

基于遗传算法的多车体机器人路径规划方法

黄 成¹, 戴 蓉²

(1. 四川工程职业技术学院, 四川 德阳 618000; 2. 中国民用航空飞行学院 计算机学院, 四川 广汉 618307)

摘要: 带拖车的移动机器人系统是一种复杂的多车体系统, 在不同的转弯角度下所需的路径宽度也不同, 其路径规划是个难题; 在给出带拖车轮式移动机器人稳态和暂态过程运动学方程的基础上, 推导得出了多车体移动机器人在最大转弯情况下所需的最大路径宽度, 并将之定义为等效尺寸; 应用遗传算法, 提出了基于等效尺寸的多车体移动机器人的路径规划方法; 首先通过等效尺寸的多步障碍扩张, 对障碍物的临近区域和狭窄通道进行可行性约束的分析; 然后应用遗传算法进行全局的路径规划, 将路径的长度和宽度综合在适应度函数之中; 在一定程度上, 多车体移动机器人的路径规划问题得到解决; 文章通过建立三维网格化地图, 对障碍物的临近区域和狭窄的瓶颈通道区域进行了可行性约束的描述, 遗传算法在较复杂的环境中实现了良好的避障, 并得到了相对较短的有效路径。

关键词: 多车体机器人; 等效尺寸; 遗传算法; 路径规划

Mulei—Body Robot Path Planning Method Based on Genetic Algorithm

Huang Cheng¹, Dai Rong²

(1. Sichuan Engineering Technical College Deyang 618000, China;

(2. School of Computer, China Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Tractor—trailer wheeled mobile robot is a complicated system, which is composed of a tractor and multiple trailers. As the path width changes with the different turning angles, as its path planning is complicated accordingly. On the base of presenting the kinematics equations of the tractor—trailer mobile robot, the maximum path width is deduced when the robot runs at the maximum turning angle. And this path width is named as equivalent size. Then genetic algorithmic is applied for the path planning method of tractor—trailer mobile robot. Firstly, the barriers are enlarged step by step with equivalent size. Then the vicinities around the barriers and the block neck zone are analyzed and labeled. The fitness function is defined according to both the path length and path width. Finally, the genetic algorithm is adopted to solve the whole path planning problem. In this paper, through the establishment of a three—dimensional grid map of the immediate area of obstacles and narrow bottleneck channel region are described feasibility constraints, genetic algorithm in the more complex environment to achieve a good obstacle avoidance, and has been relatively short a valid path.

Keywords: tractor—trailer mobile robot; equivalent size; path planning; fuzzy; genetic algorithm

0 引言

机器人的路径规划有很多种方法, 其中姿态空间分析法是常用的一种。所谓姿态空间法是指将单车体移动机器人视为一个可以忽略空间的点, 然后对该点进行路径规划。

随着自动化程度的进程, 越来越多的机器人被应用于生活中。本文对带拖车的轮式移动机器人路径规划进行了研究。其多车体的复杂结构对系统路径规划造成一大难题, 一般情况下需要考虑的路径问题如下:

(1) 构成带拖车移动机器人的车体并不是都具有驱动系统, 后边的拖车只能跟踪车头运动, 这样就造成车体的控制问题, 其就不能按照设定的路径进行跟踪^[1-3]。

(2) 拖车在进行拐弯时, 其转角、车体之间的夹角等因素都有可能对路径规划带来难题。

(3) 文献 [4] 根据带拖车移动机器人系统在最大转弯角

度情况下所需路径宽度最大的特点, 通过极限分析, 其思想是对机器人路径最大化分析, 从而设计一种最大路径, 这样就造成可行路径空间丢失的问题。在拖车机器人沿直线行走时, 即使是很窄的路径其依然可以顺利通过, 但是在拐弯时拖车的路径跟踪就出现了很大的问题。由于拖车角度无法自由控制, 我们在设计路径时就必须对路径进行放大, 这样必然会造成可行路径的丧失^[4-6]。

根据上文分析的问题, 我们在对拖车机器人进行路径设计时, 障碍物之间的狭窄通道成为问题解决的关键, 而各障碍物及其临近区域也是直接影响机器人路径规划中的重要避碰约束条件, 这些即本文研究的重点。

1 带拖车的移动机器人系统

1.1 机器人系统基本特性

通过上文分析, 在本文中, 我们以两节拖车机器人进行路径设计分析。如图 1 所示, 车头为驱动轮, 拖车是无驱动的, 这样一种简单的拖车系统足以说明实际路径设计的各种问题。

