

文章编号: 1002-0446(2004)05-0434-05

动态未知环境下基于相对坐标系的 移动机器人实时运动规划*

张凤^{1,2}, 谈大龙¹

(1. 中国科学院机器人学开放实验室, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 提出了一种简单、新颖的在动态未知环境下的移动机器人运动规划方法。此方法基于相对坐标系, 通过传感器信息实时调整机器人的行为来实现规划。在规划过程中, 机器人有两种行为: 向目标运动和避碰, 且避碰行为具有优先权。机器人两种行为的切换是基于加速度空间的, 首先解决的是避碰问题, 而向目标运动是作为避碰的反问题来考虑的。仿真研究验证了此规划方法的有效性。

关键词: 运动规划; 避碰; 相对坐标系; 相对速度

中图分类号: TP24 文献标识码: B

Mobile Robot Real-time Motion Planning Based on the Relative Coordinates in Dynamic and Unknown Environments

ZHANG Feng^{1,2}, TAN Da-long¹

(1. Robotics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A simple and novel motion planning method for mobile robot is presented in this paper. Motion planning is achieved by adjusting the robot behavior according to information from sensors based on the relative coordinates. The robot has two behaviors in the course of planning: moving to the goal and collision avoidance, and the collision avoidance behavior has the higher priority. The switch of two behaviors is based on the acceleration space coordinates. The problem of collision avoidance is solved, and the behavior of moving to the goal is considered as a reverse problem of the avoidance. Simulation results verify the validity.

Keywords: collision motion planning; collision avoidance; relative coordinates; relative velocity

1 引言 (Introduction)

运动规划是机器人应用中一个重要的研究方面。运动规划方法大体可以分为两种: 全局法和局部法。全局方法主要有: 路-图法, 单元分解法等。全局法假设机器人的环境模型是完全已知的, 其优点是机器人从起始点到目标点的轨迹是可以离线计算的。而其缺点是不能进行障碍物的快速避碰。

局部法也叫反应式方法, 它仅需要知道很少的一部分环境模型信息。其主要优点是计算复杂性很低, 这一点对于利用传感器信息的情况以及环境信息更新频繁的情况是非常重要的。比较流行的局部

法主要是由 Kathib^[1]提出的势场法, 它以其简单和完美的数学分析而深受欢迎, 但其主要问题是极易陷入局部极小。这种仅仅依赖机器人和障碍物的位置信息来确定避碰的方法称为零阶方法^[2]。

1993 年 Shiller^[3,4]提出了速度障碍物的方法, 利用图形技术和最优方法来获得动态环境的实时运动规划。这种以机器人和障碍物的速度信息为基础的避碰方法称为一阶方法^[2]。他又先后将这种基本思想用于静态障碍物的实时在线避碰^[5], 障碍物沿着任意轨迹运动的运动规划^[2], 及非线性速度障碍物的实时全局运动规划^[6]等。

基于上述利用速度的概念来进行避碰和规划的

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001 AA422140)。
收稿日期: 2004-03-07

思想,我们提出了一种新颖的避碰方法^[7,8],不同于 Shiller 的方法,我们建立了相对坐标系,利用相对速度在加速度空间中进行避碰.这种利用加速度信息进行避碰的方法,我们将其定义为二阶方法.本文在前期工作的基础上,提出了一种在动态环境下的简单、新颖的实时运动规划方法,这里的动态环境中,不但障碍物是移动的,而且目标也是移动的.此方法中避碰和向目标运动两种行为都是用避碰的方法来解决,即将向目标运动的行为看作是避碰行为的反问题.

2 机器人避碰 (Collision avoidance)

2.1 机器人避碰方法回顾

避碰问题是运动规划的一个基本问题,如图 1 所示, R 是要考虑的点状移动机器人,以机器人本体作为坐标原点,圆形物体是它所遇到的障碍物(至少一个),机器人 R 前进方向为 X 轴正方向,与之垂直方向为 Y 轴方向. R 自身的速度 \vec{V}_A 已知, R 与障碍物的相对位置 L 可以通过激光或超声传感器测量或计算出,相对速度是 \vec{V} , $\vec{V} = \vec{V}_A - \vec{V}_B$,其中, \vec{V}_B 是障碍物的速度. α 是 \vec{V} 与 \vec{V}_A 的夹角, α' 是障碍物边缘与 \vec{V}_A 的夹角.要使机器人与障碍物不发生碰撞,相对速度必须产生 $\Delta\gamma_1$ 或 $\Delta\gamma_2$ 的转动,如图 1 所示,而这个转动是由 V_A 大小和角度的变化产生的. $\Delta\gamma_1 = \alpha - \alpha'_1$, $\Delta\gamma_2 = \alpha - \alpha'_2$.

