

文章编号 : 1002-0446(2004)01-0027-05

非结构环境下移动机器人的运动规划*

石鸿雁, 孙昌志

(沈阳工业大学机器人电机研究所, 辽宁 沈阳 110023)

摘要: 在给出了非结构环境下移动障碍物优先级定义的前提下,提出了移动机器人在含有多个障碍物且障碍物运动具有不确定性的情况下的实时避障运动规划策略.同时给出了障碍物的运动具有不确定性时预测 k 个采样周期后确定障碍物位置的表达式.仿真结果表明此避障策略是行之有效的,且具有很强的适用性和实际应用价值.

关键词: 非结构环境; 移动机器人; 运动规划; 数据融合

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

MOTION PLANNING FOR MOBILE ROBOT UNDER UNSTRUCTURED ENVIRONMENT

SHI Hong-yan, SUN Chang-zhi

(Research Institute of Electric Machine for Robots, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: The priority of moving obstacles in an unstructured environment is defined, and a real-time obstacle-avoidance motion planning strategy is proposed for mobile robots in the environment which has multiple obstacles moving in an uncertain way. An expression is presented to predict the obstacle locations under uncertain circumstances after k sampling periods. Simulation results show that the strategy is effective and practical.

Keywords: unstructured environment; mobile robot; motion planning; data fusion

1 引言 (Introduction)

在典型的工业环境或办公室中,不仅存在静止障碍物,而且存在移动障碍物,而其中的移动障碍物可能不止一个.解决动态环境下移动机器人的运动规划问题是一个比较难处理的问题,因为它需要在状态空间进行规划,即需要连续不断地解决路径规划和速度规划问题.路径规划涉及从初始点到目标点的避碰路径的计算,而速度规划本身就是一个动态问题,需要考虑动力学约束和执行器的约束.研究表明:点机器人在具有速度界限和任意多障碍物的平面上的动态运动规划是难处理的(NP-hard)问题(Canny 与 Reif, 1987).除计算之外,由于环境的不确定性使得运动规划问题不一定有解,因为在 t_0 时刻求出的解也许在 t_0 以后时刻并不适合(Sanborn 与 Hendler, 1988)^[1].

在以往的研究中,移动机器人的路径规划方法大体上可分为 3 种类型^[2]:其一是基于环境模型的

路径规划,它能处理完全已知环境(障碍物的位置和形状预先给定)下机器人的路径规划,当环境变化(出现移动障碍物)时,此方法无能为力,具体方法有:栅格法、可视图法和拓扑法等;其二是基于传感器信息的路径规划法,基于传感器的局部路径规划是实现移动机器人在动态未知环境中导航与避障的重要技术之一.其具体方法有:人工势场法、栅格法、模糊逻辑法等;其三是基于行为的路径规划法,它是移动机器人路径规划问题研究中一种新动向.它把导航问题分解为许多相对独立的导航单元即行为单元,如避碰、跟踪、目标制导等.这些行为单元都是具有传感器和执行器的完整运动控制单元,具有相应的导航功能,彼此协调工作,完成总体导航任务.

移动机器人的导航与避障问题是机器人学的重要问题,一般来说其运动规划可分为寻找最优路径和沿已规划的路径移动两部分.寻求最优路径就是

* 收稿日期:2003-07-20

在具有障碍物的工作环境下,规划出一条从初始点到目标点与障碍物无碰撞的路径.而运动规划则包括在移动障碍物中计算避碰路径,与其它机器人运动的协调.为获得对象间的精确关系的规划,把机器人的运动分为滑行运动和推动运动.机器人的运动规划为:考虑机器人动力学模型、动力学、运动学约束条件下,满足某种性能指标且与障碍物无碰撞的规划.

一般地,机器人与移动障碍物是不能进行信息交流的,机器人需要预测移动障碍物未来的运动情况.在过去大部分对此类问题的研究中,通常把不确定运动环境下移动机器人的运动规划划分为两类^[3]: 其一是障碍物的运动信息完全未知,此时对移动机器人来说,最重要的是避障而不是寻求最优的运动规划;其二是障碍物的运动信息完全已知,此时应该为机器人规划出一条最优的运动规划. Paolo Fiorini^[1]直接利用相对速度信息,建立速度障碍的概念,在速度空间对机器人的运动速度进行规划,实现了已知障碍物运动的全局离线规划,产生了使距离和时间最小的最优轨迹规划. Hong Zhang^[4]使用博弈论处理运动规划中的不确定性,用变分法和优化方法寻找最优的开环和闭环规划,同时考虑了移动障碍物形状的不确定性,只是对比较凌乱的不确定环境不太适合;文献[3]对不确定环境下移动机器人的运动规划问题,在考虑三种不确定性来源的情况下,利用概率分布确定移动障碍物的位置,以此对障碍物的运动做出预测,实现了对机器人的有效规划.但是文中障碍物只有一个,且障碍物的位置只用一个变量表示,同时没有考虑速度的方向,这使得其应用受到影响.文献[5]针对障碍物的不确定性,建立相对坐标系,在最坏情况下,采用扩大障碍物尺寸的方法,直接利用机器人与障碍物的相对速度信息进行避障.但文中只对一个时间周期做出预测,可能出现死锁现象;同时它所采用的避障策略付出了使机器人的运动区域缩小的代价.

