

基于遗传算法的移动机器人动态避障路径规划方法

李庆中 顾伟康 叶秀清

(浙江大学 信息与电子工程学系 杭州 310027)

摘 要 本文提出了一种基于遗传算法的简单、有效的移动机器人实时动态避障路径规划方法. 为利用遗传算法实时、稳定地进行动态路径规划, 本文将复杂的二维路径编码问题简化为一维编码问题, 并把路边约束、动态避障要求和最短路径要求融合成一个简单的适度函数. 仿真实验表明, 本文提出的动态路径规划方法可实时、稳定地产生移动机器人运动的最佳局部规划路径, 且具有良好的动态避障性能. 该方法也可用于智能车辆的自动导航.

关键词 遗传算法, 路径规划, 动态避障, 移动机器人

中图法分类号 TP18, TP242.6

1 引 言

移动机器人是能够在道路和野外连续、实时地自主运动的智能机器人, 是一种集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多项功能于一体的高智能化机器系统. 基于机器视觉的移动机器人, 其关键技术是计算机视觉技术和智能控制技术. 在每个控制循环过程中, 移动机器人的动态行为是, 机器视觉获取前方的路面环境及障碍物信息, 然后通过智能系统产生局部最优规划路径, 并用智能路径跟踪控制方法使移动机器人沿规划的路径行走. 对于在动态环境中移动机器人的局部路径规划问题, 传统的寻优策略因复杂而费时, 难以用于移动机器人的实时导航. 前人的研究表明遗传算法在这方面具有较大潜力^[1-4]. 为使实时应用得以实现, 关键是确定简单、有效的遗传编码技术和目标评价函数. 本文利用遗传算法, 对基于机器视觉的移动机器人的实时动态避障路径规划进行了研究, 将复杂的二维路径编码问题简化为一维, 并把路边约束、动态避障和最短路径要求融合成一个简单的适度函数. 最后通过仿真实验, 验证了本文提出的方法的有效性和准确性.

2 移动机器人组成与动态控制规划策略

本研究采用的移动机器人平台是美国 TROBOT 公司的 ATRV-2 产品. 其动力传动采用四轮驱动系统, 每个轮子由一个直流电机驱动, 各个轮子的转速由平台内部的计算机系统控制. 在此智能移动平台上, 我们建立了基于机器视觉的移动机器人系统, 其外形如图 1 所示. 其中视觉系统由移动

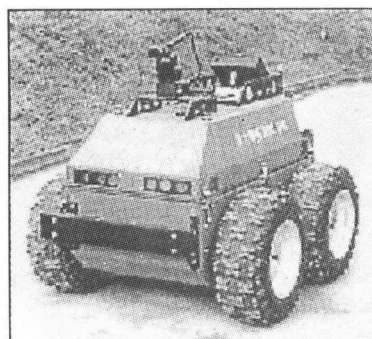


图 1 移动机器人外形

机器人上方的彩色 CCD 摄像机和内部微机主板上的图像采集卡组成. 机器人前方装有激光雷达和声

收稿日期: 2001-05-16; 修回日期: 2001-09-10

纳装置.视觉系统为移动机器人提供前方道路环境的图像信息,激光雷达可快速测量前方障碍物的远近和速度,声纳用于近距离突发障碍物的紧急刹车.

移动机器人控制策略主要有环境信息反馈法^[5]和路径规划跟踪法两种.信息反馈法包括势场法^[5]、虚力场法和基于网络结构的方法等,这些方法的特点是根据传感器测定的环境信息,综合确定机器人的运动方向与速度控制量,将参考路径的生成和路径的跟踪控制结合在一起.其优点是系统的实时性提高,但因为没有进行参考路径的规划,所以不能保证机器人的行走路径为最佳.此外,还会出现机器人运动方向多变从而使机器人的稳定性和安全性下降等问题.因此,在实际应用中,多采用路径规划跟踪法,即把局部路径规划功能和路径跟踪功能分开,由两模块完成.这样可以克服信息反馈法的弊病.本文采用这种方法,具体的控制规划策略是,在移动机器人行走之前,首先对机器人将要行走的路线进行全局规划;当机器人行走以后,则由机器视觉、激光雷达等传感装置,实时测量前方的路面环境信息和动态障碍物信息,然后在机器视觉的预瞄范围内,进行局部路径的动态规划,然后由智能控制算法实现路径的跟踪控制,以实现避障等功能;而对于前方突然出现的近距离障碍物,或实在无法避开的障碍物,则由声纳快速反应,实现紧急刹车处理.路径的全局规划,是一个离线规划问题,比较容易解决.声纳的紧急刹车控制,属于条件反射性的控制,也易于实现.以上问题的关键是环境动态信息的快速、准确获取,动态局部路径的实时规划,以及路径跟踪的智能控制.动态环境是在路面环境中,存在静态或动态的障碍物,而这些障碍物在初始的全局路径规划过程中是无法预知的.我们已经开发了比较成熟的路径跟踪智能控制方法,运动障碍物信息的快速获取正在研究过程中,本文主要介绍实时动态路径规划的方法.

