

文章编号: 1001-0920(2005)07-0786-03

带滚动约束轮移式机器人动态规划的研究

樊晓平, 李双艳

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410075)

摘 要: 根据轮移式机器人的运动学模型, 研究受到滚动约束轮移式机器人在动态环境中的运动规划问题. 将快速随机搜索树算法与优化方法相结合, 实现了一种新的算法, 规划出既可避障又可满足机器人滚动约束的运动. 将该算法运用到动态环境下机器人的运动规划中, 并通过仿真表明该算法能较好地引导机器人在动态环境中实现满足滚动约束的避障路径.

关键词: 轮移式机器人; 滚动约束; 扩展快速随机搜索树; 动态避障

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Algorithm of Dynamic Motion Planning for Wheeled Mobile Robot with Kinematic Nonholonomic Constraints

FAN Xiaoping, LI Shuangyan

(Research Center for Automation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Correspondent: FAN Xiaoping, E-mail: xpfan@mail.csu.edu.cn

Abstract: In term of kinematic model of wheeled mobile robot, the motion planning under nonholonomic robotic rolling constraint is discussed. An algorithm is presented by combining optimization and rapidly-exploring random tree (RRT). The improved RRT generates local targets and new states with special iterative way to reach the given goal state. Optimization is used to derivate control input which can satisfy mobile robot kinematic nonholonomic constraint. The algorithm is applied to the mobile robot motion planning in dynamic environment. The result shows that the algorithm can successfully guide robot following avoidance obstacles path with nonholonomic constraint in dynamic environment.

Key words: Wheeled mobile robot; Nonholonomic constraint; Extended rapidly-exploring random tree; Dynamic obstacle avoidance

1 引 言

轮移式机器人是一类受非完整性约束的系统, 在它的运动学模型中, 包含有速度在内的不可积分等式, 使得可控制量维数小于状态空间维数. 对于这种非完整系统的运动规划问题, 不能象完整系统那样用降维方法解决. 但现有许多轮移式机器人路径规划方法都把机器人当作质点或是简单几何形状来处理^[1,2], 并未将机器人受到的非完整性约束考虑到规划中. 它们解决的是几何约束问题, 而不是运动约束的问题. 非完整系统规划必须考虑轮移式机器

人的外部形状与其所受到的运动动力学约束. 许多学者对非完整系统规划问题^[3]作了研究. Laumond^[4]提出先找到不考虑非完整性约束的避障路径, 再把这些路径分为小的片断, 然后用规范路径来替代. Reeds 和 Shepp 曲线就是上述方法的实例, 这种两阶段规划方法的基本思想是不断进行路径转化, 将运动规划分层进行.

快速随机搜索树算法是一种随机性算法, 它可以直接应用于非完整性的规划, 不需进行路径转换, 所以它的算法复杂度较小, 尤为适用于高维多自由

收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2004-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(69975003).

作者简介: 樊晓平(1961—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师, 从事机器人控制、虚拟现实技术等研究;
李双艳(1982—), 女, 长沙人, 硕士, 从事机器人路径规划、智能控制的研究.

度的系统 Steven LaValle^[5]已将它应用到静态环境的运动动力学规划上, 并给出了飞船在十二维状态空间的规划实例

本文从机器人运动学模型出发, 研究了受滚动约束的轮移式机器人运动规划问题. 基本思想是将优化方法融合到一种随机性算法(快速随机扩展树)中, 在完成路径规划的同时完成控制量的运算, 满足机器人运动学的滚动非完整性约束. 最后将该算法运用到轮移式机器人在动态环境下的运动规划, 并通过仿真表明了该算法的有效性

2 快速搜索随机树

快速随机搜索树(RRT)^[6,7]是一种随机性的算法. 它采用一种特殊的增量方式进行构造, 能逐步地迅速缩短一个随机状态点与期望状态点的距离. 文献[8]证明了RRT算法的完整性与收敛性, 确保如果工作空间中存在一条可行路径, RRT就一定可以找到相应的路径. 标准RRT的构建如图1所示. 令 C 代表机器人所在配置空间, C_{free} 表示可以避障的配置空间. C_{init} 为给定机器人的初始配置, C_{goal} 为目标配置, 均属于 C_{free} . C_{init} 是RRT的根结点, 算法中 $\rho > 0$, 是RRT生长的最小单位长度, 称为步长. $Dis(c_1, c_2)$ 表示 C 中任意两节点间的距离, T_k 表示生成了 k 个结点的RRT. RRT的构建过程如下:

Step 1: 给出 $T_{init}(C_{init})$.

Step 2: 在 C 中选取一个随机的配置 C_{rand} , 且 $C_{rand} \in C_{free}$.