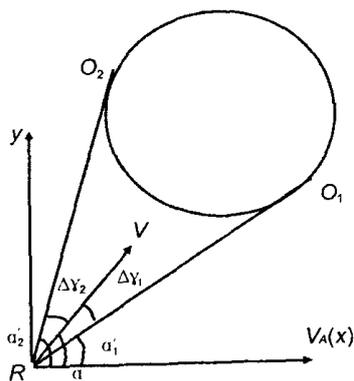


图 1 相对坐标系
Fig.1 Relative coordinate

参见文[7],由文[7]得出如下公式:

$$\Delta v \Delta \gamma = -\sin \varphi \Delta v_a + \cos \varphi_a \Delta a$$

重新定义为:

$$V \Delta \gamma = \Delta V_A \sin \alpha + \cos \alpha V_A \Delta \theta \quad (1)$$

由式(1)可以看出, ΔV_A 和 $\Delta \theta$ 只要满足(1)式的线

性关系即是避碰解,同时可得加速度空间坐标,如图 2 所示,两线中间为碰撞区.为了避碰,机器人要产生一个加速度,使 V_A 和 θ_A 发生变化.从式(1)和图 2 可以看出,要产生 $\Delta \gamma$ 的转动, ΔV_A 和 $\Delta \theta$ 可有多解, $\Delta \theta$ 是机器人本体需要转动的角度.而最佳的避碰力的方向是与相对速度垂直的,这里所说的最佳的避碰力是指为了避碰,施于机器人的力最小,即 $J = \min(\Delta V_A^2 + (V_A \Delta \theta)^2)^{[7]}$,其大小为 $V \Delta \gamma$.所以最佳解为:

$$\begin{cases} \Delta V_A = V \Delta \gamma \sin \alpha \\ V_A \Delta \theta = V \Delta \gamma \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

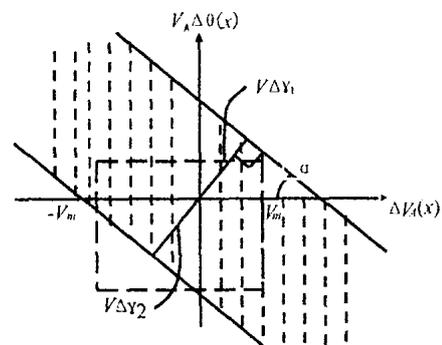


图 2 避碰的加速度空间坐标

Fig.2 Acceleration space coordinate of collision avoidance

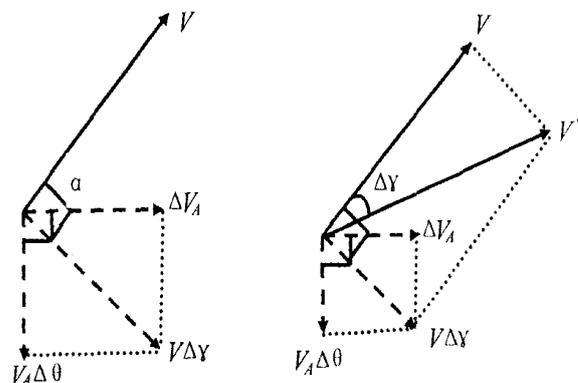


图 3 相对速度与加速度的关系

Fig.3 The relation between relative velocity and acceleration

由图 2 及式(2),得如下所示的相对速度与机器人调整的加速度关系,如图 3 所示,最佳避碰力 $V \Delta \gamma$ 与相对速度 V 是垂直的,即 $V \Delta \gamma$ 是避碰协调力,避碰协调力主要是使 V 转动 $\Delta \gamma$ 角,使其离开碰撞区,调整后相对速度为 V' ,即 V 与 $V \Delta \gamma$ 的合成速度. $V \Delta \gamma$ 是有实际意义并真正作用在机器人上使机器人运动发生变化的力.

2.2 避碰策略比较分析

如果机器人在运动过程中遇到障碍物,即机器

人与障碍物的相对速度在碰撞角内,可以采取如下三种策略来进行避碰.

