

面向救援任务的地面移动机器人路径规划

秦世引, 高书征

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要:由于救援机器人处于复杂环境中,面向紧急救援任务的实时性要求较高,因此,救援机器人的路径规划技术在整个救援过程中发挥着十分重要的作用.针对复杂环境条件,用多边形表示障碍物,设计了一种基于障碍物编码的遗传算法,进行路径规划.与以往的基于顶点编码的方法相比,该方法对障碍物复杂不规则的情况适应性更强,同时也缩减了解搜索空间,提高了算法的效率,增强了路径规划的实时性.通过异构多机器人联合救援模拟实验验证和分析,表明所提出的方法能够使机器人避让复杂环境中不同类型的障碍物,实现高效实时的路径规划,可操作性强,可以推广应用于实际救援系统中.

关键词:路径规划;障碍物编码;机器人救援;遗传算法

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-4785(2009)05-0414-07

Path planning for mobile rescue robots in disaster areas with complex environments

QIN Shi-yin, GAO Shu-zheng

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Rescue robots often work in complex environments and their effectiveness can determine whether victims will survive. This makes research on robot path planning of great significance. In this paper, obstacles in complex environments were modeled as polygons. Based on the encoded polygon, a new path planning algorithm was proposed using genetic algorithms. Compared with previous vertex-based encoding methods, the proposed encoding method can more easily adapt to the irregular shapes of obstacles. The solution space is thus considerably reduced, improving the efficiency and real-time performance of the path planning algorithm. Experimental results demonstrated that the algorithm can effectively guide a robot around obstacles in complex environments, producing acceptable paths for robots covering difficult terrain in rescues. The algorithm can be extended to practical rescue systems involving multiple robots.

Keywords: path planning; obstacles encoding; robot rescue; genetic algorithm

近年来多发的自然灾害如雪灾、火灾、水灾、地震、瘟疫以及人为的恐怖活动都威胁着人们生命财产的安全.采用救援机器人辅助甚至代替救援人员完成对幸存者的搜救任务,能够大大提高救援的实施效力和执行效率,减少人员伤亡^[1, 2].这种异构机器人救援系统由多种类型的机器人协作完成任务,地面救援机器人和空中飞行机器人相结合进行立体化侦察、搜寻和救援,以扩大搜索和救援范围,提高环

境感知和目标识别的可靠性和准确性.其中地面机器人负责直接的搜寻和救援,空中飞行机器人在灾害环境中可以不受地面状况的影响、灵活性高、“视野”广、加快搜索速度,在搜救行动中更多地从事现场勘查和为地面救援机器人探路导航等工作.它利用所得到的环境信息快速进行路径规划,并遥控地面救援机器人按照规划的路线行进.

机器人路径规划^[3]本质上是一个 NP 完全问题,难以求得精确解.传统的图搜索法、栅格法等搜索效率较低,路径优化结果^[4-6]也不尽理想.遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法,它对复杂的非线性问题具有良好的适用性.本文在用多边形

收稿日期:2009-05-29.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60875072);国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2006AA04Z207);教育部博士点基金资助项目(20060006018);中澳国际合作资助项目(2007DFA11530).

通信作者:秦世引. E-mail: qsy@buaa.edu.cn.

表示障碍物的基础上,提出了一种新的基于障碍物编码的方法,和以往类似方法^[7,8]相比,进一步缩小了搜索的解空间,提高了搜索速度.通过异构多机器人联合救援模拟实验,验证了此方法非常适用于复杂环境中的障碍物建模,能够提高基于遗传算法的路径规划效率.