本文机器人的工作环境中含有多多个障碍物,障碍物的位置使用平面坐标 (x, y) 表示,且考虑了速度的方向,同时预测了若干个时间周期后障碍物的位置和速度,这使得做出的运动规划更具有实用价值.

2 不确定性问题的处理 (Disposal of the uncertainty problems)

2.1 问题的描述

假定在典型的工业环境或办公室中,不仅存在静

止障碍物,而且也存在移动障碍物,设其中的移动障碍物有 n 个,它们可以是办公人员、车间的工作人员或其它的机器人.如果这些移动障碍物都是人,则不需要研究避碰问题.因此,我们假定这个障碍物都是机器人,同时约定这 n 个障碍物之间是不发生碰撞的,机器人与障碍物之间不进行信息交流.

由于每个障碍物的运动都受到自身运动学、动力学约束的限制,都有自己的特定目标,因此其速度和方向都有一定的范围,不妨设为 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 和 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$,同时为计算方便将其预测的运动时间划分为若干段,并做假设①:在每个时间段上速度和方向是不变的,在不同的时间段上速度和方向是可以变化的;假设②:在不同的时间段上速度的改变量是随机的、独立的,则对任意的 $t > 0$ 有:

$$v(t + \Delta T) = v(t) + \Delta v \quad (1)$$

$$\theta(t + \Delta T) = \theta(t) + \Delta \theta \quad (2)$$

其中 $v(t)$, $v(t + \Delta T)$, $\theta(t)$, $\theta(t + \Delta T)$ 分别表示 t 时刻和 $t + \Delta T$ 时刻障碍物的速度和方向, $\Delta v \sim N(\mu_v, \sigma_v^2)$, $\Delta \theta \sim N(\mu_\theta, \sigma_\theta^2)$. μ_v , σ_v^2 分别为速度改变量 Δv 的均值和方差, μ_θ , σ_θ^2 分别为方向改变量 $\Delta \theta$ 的均值和方差.于是 k 个时间段后,

$$v(t + k\Delta T) = v(t) + k\Delta v \quad (3)$$

$$\theta(t + k\Delta T) = \theta(t) + k\Delta \theta \quad (4)$$

在上述假设下,若第 i ($i = 1, 2, \dots, n$)个障碍物在时刻 t_0 所处的位置和方差分别为 (x_{i0}, y_{i0}) 、 σ_i^2 ,速度为 (v_{i0}, θ_{i0}) ,可以预测 k 个时间段后障碍物的位置为:

$$x_{ik} = x_{i0} + \sum_{j=1}^k v_i(t_0 + j\Delta T) \cos \theta_i(t_0 + j\Delta T) \Delta T \quad (5)$$

$$y_{ik} = y_{i0} + \sum_{j=1}^k v_i(t_0 + j\Delta T) \sin \theta_i(t_0 + j\Delta T) \Delta T \quad (6)$$

其中 $\theta_i(t_0 + j\Delta T)$ 为第 i 个障碍物在 t_0 时刻后的第 j 个时间段的速度 $v_i(t_0 + j\Delta T)$ 与世界坐标系中水平坐标轴的夹角.根据两角和的公式,式(5)、(6)分别变形为:

$$\begin{aligned} x_{ik} &= x_{i0} + \sum_{j=1}^k [v_i(t_0) + j\Delta v] \cdot \\ &\quad [\cos \theta_i(t_0) \cos(j\Delta\theta) - \sin \theta_i(t_0) \sin(j\Delta\theta)] \Delta T \\ &= x_{i0} + \sum_{j=1}^k \{ [v_i(t_0) + j\Delta v] \cos \theta_i(t_0) \cos(j\Delta\theta) \\ &\quad - [v_i(t_0) + j\Delta v] \sin \theta_i(t_0) \sin(j\Delta\theta) \} \Delta T \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{ik} &= y_{i0} + \sum_{j=1}^k [v_i(t_0) + j\Delta v] \cdot \\ &\quad [\sin \theta_i(t_0) \cos(j\Delta\theta) + \cos \theta_i(t_0) \sin(j\Delta\theta)] \Delta T \end{aligned}$$

$$= y_{i0} + \sum_{j=1}^k \{ [v_i(t_0) + j\Delta v] \sin \theta_i(t_0) \cos(j\Delta\theta) + [v_i(t_0) + j\Delta v] \cos \theta_i(t_0) \sin(j\Delta\theta) \} \Delta T \quad (8)$$

