人依旧可以达到目标点.

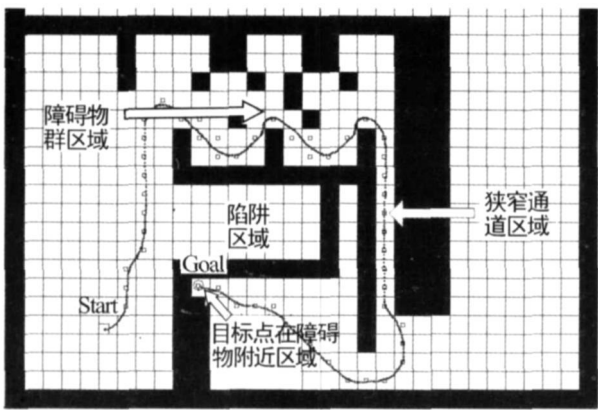


图 5 全局路径规划效果图
Fig 5 Global path planning diagram

4.2 局部避障效果实验

图 6 是机器人利用局部路径规划器有效绕行动态障碍物并继续向目标节点运动的效果图.

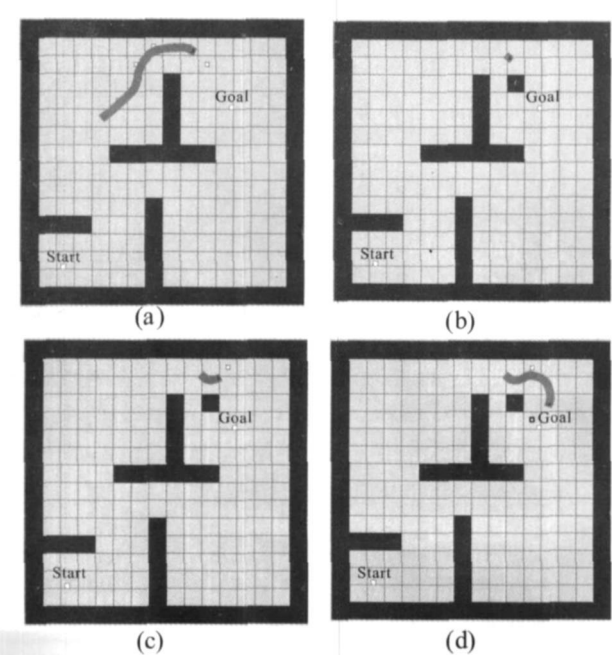


图 6 局部路径规划和避障效果图

Fig 6 Local path planning and obstacle avoidance diagram

6(b)中机器人进入子目标点栅格所在的区域,这时候机器人探测到动态障碍物,图 6(c)中显示了机器人能够利用局部路径规划器有效绕行动态障碍物,图 6(d)中显示机器人继续趋向目标节点运动.

本文所提方法在新松公司的家用智能服务机器人平台上实现.该机器人曾在多种展会上展出(图 7),机器人能够较好地躲避动态人群并到达指定的目标点,实现其在非结构化环境下的运动规划与实时避障功能.



图 7 新松公司智能服务机器人
Fig 7 SIASUN intelligent service robot

5 结论与展望 (Conclusion and future work)

本文对移动机器人动态环境下的路径规划技术进行了研究探索,提出了一种能够将全局路径规划方法和局部路径规划方法相结合、将基于反应的行为规划和基于慎思的行为规划相结合的路径规划解决思路,提出了一种能使机器人局部轨迹规划更平滑的基于弧线运动的规划方法,提出的方法能够解决传统人工势场方法的 4 种缺陷^[9]以及障碍物附近目标点不可达问题^[10].

目前的算法中,采用 A^* 方法作为全局路径规划器,在进一步的研究中,将考虑用 $Dynamic A^*$ (D^*)^[6]方法和 $Field D^*$ 方法^[7]作为全局路径规划器,使之更适合在动态不确定性的环境应用.

参考文献 (References)

[1] 石鸿雁,孙昌志. 非结构环境下移动机器人的运动规划 [J]. 机器人, 2004, 26(1): 27-31.

(下转第 106 页)

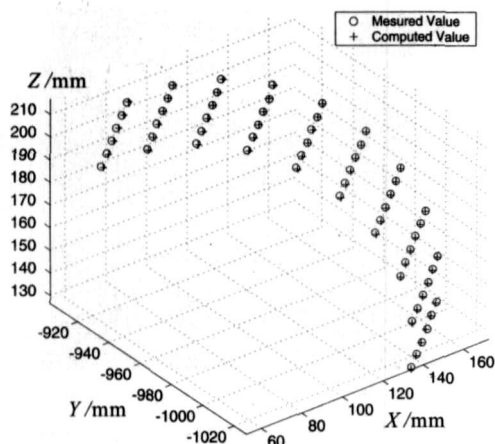


图 10 虚拟环境标定误差分析示意图

Fig 10 Error analysis on virtual environment calibration

6 结论 (Conclusion)

本文针对 T形管工件进行了基于机器人力控制表面跟踪的遥控焊接虚拟环境标定实验,采用基于力觉传感器坐标系横切面轮廓线的力控制策略跟踪工件表面.在精确测量跟踪过程中接触点空间位置的基础上,对椭圆跟踪轨迹进行直接最小二乘拟合,通过 T形管工件标定算法,实现了高精度的虚拟环

境标定.实验结果表明,标定后 T形管工件虚拟环境模型的算术平均误差为 0.6 mm,标准误差为 0.7 mm,单个空间点的最大误差为 1 mm.由于 FTC传感器的被动柔顺范围是 ± 1 mm,因此虚拟环境模型精度能够满足以被动柔顺方式完成接触遥控焊接任务的需要,为实现基于监督控制的遥控焊接接触任务策略奠定了坚实的基础.

参考文献 (References)

- [1] Kim W S. Virtual reality calibration for telebotonic servicing[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994. 2769—2775.
- [2] 宋月娥. 弧焊机器人系统协调运动精度及离线编程标定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [3] 魏秀权. 基于人机交互的机器人遥控焊接虚拟环境标定[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [4] Fitzgibbon A, Pili M, Fisher R B. Direct least square fitting of ellipses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476—480.

作者简介:

魏秀权 (1982-),男,博士生. 研究领域:机器人遥控焊接,力觉传感与控制,虚拟环境标定.

(上接第 101页)

- [2] 樊晓平,李双艳,陈特放. 基于新人工势场函数的机器人动态避障规划[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(5): 703—707.
- [3] 刘华军,杨静宇,陆建峰,等. 移动机器人运动规划研究综述[J]. 中国工程科学, 2006, 8(1): 85—94.
- [4] Nilsson N J. Principles of Artificial Intelligence[M]. Berlin, Germany: Springer, 1980.
- [5] Zelinsky A. A mobile robot exploration algorithm[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(6): 707—717.
- [6] Stentz A. The focussed D^* algorithm for real-time replanning[A]. Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufman, 1995. 1652—1659.
- [7] Ferguson D, Stentz A. Using interpolation to improve path planning The field D^* algorithm[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(2): 79—101.
- [8] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile

- robot[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90—98.
- [9] Koren Y, Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991. 1398—1404.
- [10] Ge S S, Cui Y J. New potential functions for mobile robot path planning[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(5): 615—620.

作者简介:

曲道奎 (1961-),男,研究员,博士生导师. 研究领域:智能控制,机器人学.
杜振军 (1981-),男,博士生. 研究领域:移动机器人.
徐殿国 (1960-),男,博士,教授. 研究领域:电力电子,电力拖动,机器人技术.