

基于可视切线图的未知环境建模新方法研究<sup>①</sup>

刘 罡<sup>②</sup> 刘玉斌 赵 杰

(哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

**摘 要** 针对移动机器人路径规划的环境建模问题,提出了一种基于可视切线图的未知环境建模新方法。首先给出可视切线图的定义,其节点为障碍物边界上的可视切点,边为视点与可视切点间的切线段。其次为避免机器人与障碍物相碰,对可视切线图进行了扩展。最后在建立可视切线图的基础上,采用两种启发函数搜索全局目标指导下的局部最优路径。仿真分析证明,可视切线图的数据结构简单,所需存储空间小,具有较好的环境适应能力,是一种有效的路径规划工具。

**关键词** 移动机器人,路径规划,未知环境建模,局部路径规划

0 引言

移动机器人在未知环境下的路径规划是机器人研究的一个重要方向,其算法的优劣依赖于环境建模和路径搜索策略<sup>[1]</sup>。目前,已知环境建模已被广泛研究,并取得了丰硕的成果<sup>[2]</sup>。可视图法是一种适合于有多边形障碍物的环境建模方法,但其边较多,影响了路径规划的计算成本<sup>[1-5]</sup>。Voronoi 图法实时性较好,生成的路径相对比较安全,并且路径比较平滑<sup>[6,7]</sup>。然而,在 Voronoi 图中不存在最短路径,也不能保证路径最优<sup>[1,2]</sup>。切线图法以 C-空间障碍物之间的公切线和障碍物边界作为局部最短路径,比可视图法具有更少的边,因此减少了路径规划的计算成本<sup>[8,9]</sup>。切线图的构造可以采用移动线和扫描线相结合的方法<sup>[1]</sup>。相对于已知环境建模来讲,未知环境建模的研究较少,目前的研究成果主要是基于上述环境建模方法进行的改进<sup>[3,10-14]</sup>,通过增量地构造各种图,再采用图搜索方法进行路径规划。事实上,在二维空间内,切线对机器人路径规划起着关键性的作用<sup>[1]</sup>。因此,本文提出一种新的基于可视切线图的未知环境建模方法。以机器人为视点(view point),做视点与机器人所“看到”的障碍物之间的切线,从而构造出可视切线图。与已知环境建模方法相比,可视切线图法突出了机器人的能动性,

表现为机器人可以根据环境的变化动态生成可视切线图,更适合于机器人在未知环境下自主路径规划。

1 问题描述及术语

考虑二维平面上的点状移动机器人,要求其在分布有多边形障碍物的环境里由起点沿着一条避碰的路径安全到达目标点。机器人无先验的环境知识,只知道目标点的坐标;在任意时刻内,机器人只能“看到”以自己当前位置为中心,以  $r$  为半径区域内的环境信息,并且可以绕自身旋转,向任意方向行走。为了进一步阐述可视切线图的概念,首先给出以下一些相关术语的定义(见图 1)。

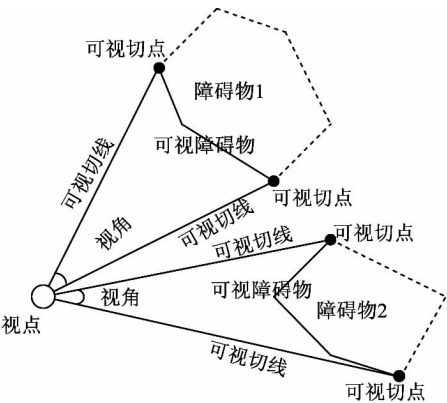


图 1 可视切线图的相关术语

① 863 计划(2007AA041501)资助项目。  
② 男,1977 年生,博士生,研究方向:煤矿救援机器人;联系人, E-mail: liuxing338@163.com  
(收稿日期:2009-05-08)