由于每个障碍物的速度 (v_{ik}, θ_{ik}) ($i=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots$)，都是独立分布的，且当 ΔT 很小时， $j\Delta\theta$ 也很小，因此 $\cos(j\Delta\theta)$ 趋于 1， $\sin(j\Delta\theta)$ 趋于 0，所以 (x_{ik}, y_{ik}) 近似服从正态分布，设障碍物每增加一个时间段的方差为 σ_{step}^2 ，则它在区间 $[v_{min}, v_{max}]$ 上服从均匀分布，且方差 $\sigma_{step}^2 = (v_{max} - v_{min})^2 / 12$ 。

概率密度函数为：

$$f(x_i, y_i, k) = \frac{1}{2\pi\sigma_i^2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} + \frac{(y_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} \right] \right\} \quad (9)$$

其中： $\sigma_i^2 = \sigma_{step}^2 = \sigma_i^2 + k\sigma_{step}^2$

$$\mu_i = x_{i0} + [kv_i(t_0) + \frac{k(k+1)}{2} \mu_i] \cdot \Delta T \cos \theta_i(t_0)$$

$$\mu_i = y_{i0} + [kv_i(t_0) + \frac{k(k+1)}{2} \mu_i] \cdot \Delta T \sin \theta_i(t_0)$$

机器人通过传感器系统搜集障碍物的位置和速度信息，并对得到的信息进行数据融合，以减少传感器的信息误差所造成的不确定性，上述由传感器得到的数据是进行数据融合后的结果。

2.2 预测到达交叉路口的时间和概率

假设移动机器人在静态环境下的路径规划利用前面提到的某种方法(如切线图法^[6])已经完成^[7](见图 1)。



图 1 静态环境下移动机器人已规划好的路径

Fig.1 Planned path for mobile robot in the static state environment

即机器人在没有移动障碍物干扰的情况下，按照已规划好的路径移动，机器人与障碍物只在其路径交叉点处可能发生碰撞。如果机器人预测到与某个障碍物可能发生碰撞，需要立即采取避碰措施，因此预测移动障碍物和机器人到达路径交叉点的时间是非常重要的。

如果每个障碍物的位置按照式(7)、(8)计算，则第 i 个障碍物到达路径交叉点的距离 d_{ic} 的概率可由式(9)计算。假设③：每个障碍物以目前的速度沿

直线运动，可以计算出此障碍物到达此路径交叉点所用的大概时间 t_{ic} ，而此时障碍物到达路径交叉点的概率 $P(d_{ic})$ 可近似表示为： $P(d_{ic}) = \alpha_{ic} p(d_{ic}, t)^{[3]}$ 。其中： $\alpha_{ic}, i=1, 2, \dots, n$ 为根据每个障碍物的实际运动情况确定的常数。

2.3 运动规划策略

当每个障碍物到达各自路径交叉点所用的时间 t_{ic} 和相应的概率 $P(d_{ic})$ 求出后，可根据机器人运动速度的大小、方向和距离选择避障方式，如加速、减速或停止运动。假定有 n 个障碍物，按式(7)、(8)可分别计算出每个障碍物到达其与机器人路径交叉点所用的时间 $t_{ic} (i=1, 2, \dots, n)$ 和概率 $P(d_{ic})$ ，同时根据传感器的读数确定各个障碍物的运动方向与机器人路径垂直距离的夹角，此时可为每个障碍物规定其优先级。优先级的定义如下：

定义：某一时刻，当出现多个移动障碍物时，根据机器人路径上机器人与每个障碍物交叉点的距离长短、速度的大小和方向为障碍物定义优先级，与机器人距离越近且可能发生碰撞的障碍物优先级越高，速度越快。机器人在运动时，首先避开优先级最高的障碍物，然后按优先级依次避开其它障碍物。这与生活常识类似，我们首先应该避开对自己威胁最大的障碍物，然后按照威胁的程度依次避开其它障碍物，如图 2 所示，图中的曲线为机器人的路径。