收稿日期: 2014-01-20; 修回日期: 2014-03-03。

作者简介: 黄 成 (1975-), 男, 江苏常州人, 副教授, 学士, 主要从事网络工程、信息安全、网络编程方向的研究。

在水平面内, 我们对车体运动系统建立坐标系, 其相应参数如图 1 所示。\$D\$、\$l_n\$ 和 \$\varphi_n\$ 分别代表车体宽度、第 \$n\$ 个拖车的长度和第 \$n\$ 节拖车与前一车体之间的 \$l\$ 轴夹角; 带有驱动的车头设为第 0 节车体, \$a\$ 代表其与 \$l_0\$ 轴之间的夹角; \$x\$、\$y\$ 分别代表车头的坐标位置信息, \$\theta\$ 为车体与路径轴的夹角; \$u\$ 代表其切线速度。基于以上参数可以用下式来描述其运动特性:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos a \sin \theta \\ u \cos a \sin \theta \\ \frac{u}{l_0} \sin a \\ \frac{u}{l_0} \sin a - \frac{u}{l_1} \cos a \cdot \sin \varphi_1 \\ \frac{u}{l_1} \cos a \cdot \sin \varphi_1 - \frac{u}{l_2} \cos a \cdot \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

图 1 带两节拖车的轮式移动机器人系统

1.2 等效尺寸

如图 2 所示, 当拖车机器人进行转弯时, 我们将牵引车之前设定的最大转角 \$\theta_{max}\$ 进行转弯, 当其运动达到稳定时, 牵引车头后面的拖车将会按照各自的圆周半径进行转弯。这时机器人的行走路径将是最大, 本文我们用 \$D\$ 来表示。

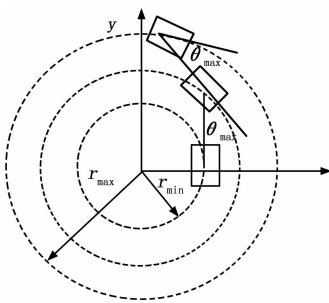


图 2 各车体收敛于同心圆时的最宽路径情况

由于在设计转弯路径宽度时, 我们是在最大转角下得出的, 所以该方案对于所有路径都是有效的。该宽度用式 (2) 可以计算得到。

$$D = r_{max} - r_{min} + \frac{1}{2}d = l[\sqrt{\csc^2 \theta_{max} + (N-1)} - \sqrt{\csc^2 \theta_{max} - 1}] + \frac{1}{2}d \quad (2)$$

机器人的行走宽度与其行走路径形式有关, 当其路径为直线时, 其行走宽度就为车体宽度的一半。因此, 基于等效尺寸

的路径规划按照最大等效尺寸实施障碍扩张, 自然会丧失一些可行路径。如果要达到彻底的解决, 必须对路径规划与基于等效尺寸的扩张进行综合^[7-8]。

1.3 机器人运动过程的暂态描述

机器人在行走时, 我们必须考虑的一个问题就是壁障, 因此, 需要计算出其实时路径参数, 带拖车的移动机器人系统的实时姿态描述的运动学方程如下所示:

$$a(k) = \begin{cases} a(k-1) + \beta \\ a(k-1) \\ a(k-1) - \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中, \$k\$ 代表偏差计算次数, \$\beta\$ 代表控制周期内步进电机的动作角度, 这样我们就可以对偏转角 \$a\$ 进行控制了。设 \$\varphi_1\$ 的初始值为 \$\varphi_1(0)\$, 则有:

$$\varphi_1(1) = \varphi_1(0) + [\frac{u(0)}{l_0} \sin a(0) - \frac{u(0)}{l_1} \cos a(0) \sin \varphi_1(0)] \Delta T \quad (4)$$

并可依次类推得到在第 \$k\$ 步时 \$\varphi_1\$ 的大小为:

$$\varphi_1(k) = \varphi_1(k-1) + [\frac{u(k-1)}{l_0} \sin a(k-1) - \frac{u(k-1)}{l_1} \cos a(k-1) \sin \varphi_1(k-1)] \Delta T \quad (5)$$

同理可得第二节与第一节拖车的夹角 \$\varphi_2\$ 的大小为:

$$\varphi_2(k) = \varphi_2(k-1) + [\frac{u(k-1)}{l_1} \cos a(k-1) \sin \varphi_1(k-1) - \frac{u(k-1)}{l_2} \cos a(k-1) \cos \varphi_1(k-1) \sin \varphi_2(k-1)] \Delta T \quad (6)$$