**定义 1** 机器人“眼睛”所在的位置称为视点。

**定义 2** 机器人所能“看到”的范围称为视窗 (view window)。

**定义 3** 在机器人视窗内,机器人所能看到的障碍物称为可视障碍物 (visual obstacle)。可视障碍物只是障碍物的一部分,是由多条直线段相连构成的非封闭几何图形。

**定义 4** 如果从视点出发的一条视线与可视障碍物的边界相交于点  $P$ ,并且在点  $P$  的邻域内,该视线不与障碍物相交,那么该视线与可视障碍物相切。该视线称为可视切线 (visual tangent, VT),点  $P$  称为可视切点 (visual tangent point, VTP)。

**定义 5** 同一可视障碍物的两条可视切线之间的夹角称为可视障碍物的视角 (view angle)。

**定义 6** 当障碍物1被障碍物2遮挡的时候,如图 2 所示,延长障碍物 2 的可视切线  $OP_2$  与障碍物 1 的可视边界相交于  $P_1$  点,则点  $P_1$  称为障碍物 1 的伪可视切点, $OP_1$  称为障碍物 1 的伪可视切线。

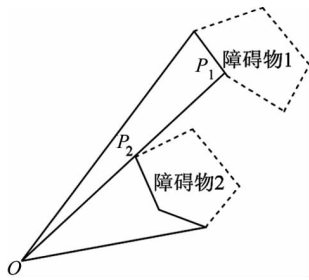


图 2 伪可视切线和伪可视切点的定义

**定义 7** 当障碍物的顶点成为机器人的视点时 (图 3),与视点  $O$  相邻的顶点  $P_1$  和  $P_2$  称为可视切点,与视点  $O$  相连的边  $OP_1$  和  $OP_2$  称为可视切线。

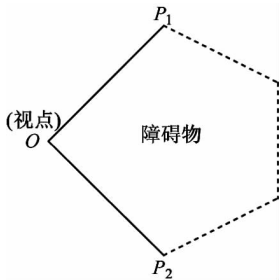


图 3 当视点在顶点上时,可视切线及可视切点的定义

**命题 1** 可视切点一定是障碍物的顶点。

证明:首先考虑如图 1 所示的一般情况,机器人的视线若与障碍物的边相交则一定不与障碍物相切,所以要使视线与障碍物相切,只能与障碍物的顶

点相交,命题得证。其次考虑如图 3 所示的极端情况,当机器人运动到障碍物的一个顶点时,由于障碍物是多边形,则一定存在两个相邻的顶点,根据定义 7 命题得证。

**命题 2** 一个可视障碍物最多有两条可视切线。

证明:当障碍物不被其它障碍物遮挡时,其有两条可视切线;当障碍物被其它障碍部分物遮挡时,其有一条可视切线和一条伪可视切线;当障碍物完全被其它障碍物遮挡时,其不存在可视切线。因此,一个可视障碍物最多有两条可视切线。

2 可视切线图

由于环境未知,机器人无法利用先验知识进行路径规划,只能依靠传感器获得当前的环境信息。在这里,传感器充当了机器人的眼睛。随着机器人视点位置的变化,障碍物的可见性也在发生变化,如图 4 所示。实线表示障碍物的边可见,虚线表示障碍物的边不可见。

设一个有向图  $VTG(N, L)$  的节点集合  $N = V \cup \{S, G\}$ ,这里  $V$  是所有可视切点的集合;连接节点的边集合  $L$  是所有可视切线段的集合;其方向是从起点  $S$  出发,终止于目标点  $G$ ,则有向图  $VTG(N, L)$  称为可视切线图。可视切线图是以视点为中心的星形图,如图 4 所示。

**命题 3** 对于一个点状机器人来说,其路径是由可视切线段构成的。

证明:在当前的视窗内,机器人的视点位于  $O$  点,如图 4(a)所示。在机器人的可视半径  $r$  内,传感器只能检测到障碍物 1 和障碍物 2,而且彼此互不遮挡,因此可视切线图包含 4 条可视切线和 4 个可视切点。机器人为了走出当前的障碍区,而且不与障碍物相碰,将可视切线图上的可视切点作为子目标点并沿着可视切线行走是自然的选择。如果按某种优化策略选取  $O_1(O_2)$  点作为子目标点,则在以  $O_1(O_2)$  点为视点的新视窗内,可视切线图包含 6 条可视切线和 6 个可视切点,如图 4(b)和图 4(c)所示。机器人将新的可视切点作为下一个子目标点,并沿着可视切线行走同样是自然的选择。但是,机器人按某种优化策略只能选取图 4(b)和图 4(c)其中的一种路径行走,因此,可视切线图是一种动态的星形结构图。