Step 3: 找出 T_k 中距离 C_{rand} 最近的结点 C_{near} , 即 $Dis(C_{near}, C_{rand}) = \min_{c \in T_k} Dis(c, C_{rand})$.

Step 4: 在 C_{near} 与 C_{rand} 的连线上求 C_{new} , C_{new} 必须满足 $C_{new} \in C_{free}$ 且 $Dis(C_{new}, C_{near}) = \rho$ 的条件. 如果存在 C_{new} , 且 C_{new} 可避障, 转 Step 5, 否则转 Step 2.

Step 5: T_k 增加一个新结点. 令 T_{k+1} 表示新的 RRT, 则 $T_{k+1} = T_k \cup C_{new}$.

Step 6: 判断条件 $C_{new} = C_{goal}$, 若是, 转 Step 7, 否则转 Step 2.

Step 7: 结束

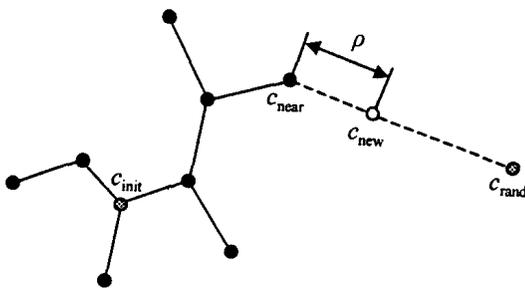


图 1 标准快速扩展随机树构建

3 滚动约束条件下标准 RRT 的扩展

一般而言, 机器人的运动规划分为可行路径产生阶段与满足约束条件的轨迹产生阶段. 这样的规划是分层进行的. 改进 RRT, 则可在路径规划阶段直接把非完整约束限制考虑进去. 从运动学角度考虑机器人受的非完整约束即滚动约束, 图 2 给出轮移式机器人的模型. 机器人系统状态 C^3 由二维的平面坐标系 R^2 和一维的角度值 S^1 构成, 即 $C^3 = R^2 \oplus S^1$, 表示为 $q(x, y, \theta)$, 其控制变量为 $input(u, V, \varphi)$. 系统受到的滚动约束如下:

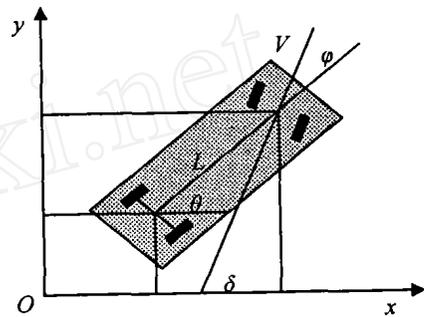


图 2 轮移式机器人的模型

$$\begin{aligned} dx \sin \theta - dy \cos \theta &= 0, \\ dx/dt &= V \cos \varphi \cos \theta, \\ dy/dt &= V \cos \varphi \sin \theta, \\ d\theta/dt &= (V/L) \sin \varphi \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)所示约束不可积, 机器人的可控量维数小于机器人状态的维数, 是非完整约束系统. 定义在状态空间 C 中任意两状态 p, q 之间的距离为

$$\begin{aligned} distance(p, q) &= \\ &[A_1(x_p - x_q)^2 + A_2(y_p - y_q)^2 + \\ &A_3 \min((\theta_p - \theta_q)^2, (\theta_p - \theta_q + 2\pi)^2, \\ &(\theta_p - \theta_q - 2\pi)^2)]^{0.5}. \end{aligned}$$

其中: A_1, A_2, A_3 为权值参数. 取 $A_1 = 1, A_2 = 1, A_3 = L^2$. 对于上述非完整约束系统, 改进 RRT 规划算法, 在得到离随机目标点 qr 最近的结点 vn 之后, 寻找最优控制输入 (V, φ) , 使新节点 qn 距离 qr 最近. 这就演变为一个优化问题. 定义

$$\begin{aligned} \min & (distance(qn, qr)), \\ \text{s.t.} & x_{qn} = x_{vn} + V dt \cos \varphi \cos \theta_n; \\ & y_{qn} = y_{vn} + V dt \cos \varphi \sin \theta_n; \\ & \theta_n = \theta_n + (V dt/L) \sin \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

解上面优化问题得出的 φ 与 V 可以推算出新结点 qn . 上述就是 RRT 产生新状态点的关键.