策略一:保持前进方向不变;通过改变机器人速度大小来使相对速度离开碰撞角.也就是说,机器人通过加速、减速或后退来避开障碍物,如图 2 所示,沿着 x 轴速度发生变化.

在机器人运动规划中,为了在避碰过程中不频繁地进行重新规划,一般选取的避碰策略是尽量不改变机器人的原有路径,即利用策略一来实现避碰.但实际上,机器人往往受到最大速度、最大加速度等物理限制,使其不能达到预期的规划速度来避碰.

策略二:保持速度不变;通过改变速度方向来使其离开碰撞角.也就是,机器人通过转弯离开原来的碰撞路径,如图 2 所示,沿着 y 轴角度发生变化.

它单纯通过调整角度来使机器人避碰,这使机器人离开原来的路径,增加了重新规划的难度.

这种策略同时改变速度大小和方向来使其离开碰撞角区域.

策略三综合考虑使速度和方向同时变化来实现避碰,由式(1)可知,只要满足式(1)的线性方程就可以得到一组避碰解,但考虑到要使机器人利用最小的加速度,即最小力来避碰是最佳的策略,如图 2 所示,则沿着垂线方向变化是最佳的.

但考虑到受最大速度、最大加速度等的限制,在图 2 中,由于受最大速度的限制, $V_{\Delta y_1}$ 不在最大速度允许的范围内,所以只能选取 $V_{\Delta y_2}$ 作为最佳避碰力.

当障碍物为静止障碍物时,由式(2)可知, $\alpha = 0$,这时, $\Delta V_A = 0$, $\Delta y = \Delta \theta$.这表明与静止障碍物避碰前最佳策略是转弯.当机器人与障碍物小角度接近时, $\alpha \approx 90^\circ$,这时,避碰的最佳策略是改变速度, $\Delta V_A = V_{\Delta y}$.

3 运动规划 (Motion planning)

运动规划是寻找一条不会与任何障碍物相碰撞的从初始点到目标点的运动.本文的运动规划有两种行为:避碰和向目标运动.

避碰行为:

避碰行为是要使机器人远离障碍物,通过调整 Δy_0 ,使机器人与障碍物的相对速度与障碍物边缘的夹角 $\Delta y_0 \rightarrow 0$,从而使机器人绕开障碍物,不与障碍物相碰撞.根据式(2),避碰公式为:

$$\begin{cases} \Delta V_A = V_{obs} \Delta y_0 \sin \alpha \\ V_A \Delta \theta = V_{obs} \Delta y_0 \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

此式的目的是使 $\Delta y_0 \rightarrow 0$,即使机器人与障碍物的相对速度方向与障碍物夹角为零,从而使机器人避开障碍物.其中, Δy_0 是机器人与障碍物的相对速度与障碍物边缘的夹角.

在静态障碍物避碰过程中, Δy_0 有两种选择,即 Δy_{01} 和 Δy_{02} ,如图 1 所示,我们的选择策略是选择转角最小的,即选择最小偏航角.

$$\Delta y_0 = \min\{|\Delta y_{01}|, |\Delta y_{02}|\}$$

向目标运动行为:

实际上,向目标运动是避碰问题的反问题,向目标运动就是努力使机器人与目标“碰撞”,通过调整 Δy_G ,使机器人与目标的相对速度与目标的夹角 $\Delta y_G \rightarrow 0$,从而使机器人向目标运动,与避碰行为不同,机器人只向一个方向转,即 Δy_G 只有一个值,如图 4 所示.所以机器人在向目标运动的加速度空间坐标如图 5 所示,根据式(2),向目标运动可用公式表示为:

$$\begin{cases} \Delta V_A = V_G \Delta y_G \sin \alpha \\ V_A \Delta \theta = V_G \Delta y_G \cos \alpha \end{cases} \quad (4)$$

其目的就是要使 $\Delta y_G \rightarrow 0$,即使机器人与目标的相对速度的方向与目标的角度为零,从而使机器人向目标运动. Δy_G 是机器人与目标的相对速度与目标的夹角.

