

未知环境下基于可视切线图的救援机器人导航

彭景春¹, 刘 罡²

(1. 哈尔滨工业大学 华德应用技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150025; 2. 哈尔滨博实自动化股份有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要:研究了未知环境下救援机器人的导航问题,提出了一种基于可视切线图的导航算法,并对所提算法的可行性进行了分析。该算法包括反射式导航和反应式导航两个过程,采用方向吸引算子搜索全局目标指导下的局部最优路径。基于 Matlab 的仿真实验证明,采用该导航算法的机器人行走路径较短,所需运动时间相对较少,并且具有较好的环境适应能力,能够满足救援机器人在未知环境下的运动要求。

关键词:导航;可视切线图;救援机器人;未知环境

中图分类号:TP24

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)04-0063-08

Navigation of a Rescue Robot in Unknown Environment Using Visual Tangent Graphs

PENG Jingchun¹, LIU Gang²

(1. Huade School of Applied Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150025, China;

2. Harbin Boshi Automation Co. Ltd, Harbin, Heilongjiang 150078, China)

Abstract: The navigation of a rescue robot in unknown environment is studied in the paper. A navigation algorithm using visual tangent graphs is presented. The feasibility of the navigation algorithm proposed is also analyzed. A reactive navigation and a reflective navigation constitute the navigation process. A direction attracting operator is adopted to search a local optimum path guided by the global goal. The simulation experiment based on Matlab indicates that the proposed navigation algorithm is feasible with shorter path, relatively less motion time and better environment adaptability, which can satisfy the motion requirement of the rescue robot in unknown environment.

Key words: navigation; visual tangent graph; rescue robot; unknown environment

为降低复杂危险的灾害现场给救援人员及幸存者带来的安全威胁,快速有效地开展救援工作,迫切需要各种救援机器人来代替救援人员实施救援任务,由国家和公司资助研制的各种救援机器人应运而生,如: CEDRA^[1], FUMA^[2], TALON^[3], ROBHAZ-DT3^[4], HELIOS^[5], PackBot^[6], Silver^[7], ACM^[8], SOURYU^[9], MIORA^[10], KOHGA^[11], CUBIC-R^[12], Amoeba II^[13]等。为顺利完成救援任务,在充满障碍物的未知环境里进行自主导航是救援机器人必备的能力,而导航算法的有效性依赖于环境建模和路径搜索策略^[14]。

目前,已知环境的建模已得到广泛研究^[15],主要有可视图法、Voronoi 图法和切线图法。可视图法可以为机器人在充满多边形障碍物的环境里进行导航^[16-17],但是,其多边形特性严重影响了导航的计算成本,而且不能用于障碍物具有曲边的场合。Voronoi 图法具有相对较小的数据结构,但在 Voronoi 图上不存在最短路径^[18-19]。切线图采用局部最短路径概念对具有一般几何形状的障碍物进行建模,与可视图相比具有更少

收稿日期:2012-04-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2007AA041501)

作者简介:彭景春(1975—),女,河南商丘人,讲师,博士研究生,主要从事救援机器人、医疗机器人方面的研究。

E-mail: pjc8996@126.com

刘 罡(1977—),男,辽宁凤城人,博士,主要从事救援机器人、智能机器人、机器视觉方面的研究,本文通信作者。

E-mail: liuxing338@163.com

的边^[20-21]。机器人在未知环境里运动时,由于缺乏全局环境信息而不能采用上述方法来规划路径。为此,文献[22-25]提出了一种“learns”环境建模方法,通过增量地构造各种图,再采用图搜索的方法进行导航。文献[26]提出了一种用于机器人在具有任意形状障碍物的未知环境下导航的可视切线图法。该方法可以根据外界环境的变化动态建模,更适合未知环境下的机器人导航。

本研究提出一种基于可视切线图的救援机器人导航算法,该算法包括反射式导航和反应式导航两个过程。在反射式导航过程中,机器人沿着目标点的方向运动,如果前端传感器探测到障碍物,则机器人停止运动;在反应式导航过程中,机器人扫描当前视窗内的所有障碍物并确定障碍物相对于机器人的方位。在构建可视切线图后,机器人依据方向吸引算子决定自己的运动方向。