1 基于障碍物的编码

1.1 环境建模

如图 1 中,空中飞行机器人采集的图像和地面搜救机器人通过超声、红外等传感器获得的信息进行融合,得到环境中障碍物的精确位置,由空中机器人规划好路径,将控制指令通过无线网络发送给地面救援机器人,这将大幅度提高救援系统的工作效率.显而易见,只有准确建模复杂环境,快速地规划出地面救援机器人的行进路线,才能够快速实施救援,将灾情导致的损失和伤亡降到最低.目前环境建模方法包括可视图法、切线图法、Voronoi 图法、拓扑法、惩罚函数法、栅格法等^[9].前 4 种方法都是采用基于图论的思想,将目标、机器人及其工作空间用一个连接图表示,将路径规划问题转化为在图上寻找一条从起始节点到目标节点的路线.惩罚函数法将路径规划这个有约束的问题(受到障碍物的限制)转化为一个无约束最优化问题,再求解就可得出解答.栅格法用网格描述机器人的工作环境,根据栅格的可信度值可确定出障碍物的分布,此时通过避障规划就可得到无碰路径.文献[10]提到了根据机器人尺寸膨胀障碍物的方法,文献[7-8]用到一种用多边形表示障碍物的形式,将路径限制在障碍物顶点的连线上,大大缩小了搜索的解空间.

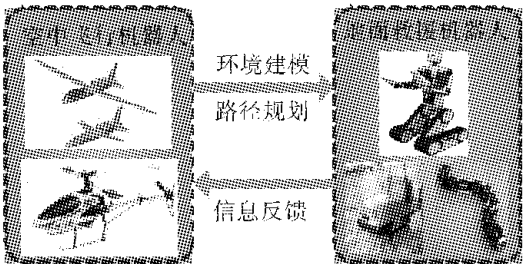


图 1 异构多机器人救援系统
Fig. 1 Rescue system of heterogeneous robots

本文同样采用多边形表示障碍物,并且完善了对不同形状障碍物处理的规则,如图 2 所示.具体处理方法如下:

1)如图 2 外轮廓线所示,考虑到实际机器人尺寸,对障碍物用多边形表示时留出一定的安全距离使得机器人沿障碍物运动时不会与障碍物发生直接

的接触,造成碰撞或者阻挡^[7,10];
2)对圆形障碍物用正多边形表示,可以用正六边形、正八边形,边数越多越精确,然而边数越多,在判定是否能穿越障碍物的过程中随之造成的计算负担也会增加;

3)如图 2(c)所示,当障碍物某一顶点处的锐角度数特别小时,其两侧外轮廓线的焦点将远离实际顶点 P ,那么按照 P 的位置来规划路径,必定产生错误的结果.因此,可以将 P 点视为用 2 个顶点表示的一段很短距离的线段,使建模更合理,如图中虚线圈区域所示;

4)凹多边形内角和大于 180° 的点是不可能到达的,否则必然不是最短路径.对凹多边形通过增加连线,将凹多边形转化成多个相互连接的凸多边形以方便最短路径的计算,以及判定所规划的路径是否穿越障碍物.

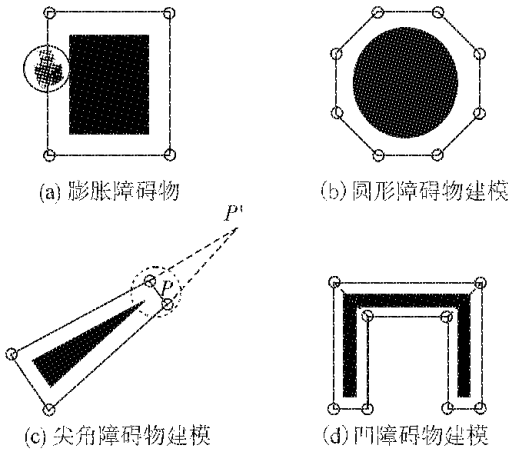


图 2 障碍物轮廓的多边形拟合
Fig. 2 Modeling obstacles with polygon

经过上述处理,从指定起始点到目标点的最短距离问题的最优解必然是通过多边形某些顶点连起来的路线.这样不仅限定了可行解空间,提高搜索算法效率,而且可以简化路径编码方式,通用性更强.