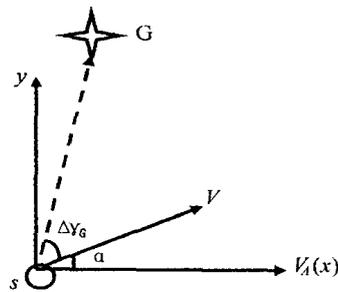


图 4 向目标运动的角度调整

Fig. 4 Angle adjusting for moving to the goal

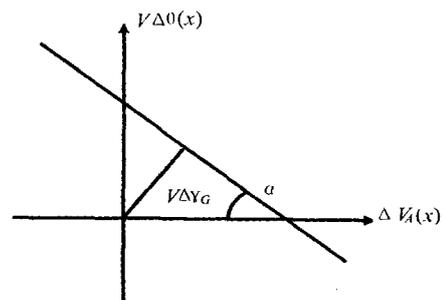


图 5 向目标运动的加速度空间坐标

Fig. 5 Acceleration space coordinate of moving to the goal

规划算法：

1) 如果前进方向没有障碍物,则机器人向目标运动,利用公式(4),使 $\Delta Y_G \rightarrow 0$.

2) 如果前进方向有障碍物,则机器人首先避碰,利用公式(3),使 $\Delta Y_o \rightarrow 0$.

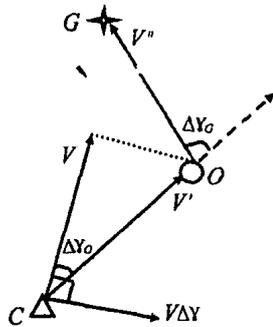


图 6 两种行为的切换过程

Fig.6 Switch between two behaviors

机器人的规划过程就是两种行为的切换过程,如图 6 所示,C 表示机器人当前位置,O 表示要避碰的障碍物边缘,G 表示目标点.从图中可以看出,O 是作为全局目标的子目标来考虑的,在完成子目标任务后再向全局目标 G 运动.本算法的基本思想是:

当发现障碍物时,首先避碰,避碰行为具有优先权,目标仅对选择避碰方向有参考作用,对过程并无影响,脱离障碍后 ($\Delta Y_o = 0$),则进行矢量目标跟踪.因为不采取任何矢量合成的做法,因而避免了局部死锁.

当障碍物形状为凸连续边缘时,由于算法是使 $\Delta Y_G \rightarrow 0$ 和 $\Delta Y_o \rightarrow 0$,因此,从避碰到跟踪的切换过程是一个沿凸边缘曲线切线方向的运动过程.

另外,本算法中,当目标和障碍物为静态时,把避碰和接近目标的过程变为角度 ΔY_G 和 ΔY_o 的规划过程,速度可保持不变.

4 仿真研究 (Simulation study)

为了说明此规划方法的有效性,下面给出典型的仿真实验结果,见图 7 和图 8.仿真环境是用 VC 开发的,运行于 PC 机.在仿真中,机器人为圆形全方位移动机器人,其半径为 100 mm,感知半径为 2000 mm,对感知半径外的障碍物不考虑,初始速度为 100 mm/s.距障碍物的最短安全距离为 100 mm,决策周期为 100 ms.

图 7 所示是目标静止、具有移动障碍物情况下

的仿真结果,其中,障碍物半径是 400 mm.图 8 是目标和障碍物都在运动情况下的仿真结果,其中,障碍物半径为 400 mm,运动目标半径是 200 mm.

从仿真结果来看,图 7 表明,此规划方法能动态避碰,最终到达目标.图 8 结果表明,应用此规划方法,机器人具有动态避碰和跟踪动态目标的能力.