1 可视切线图

本研究假设如下:①机器人被放置在一个完全未知并分布有静态障碍物的环境里,试图从任意的起点运动到任意的目标点;②机器人的外形被简化为一个半径为 r 的圆形;③机器人配置多个传感器,探测距离为 d_m 。在二维空间内,切线对于机器人导航起着关键性的作用。如果机器人的视线与探测到的障碍物边界相交于点 B ,但与点 B 邻域内的障碍物边界不相交,则称机器人视线与障碍物相切于点 B ,称机器人视线为可视切线(visual tangent, VT)。同时,称点 B 为可视切点(visual tangent point, VTP),如图 1 所示。

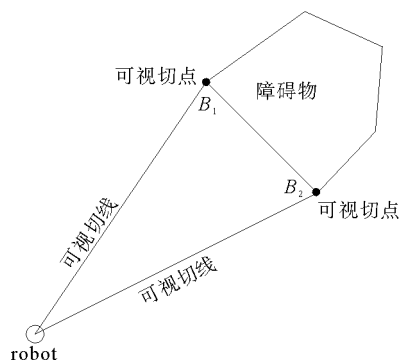


图 1 机器人与障碍物间的可视切线示意图
Fig. 1 The visual tangents between a robot and an obstacle

可视切线图 $VTG(V, E)$ 是一个有向图,是机器人导航的核心,其中, V 是可视切点的集合, E 是可视切线的集合。 v_i 表示可能的局部目标点, e_i 表示可能的运动方向。假设 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_k\}$ 是环境 R 中障碍物的集合,则 o_i 是一个具有任意边界的障碍物。任意点 P 到点 Q 的直线表示为 \overline{PQ} ,沿着直线 \overline{PQ} 的单位矢量用 η_{PQ} 表示。第 2 节将根据以上假设对导航算法展开研究。

2 导航算法

救援机器人在一个完全未知的环境里运动时,其导航完全取决于传感器信息。本研究提出一种导航算法,使得机器人在沿着任意起点 S 到任意目标点 D 的路径上能够探测并躲避障碍物。如果当前视窗内的子目标点 A 是不确定的,机器人将从当前所在点 S^* 沿着单位矢量 $\lambda = \eta_{S^*D}$ 向目标点 D 运动,如图 2 所示。如果当前视窗内的子目标点 A 是确定的,则 A 必是可视切线图的一个顶点,机器人沿着可视切线从当前所在点 S^* 运动到点 A 。如图 3 所示,假设某个障碍物边界上的两个可视切点为 A_1 和 A_2 ,机器人在点 S^* 就有两个可能的运动方向:沿着 $\overrightarrow{S^*A_1}$ 运动,或者沿着 $\overrightarrow{S^*A_2}$ 运动。

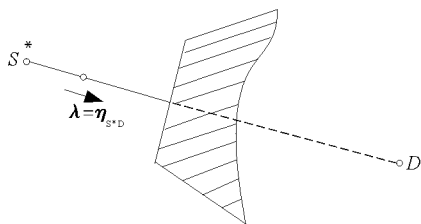


图 2 当前视窗内子目标点 A 未确定时的运动示意图
Fig. 2 The motion of the robot when A is not specified

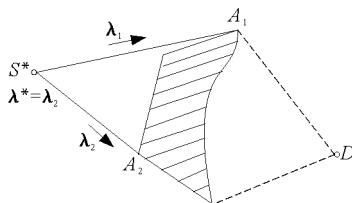


图 3 当前视窗内子目标点 A 确定时的运动示意图
Fig. 3 The motion of the robot when A is specified

在此,定义一个方向吸引算子:

$$J = \eta_{S^* D} \cdot \lambda. \quad (1)$$

其中, λ 是机器人运动方向的单位矢量。

当式(1)中函数 J 取得最大值时, $\lambda = \lambda^* \in \{\lambda_1, \lambda_2\}$, λ_1 和 λ_2 分别为 $\overrightarrow{S^* A_1}$ 和 $\overrightarrow{S^* A_2}$ 的单位矢量,机器人将沿着 λ^* 运动。

2.1 反应式导航算法

基于可视切线图的反应式导航算法如下:

Step1 顺次扫描当前视窗内的障碍物。以角度 δ 为步长,将扫描区域划分为若干个矢量,每个矢量对应的角度为 $k\delta$ 。传感器在第 k 个矢量上返回的距离为 ρ_k ,如果 $\rho_k \leq d_m$,表明该方向上存在障碍物,否则该方向上不存在障碍物。

Step2 合并障碍物并编号。当视窗内的障碍物个数 ≥ 2 时,如果相邻两个障碍物之间的空隙无法让机器人通过,则将这两个障碍物合并为一个新的障碍物。

Step3 构建可视切线图。从视点看去,每个合并后的障碍物具有两条可视切线,分别是左可视切线和右可视切线。将每个障碍物的左、右可视切线的信息添加到当前可视切线图中,得到了更新后的可视切线图。

Step4 如果目标点可见,驱动机器人朝目标点行走,直至到达目标点,算法结束。

Step5 根据可视切线图确定子目标点。为使机器人不与障碍物相碰,在机器人与障碍物之间设定一个安全距离 d 。

Step6 如果子目标点存在,转向 Step7; 否则转向 Step9。

Step7 采用如式(1)所示的方向吸引算子确定最优子目标点,如果相对于机器人的当前视点来说,最优子目标点的方向与目标点的方向一致,则执行反射式导航算法; 否则,转向 Step8。

Step8 驱动机器人朝子目标点行走,如果在行走的过程中,机器人距两侧障碍物的距离超出了传感器的探测距离,机器人停止运动并转向 Step1, 否则直至到达子目标点,然后转向 Step1。

Step9 如果当前视点不是原始起点,则删除当前视点(即上一个视窗内最优子目标点),机器人后退到上个视窗内的视点,转向 Step6; 否则,告诉机器人无法到达目标点,算法结束。