1.2 染色体编码方式

采用多边形表示障碍物的建模方法,文献[8]将路径编码成定长为环境中所有障碍物顶点个数之和的十进制染色体串.与基于顶点的编码方式不同,本文采用基于障碍物的编码方式.首先对 M 个由多边形表示的障碍物编号,令所有障碍物顶点个数之和为 N ,其顶点按一个方向(顺时针或逆时针)依次编号.然后对路径经过每个凸多边形的顶点用 4 位十进制数表示,如:

S_{obs}	S_{ver}	N_{ver}	D_{ver}
-----------	-----------	-----------	-----------

其中: S_{obs} 表示障碍物序号, 该障碍物是第几个被经历的; S_{ver} 表示顶点序号, 从该障碍物第几个顶点开始; N_{ver} 表示经过的顶点个数; D_{ver} 表示顶点排列的方向, 为 0 (顺时针) 或者 1 (逆时针). 种群个体均为长度为 $M \times 4$ 的十进制染色体串. 每条染色体中 M 个 S_{obs} 位为 $1 \sim M$ 的随机排列, 第 $M_i = (i = 1, 2, \dots, M)$ 个障碍物的顶点个数为 N_i , 路径经过障碍物的起始顶点 S_{ver} 为 $1 \sim N_i$ 的随机数. N_{ver} 表示经过的顶点个数, 为 $(1, \frac{N_i + 1}{2})$ 的整数, 防止路径对某个障碍物的环绕. 顶点排列的方向 D_{ver} 有 50% 的概率为 0 或者 1.

作为对比, 引用文献[8] 中的环境图 (图 3), 其中编号 1~6 的方块表示障碍物, 编号 1~24 的圆点表示障碍物的顶点. 对图中一条从起始位置到目标位置的可行路径, 基于顶点和基于障碍物的编码对比如图 4 所示. 这种编码方式将路径中经过的所有不规则障碍物顶点的信息都用 4 位整数表达, 在障碍物顶点很多时减小了染色体编码的长度, 更重要的是可以有效防止路径重复经过某一个障碍物的“迂回”情况发生, 大大缩小解的搜索空间.

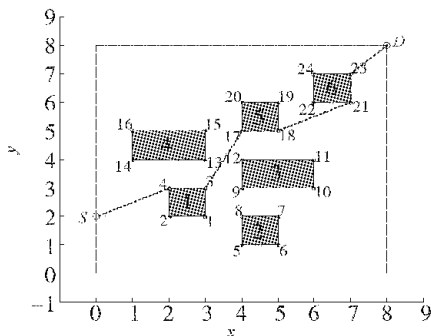


图3 编码后的障碍物

Fig. 3 Encoded obstacles in the environment

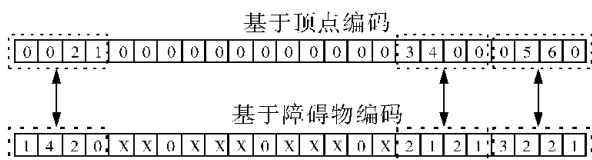


图4 基于顶点和基于障碍物的编码对比

Fig. 4 Comparison between vertex-based encoding and obstacle-based encoding

2 基于遗传算法的路径规划

2.1 适应度函数

适应度函数^[11]的选择在遗传算法中是相当重

要的, 它是引导遗传算法向问题最优解逼近的关键因素. 对于具有约束性能指标的最优问题, 可以取性能指标或性能指标的变换作为适应度函数^[12]. 本文讨论的问题是求一条最短路径, 约束条件是路径不能穿越障碍物. 为了方便赌盘选择操作, 将适应度函数定义为最大化问题:

$$\max F(p) = A - d_{\text{sum}}(p) - r\varphi(p).$$

式中: A 为适当大的实数值 (A 的取值保证 $F(p)$ 为非负的实数), $d_{\text{sum}}(p) = \sum_{i=1}^{n-1} d(m_i, m_{i+1})$ 表示路径总长, $d(m_i, m_{i+1})$ 表示两相邻节点 m_i, m_{i+1} 之间的欧氏距离, $\varphi(p)$ 表示该路径穿过障碍物的次数, 通过依次判断障碍物顶点是否在路径两侧即可得到. r 取一个比较大的正实数表示对穿过障碍物的不可行路径的惩罚, 实验中取值 5 000, 远大于可行路径长度以使路径尽快进化为可行解. 称 $d_{\text{sum}}(p) + r\varphi(p)$ 为路径的等效距离, 之所以称其为等效距离, 是因为它包含了对路径穿过障碍物的惩罚. 在用多边形表示障碍物的方法完成环境建模后, 首先计算出各顶点之间的等效距离矩阵, 以后计算个体适应度时, 依次从等效距离矩阵中取出路径相邻顶点的等效距离值, 这种建立查询表的方式可以避免对两顶点间线段等效距离的重复计算, 节省了时间.

2.2 遗传操作

2.2.1 选择

采用传统的赌盘选择^[12]方法, 若种群中有 N' 个个体, 第 i 个个体的适应度为 f_i , 则它被选择进入下一代的概率为 $p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^{N'} f_j}$. 这样适应度大的个体更有可能进入下一代, 同时进化中采用最优个体保留策略.

2.2.2 个体交叉

从父代中随机选择 2 个个体, 以障碍物为单位分成 2 部分, 交换彼此的第 2 部分生成 2 个新个体. 新个体中可能会出现 2 个障碍物序号相同的情况, 因此要进行 1 次障碍物序号的排序, 将障碍物序号重新整合成 $1 \sim M$ 的整数排列, 而且每个整数只出现 1 次.

2.2.3 变异

相对于传统方法中的插入节点、删除节点、变换节点^[13-14], 这里变成 $S_{ver}, N_{ver}, D_{ver}$ 位的变异. S_{ver} 等概率取 $(1, N_i)$ 的随机数, N_{ver} 等概率取 $(1, \frac{N_i + 1}{2})$ 的整数, D_{ver} 变异为 $(1 - D_{ver})$, 具体操作如图 5 所示.