基于上面各式, 我们可以计算出机器人实时的运动状态, 如偏转角、车体之间的夹角、偏离距离等。由图 1 中各车体之间的几何约束关系可得:

$$\Delta d_1 = l_1 \cdot \sin \varphi_1 + \frac{d}{2} \cdot \cos \varphi_1 \quad (7)$$

$$\Delta d_2 = l_1 \cdot \sin \varphi_1 + l_2 \cdot \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \frac{d}{2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (8)$$

更多车体情况的动态描述同样可以推导得出。

2 基于等效尺寸的地图分析

2.1 网格化三维地图

参考栅格法的思路, 将整个地图按照某一可比的实用尺寸, 例如 \$0.25d\$, 画成坐标方格, 构建网格形式的环境地图。每个网格点除自身的坐标 \$(x, y)\$ 外, 根据其对于机器人的可行性约束程度用 \$Z\$ 做第二维。将无任何约束的自由区标记为极小的 0; 障碍物区标记为极大的 100; 按 \$d/2\$ 扩张后覆盖的区域按距离远近的比例由内向外标记为 99 到 90; 对于按 \$D\$ 扩张后新增加的覆盖区域, 按距离的远近由内向外以从 10 到 0 的可行性约束值做标记。由此, 则可以构建出如图 3 所示的网格化三维地图。

2.2 障碍物的临近区域

在三维地图中, 各区域按其可行性约束划分为自由区、不可行区和有限可行区, 如表 1 所示。

有限可行区域是指临近每个障碍物周围从 \$d/2\$ 到 \$D\$ 之间的环形区域, 每个障碍物的临近区域根据可行性约束的变化形

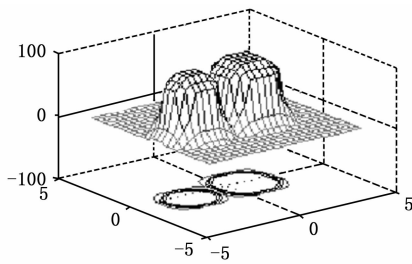


图 3 网格化三维地图

表 1 可行性区域划分

类别	区域范围	可行性约束 S
自由区	距离障碍物 > D	0
有限可行区	距离障碍物 [d/2, D]	(0, 50)
不可行区	距离障碍物 < d/2	[50, 99]
	障碍物区域	100

成一个梯度变化的场，带拖车的机器人在其中即存在通过的可能，但也存在和障碍物发生碰撞的可能。由于各节拖车在跟随牵引车运动的过程中，其行进轨迹会偏离牵引车的轨迹，如果在障碍物的临近区域内，则可能发生牵引车无碰，而拖车与障碍物相碰的情况，这种情况的可能性随着机器人运动路径与障碍物之间的距离远近不同而不同。参考人的驾驶经验，机器人的路径规划应在有路可行的前提下尽量远离障碍物以避免发生碰撞。

2.3 障碍物间的“瓶颈”通道

两个障碍物因彼此距离近，其临近部分会发生重合，这表明障碍物之间存在着相对狭窄的“瓶颈”通道，这种区域是制约路径规划中的关键因素。在扩张过程中，某一网格点如果同时两次或多次被不同障碍物的扩张区域所覆盖，则按式 (9) 进行可行性约束值的计算。

$$S = S_{\max} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{S_i}{2^i} \quad (9)$$

在上式中，如果是两个障碍物相互临近，则其间各网格点的可行性约束值等于最高的可行性约束值与次高值一半的相加和。

3 基于遗传算法的路径规划

3.1 遗传算法

基于以上分析，本文将遗传算法应用于机器人路径规划中。所谓的遗传算法就是按照适者生存和自然选择的思想将路径信息进行筛选的过程。遗传算法是一种具有智能化特点的全局优化搜索算法，是解决移动机器人路径规划等问题的重要方法之一^[9-11]。

3.2 路径搜索

根据前面各步骤的工作，整个地图区域经过分析后已经转换为一个标记有可行性信息的网格化地图，每个方格都具有各自的坐标和可行性约束标志值。在此地图上，应用遗传算法的带拖车移动机器人路径规划步骤如下。