反应式导航算法具体流程如图 4 所示。

2.2 反射式导航算法

当救援机器人的运动方向和目标点的方向一致时,机器人应该沿这个方向运动,直至遇到障碍物或者到达目标点为止。反射式导航算法流程如图 5 所示。

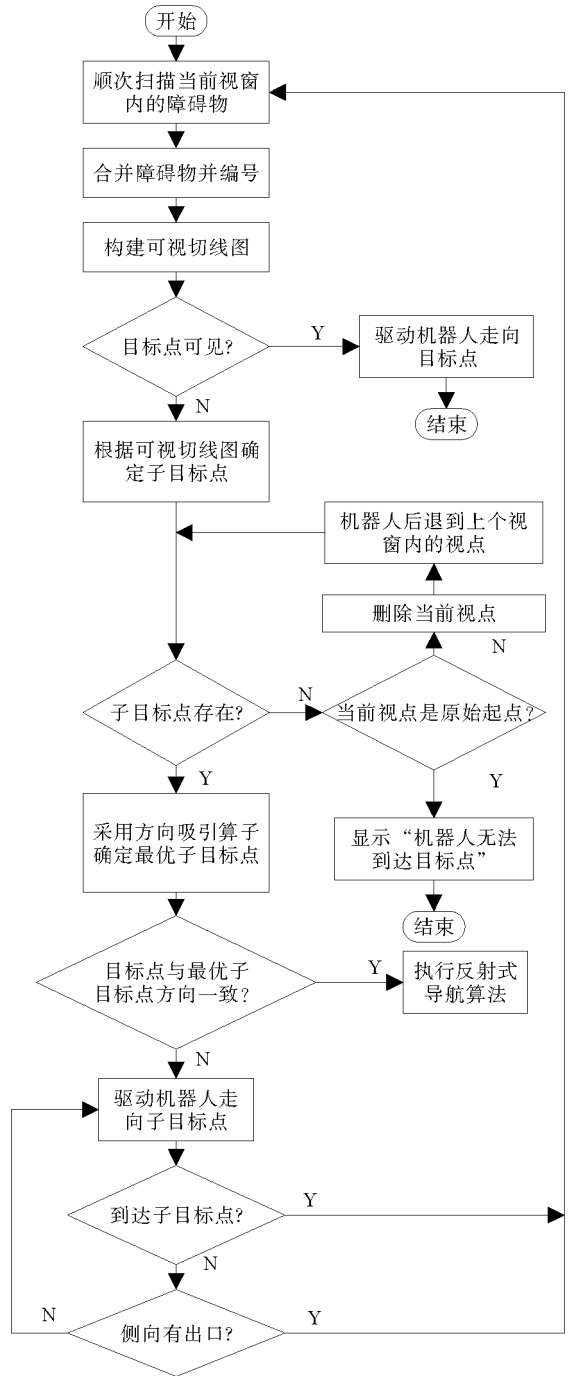


图 4 反应式导航算法流程图

Fig. 4 The flow of the reactive navigation algorithm

Step1 驱动机器人沿着目标点的方向运动。

Step2 探测机器人前方的障碍物。如果探测到障碍物,则机器人停止运动,执行反应式导航算法;否则,转向 Step3。

Step3 判断机器人是否到达目标点,如果到达目标点,则算法结束;否则,转向 Step1。

3 可行性分析

救援机器人在未知环境里运动,能否从起点顺利到达目标点对于完成任务是非常重要的。在工作区域内,如果客观上存在一条从起点 S 到目标点 D 的路径,算法应该保证机器人经过有限次的导航能从起点 S 运动到目标点 D 。为此,首先,导航算法必须能够找到客观上存在的路径,即要求算法保证机器人不能错过任何可行的路径;其次,导航算法能够使机器人逐渐向目标点逼近,即要求机器人行走路径的投影距离要满足:

$$|\overrightarrow{S^*D}| > \overrightarrow{AD} \cdot \eta_{S^*D} \quad (2)$$

其中, A 为行走路径上的点。

1) 机器人只有不漏掉任何可行的路径,才能保证找到客观上存在的路径。如图 6 所示,由于视角存在盲区,机器人无法探测到可行路径 P_1 ,而是沿着路径 P_2 行走,最终导致机器人无法到达目标点。因此,为使机器人在行走的过程中不漏掉任何可行的路径,在反应式导航过程中,Step8 给出了相应的解决办法。

2) 只要满足式(2)所示的不等式,就表明机器人逐渐向目标点逼近。机器人首先执行反应式导航过程,算法的 Step1 至 Step3 保证了机器人能够获得当前视窗内的可视切点和可视切线段,构建可视切线图。

在机器人的当前视窗内,当前起点、目标点和障碍物之间存在四种相对位置关系,如图 7 所示。

1) 目标点在视窗内并可见,如图 7(a) 所示,反应式导航算法的 Step4 给出了相应的动作。此时,机器人沿着 η_{S^*D} 运动并且其上每一点 A 满足 $|\overrightarrow{AD}| = \overrightarrow{AD} \cdot \eta_{S^*D}$,则机器人沿 η_{S^*D} 运动到点 A 有:

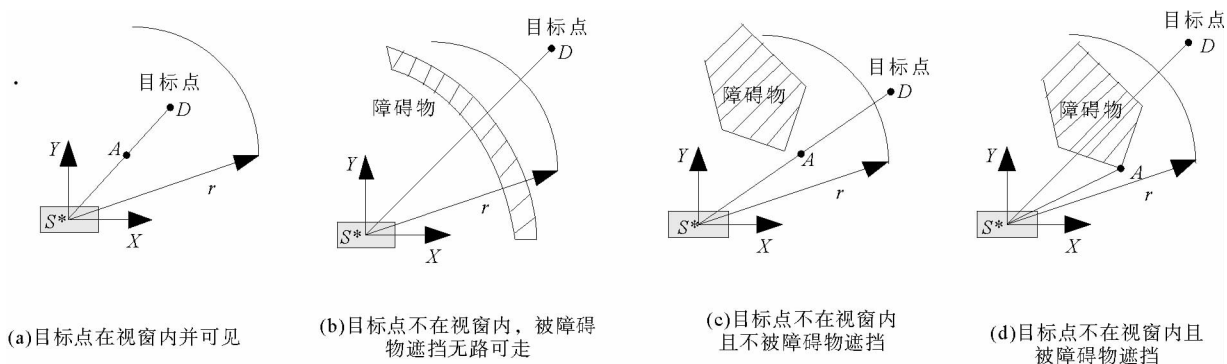


图 7 当前起点、目标点和障碍物之间的位置关系图

Fig. 7 The position relationships among the current starting point, the end point and obstacles