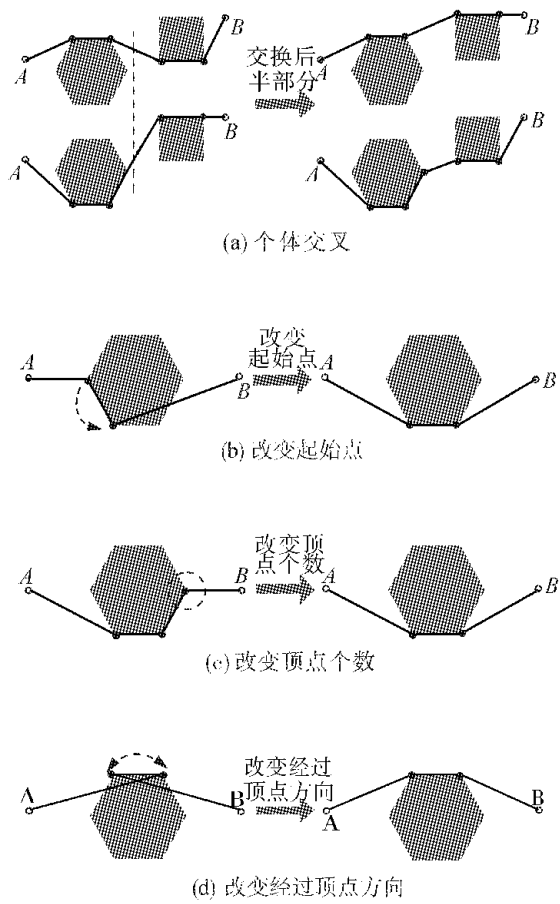


图 5 遗传操作

Fig. 5 Operators of the genetic algorithm

3 实验和分析

3.1 算法效率比较

3.1.1 四边形障碍物

种群规模直接影响遗传算法的收敛性,由于图 3 中障碍物形状比较简单,本文采用 30 个个体进行仿真实验,当最优个体连续 100 代没有变化时终止算法.文献[8]旨在表述一种新的路径编码机制,对环境图 3 只采用了简单的交叉变异操作,但是实验表明插入节点、删除节点、变换节点^[13-14]等操作算子可以显著提高遗传算法寻优能力和收敛速度.在同样的多边形表示障碍物建模的情况下,本文对基于顶点编码的简单(只有交叉变异操作)算法、基于顶点编码的改进算法(包括个体交叉、插入节点、删除节点、交换节点操作)和基于障碍物编码的方法进行对比仿真实验.为了使得顶点编码的算法与障碍物编码算法能够相互比较,本文为顶点编码算法增加了插入节点、删除节点以及变化节点的操作,以求更符合实际的对比效果.算法参数设定如表 1 所示.

表 1 3 种算法参数

Table 1 Parameters of the three algorithms

参 数	顶点编码 简单算法	顶点编码 改进算法	障碍物 编码算法
种群规模	30	30	30
操作算子	个体交叉	个体交叉	个体交叉
子概率	概率 20%	概率 20%	概率 20%
变异	插入节点 概率 20%	变换起始顶点 概率 20%	
		删除节点 概率 20%	变换经过顶点 个数概率 20%
		变换节点 概率 20%	变换顶点排列 方向概率 20%

图 6 是对 3 种算法分别实验 100 次后取均值得到的算法效果对比图.在实验中,基于顶点编码简单算法、基于顶点编码改进算法、基于障碍物编码算法最后搜索到全局最优解的概率分别是 65%、100%和 95%.

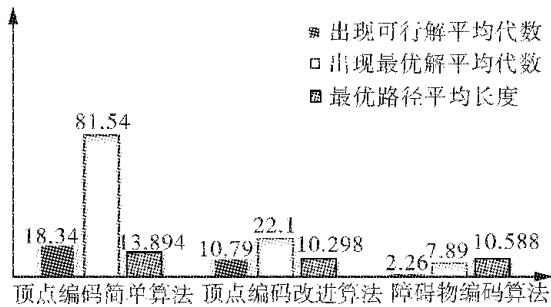


图 6 3 种算法性能比较

Fig. 6 Performance comparison of the three algorithms

通过对上面实验结果的分析可以发现,对简单的环境图,顶点编码改进算法不仅收敛性比顶点编码简单算法有显著改善,而且寻找到全局最优解的能力大大提高.相比而言,基于障碍物编码算法,在很少代数就出现了可行解和局部最优解,主要原因是这种编码方式在大大缩小了解的搜索空间.但是最后算法寻找到全局最优解的概率比顶点编码改进算法略低一些,因为当各个障碍物顶点数 $N_i \leq 4$ 时,基于障碍物编码的染色体长度并不比基于顶点编码算法短,而且编码格式的限制使其寻找全局最优的能力有所减弱.

3.1.2 多边形障碍物

当障碍物形状比较复杂或者用多边形表示圆形

障碍物时,为了获得较高精度而增加正多边形边数,此时不仅个体编码长度大大增加,而且整个解搜索空间也大大增加.对这种顶点数 $N_i \geq 4$ 的情况也进行了实验,机器人环境图如图7所示.需要说明的是,这里影响算法效率的主要参数是多边形的顶点数,而与多边形是否规则无关,为了方便布置,采用了正八边形.这次实验将种群规模设置为50,操作算子概率参数不变,如表1所示,种群迭代200代结束程序.