局部动态路径规划的基本策略是,从移动机器人的当前位置出发,根据机器视觉和激光雷达得到的路边约束和障碍物的运动速度与运动方向等信息,在机器视觉的一定预瞄范围内实时规划出一条安全、可行的最短参考路径,该参考路径必须满足路边约束条件和动态避障条件,是由一定间距的点序列构成.移动机器人沿参考路径运动的同时,以机器人当前行走速度,对参考路径进行新一轮规划,并由重新规划的路径代替原参考路径,进入下一轮的路径跟踪控制,使机器人沿动态参考路径不断向全局目标点接近.每次局部规划路径的长度必须足够大,

使移动机器人有时间避开障碍物、以及能对前方未规划区域中的路径进行规划,并使两次规划的路径有足够的重叠长度,从而保证运动路径的可靠性和最优性.

3 遗传路径规划算法

遗传算法(GA)是一种基于自然选择和自然遗传的全局优化算法,它采用从自然界选择、遗传操作中抽象出来的几个算子,对参数编码的字符串进行遗传操作,每一字符串对应于一个可行解,这种遗传操作是对多个可行解组成的群体进行的,故在进化过程中可以并行地对解空间的不同区域进行搜索,可使搜索趋于全局最优解而不会陷于局部极小解.正是由于这种内在的优良特性,GA可广泛应用于各种优化问题.遗传算法的操作算法主要有:

(1) 复制或选择算子(Reproduction or Select):将父代的个体原封不动地传递到子代,在复制过程中,每个个体是按照适应度值的大小决定其能否被复制到下一代的概率,复制算子可使群体中的优秀个体数目逐渐增加,使进化过程向更优解的方向发展,反映了自然界中优胜劣汰的法则.

(2) 交叉算子(Crossover):上面的复制算子只能在现有群体中寻优,而不能产生与父代不同的个体,交叉算子可使同一代的某对个体间,按一定的概率交换其中的部分基因,从而产生新的基因组合,可望获得比父代更好的个体.

(3) 变异算子(Mutation):复制和交叉算子只能在现有基因型的排列组合内寻找最优,而不能产生新的基因型,变异算子可使基因型发生变化,从而扩大寻优范围.

可见GA的主要优点是:采用群体方式对目标函数空间进行多线索的并行搜索,可同时对多个可行解进行检查,交叉算子、变异算子可使可行解之间交换信息和产生新的可行解,不会陷入局部极小点;GA只需要可行解目标函数的值,而不需要其它信息,对目标函数的连续性、可微性没有要求,因此使用方便;解的选择和产生采用概率方式,因此具有较强的适应能力和鲁棒性.

3.1 路径编码方式

在遗传算法中,对于固定的适应度函数,编码的长度和搜索空间的大小直接决定了在线计算的时间,因此,本文采用了简化编码长度的技术,即把路径的二维编码简化为一维编码.编码技术如图2所示.图中的起始点即移动机器人的当前位置,目标点

是机器视觉预瞄范围内的局部路径的目标点,规划的路径就是在起始点和目标点之间,在图中所示的路边约束范围内,确定最佳路径的点序列坐标.在地面坐标系 XOY 中,路径点序列的坐标是二维的,为降低编码长度,对坐标系进行了变换,新的坐标是 xoy , x 轴为起始点与目标点的连线,然后把 x 轴等分成 x_1, x_2, \dots, x_n , 则优化的路径点就简化为一维的 y 坐标编码优化问题.编码采用浮点数形式,编码格式如图 3 所示.