个体编码：采用坐标直接编码，路径个体表示为从起点到终点的一系列中途点网格 g_i 的坐标。

初始种群：随机产生 N 条初始路径个体，以这 N 条路径构成的种群作为初始点开始迭代运算。

适应度函数：如式 (10) ~ (12) 所示，评价算子的加权和直接与路径 R_i 的长度 L 和可行性约束 S 等相关。

$$fitness(R_i) = f_i = A - k_1 S - k_2 L \quad (10)$$

$$L = \sum length(|g_i g_{i+1}|) \quad (11)$$

$$S = \sum barrier(g_i) \quad (12)$$

式中， A 是以无穷大正数，路径长度 L 为路径上相邻两个网格点间的距离之和，可行性约束 S 为路径上各网格点的可行性约束值之和。正常数 k_1 、 k_2 为各评价因子的影响权重。调节 k_1 和 k_2 的大小，可以改变适应度函数评价路径个体优劣时的相对重要因素。

选择函数：采取轮盘赌方式，其思想就是将优秀个体保留，差个体保留其被选择的可能性，这样就使遗传结果多样化，而且其实现方法简单常用，某个体被选择的概率如下式：

$$p = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (14)$$

按上式，每条路径个体都会在 0 到 1 之间分配到一段互不重叠的连续范围。产生一个随机数，若其落入某一个体的范围内，则表示选中该个体一次。反复执行此操作，直到选够需要数目的个体，并以此个体组成的新种群覆盖原来的种群。

遗传算子：设定交叉概率为 p_c ，每条路径个体产生一个随机数 c ，如果小于等于 p_c 则该个体与另一随机选择的个体进行非等长的交叉操作，即进行杂交的路径个体的染色体长度不必相等，交叉也不必在同一位置上。在双亲和子代的四个个体中选择两个适应度更高的个体代替原双亲。

设定变异概率为 p_m ，每条路径个体产生一个随机数 m ，如果小于等于 p_m 则该个体产生变异。变异操作包括移动、增加或删除路径中的一个点。移动一个点：如果路径个体某一段的可行性约束值 S 较大，则随机选择这段路径的一个端点，沿原路径段的垂直方向随机移动，以避开原路径段上的障碍区域或可行性约束较大的区域；增加一个点：若个体在移动操作后，其可行性约束值仍然很高，即仍然存在穿越障碍物的路径段，则进行增加一个点的操作，在存在障碍物的路径段的两个中间点 g_i 和 g_{i+1} 之间增加一个点，形成一个新的路径个体；删除一个或多个点：对于路径 R_i ，如果其中间点 g_i 和 g_j 之间连线的可行性约束值等于 0 或很小，则将 g_i 和 g_j 之间的点删除。

终止条件：在每循环执行一次遗传算法的操作后，则计算每个个体的适应度函数值，如果个体路径的适应度函数的可行性约束值 S 如果很小，则说明该路径个体的可行性约束也已经很小，带拖车的移动机器人在这条路径上行进时就能够较好的避碰。当路径个体的长度也随着运算逐渐减小到一定程度并达到要求后，且总体的平均适应度函数值基本不再增加时，则可认为算法收敛，否则继续进行运算。如果经过多代的遗传运算，结果仍然不收敛，则可退出并报告路径搜

索失败。

3.3 路径的局部平滑与优化调整

前面步骤所得出的路径规划结果以环境模型中一组网格坐标来表达,其原因在于轮式机器人的驱动不是完全自由的,拖车只能跟踪导向轮做切向运动,另一个问题就是带拖车的移动机器人还受到牵引车转角的限制、各拖车车体间夹角的限制等,这使得机器人只能跟踪满足转角约束的平滑曲线和直线。因此,对所得路径中的折线和过大曲率的曲线,就需要做相应的局部路径平滑处理^[12-13]。

对于宽度较窄的“瓶颈”通道而言,机器人进入通道前的起始位型也会影响其避碰,尤其是可行性约束值较大的“瓶颈”通道。因此对待这种情况也需要在路径的平滑和优化中进行适当的调整。

由于在环境建模中是以一定边长的网格化地图为基础的,而不是连续的理想化的点,因此在路径的局部平滑和优化中,系统是具有较大空间调整裕度的。具体的路径局部平滑与优化可以从转角插值、路径调整和停车转向入手。在初步搜索路径中的折线或曲率过大的部分,机器人无法完成超过允许值的转弯操作,可将这段路径根据转角需要变化程度的大小向两端延伸适当的距离,将需要完成的转角操作应用插值分布到一个稍大的范围内,同时在可行性约束小的区域对路径进行相应的调整,例如平移或延伸等。在仿真和实验中,可让机器人在需要做较大转角的路径段上采取停车或减速后调整导向轮方向的策略,通过第二节中的各运动学方程可知,这种情况下机器人跟踪设定路径的性能要优于机器人保持匀速下进行转向调整的情况,系统的实验也明显地说明了这一点。

