

自动泊车轨迹生成方法的研究

张 勤¹, 曲宁玺¹, 李 艳¹, 神谷好承²

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640;

2. 日本国立金泽大学机械工程学院, 金泽 920 - 1192)

摘要: 轮式移动机器人是机器人学的重要分支, 广泛地应用于消防、军事等领域。轮式移动机器人属于非完整约束系统, 也是典型的强非线性系统, 一般的控制理论很难能够适用。根据重复变换法对轮式移动机器人自动泊车轨迹的生成作了尝试, 通过移动机器人的两驱动轮的 9 种可能的微小移动组合, 利用顺运动学计算出与其对应机器人的位置和姿态, 选取最优解, 实现了机器人在障碍及非障碍环境下的自动泊车, 对移动机器人优化路径, 提高姿态性能, 通过仿真证明了算法的可行性, 生成的泊车轨迹同人操纵下泊车的轨迹非常相似。

关键词: 轮式移动机器人; 避障; 自动泊车; 重复变换法

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Research of the method to generate automatic parking trajectory

ZHANG Qin¹, QU Ning-xi¹, LI Yan¹, KAMIYA Yoshitsugu²

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology,

Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University, Kanazawa 920 - 1192, Japan)

ABSTRACT: Wheeled mobile robot is an important variety of robotics, and it is widely applied in such fields as fire fighting and military. Wheeled mobile robot belongs to nonholonomic constrained system, and it is a typical strong nonlinear system, general control theories are difficult to apply to it. This paper makes a tentativeness on wheeled mobile robot to generate the trajectory based on RDK (Repeatedly Direct Kinematics) method, by the 9 possibility of the combinations of two drive wheels, use forward kinetics method to compute out the position and posture of the robot, and then choose the optimal solution, automatic parking are achieved in environment of obstacle and without obstacle. Simulations show the effectiveness of the proposed method, the parking trajectory is very similar to the parking trajectory generated under the control of human.

KEYWORDS: Wheeled mobile robot; Obstacle avoidance; Automatic parking; Repeatedly direct kinematics (RDK)

1 引言

轮式移动机器人是机器人学的重要分支, 它广泛地应用于消防、军事等领域。近年来, 在无人车间、医疗领域的应用越来越受到人们的瞩目。

轮式移动机器人属于非完整约束系统^[1-4], 通过控制左右驱动轮的回转, 机器人可以实现任意方向的回转和移动。也就是说, 这种轮式机器人的控制中, 输入量是左右两轮的回转量, 输出是机器人的位置和姿势^[5-6]。在这种两输入三

输出的控制系统中, 一般的控制理论很难适用。本文尝试用基于重复变换算法^[7]的路径规划方法, 来解决这一问题, 通过移动机器人两驱动轮 9 种可能的微小移动组合, 利用顺运动学计算出与其对应的机器人的各种位置和姿势, 从中选择最优解, 如此循环, 达到目标值。仿真结果表明该算法能很好地适用非完整约束系统, 完成自动泊车任务。

2 轮式机器人的模型

轮式移动机器人是一个具有大延迟、高度非线性的复杂系统, 为了便于分析和检查重复变换法的有效性, 轮式移动机器人的模型可以简化为如图 1 所示, 它具有两个自由度。

U_l 和 U_r 分别表示左轮和右轮的位移, w 表示车的宽度, G 点是车的重心, 假设 G 在两轮的绝对中心处, 车身长度为 L 。轮式机器人的位置用 G 点的坐标表示 $G(x, y)$, 姿势用它与 x 轴方向的夹角表示。当左右轮的移动量分别为 U_l 和 U_r 时, 机器人位置从 $G(x, y)$ 移动到 $G'(x', y')$, 机器人移动前后位置和姿态的关系如图 2所示。