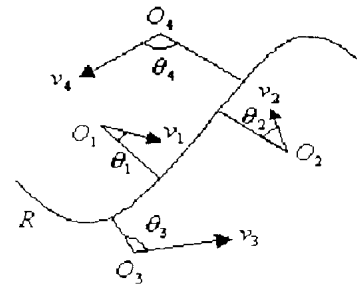


图 2 确定移动障碍物的优先级

Fig.2 Determining the priority for the moving obstacles

障碍物 O_1, O_2 的运动方向与机器人路径的最短距离的夹角为锐角 θ_1, θ_2 ，此时障碍物的优先级根据障碍物到达其路径交叉点的时间和概率设立，时间最短且概率大的障碍物的优先级最高，随着时间的延长和概率的增大障碍物的优先级依次降低；概率相同，时间短的优先级高；时间相同，概率大的优先级高。

障碍物 O_3, O_4 的运动方向与机器人路径的最短距离的夹角为钝角 θ_3, θ_4 ，此时不考虑障碍物的

优先级,可设为0.机器人在运动中首先避开优先级最高的障碍物,然后再依次避开优先级低的障碍物,优先级为0的障碍物不需要躲避.

2.4 实时避障方法

机器人在未知环境下必须依靠传感器不断地感知自身位置和环境信息,同时做出相应的决策以躲避各种障碍物.而在复杂环境下为获取有效的信息,机器人的传感器系统常常由不同种类的多个传感器组成.机器人需要根据由各个传感器检测到的信息进行信息融合后的数据,为自己进行准确的运动规划.本文采用文献[8]的方法识别障碍物,搜集障碍物的各种信息进行避障.

考虑机器人与障碍物的路径在交叉点 P 的夹角为 φ 的情况,如图3所示,如下设3个距离值 L_s 、 L_{in} 与 L_{out} :当机器人到达安全距离点 P_0 时(P_0 与路径交叉点 P 的距离等于 L_s),在机器人不运动情况下,障碍物通过点 P 时不会与机器人碰撞, L_s 的值由实际情况决定;当机器人到达点 P_0 时,障碍物与点 P 的距离为 L_{in} ,在障碍物与机器人继续向点 P 方向运动情况下,机器人可以安全地通过点 P ,如图3(a)所示;当机器人到达点 P_0 时,障碍物与点 P 的距离为 L_{out} ,在障碍物继续向远离交叉点的方向运动情况下,机器人能安全地通过路径交叉点,如图3(b)所示.

机器人的实时避障策略如下:

(1) 如果机器人预测出:在 t_0 时刻机器人与路径交叉点的距离为 L_s ,而第 i 个障碍物到达与路径交叉点的距离不小于 L_{in} 的点,且其概率不小于 β ,则机器人以当前的速度运动;如果相应的概率小于 β ,机器人加速运动.

(2) 如果机器人预测出:在 t_0 时刻机器人到达其与路径交叉点的距离为 L_s 的点 P_0 ,而第 i 个障碍物到达与路径交叉点的距离不小于 L_{out} 的点,相应的概率不小于 β ,同时障碍物向背离路径交叉点的方向运动,则机器人以当前的速度运动;如果计算出的概率小于 β ,则机器人减速运动;

(3) 如果机器人预测出:在 t_0 时刻机器人到达其与路径交叉点的距离为 L_s 的点 P_0 ,而障碍物到达

区间 $[P - L_{in}, P + L_{out}]$ 之内(即在时间 $[t_0 - L_{in}/v_0, t_0 + L_{out}/v_0]$ 范围内)的点,同时计算出的概率不小于 β ,则机器人只能停止前进,以等待情况(2)出现后再继续前进;如果概率小于 β ,则机器人以当前的速度运动.

L_{in} 、 L_{out} 计算公式^[3]如下:

$$L_{in} = \frac{L_s}{\sin \varphi} \left| \sqrt{\frac{v_r^2 + v_o^2 - v_r v_o \cos \varphi}{v_r^2}} + \frac{v_o}{v_r} \right| \quad (10)$$

$$L_{out} = \frac{L_s}{\sin \varphi} \left| \sqrt{\frac{v_r^2 + v_o^2 - v_r v_o \cos \varphi}{v_r^2}} - \frac{v_o}{v_r} \right| \quad (11)$$

其中: v_r, v_o 分别为机器人与障碍物的速度.