4 仿真与实验

在仿真程序中,初始种群的数目 N 设定为 30,交叉概率 p_c 设定为 0.8,变异概率 p_m 设定为 0.02。经过 60 代遗传运算,适应度函数的平均值由最初的 127 上升并稳定在最终的 874。在地图中为机器人系统进行运动规划仿真,并利用式(3)至式(8)的各运动学方程进行避碰检验。算法在较复杂的环境中实现了良好的避障,并得到了相对较短的有效路径。仿真验证了本方法的有效性,解决了典型情况下带拖车移动机器人的路径规划问题。本文中路径规划方法的仿真结果如图 4 所示。

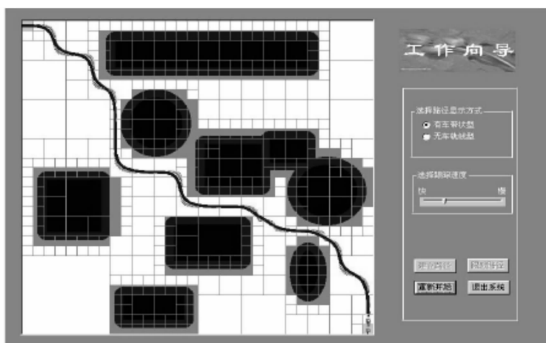


图 4 仿真结果

在仿真的基础上,采用以 Hero-1 移动机器人作为牵引车所构建的实验平台,并设计制作了两个二轮拖车连接到牵引车上,同时一对 Hero-1 的控制系统进行了改造,为其配备了遥控装置,接收上位计算机所传送的控制指令。

5 结论

带拖车的轮式移动机器人是一类特殊的复杂多车体机器人系统,其路径规划问题具有重要的实际价值,其难度也相应增加。在基于等效尺寸的概念基础上,本文通过建立三维网格化地图,对障碍物的临近区域和狭窄的瓶颈通道区域进行了可行性约束的描述,并应用遗传算法解决了带拖车轮式移动机器人的路径规划问题。

参考文献:

- [1] Chen M S, Chen C C. Output feedback control of bilinear systems via a bilinear LTR observer [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 53 (2): 617-621.
- [2] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (7): 961-967.
- [3] 宋 培, 居鹤华. 基于代价削减的移动机器人快速路径规划方法 [J]. 计算机测量与控制, 2012, (11): 3045-3047.
- [4] Li H C, Huang Y L. Concept of equivalent size for tractor-trailer mobile robot and its application to path planning [A]. Proceedings IEEE WCIVA [C], Shanghai, 2012, 6: 1344-1350.
- [5] Sabattini L, Secchi C, Fantuzzi C. Arbitrarily shaped formations of mobile robots: artificial potential fields and coordinate transformation [J]. Robots, 2011, 30 (4): 385-397.
- [6] 刘满禄, 张 华, 胡天链. 改进的人工势场法用于移动机器人导航 [J]. 华中科技大学学报, 2009, 36 (S1): 177-180.
- [7] Sheng J W, Gao Q H, Wei B G, et al. An Improved Artificial Potential Field Algorithm for Virtual Human Path Planning [J]. Edutainment, 2010: 592-601.
- [8] 李 擎, 徐银梅, 张德政, 等. 基于粒子群算法的移动机器人全局路径规划策略 [J]. 北京科技大学报, 2010, 32 (3): 397.
- [9] 邢焕来, 潘 炜, 邹喜华. 一种解决组合优化问题的改进型量子遗传算法 [J]. 电子学报, 2012, 35 (10): 1999-2007.
- [10] Li Q, Zhang C, Xu Y M, et al. Path Planning of mobile robots based on specialized genetic algorithm and improved particle swarm optimization [A]. Proceedings of the Chinese Control Conference [C], Hefei, 2012: 1201-1204.
- [11] 刘传领, 杨静宇. 一种基于量子染色体变异的移动机器人路径规划融合算法 [J]. 信息与控制, 2011, 40 (5): 594-599.
- [12] Bennet D J, McInnes C R. Distributed control of multi-robot systems using bifurcating potential fields [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2010, 58 (3): 256-264.
- [13] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述 [J]. 控制与决策, 2010, 25 (7): 961-967.