4 滚动约束快速随机搜索树在动态运动规划中的应用

在已知静态环境中, 离线的全局规划可以解决

路径规划与优化的问题。但很多情况下,环境信息是动态未知的,致使多种离线算法失效。环境未知时,机器人只能靠在线反馈信息一步一步地进行规划,不可能得到全局最优解。为了适应动态未知环境,将滚动路径规划的思想^[9]结合到RRT中,并给定一个时间周期长度,在每个周期的起始时间帧,机器人实时地用传感器探测局部障碍物的运动信息。同时,预测障碍物在下一帧的分布情况,生成一棵滚动约束快速随机搜索树。该树的规模有一定限制,即树的结点数有一个最大值,一旦搜索树的扩展结点数超过它时,搜索树就停止生长。生成了一棵搜索树,也就完成了一个局部周期的规划。此后,机器人再获取新的环境信息,进入到下一周期的规划。

每个周期包含有限个时间帧。改进的RRT在每一帧都产生一个新结点,并进行碰撞检测,决定该节点的有效性。结点包含指向父结点的指针、相应的控制量及机器人状态等信息。

上述过程不断重复,直到某一周期内,机器人到达了目标状态,规划完成。

其中建立满足滚动非完整性约束的快速随机搜索树NONHOLONOM ICB IAS-RRT算法流程为:

BU LDE. NONHOLONOM ICB IAS. RRT (q_{init}, K)

Step 1: $T_{init}(q_{init})$

for $K = 1$ to $K < MAX_TREESIZE$ do;

Step 2: $q_{target} = BIAS_Goal(q_{goal}, BIAS)$;

Step 3: $q_{near} = Nearest_Neighbor(q_{target}, T)$;

Step 4: $Input_Optm_Input(q_{near}, q_{target})$;

Step 5: $q_{new} = New_State(q_{near}, Input, \Delta t)$;

Step 6: $T_{add_vertex}(q_{new})$;

Step 7: $T_{add_edge}(q_{near}, q_{new}, u)$;

Step 8: return T .

这里假设 Step 5 得到的 q_{new} 是属于自由空间的;否则,回到第 2 步,产生新的局部目标点 q_{target} ,直到得到的 q_{new} 属于自由空间的为止。

在RRT算法中,要选取一个随机结点作为局部目标点 q_{target} ,再产生新结点,且 q_{target} 的产生方式决定了搜索树结点的分布状况。标准RRT采用随机函数产生局部目标点,产生过程完全随机,所以标准RRT有搜索过度均一、无启发的缺点。文中通过随机函数加参数BIAS来产生局部目标点,以便克服以上缺点,实现有偏于全局目标 q_{goal} 的搜索算法。

确定基点 q_{target} 的算法如下:

$BIAS_Goal(q_{goal}, BIAS)$

if $Math_Random() < BIAS$,

$q_{target} = q_{goal}$,

else $q_{target} = q_{rand}$

这样使树结点分布不但具有全局特性,又呈现一定的局部特性,即产生的节点既布满整个工作空间,又会在实际目标区域有高密度。

5 仿真结果

用C++语言实现上述算法,仿真结果如图3和图4所示。

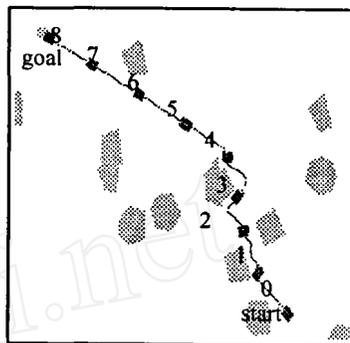


图3 静态环境下的机器人运动规划

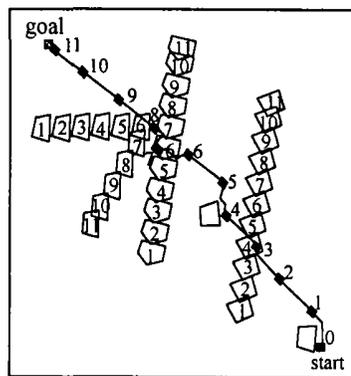


图4 动态环境下的机器人运动规划

图3显示了用算法引导机器人在未知环境中避障运行的步骤。图4则显示在动态环境中上述算法的运行过程。

图中用数字表明机器人运动步骤的先后。另外,图4中运动障碍物的运动步骤也由数字表明。显然,没有数值一样的障碍物与机器人重叠,运动规划是可避障的。

因为该算法含有随机元素,即便是在相同的环境中,每次的实验结果也不完全相同,有时,甚至会有很大的差别。为了说明试验效果,对第2种情况进行了多次仿真试验,仿真结果如表1所示。

表1 动态环境下机器人路径规划仿真记录

试验次数	扩展节点数	有效节点数	运行时间/s
1	2 648	1 967	10.4
2	2 343	1 807	9.5
3	3 455	2 515	12.6
4	3 441	2 498	11.0

(下转第793页)

参考文献(References)