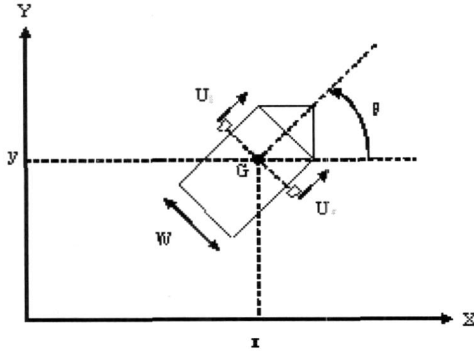


图 1 轮式移动机器人模型

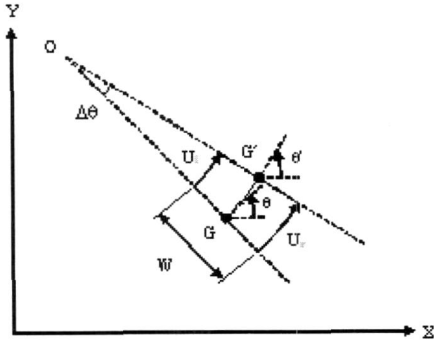


图 2 左右轮位移模型

此时 $\theta' = \theta + \Delta\theta$, $x' = x + \Delta x$, $y' = y + \Delta y$ 。当 U_l 和 U_r 足够小时, 由图 2的几何关系可得:

$$\begin{aligned} \left(\frac{w}{2} \right) \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) &= U_l \\ \left(\frac{w}{2} \right) \cdot \sin\left(\theta - \frac{\Delta\theta}{2}\right) &= U_r \end{aligned} \quad (1)$$

由 (1)式可得

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{U_r - U_l}{w} \\ \left| OG' \right| &= \frac{w(U_r + U_l)}{2(U_r - U_l)} \end{aligned} \quad (2)$$

在图 2中, $G(x, y)$ 可以表示为 $O(O_x, O_y)$ 的关系:

$$\begin{aligned} x &= O_x + \left| OG' \right| \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ y &= O_y + \left| OG' \right| \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$O(O_x, O_y)$ 与 $G(x, y)$ 的关系为:

$$\begin{aligned} O_x &= x + \left| OG' \right| \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \\ O_y &= y + \left| OG' \right| \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

由以上分析, 当 $U_r = U_l$ 时, 机器人从 $G(x, y)$ 到 $G'(x', y')$ 的移动距离

$$x' = (x - x), \quad y' = (y - y)$$

可以表示为式 (5)

$$\begin{aligned} x &= \frac{w(U_r + U_l)}{U_r - U_l} \cdot \cos\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \cdot \sin 2 \\ y &= \frac{w(U_r + U_l)}{U_r - U_l} \cdot \sin\left(\theta + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \cdot \sin 2 \end{aligned} \quad (5)$$

当 $U_r = U_l$ 时, 机器人移动前后的姿势不变, 移动距离为

$$\begin{aligned} x &= \frac{U_r + U_l}{2} \cdot \cos \theta \\ y &= \frac{U_r + U_l}{2} \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (6)$$

3 基于重复变换法的轨迹生成算法及其仿真

3.1 无障碍环境下的泊车

移动机器人从初始位置姿势根据算法逐渐向目标位置姿势移动。本算法的特点是在达到目标位置之前优先考虑机器人的姿势。算法的流程叙述如下:

首先轮式移动机器人的目标位置设定在坐标原点, 目标方向与 x 轴的方向一致。

轮式机器人的初始位置和方向在上述坐标系中表为 $G(x_0, y_0, \theta_0)$ 。

机器人左右两个车轮可能的微小移动可以表示为 $\{-U_l, 0, +U_l\}$ 和 $\{-U_r, 0, +U_r\}$, 由式 (2), (5), (6)的运动学方程可以算出相应的机器人的 9种位姿。

从 中算出的 9种姿态中, 选出比当前位置更趋近于目标位置也就是坐标原点位置的解。

根据上式选出的解中, 再选出与 (7)式定义的机器人的方向最接近的

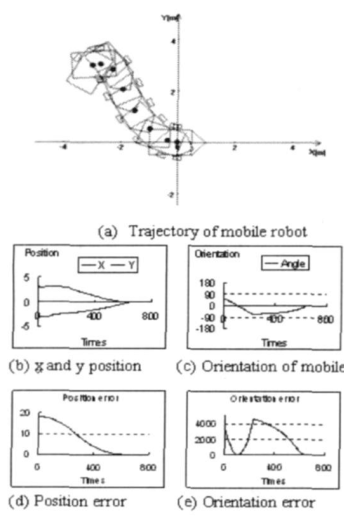
$$\theta_i = \text{atan2}(y_i - 1, x_i - 1) \quad (7)$$