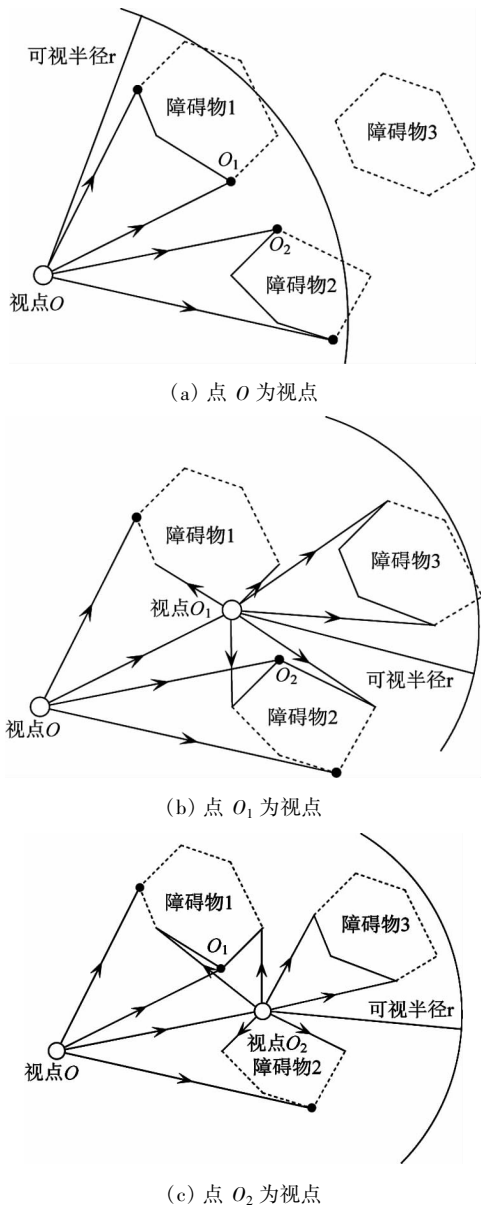


图 4 可视切线图

可视切线图用于未知环境下点状机器人的路径规划具有很大优势。可视图的数据大小决定于障碍物顶点的个数,切线图的数据大小决定于障碍物边界线段的个数,而可视切线图的数据大小决定于障碍物的个数。可见,可视切线图数据结构简单,所需存储空间小,是一种更加有效的路径规划工具。

### 3 扩展的可视切线图

由于机器人具有几何尺寸,在实际的路径规划中不能当作点来处理,否则会导致机器人与障碍物相碰。假设圆形机器人的半径为  $r_1$ ,与障碍物的安全距离为  $d$ ,本节提出一种扩展的可视切线图用于多边形障碍物的路径规划。首先将机器人膨胀为一

个半径为  $r_1 + d$  的圆,并如图 5 所示,有以下定义:

**定义 8** 将可视障碍物的可视切点膨胀为一个半径为  $r_1 + d$  的圆,这个圆称为可视切点圆。

**定义 9** 过机器人的视点做与可视切点圆相切的直线,并交于点  $P_1$ ,且该直线不与可视障碍物相交,那么该切线称为扩展可视切线,点  $P_1$  称为扩展可视切点。

**定义 10** 过可视切点做与膨胀后的机器人相切的直线,保证机器人在运动过程中不与障碍物相碰,该直线称为避碰切线。

**命题 4** 扩展可视切线段与避碰切线段平行且相等。

证明:如图 5 所示,连接  $OO_1$ , 因为  $O_1P_1 \perp OP_1$ ,  $OP \perp O_1P$ , 且  $O_1P_1 = OP$ , 所以  $\triangle OP_1O_1 \cong \triangle O_1PO$ 。因此,  $O_1P = OP_1$ ,  $\angle O_1OP_1 = \angle OO_1P$ , 命题得证。