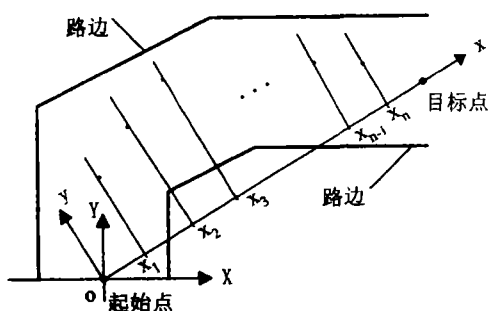


图2 路径编码方法示意图

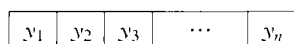


图3 路径编码形式

3.2 适应度函数的确定

适应度函数是影响遗传算法收敛性和稳定性的重要因素,本文动态路径的规划要求满足三个条件:即路径在路边约束之内、能动态避障以及路径最短. Noboru^[1]、Woonggie^[2] 都是采用各项评价函数加权求和的形式来确定适应度函数,这种适应度函数的缺点是各个权系数很难调整和确定,即各个权系数不是恒定不变的,是随着路径和障碍物的情况变化而变化的.因此,本文在确定适应度函数时,尽量使适应度函数的项数最少,但又必须把路径规划的两个条件融合在遗传优化过程中.下面分别介绍三个条件的实现过程.

由机器视觉得到的路边信息,我们采用如图 2 所示的折线形式,则组成路边的各个折线的方程易求.路边约束限制了解空间的范围,即各个 y_i 值只能在路边约束范围内取值,各个点的 y_i 值取值范围的确定方法如下:在图 2 中,首先计算出各个 x_i 位置与 x 轴垂直的各直线与路两边折线相交的两个 y 坐标值,然后再分别向路中心收缩一定量,收缩量的确定是按照机器人中心必须远离路边的安全距离确定的,显然安全距离应大于移动机器人的最大半径,设

确定的 y_i 的取值范围是 (y_{i1}, y_{i2}) . 因此路边约束的适应度函数 $fit1$ 可表达为

$$fit1 = \begin{cases} 1 & \text{如果 } y_{i1} \leq y_i \leq y_{i2} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中 i 为路径上的所有点.上式表明,只要各个路径点在离路边的安全距离之内,则适应度为 1,否则为 0,这样确定是比较符合实际情况的.

动态避障是比较关键的一个约束条件,假设障碍物的个数、障碍物的位置和速度信息可由机器视觉和激光雷达确定;在局部动态路径的规划过程中,假设移动机器人以当前的速度行走,各障碍物也以当前测定的速度做匀速直线运动,因为控制周期一般小于 500ms,此外,路径跟踪控制算法会自动控制机器人行走速度的变化,因此在路径规划过程中,可以不考虑机器人和障碍物行走速度的变化.动态避障的基本条件是,对于某一路径,组成路径的各点与各障碍物之间的最小距离必须大于机器人与障碍物的半径之和.

设机器人从当前点 P_0 到 $P_i(x_i, y_i)$ 需要的时间为 t_i ,从 $P_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1})$ 至 $P_i(x_i, y_i)$ 所用的时间为 T_{i-1} ,则

$$t_i = t_{i-1} + T_{i-1}, \quad (2)$$

其中

$$T_{i-1} = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{V}, \quad (3)$$

式中 V 是移动机器人的当前速度.

设在时刻 t_i ,第 k 个障碍物的位置为 $O_{bk}(x_{bk}(t_i), y_{bk}(t_i))$,则

$$x_{bk}(t_i) = x_{bk}(t_0) + V_{kx}t_i, \quad (4)$$

$$y_{bk}(t_i) = y_{bk}(t_0) + V_{ky}t_i,$$

式中 $(x_{bk}(t_0), y_{bk}(t_0))$ 是第 k 个障碍物的起始坐标, V_{kx} 、 V_{ky} 是第 k 个障碍物的当前速度 V_k 在 xoy 坐标系中的分量.

设在时刻 t_i ,路径点 $P_i(x_i, y_i)$ 与第 k 个障碍物的距离 d_{ik} 为

$$d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_{bk}(t_i))^2 + (y_i - y_{bk}(t_i))^2}, \quad (5)$$

则对于任意一条路径,路径上点与障碍物的最短距离 D_{\min} 为

$$D_{\min} = \min(d_{ik}), \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中 n 是组成路径的点的个数, m 为障碍物的个数.