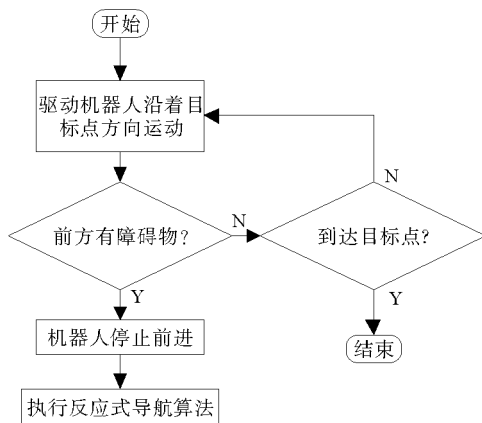


图 5 反射式导航算法流程图

Fig. 5 The flow of the reflective navigation algorithm

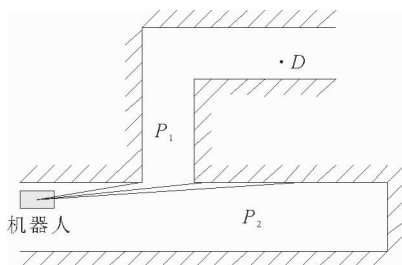


图 6 机器人无法检测到可行路径示意图

Fig. 6 The diagram that the robot can't detect a feasible path

$$|\overrightarrow{S^*D}| = |\overrightarrow{S^*A}| + \overrightarrow{AD} \cdot \boldsymbol{\eta}_{S^*D} \quad (3)$$

因此,路径投影距离满足 $|\overrightarrow{S^*D}| > \overrightarrow{AD} \cdot \boldsymbol{\eta}_{S^*D}$,机器人向目标点逼近。

2)目标点不在视窗内,被障碍物遮挡无路可走,如图7(b)所示,反应式导航算法的 Step9 给出了相应的动作。机器人后退到上个视窗内的视点,从而继续寻找其他可行路径,避免陷入局部死点而无法前进。由于客观上总存在一条从起点 S 到目标点 D 的路径,因此这种情况并不影响机器人到达目标点。

3)目标点不在视窗内且不被障碍物遮挡,如图7(c)所示,反射式导航算法的 Step1 至 Step3 给出了相应的动作。在这种情况下,行走路径投影距离满足式(2),机器人向目标点逼近。

4)目标点不在视窗内且被障碍物遮挡,如图7(d)所示,反应式导航算法的 Step5 至 Step8 给出了相应的动作。由于机器人没有被障碍物完全遮挡,根据式(1),其最优子目标点为 A ,因此 $-\pi/2 < \angle AS^*D < \pi/2$ 。在这种情况下,机器人沿 $\boldsymbol{\eta}_{S^*A}$ 运动到点 A ,并满足:

$$|\overrightarrow{S^*D}| - |\overrightarrow{AD}| \cdot \boldsymbol{\eta}_{S^*D} = |\overrightarrow{S^*A}| \cos \angle AS^*D > 0 \quad (4)$$

因此,行走路径投影距离满足式(2),机器人向目标点逼近。

通过上述分析,机器人在方向吸引算子的作用下不断地移动视窗,逐渐将目标点纳入其视线,使得目标点可见,驱动机器人运动到目标点。因此,基于可视切线图的导航算法,增强了机器人对环境的适应能力,保证了机器人能够从起点顺利到达目标点。

4 仿真实验

利用 Matlab 软件建立仿真环境,以一种多节履带式搜索机器人为仿真对象,进一步分析基于可视切线图的导航算法的可行性,如图8所示:机器人由四个单元串联而成,每个关节具有两个自由度,可以实现俯仰和偏航运动,运动范围为 $\pm 45^\circ$;机器人头部单元的前端和两侧均安装有超声传感器,可以探测机器人周围的环境信息。