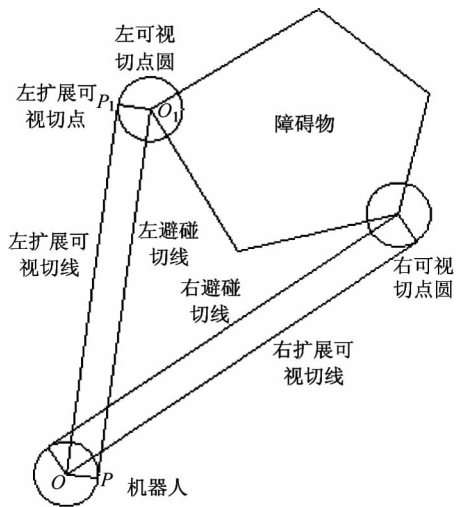


图 5 扩展可视切线图的相关术语

**定义 11** 将可视障碍物的顶点膨胀为一个半径为  $r_1 + d$  的圆,称为顶点圆,如图 6 所示。

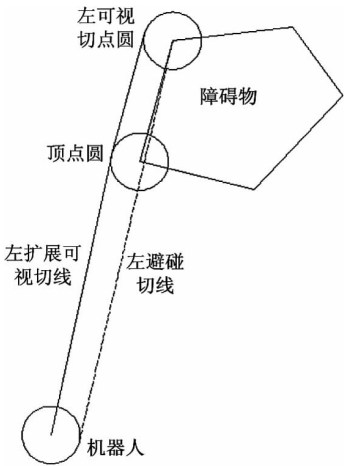


图 6 避碰切线与可视障碍物相交

**命题 5** 对于半径为  $r_1$  的机器人来说,当可视障碍物不与避碰切线相交时,其路径由扩展可视切线段构成;当可视障碍物与避碰切线相交时,其路径由扩展可视切线段、顶点圆弧、顶点圆之间的公切线及顶点圆和可视切点圆的公切线构成。

证明:当可视障碍物不与避碰切线相交时,如图 5 所示,机器人沿着左(右)扩展可视切线段行走,始终在左(右)避碰切线的左(右)侧而不与障碍物相碰;当可视障碍物与避碰切线相交时,如图 6 所示,机器人若沿着初始的左扩展可视切线行走,必然与障碍物相碰。因此,将如图 6 所示的可视障碍物的顶点进行膨胀处理,得到一系列的顶点圆。过机器人的视点作与机器人最先相碰的顶点圆的扩展可视切线,然后依次作各顶点圆之间的公切线以及顶点圆和可视切点圆的公切线。那么,机器人与可视障碍物的无碰路径则由扩展可视切线段、各顶点圆弧、顶点圆之间的公切线及顶点圆和可视切点圆的公切线构成。

4 最优路径搜索

描述环境的图构造出来后,最优路径搜索显得格外重要。目前,图搜索算法已被广泛地研究,并取得了很多研究成果<sup>[2]</sup>。机器人在未知环境里行走,由于不能构造完整的环境模型,必须在每个视窗内搜索出局部最优的路径,以决定机器人下一步行走的方向,基于全局目标的启发式搜索成为必然的选择。

4.1 “最短路径”的启发式搜索

如果目标点在机器人的视窗内可见,驱动机器人直接向目标点行走。否则,利用启发式函数  $\min f(p) = g(p) + h(p)$  来选取机器人的路径。其中,  $f(p)$  为视窗内某个扩展可视切点  $p$  的路径长度函数,  $g(p)$  为视点至  $p$  的距离,由于视窗外的信息无法获得,一般  $h(p)$  为从  $p$  点到目标点的距离。依据该启发函数,机器人规划出来的路径是局部最优的,而不是全局最优的。这主要因为机器人受传感器的限制,无法获得视窗外的信息。