- [1] Chang Y C. Robust Tracking Control of Nonlinear Mimo Systems Via Fuzzy Approaches[J]. *Automatica*, 2000, 36: 1535-1545.
- [2] Tong S C, Tang J T, Wang T. Fuzzy Adaptive Control of Multivariable Nonlinear Systems[J]. *Fuzzy Set and System*, 2000, 111(2): 153-167.
- [3] Ordonez R, Passino K M. Stable Multi-input Multi-output Adaptive Fuzzy/Neural Control [J]. *IEEE Trans on Fuzzy systems*, 1999, 7(3): 345-353.
- [4] 陈谋, 姜长生, 等. 基于RBF神经网络的一类不确定非线性系统的自适应H 控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(1): 27-28.
(Chen M, Jiang C S, et al. Adaptive H Control of a Class of Uncertain Nonlinear Systems Based on RBF Neural Networks[J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(1): 27-28.)
- [5] 刘国荣, 万百五. 一类非线性M MO 系统的直接自适应模糊鲁棒控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(5): 697-698.
(Liu G R, Wan B W. Direct Adaptive Fuzzy Robust Control for a Class of Nonlinear M MO systems[J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(5): 697-698.)
- [6] 刘国荣, 万百五. 一类非线性M MO 系统的间接自适应模糊鲁棒控制[J]. *控制与决策*, 2002, 17(S): 666-680.
(Liu G R, Wan B W. Indirect Adaptive Fuzzy Robust Control for a Class of Nonlinear M MO Systems[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(S): 666-680.)
- [7] 佟绍成, 朱延枫. 多变量非线性系统的间接模糊输出反馈自适应控制[J]. *控制与决策*, 2003, 18(6): 667-671.
(Tong S C, Zhu Y F. Indirect Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear M MO Systems Based on Observer[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(6): 667-671.)
- [8] Leu Yin-guang, Lee Tsu-tian, Wang Wei-ye. Observer-based Adaptive Fuzzy-neural Control for Unknown Nonlinear Dynamical Systems [J]. *IEEE Trans on System, Man, Cybernetics*, 1999, 29: 583-591.

(上接第 788 页)

6 结 语

受滚动约束的轮移式机器人的运动规划问题是机器人技术中的一个关键, 它是不可能用离线全局算法完成的. 本文把优化方法与RRT 算法机制结合起来, 在寻找避障路径的同时, 满足运动方程的约束条件. 而对于动态环境, 利用滚动规划的思想, 连接多个滚动约束的RRT 的规划轨迹就可到达全局目标状态. 对于多自由度的机器人, 这种含随机性的算法可以降低算法复杂度, 提高实时性. 这种算法还可以扩展到同时受运动学与动力学约束的非完整机器人系统.

参考文献(References)

- [1] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J]. *自动化学报*, 2002, 28(2): 161-175.
(Xi Y G, Zhang C G. Rolling Path Planning of Mobile Robot in a Kind of Dynamic Uncertain Environment [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(2): 161-175.)
- [2] 刘国栋, 谢宏斌, 李春光. 动态环境中基于遗传算法的移动机器人路径规划的方法[J]. *机器人*, 2003, 25(4): 327-332.
(Liu G D, Xie H B, Li C G. Method of Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environment Based on Genetic Algorithm [J]. *Robot*, 2003, 25(4): 327-332.)
- [3] Laumond J P, Sekhavat S, Lamiraux F. *Guidelines in Nonholonomic Mobile Planning for Mobile Robots* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1998: 1-53.
- [4] Laumond J P, Jacobs P E, Taix M, et al. A Motion Planner for Nonholonomic Mobile Robots [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automations*, 1999: 577-593.
- [5] LaValle S M, Kuffner J J. Randomized Kinodynamic Planning [J]. *Int J of Robotics Research*, 2001, 20(5): 378-400.
- [6] LaValle S M. *Rapidly-exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning* [R]. Computer Science Dept, Iowa State University, 1998.
- [7] Cheng P, Shen Z, LaValle S M. RRT-based Trajectory Design For Autonomous Automobiles and Spacecraft [J]. *Archives of Control Sciences*, 2001, 11(3-4): 167-194.
- [8] Peng Cheng, Steven M. LaValle. Resolution Complete Rapidly-Exploring Random Trees [A]. *IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Washington, 2002: 267-272.
- [9] 席裕庚, 张纯刚. 机器人滚动路径规划的算法与仿真研究[J]. *高技术通讯*, 2003, (4): 53-57.
(Xi Y G, Zhang C G. Algorithm and Simulation of Robot Rolling Path Planning [J]. *High Tech Communication*, 2003, (4): 53-57.)