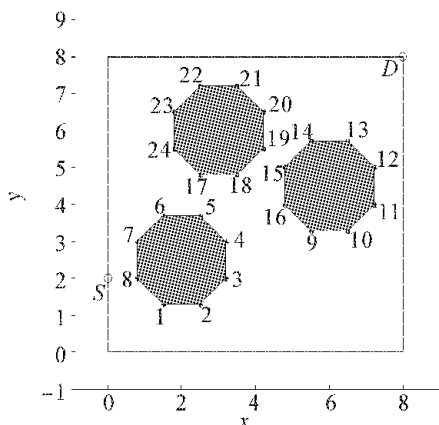


图7 八边形障碍物环境示例

Fig.7 An example of environment with octagon obstacles

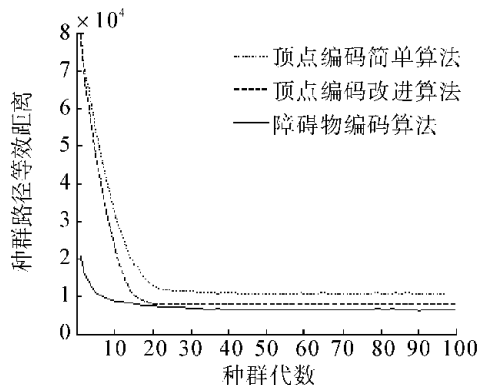


图8 种群路径等效距离平均长度对比

Fig.8 Comparative results of average equivalent distance of population contrast

当种群进化200代后,最优解路径可行的概率分别为12%、65%、100%.主要原因在于基于顶点的编码方式路径经常会出现多次经历同一障碍物的“迂回”现象,而且在没有任何先验信息的情况下随机生成的路径穿过障碍物的概率更高;基于障碍物的编码方式本质上是利用了同一障碍物的顶点集合作为先验信息,能产生平均适应度更高的随机个体,并且特殊的编码方式大大减少了解的搜索空间.前100代种群路径等效距离 $d_{sum}(p) + r\varphi(p)$ 平均长度

变化和某一次实验中最优个体路径等效距离长度变化对比图分别如图8和图9所示.实验中对穿过障碍物的不可行路径的惩罚 r 取5000,可见种群初始化时基于障碍物编码方式的算法更容易产生适应度高的个体.

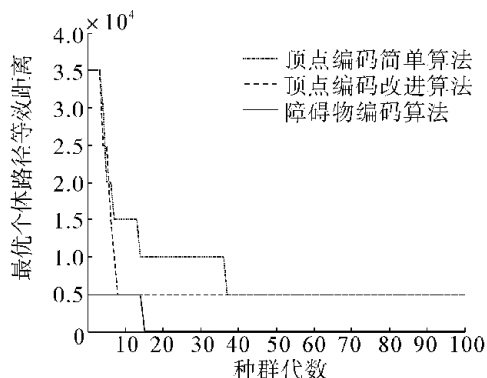


图9 最优个体路径等效距离长度对比

Fig.9 Comparative results of equivalent distance of the optimum individual contrast

3.2 救援过程路径规划模拟实验

在采用广角相机、计算机和ASR(ability storm robot)机器人等搭建的异构多机器人联合救援模拟实验平台(图10)上进行了实验.计算机和广角相机模拟空中机器人采集地面图像,完成环境建模和路径规划,通过无线网络将控制指令发送给地面救援机器人,使地面救援机器人沿着规划出的路径前进,并精确定位到救援目标位置.

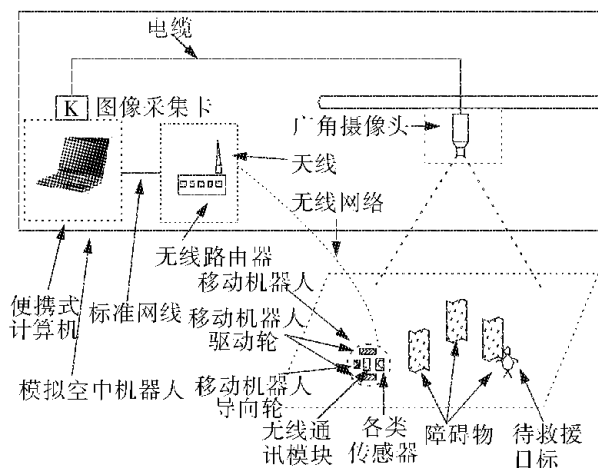


图10 多机器人联合救援模拟实验平台

Fig.10 Rescue simulation platform of multi-robots

实验中关键参数如表2所示.对广角摄像头采集的畸变图像^[15],如图11所示,文中采用三次多项式拟合图像坐标和世界坐标的对应关系,通过32组特征点求解多项式的系数,实现图像坐标到世界坐

标的映射. 还利用投影关系对机器人高度引起的误差进行了补偿,实现了对机器人的精确定位,并通过基于图像^[16]的视觉反馈控制^[17]提高机器人导航的精度.