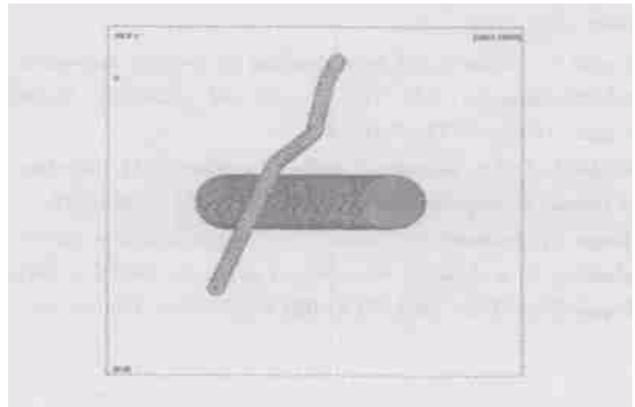


图 7 目标静止、障碍物运动的情况

Fig.7 Obstacle moving while the goal is static

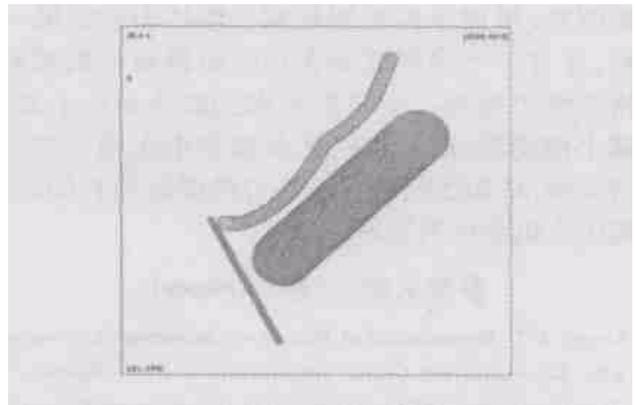


图 8 障碍物和目标都是运动的情况

Fig.8 The goal and obstacle moving at the same time

5 结论 (Conclusion)

本文提出了一种简单、新颖的在动态环境下的移动机器人运动规划方法.此方法基于相对坐标系,通过传感器信息实时调整机器人行为,来实现规划.在规划过程中,机器人有两种行为:向目标运动和避碰,且避碰行为具有优先权.在规划中,向目标运动行为是作为避碰问题的反问题来解决的,而机器人两种行为的切换是基于加速度空间来进行的.仿真结果验证了此规划方法在动态环境下的有效性.

参考文献 (References)

[1] Khatib O. Real time collision avoidance for manipulators and mobile robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 1986, 5

- (1) : 90 - 98 .
- [2] Shiller Z, Large F, Sekhavat S. Motion planning in dynamic environments: obstacle moving along arbitrary trajectories[A]. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. Seoul, Korea: 2001 .21 - 26 .
- [3] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using the relative velocity paradigm[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. Atlanta GA: 1993 . 560 - 565 .
- [4] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998 ,17(7) : 760 - 772 .
- [5] Shiller Z. Online suboptimal collision avoidance[J]. The International Journal of Robotics Research, 2000 ,19(5) : 480 - 497 .
- [6] Large F, Sekhavat S, Shiller Z. Towards real-time global motion planning in a dynamic environment using the NLVO concept[A]. Proceedings of the 2002 IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems[C]. Lausanne, Switzerland: 2002 . 607 - 612 .
- [7] Zhang F, Tan D L. collision avoidance for mobile robots based on relative coordinates[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing [C]. Changsha, China: 2003 . 616 - 621 .
- [8] 张凤,谈大龙. 一种基于相对坐标系下移动机器人动态实时避碰的新方法[J]. 机器人, 2003, 25(1) : 31 - 34 .

作者简介:

张 凤 (1972-),女,博士研究生.研究领域:机器人及多机器人系统研究.

谈大龙 (1940-),男,研究员,博士生导师.研究领域:机器人智能控制,多机器人系统,可重构机器人加工系统等.

(上接第 420 页)

重要因素.增加弹性装置是减小惯性力影响的一个途径,还有一个途径就是在仿生机器鱼的机械阶段就将惯性力作为一个参数考虑到最优设计中去,尽量减小摆动部分的质量,将质量集中在相对摆动不大的头部,从而达到减少惯性力的能量消耗的目的,提高仿生机器鱼的效率.

参考文献 (References)

- [1] Knower A T. Biomechanics of Thunniform Swimming: Electromyography, Kinematics, and Caudal Tendon Function in the Yellowfin Tuna *Thunnus Albacares* and the Skipjack Tuna *Katsuwonus Pelamis*[D]. San Diego: University of California, 1998 .
- [2] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, Yue D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000 ,32 : 33 - 53 .
- [3] Harper K A, Berke meier M D, Grace S. Modeling the dynamics of spring driven oscillating-foil propulsion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1998 ,23(3) : 285 - 295 .
- [4] 梁建宏,王田苗,魏洪兴.水下仿生机器鱼的研究进展 II——小型实验机器鱼的研制[J]. 机器人, 2002,24(3) : 234 - 238 .
- [5] 佩因 H J. 振动与波动物理学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980 .
- [6] 刘军考,陈维山,陈在礼.水下机器人新型仿鱼鳍推进器[J]. 机器人, 2000 ,22(5) :427 - 432 .

作者简介:

俞经虎 (1973-),男,博士.研究领域:鱼形机器人.

竺长安 (1957-),男,教授,博士,博士生导师.研究领域:智能机器人/计算机集成制造系统.