4.2 “最小方向偏差”的启发式搜索

如果目标点在机器人的视窗内可见,同样驱动机器人直接向目标点行走。否则,利用启发式函数  $\min \theta = | \theta_{\text{goal}} - \theta_p |$  来选取机器人的路径。其中,  $\theta_{\text{goal}}$  为目标点的方位角,  $\theta_p$  为扩展可视切点的方位角。根据该启发式函数,机器人始终沿着靠近目标

点的方向行走,这样才有可能更快地走到目标点。如果机器人的行走方向偏离目标方向越远,其到达目标点的可能性就越小。同样,依据该启发函数,机器人规划出来的路径是局部最优的,而不是全局最优的。由于非探测区内的信息无法获得,采用上述两种启发式函数来搜索最优路径反映了全局优化的要求与局部有限信息约束的折衷,是在给定环境信息下企图实现全局优化的自然选择。

5 仿真分析

为了进一步分析本文提出的可视切线图的可行性,利用 Matlab 软件建立了仿真环境,模拟机器人在充满障碍物的未知环境里运动。图 7 显示了基于“最短路径”启发式搜索策略的路径规划结果。图 8 显示了基于“最小方向偏差”启发式搜索策略的路径规划结果。从图中不难看出,无论采用什么搜索策略,机器人都能顺利从不同的起点运动到终点,证明了本文提出的可视切线图是一种有效的路径规划工具,具有较好的环境适应能力。

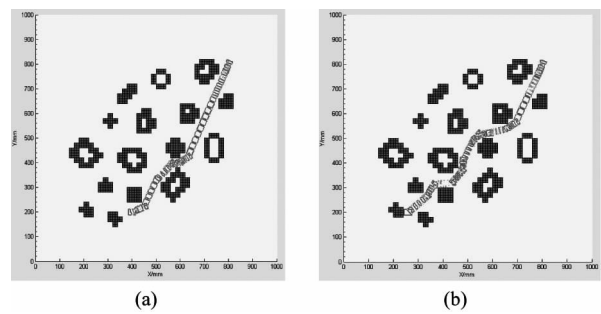


图 7 基于“最短路径”启发式搜索策略

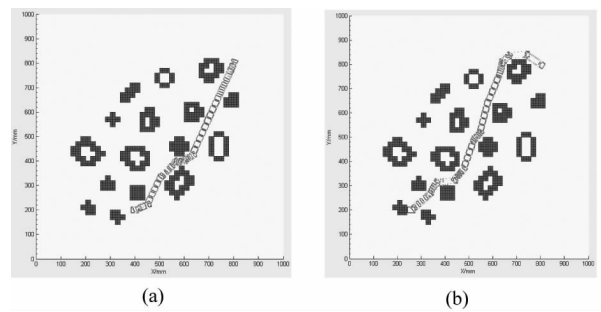


图 8 基于“最小方向偏差”启发式搜索策略

另外,图 7(a)和图 8(a)具有相同的起点和终点,机器人行走路径基本相同。然而,图 7(b)和图 8(b)虽然具有相同的起点和终点,机器人行走路径却不相同。从全局来看,面对不同的环境,两种搜索策

略所规划出来的路径的最优性是不一样的。从图中可以看出,采用“最短路径”启发式搜索策略要好于“最小方向偏差”启发式搜索策略,但是,从局部来看,在未知环境下无法用全局的观点来评价哪种搜索策略更好。因为,在没有到达目标点时,机器人无从知道全局最优路径,这是未知环境下机器人路径规划所不可避免的。虽然局部路径规划结果未必是全局最优的,但是采用上述两种搜索策略均体现了全局目标的指导作用。

为进一步分析基于可视切线图路径规划方法的实时性,对机器人从不同起点到达目标点的单步规划平均时间进行了测试,测试结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,尽管从不同起点到达终点总规划步数不同,但每一步所需规划时间为毫秒数量级。因此,利用可视切线图来建立环境模型进行路径规划具有时间短,实时性好的优点。