表 2 模拟救援实验系统参数

Table 2 Parameters of the rescue simulation system

参数项	参数值
计算机配置	Core2 Duo CPU 2.1 GB,内存 2 GB
无线网卡	802.11b,54 Mbps
相机分辨率	640 pixel × 480 pixel
编程语言	Visual C++
机器人半径	0.24 m
机器人运动区域	4.8 m × 2.4 m
机器人定位精度	误差 < 0.03 m
机器人行进速度	0.06 m/s
每秒处理图像数	5 帧

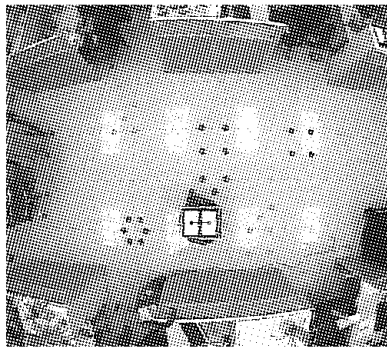


图 11 模拟救援实验环境

Fig. 11 Environment of the rescue simulation

采用基于障碍物编码的遗传算法进行路径规划. 种群规模取 50,交叉变异参数与表 1 相同. 对图 11 环境放置了不同的障碍物,改变其位置,并指定不同的起始终止点,做了 10 组实验. 图 11 是某一次实验中时刻置顶相机采集到的图像,图 12 是监控程序画的对应的路径规划与导航控制图,已经转化到标准直角坐标系下, O 为原点,横轴为 x 轴,纵轴为 y 轴,黑色区域为障碍物区,图像四周深灰色区域为不可行区,黑色周围的浅灰色区为考虑到机器人尺寸而做的安全限制区,白色部分为安全区. S 为机器人起始点, D 为目标点. 规划出的路径在图 12 中用细线表示,机器人行进效果如图 12 中黑色粗线所示.

由于基于障碍物编码的方法初始化产生性状更加优良的种群,并且大大减少了解的搜索空间,可行

解和最优解出现的时间大大缩短. 在模拟实验中,10 组机器人路径规划平均时间 $t < 0.2$ s,已经低于反馈控制的时间周期,使实时系统的在线路径规划成为可能.

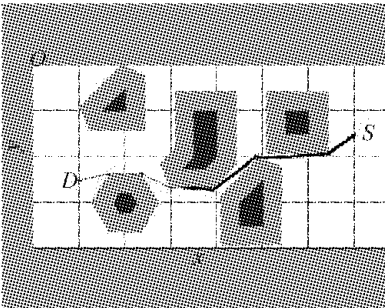


图 12 机器人按照规划的路径在救援实验环境中运动

Fig. 12 The robot moves along the planned path in the rescue simulation environment

4 结束语

本文针对面向救援任务的机器人路径规划问题,设计了一种基于障碍物编码的遗传算法. 较之以往基于顶点编码的算法,该算法可以初始化产生适应度更高的个体,而且通过缩减解搜索空间加快了遗传算法的搜索速度,缩短了可行解和最优解的搜索时间,使在线实时的操作成为可能. 通过模拟实验证明了这种方法的可行性和有效性,可以推广应用到下一步将要研究的实际的救援系统中.

参考文献:

[1] CASPER J L, MICIRE M, MURPHY R R. Issues in intelligent robots for search and rescue [C]//Proceedings of SPIE. Orlando, USA, 2000, 4024: 292-302.