由 条件选出的最适解, 所对应的左右两轮的微小移动量加到车轮的移动中, 返回 , 给出新的左右轮增量, 如此循环, 直到达到目标值。

在式 (7)中, $k > 1$ 表示和目标位置相比, 机器人的方向优先趋向目标方向。

使用上述的算法, 对轮式移动机器人的自动泊车轨迹进行了仿真。机器人的初始位置和姿态为 $G(x_0, y_0, \theta_0) = G(-3, 3, 60^\circ)$ 时, 该算法逐渐趋近于目标值 (坐标原点) 的泊车轨迹, 如图 3(a)所示。图 3(b), (c)分别是泊车过程中, 机器人位置和姿态的变化。图 3(d)、(e)分别表示机器人移动过程中的位置和姿态误差的变化曲线。如果机器人的初始方向 $\theta_0 = 180^\circ$ 该算法生成的轨迹如图 4(a)所示, 由图可

见,机器人是先后退,达到 45 度左右再前行,收敛于目标位置 and 方向。从该算法生成的轨迹可以看出,该轨迹与开车时泊车到目标地点所选择的路径非常相似。



$$\Delta U_l = 0.01, \Delta U_r = 0.01$$

图 3 生成运动轨迹的例子

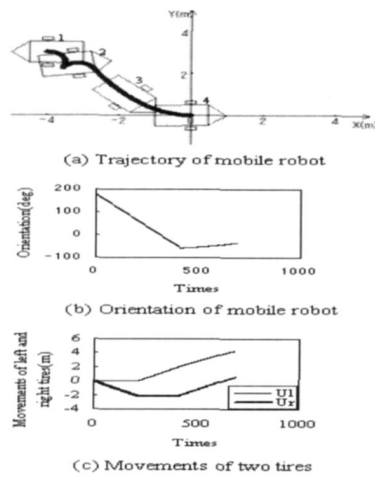


图 4 当 $\theta_0 = 180^\circ$ 时的轨迹 I

图 4 的结果是根据式 (7) 计算出目标姿势 (x_i, y_i, θ_i) , 采用评价函数式 (8) 评价的结果。

$$(x_i - x_i)^2 + (y_i - y_i)^2 + (\theta_i - \theta_i)^2 \quad \min \quad (8)$$

如果把评价函数改为式 (9), 图 4 的仿真结果变成如图 5 所示。

$$(x_i - x_i - 2)^2 + (y_i - y_i)^2 + (\theta_i - \theta_i)^2 \quad \min \quad (9)$$

和图 4 相比较, 图 5 中机器人的最终方向和图 4 相同, 但是可以看出机器人相对于基准坐标系转动了 360° 。可见, 根据轨迹的要求, 设定相应的评价函数, 就可以得到不同的泊车轨迹。当轮式移动机器人的初始位置处在第一象限, 也就是当 $x_0 > 0$ 时, 机器人通过倒车达到目标的位置和方向, 如图 6

所示为 $G(x_0, y_0, \theta_0) = G(4, 3, 120^\circ)$ 时的泊车轨迹。在初始条件相同的情况下, 改变式 (7) 中的 k 值, 可以调节机器人姿态的变化速度。 k 值取得越大, 机器人的方向调整得快。