表 1 单步路径规划平均消耗的时间

| 搜索策略           | 起点坐标<br>(mm) | 终点坐标<br>(mm) | 单步规划<br>平均耗时<br>(ms) | 总步数 |
|----------------|--------------|--------------|----------------------|-----|
| 基于“最短<br>路径”   | (400,200)    | (800, 800)   | 107.56               | 9   |
|                | (260,200)    | (800,800)    | 102.23               | 13  |
| 基于“最小<br>方向偏差” | (400,200)    | (800,800)    | 102.44               | 9   |
|                | (260,200)    | (800,800)    | 110.75               | 12  |

6 结论

本文在充分研究现有环境建模方法的基础上,提出了一种新的完全面向未知环境的建模方法——可视切线图法。分别采用“最短路径”和“最小方向偏差”启发式搜索策略从已构造好的可视切线图中搜索局部最优路径,该搜索策略体现了全局目标的指导作用,所规划出来的路径是全局指导下的局部最优路径。仿真分析证明了所提出的可视切线图是一种有效的路径规划工具。可视切线图的数据结构简单,所需存储空间小,并且具有较好的环境适应能力。利用可视切线图来建立环境模型进行路径规划,所需时间短,实时性好。

参考文献

[ 1 ] Liu Y H, Arimoto S. Computation of the tangent graph of polygonal obstacles by moving-line processing. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(6): 823-830

[ 2 ] 刘华军,杨静宇,陆建峰等. 移动机器人运动规划研究

综述. *中国工程科学*, 2006, 8(1): 85-94

[ 3 ] Oommen B, Iyengar S, Rao N, et al. Robot navigation in unknown terrains using learned visibility graphs. part I: the disjoint convex obstacle case. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, RA-3(6): 672-681

[ 4 ] Lozano-Perez T, Wesley M A. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. *Commun, ACM*, 1979, 22(10): 560-570

[ 5 ] Wooden D, Egerstedt M. Oriented visibility graphs: low-complexity planning in real-time environments. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, Florida, USA, 2006. 2354-2359

[ 6 ] Canny J F. A voronoi method for the piano-movers problem. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, USA, 1985. 530-535

[ 7 ] Tomono M. Planning a path for finding targets under spatial uncertainties using a weighted voronoi graph and visibility measure. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA, 2003. 124-129

[ 8 ] Liu Y H, Arimoto S. A flexible algorithm for planning local shortest path of mobile robots based on reachability graph. In: *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots Systems*, Tokyo, Japan, 1990. 749-756

[ 9 ] Liu Y H, Arimoto S. Proposal of tangent graph and extended tangent graph for path planning of mobile robots. In: *Proceedings of the IEEE International Conference Robotics Automat*, Sacramento, California, USA, 1991. 312-317

[ 10 ] Choset H, Burdick J. Sensor based planning, part I: the generalized voronoi graph. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, 1995. 1649-1655

[ 11 ] Choset H, Konukseven I, Rizzi A. Sensor based planning: a control law for generating the generalized voronoi graph. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Robotics*, Monterey, CA, USA, 1997. 333-338

[ 12 ] Ahn S, Doh N L, Lee K, et al. Incremental and robust construction of generalized voronoi graph (GVG) for mobile guide robot. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, USA, 2003. 3757-3762

[ 13 ] Huang H P, Chung S Y. Dynamic visibility graph for path planning. In: *Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Sendai, Japan, 2004. 2813-2818

[ 14 ] 吴峰光,奚宏生. 一种新的基于切线的路径规划方法. *机器人*, 2004, 26(3): 193-197

# Research on a new method for unknown environment modelling based on visual tangent graphs

Liu Gang, Liu Yubin, Zhao Jie

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

## Abstract

Aiming at environment modelling of path planning of a mobile robot, a new method for unknown environment modelling based on visual tangent graphs is proposed. Firstly, the visual tangent graph is defined, whose nodes correspond to visual tangent points on obstacle boundaries, and whose edges represent tangents between the visual point and the visual tangent points. Secondly, the visual tangent graph is extended to avoid collision of a robot and obstacles. Finally, according to the visual tangent graph, a local optimal path guided by the global goal is searched using two heuristic functions. The simulation analysis indicates the visual tangent graph is an effective path planning tool with simple data structure, less memory space and better environment adaptability.

**Key words:** mobile robot, path planning, unknown environment modelling, local path planning