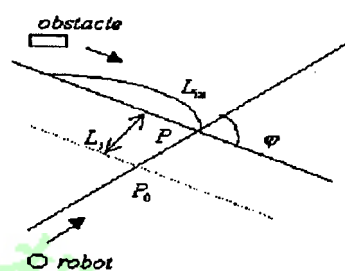


图3(a) L_s 与 L_{in} 的定义

Fig.3(a) Definitions of L_s and L_{in}

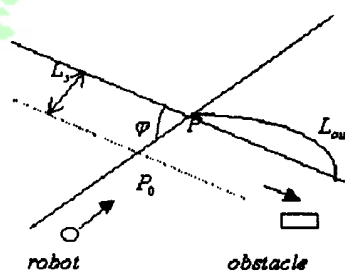


图3(b) L_{out} 的定义

Fig.3(b) Definition of L_{out}

3 仿真实例 (Simulation example)

在有两个障碍物且其运动具有不确定性的情况下,机器人沿已规划好的曲线的运动规划结果如图4所示,图中“o”表示机器人,“*”表示障碍物1,“x”表示障碍物2.

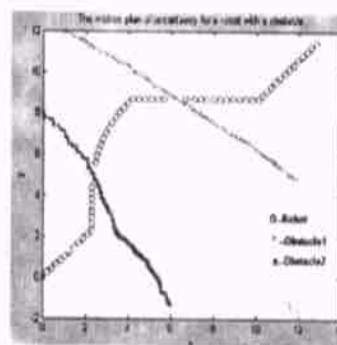


图4 障碍物的运动具有不确定性时机器人的运动规划

Fig.4 Robot motion planning when obstacles are moving with uncertainty

4 结论 (Conclusion)

本文针对非结构环境中存在多个障碍物且障碍物运动具有不确定性的情况,提出了移动机器人的实时避障运动规划策略.同时,给出了障碍物的运动具有不确定性时预测 k 个采样周期后障碍物位置的公式.利用此公式及障碍物速度可计算出机器人到达其与障碍物路径交叉路口的时间,为机器人避障提供依据.

参考文献 (References)

- [1] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(7): 760 - 772.
- [2] 李瑞峰,李伟招.基于多传感器信息融合的移动机器人路径规划[J].机电一体化,2002,(4): 20 - 23.
- [3] Mura J, Shirai Y. Modeling motion uncertainty of moving obstacles for

- robot motion planning[A]. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. CA: 2000. 2258 - 2263.
- [4] Zhang H, Kumar V, Ostrowski J. Motion planning with uncertainty[A]. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. Belgium: 1998. 638 - 643.
- [5] 张成钢,孙茂相.移动机器人在障碍物具有不确定性时的运动规划[J].机器人,2003,18(3): 285 - 288.
- [6] Liu Y-H, Arimoto S. Path planning using a tangent graph for mobile robots among polygonal and curved obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 1992, 11(4): 376 - 382.
- [7] Kyriakopoulos K J. A supervisory control strategy for navigation for mobile robots in dynamic environments[D]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 1991.
- [8] 洪伟,等.移动机器人的障碍物群检测方法[J].吉林大学学报(信息科学版),2003,20(1): 67 - 72.

作者简介:

石鸿雁(1962-),女,副教授.研究领域:机器人路径规划与优化方法.

(上接第 26 页)

参考文献 (References)

- [1] 谈世哲,梅志千,杨汝清,等.基于 DSP 的工业机器人控制器的设计与实现[J].机器人,2002,24(2): 134 - 139.
- [2] 郭伟,岳艳红,闫发军,等.一种开放式通用机器人控制器的研究与设计[J].高技术通讯,2001,11(7): 79 - 81.
- [3] 董春,刘琨,富历新.一种独立型可编程三轴运动控制器[J].微电机,1999,32(5): 53 - 55.
- [4] Lee H S, Tomizuka M. Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(1): 48 - 55.
- [5] Han S-H, Lee M H, et al. Real-time implementation of a robust adaptive controller for a robotic manipulator based on digital signal processors[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems

- and Humans, 1999:29(2): 194 - 204.
- [6] Tan K K, Tang K Z, et al. Development of an integrated and open-architecture precision motion control system[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(7): 757 - 772.
- [7] Lee H-S, Jeon J K, et al. A high-performance open architecture motion controller[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C]. Korea: 2001. 886 - 890.
- [8] Lim S Y, Dawson D M, Vedagarbha P. Advanced motion control of mechatronic systems via a high-speed DSP and a parallel processing transputer network[J]. Mechatronics, 1996, 6(1): 100 - 122.

作者简介:

董春(1965-),男,副教授,博士.研究领域:运动控制及相关技术.