由此可得动态避障的适应度函数 $fit2$ 为

$$fit2 = \begin{cases} 1 & \text{如果 } D_{\min} \geq R_0 + R_k \\ & k = 1, 2, \dots, m \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

上式表明,只要路径各点与各障碍物的最小距离大于机器人与障碍物的安全半径之和,则机器人就能安全避开障碍物,所以适应度为 1,否则为 0,这样确定是符合实际情况的。

路径最短的适应度函数确定如下:

$$fit3 = \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (8)$$

最后综合得到遗传算法的综合适应度函数为

$$fit = fit1 \times fit2 \times fit3. \quad (9)$$

该综合适应度函数把三个约束条件有机融合在一起,计算简单,且能避免三项加权求和引起的优化不稳定问题。

3.3 遗传操作算子的定义

复制算子:同传统复制算子一样,即采用与适应度成比例的概率来选择个体.为了保证最优个体在进化过程中不被破坏,新一代群体中适应度最小的个体可以直接用上一代的适应度最大的个体取代。

交叉算子:与传统的交叉算子类似,交换的位置和交换的点数是随机确定的。

变异算子:其作用是在个体结构一定的前提下,加入随机扰动,以寻找最优解,本文采取加入零均值高斯白噪声的方法。

此外,为提高初始种群的优良性能,在随机产生初始种群的过程中,加入初选评估程序,即对随机产生的初始种群考察其路边约束和动态避障的适应度值,由此保证初始种群中满足路边约束和动态避障条件的个体数目大于一定的数量,这样可保证遗传算法快速、稳定地找到全局最优解。

在本文的遗传操作中,群体规模反映了在路边约束范围内随机产生的路径条数,此值越大,产生的路径越精确,但搜索的时间也越长,综合考虑实际的路宽大小和算法的实时性要求,群体规模取 30. 根据经验,交叉概率较大,一般在 0.6 ~ 0.9 之间,而变异概率较小,一般在 0.001 ~ 0.4 之间,经程序调试,交叉概率和变异概率分别取为 0.65 和 0.25。

3.4 路径平滑方法

利用以上算法对局部路径动态规划的结果是构成路径点的序列,路径点的连线为折线,必须加以平滑.考虑用插值法平滑的路径有可能偏离原规划路径点序列而穿越障碍物,以及平滑算法的实时性要求,本文采用折线拐角处用圆弧平滑过渡的简单方法^[2].具体过程如图 4 所示,在角点 P_1 、 P_2 处分别用圆弧 BC 和 DE 过渡,为方便各过渡圆弧的确定,可取各角点到圆弧切点的距离相等,如取 0.3 米.该距离确定后,各圆弧的半径和圆心易求.最后平滑得到

的路径即 $ABCDEF$,是由直线和圆弧组成的,该方法简单易行,且不会发生穿越障碍物的问题。

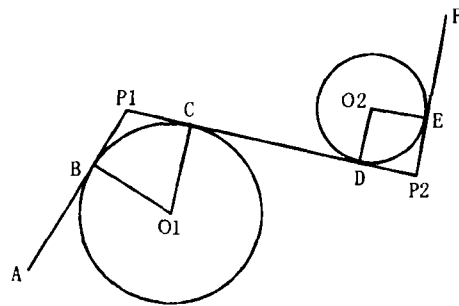


图 4 路径平滑示意图

4 试验结果

为验证本文提出的动态路径规划方法的有效性,首先进行了大量路径规划的仿真实验.下面是部分仿真实验的结果.其中图 5、图 6 是路上有两个障碍物且处于静止状态时的路径规划结果,图中黑色方块代表机器人,圆形黑色标记代表障碍物.图 7 是动态避障路径局部规划的结果,两个障碍物各沿垂直和水平方向以 0.16m/s 和 2m/s 的速度移动,移动机器人的当前速度是 0.3m/s.由静态和动态的仿真试验结果可看出,路径规划的结果都比较好,且比较稳定.此外路径规划一次的时间小于 200ms(PⅢ-550),可见实时性能能够保证。

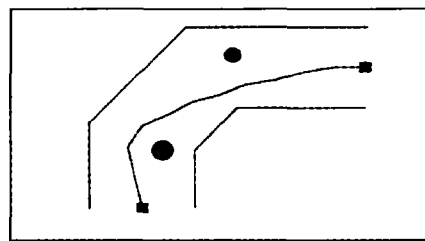


图 5 静态路径规划结果 1

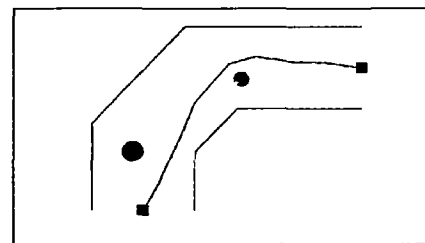
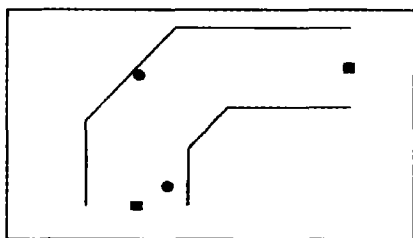
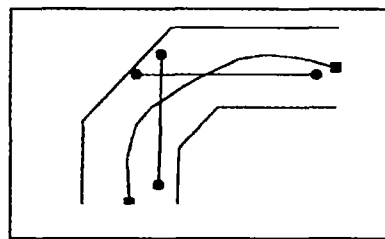