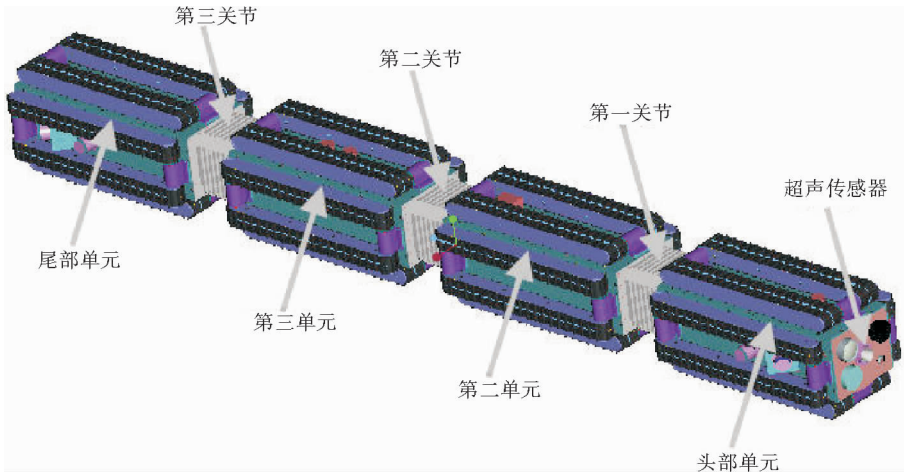


图8 多节履带式搜索机器人机构示意图

Fig. 8 The mechanism scheme of the multi-linked and tracked rescue robot

4.1 反射式导航算法测试

机器人从起点(400,400)向目标点(900,900)运动,如图9所示。在开始阶段,机器人的运动方向与目标点方向一致。依据反射式导航算法,机器人沿着目标点方向运动,当在点 A 处检测到前方有障碍物时,调整了运动方向。可见,采用反射式控制路径规划算法,机器人可以提前检测到障碍物,提前变向,减少了运动所需的时间。

4.2 反应式导航算法测试

为验证所提出的导航算法能够确保机器人在沿着最优路径运动的过程中发现两侧的可行路径,以便找到客观存在的路径,做如图 10 所示仿真实验。从图中可以看出,机器人在沿着子目标点运动的过程中,利用两侧的传感器检测到侧向有出口,则停止运动,重新执行反应式导航算法,因此能够到达目标点。

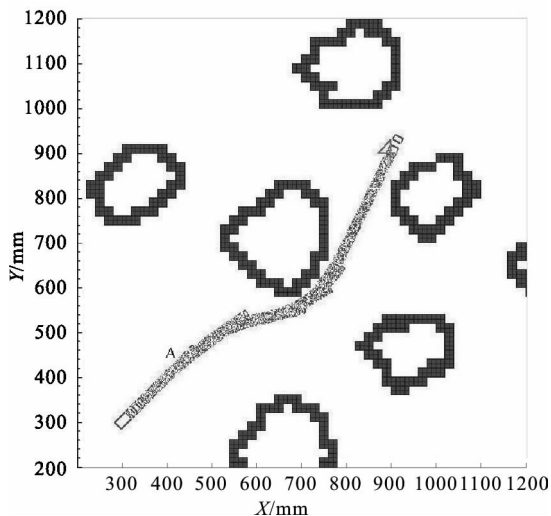


图 9 反射式导航算法测试结果图

Fig. 9 The test result of the reflective navigation algorithm

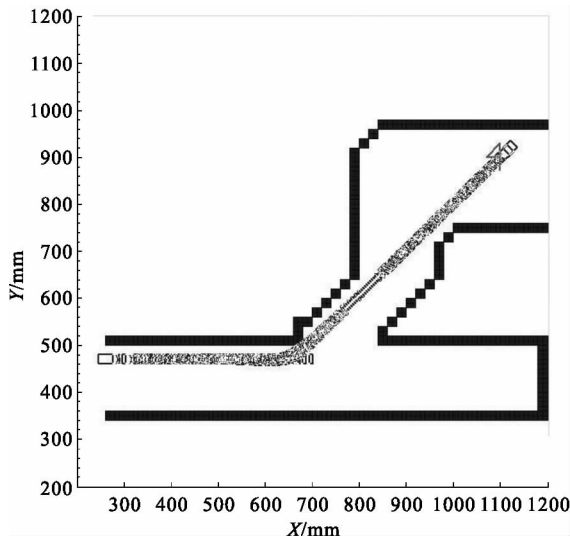


图 10 反应式导航算法测试结果图

Fig. 10 The test result of the reactive navigation algorithm

4.3 导航算法综合测试

为测试所提出的基于可视切线图的导航算法的综合性能,进行如图 11 所示的仿真试验。可以看出,机器人能够从起点顺利运动到终点。采用方向吸引算子启发式策略搜索出来的最优路径不是全局最优的,而是全局目标指导下的局部最优路径。