[2] MATSUNO F, TADOKORO S. Rescue robots and systems in Japan[C]//Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics. Shenyang, China, 2004: 12-20.

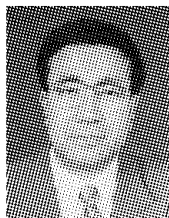
[3] 郭再新, 李艳宏, 刘 涛. 多移动机器人路径规划技术的研究现状与展望[J]. 机械, 2008(1): 13-16.

WU Zaixin, LI Yanhong, LIU Tao. Research progress and future development on path planning for multi-robot [J]. Machinery, 2008(1): 13-16.

[4] QUINLAN S, KHATIB O. Elastic bands: connecting path planning and control [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, USA, 1993, 2: 802-807.

- [5] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 1994, 4: 3310-3317.
- [6] 黄彦文, 曹其新. RoboCup 比赛环境下足球机器人路径规划研究[J]. 智能系统学报, 2007, 2(4): 52-57.
HUANG Yanwen, CAO Qixin. Path planning for robot soccer in the RoboCup environment[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2(4): 52-57.
- [7] WANG Y, SILLITOE I, MULVANEY D J. Mobile robot path planning in dynamic environments[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma, Italy, 2007: 71-76.
- [8] 蔡自兴, 彭志红. 一种新的路径编码机制在移动机器人路径规划中的应用[J]. 机器人, 2001(3): 230-233.
CAI Zixing, PENG Zhihong. The application of a novel path encoding mechanism in path planning for a mobile robot[J]. Robot, 2001(3): 230-233.
- [9] 戴博, 肖晓明, 蔡自兴. 移动机器人路径规划技术的研究现状与展望[J]. 控制工程, 2005(3): 198-202.
DAI Bo, XIAO Xiaoming, CAI Zixing. Current status and future development of mobile robot path planning technology[J]. Control Engineering of China, 2005(3): 198-202.
- [10] WISE K D, BOWYER A. A survey of global configuration-space mapping techniques for a single robot in a static environment[J]. The International Journal of Robotics Research, 2000, 19(8): 762-779.
- [11] HU Y R, YANG S X, XU L Z, et al. A knowledge based genetic algorithm for path planning of a mobile robot environments[C]//IEEE International Conference Robotics and Automation. Shenyang, China, 2004: 767-772.
- [12] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论, 应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 25-28.
- [13] LI Q, ZHANG W, YIN Y, et al. An improved genetic algorithm of optimum path planning for mobile robots[C]//Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2006: 637-642.
- [14] MAHJoubi H, BAHRAMI F, LUCAS C. Path planning in an environment with static and dynamic obstacles using genetic algorithm: a simplified search space approach[C]//IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver, Canada, 2006: 2483-2489.
- [15] 刘宏鼎, 秦世引. 双目轮式移动机器人的运动目标识别与跟踪[J]. 智能系统学报, 2007, 2(3): 19-24.
LIU Hongding, QIN Shiying. Recognition and tracking of moving targets for binocular wheel moving robots[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2007, 2(3): 19-24.
- [16] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 2nd ed. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2002: 420-500.
- [17] 方勇纯. 机器人视觉伺服研究综述[J]. 智能系统学报, 2008, 3(2): 109-114.
FANG Yongchun. A survey of robot visual servoing[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3(2): 109-114.

作者简介:



秦世引, 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂系统的智能控制、图像处理与模式识别等。作为负责人主持完成(或在研)国家攀登计划项目的子项目、国家“973”项目的子课题、国家“863”项目、国家自然科学基金项目、国防科技预研基金项目、武器装备预研基金项目等 18 项。1999 年获全国优秀科技图书奖暨科技进步奖(科技著作)一等奖, 1999 年获国家第五届工程设计优秀软件金奖。发表学术论文 130 余篇, 出版学术著作 1 部, 研究生教材 1 部, 译著 2 部。



高书征, 男, 1985 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为移动机器人路径规划与视觉导航控制。