图 6 静态路径规划结果 2

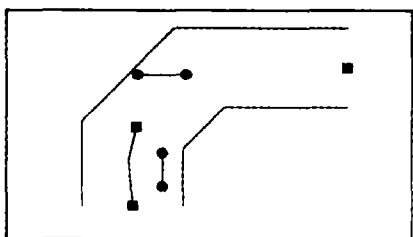


(a) 初始状态

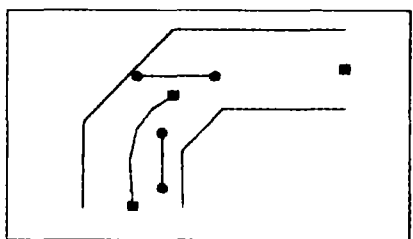


(f) 终止状态

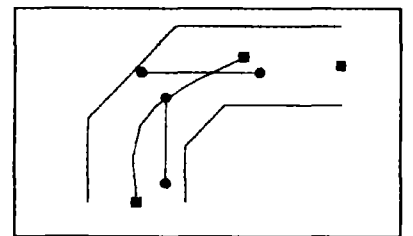
图7 动态避障路径规划结果



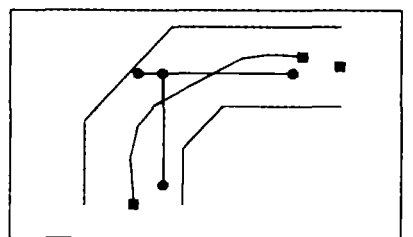
(b) 运动状态 1



(c) 运动状态 2



(d) 运动状态 3



(e) 运动状态 4

5 结 论

本文将复杂的二维路径编码问题简化为简单的一维编码问题,并把路边约束、动态避障要求和最短路径要求融合成一个简单的适应度函数,提出了移动机器人实时动态避障路径规划方法.仿真实验表明,本文提出的动态避障路径规划方法可实时、稳定地产生移动机器人运动的最佳局部规划路径,且具有良好的动态避障性能.该方法也可用于智能车辆的自动导航.

参 考 文 献

- [1] Noboru N, Hideo T. Path Planning of Agricultural Mobile Robot by Neural Network and Genetic Algorithm. Computers and Electronics in Agriculture, 1997, 18(2): 187 - 204
- [2] Woongie H, Seungmin B, Taeyong K. Genetic Algorithm Based Path Planning and Dynamic Obstacle Avoidance of Mobile Robots. In: Proc of the IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation. Orlando, FL, USA, 1997, 2747 - 2751
- [3] Gerke M. Genetic Path Planning for Mobile Robots. In: Proc of American Control Conference. San Diego, CA, USA, 1999, 2424 - 2429
- [4] Fujimori A, Nikiforuk P N, Gupta M M. Adaptive Navigation of Mobile Robots with Obstacle Avoidance. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1997, 13(4): 596 - 601
- [5] 王田苗,张 钺,等.基于势场法的感知-动作行为研究.计算机学报,1993,16(2):89-96

GENETIC PATH PLANNING AND DYNAMIC OBSTACLE AVOIDANCE FOR MOBILE ROBOTS

Li Qingzhong, Gu Weikang, Ye Xiuqing

(*Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

ABSTRACT

Based on Genetic Algorithm, a simple and efficient method for real-time path planning and dynamic obstacle avoidance of mobile robots is developed in this paper. In order to realize the goal of real-time path planning by using Genetic Algorithm stably, the complicated two-dimensional path-coding problem is reduced to a simple one-dimensional problem. And the roadside constraint, requirements for dynamic obstacle avoidance and shortest path are fused to a simple fitness function. Simulation results show that the proposed approach can quickly and robustly generate local optimum path with performance of dynamic obstacle avoidance. This dynamic path planning method can also be applied to intelligent vehicle guidance.

Key Words Genetic Algorithm, Path Planning, Dynamic Obstacle Avoidance, Mobile Robot