仿真实验结果不仅证明可视切线图是一种有效的路径规划工具,而且证明所提出的基于可视切线图及方向吸引算子启发式搜索策略的导航算法是可行的,具有较好的环境适应能力,能够满足救援机器人在未知环境下的导航要求。

5 结束语

针对未知环境下救援机器人的导航问题,将反射式导航算法和反应式导航算法有机地结合起来,提出了一种基于可视切线图的导航算法。通过对所提算法的可行性分析表明,如果客观上存在一条从起点 S 到目标点 D 的路径,则机器人可以从起点运动到目标点。最后,以一种多节履带式搜索机器人为仿真对象,证明了所提算法的可行性。仿真实验证明,应用该算法的机器人行走路径较短,所需运动时间相对较少,并且具有较好的环境适应能力,能够满足救

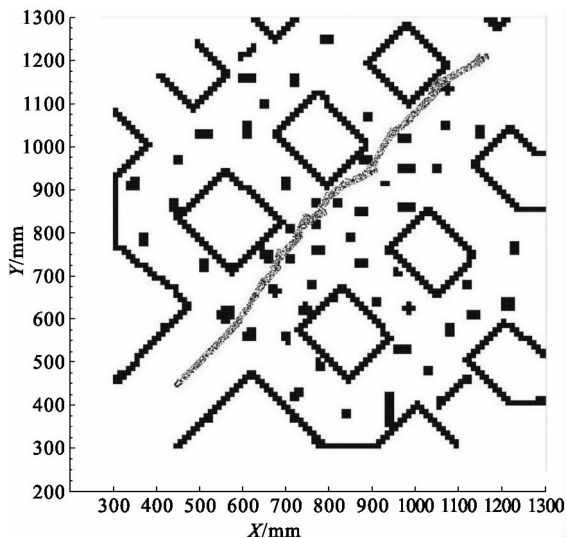


图 11 导航算法综合测试结果图

Fig. 11 The general test result of the proposed navigation algorithm

援机器人在未知环境下的运动要求。

参考文献:

- [1]MEGH DARI A,PISHKENARI H N,GASKARIMAHALLE A L,et al. Optimal design and fabrication of CEDRA rescue robot using genetic algorithm[C]//2004 International Design Engineering Technical Conferences, Salt Lake City, Utah, Sep. 28-Oct. 2, 2004; 1-8.
- [2]SATO N, MATSUNO F, SHIROMA N, FUMA: Platform development and system integration for rescue missions[C]//2007 IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, Roma, Sep. 27-29, 2007; 1-6.
- [3]PAL P K, JAYARAJAN K, RAY D D, et al. A mobile robot that removed and disposed ammunition boxes[J]. Current Science, 2007, 92: 1673-1677.
- [4]LEE W, KANG S, KIM M, et al. Rough terrain negotiable mobile platform with passively adaptive double-tracks and its application to rescue missions[C]//2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Apr. 18-22, 2005; 1591-1596.
- [5]MATSUNO F, HIROSE S, AKIYAMA I, et al. Introduction of mission unit on information collection by on-rubble mobile platforms of development of rescue robot systems(DDT) project in Japan[C]//SICE-ICASE International Joint Conference, Busan, Oct. 18-21, 2006; 4186-4191.
- [6]YAMAUCHI B. Autonomous urban reconnaissance using man-portable UGVs[C]//Conference on Unmanned Ground Vehicle Technology VIII, Kissimmee, Apr. 17-20, 2006; S2300.
- [7]MOOSAVIAN S A A, SEMSARILAR H, KALANTARI A. Design and manufacturing of a mobile rescue robot[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, Beijing, Oct. 9-13, 2006; 3982-3987.
- [8]MORI M, HIROSE S. Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by active cord mechanism ACM-R3[C]//2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, Lausanne, Switzerland, Sep. 30-Oct. 4, 2002; 829-834.
- [9]MASAYUKI A, TAKAYAMA T, HIROSE S. Development of Souryu-III-connected crawler vehicle for inspection inside narrow and winding spaces[C]//2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Sep. 28-Oct. 2, 2004; 52-57.
- [10]HARAGUCHI R, OSUKA K, MAKITA S, et al. The development of the mobile inspection robot for rescue activity MOIRA2[C]//12th International Conference on Advanced Robotics, Seattle, July 18-20, 2005; 498-505.
- [11]MIYANAKA H, WADA N, KAMEGAWA T, et al. Development of an unit type robot "KOHGA2" with stuck avoidance ability[C]//2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Apr. 10-14, 2007; 3877-3882.
- [12]TABATA K, INABA A, ZHANG Q, et al. Development of a transformational mobile robot to search victims under debris and rubble[C]//2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Sep. 28-Oct. 2, 2004; 46-51.
- [13]YE C L, MA S G, LI B. Research on urban search and rescue robot-development of Amoeba II[C]//6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, Jun. 21-23, 2006; 9183-9187.
- [14]LIU Y H, ARIMOTO S. Computation of the tangent graph of polygonal obstacles by moving-line processing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(6): 823-830.
- [15]LIU H J, YANG J Y, LU J F, et al. Research on mobile robots motion planning: A survey[J]. Engineering Science, 2006, 8(1): 85-94.
- [16]OOMMEN B, IYENGAR S, RAO N, et al. Robot navigation in unknown terrains using learned visibility graphs, part I: The disjoint convex obstacle case[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987(6): 672-681.
- [17]LIU Y H, ARIMOTO S. Computation of the tangent graph of polygonal obstacles by moving-line processing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(6): 823-830.
- [18]CANNY J F. A Voronoi method for the piano-movers problem[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cambridge, Mar., 1985; 530-535.
- [19]TOMONO M. Planning a path for finding targets under spatial uncertainties using a weighted Voronoi graph and visibility measure[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, Oct. 27-Nov. 1, 2003; 124-129.

[20] LIU Y H, ARIMOTO S. A flexible algorithm for planning local shortest path of mobile robots based on reachability graph [C]//IEEE International Workshop on Intelligent Robots System, Tokyo, July 3-6, 1990:749-756.

[21] LIU Y H, ARIMOTO S. Proposal of tangent graph and extended tangent graph for path planning of mobile robots [C]//IEEE International conference on robotics and Automation, Sacramento, California, Apr. 9-11, 1991:312-317.

[22] CHOSET H, BURDICK J. Sensor based planning, part I: The generalized voronoi graph [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nagoya, May 21-27, 1995:1649-1655.

[23] CHOSET H, KONUKSEVEN I, RIZZI A. Sensor based planning: A control law for generating the generalized voronoi graph [C]//8th International Conference on Advanced Robotics, Monterey, July 7-9, 1997:333-338.

[24] AHN S, DOH N L, LEE K, et al. Incremental and robust construction of generalized voronoi graph (GVG) for mobile guide robot [C]//2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, Oct. 27-31, 2003:3757-3762.

[25] HUANG H P, CHUNG S Y. Dynamic visibility graph for path planning [C]//2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Sep. 28-Oct. 2, 2004:2813-2818.

[26] 刘罡, 刘玉斌, 赵杰. 基于可视切线图的未知环境建模新方法研究 [J]. 高技术通讯, 2010, 20(7):505-510.
LIU Gang, LIU Yubin, ZHAO Jie. Research on a new method for unknown environment modeling based on visual tangent graphs [J]. High Technology Letters, 2010, 20(7):505-510.

“机器人与智能技术”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇ 机器人理论与控制技术
- ◇ 人工智能与智能控制技术
- ◇ 移动机器人及自主导航技术
- ◇ 机器人传感技术、智能传感器
- ◇ 机器视觉、图像处理与模式识别技术
- ◇ 智能系统建模与控制
- ◇ 机器人结构设计
- ◇ 多机器人系统
- ◇ 特种机器人
- ◇ 机器学习

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿,来稿请注明“机器人与智能技术”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表,并实行优稿优酬。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: xbgjcl@126.com; zklwh@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057826

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部