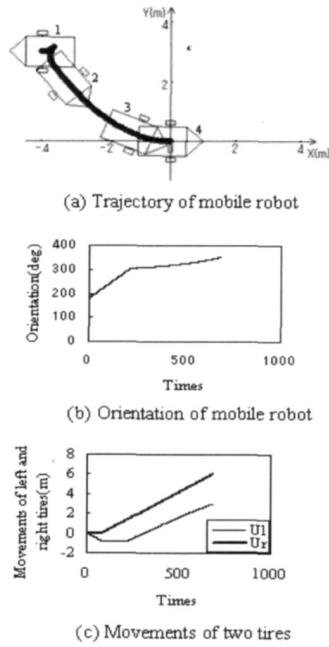


图 5 当 $\theta_0 = 180^\circ$ 时的轨迹 II

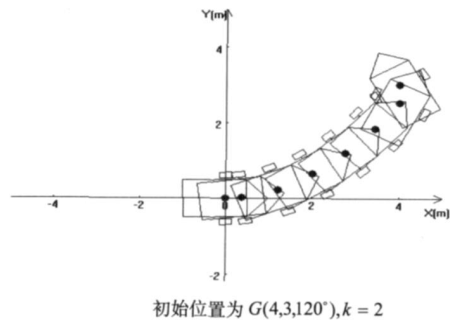


图 6 倒车生成的泊车轨迹例 I

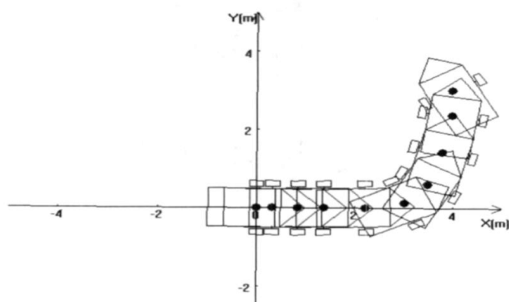
当 $k = 10$ 时, 生成的泊车轨迹如图 7 所示。与图 6 相比, 泊车过程中车的姿态更快地趋向了目标值。

3.2 辅助目标的设立

当轮式机器人的初始位置接近或者在 y 轴上的时候 ($x_0 = 0$), 本算法不能直接适用而需要选择一个辅助目标位置, 经过辅助目标达到最终的目标位置。关于这一点, 与人开车时的想法非常接近。图 8 为移动机器人的初始位置在 y 轴附近时, 设定辅助目标 $(-3, 0, 0)$ 后, 机器人收敛于目标位姿的轨迹。

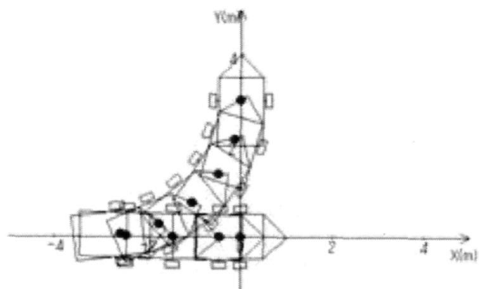
3.3 障碍环境下的泊车

当泊车的目标车位很小, 或者说目标车位的相邻位置已经有车, 这种情况下, 自动泊车时既要泊到目标位置, 又不能



初始位置为 $G(4,3,120^\circ)$, $k=10$

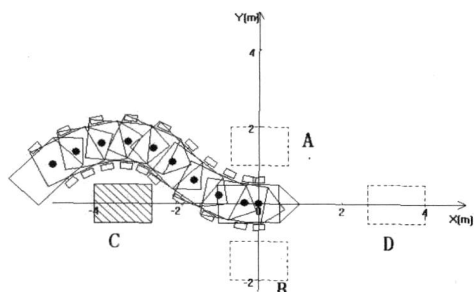
图7 倒车生成的泊车轨迹例Ⅱ



初始位置为 $G(0,3,90^\circ)$

图8 带有辅助目标的轨迹

和周围的车发生碰撞。基于上述的考虑,如图9所示,如果在目标车位的左右位置即A、B位置上有车时,通过改变式(7)中的 k 值,调整泊车过程中车趋向于目标方向的速度,从而改变泊车轨迹的曲率,较容易地避开障碍,达到目标位姿。当目标车位的前后受到限制,如图9中C或D处有障碍时,泊车有一定的难度。该算法的流程变成如图10所示。与无障碍环境泊车算法相比,基本相同,从算出的9种姿态中,首先选出与障碍物不干涉的解,再按上述方法进行优化。根据流程图,进行了障碍环境下的仿真,障碍的位置及生成的轨迹如图9所示,图中可见移动机器人绕过了障碍到达了目标位姿。



初始位置为 $G(-5,1,45^\circ)$

图9 移动机器人避障的轨迹图

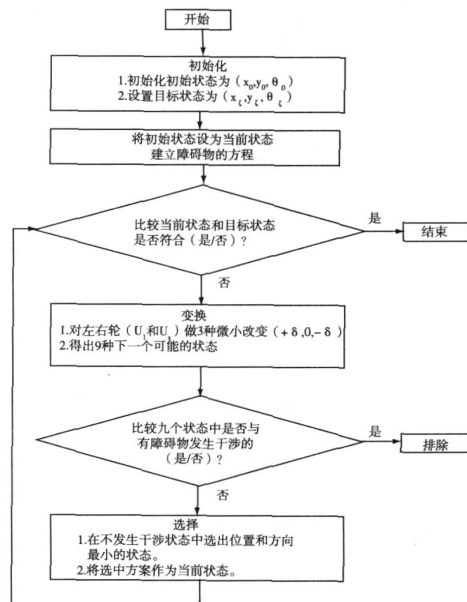


图10 重复变换法流程图

4 结论

本研究基于重复变换法对轮式移动机器人轨迹的生成作了尝试。通过以上的分析和仿真可以得出以下结论:

1) 在轮式移动机器人这种非完整约束系统中,一般的控制系统很难适用,本文基于重复变换算法的移动策略,单纯简单,实现了机器人在障碍及非障碍环境下的自动泊车。

2) 基于重复变换法生成的泊车轨迹,与人泊车时行走的轨迹非常相似。可以说人的泊车技能通过该算法得到了实现。

3) 当移动机器人的初始位置在设定坐标系的 y 轴附近时,本算法不能直接适用,即要求机器人的初始位置 $|x| > D$,车型不同 D 的值也不同,可根据实际实验结果来确定 D 值。当 $|x| < D$ 时,通过选择辅助目标位置,经过辅助目标达到最终的目标位置。

4) 本文通过仿真生成了各种情况下的泊车轨迹。不规则障碍环境下,该算法如何拓展,多个轮式移动机器人联结状态如何应用,这些都是有待研究的问题。

参考文献:

- [1] G Walsh, D Tibury, S Sastry, R Murray and J P Laumond Stabi- lization of Tra - jectories for System s with Nonholonomic Constraints [C]. IEEE Trans Automat Control, 1994, 39(3): 216 - 222.
- [2] Y Kanayama, Y Kimura, F Miyazaki and T Noguchi A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot[C]. IEEE Proc Robot Automation, 1990. 384 - 389.
- [3] R Fierro and FL Lewis Control of a Nonholonomic Mobile Robot Back - stepping Kinematics into Dynamics[C]. IEEE Proc Deci- sion Contr 1995. 3805 - 3810.

(下转第 167 页)

从表 1 中可以看出, SAGA - LSSVM 模型与 LSSVM 模型相比,故障诊断的准确率和诊断效率都得到了提高。

5 结论

故障诊断就其本质而言是一类分类问题^[15]。LSSVM 是一种可用于模式分类的算法,针对 LSSVM 参数通常靠交叉试验来确定的情况,提出了一种 SAGA 算法和 LSSVM 相结合的故障诊断方法,在遗传算法中溶入了模拟退火思想,利用 SAGA 算法强大的全局搜索能力对 LSSVM 参数进行动态选取,实现了 LSSVM 参数的自动最优选择,以某型直升机机载电气盒的故障诊断为例对该方法进行了仿真研究,仿真结果表明,与 LSSVM 模型相比,采用 SAGA - LSSVM 模型的故障诊断的精确度和效率都得到提高,它既克服了需要根据经验去搜寻合理参数造成的效率较低的问题,又提高了故障诊断的精确度。

参考文献:

- [1] V N Vapnik The nature of statistical learning theory[M]. New-York: Springer, 1995.
- [2] V Vapnik, S Golowich, A Smola Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 1996, 9 (2): 281 - 287.
- [3] 王罗,张桂新,陈特放. 回归型支持向量机在电机故障诊断中的研究[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (12): 1691 - 1694.
- [4] 桑海峰,何大阔,大鹏. 基于支持向量机与遗传算法的发酵过程软测量建模[J]. 东北大学学报, 2007, 28 (6): 781 - 784.
- [5] J A K Suykens, J Vandewalle Least squares support vector machine classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9 (3): 293 - 300.
- [6] K Pelckmans, J A K Suykens, B De Moor Building sparse representations and structure determination on LS - SVM substrates[J]. Neurocomputing, 2005, 64 (S): 137 - 159.

(上接第 151 页)

- [4] R Murray and S Sastry Nonholonomic Motion Planning: Steering Using Sinusoid[C]. IEEE, Trans Automat Control, 1993, 38 (5): 700 - 716.
- [5] 神谷好承,久保哲也,青柳誠司,岡部佐規一. 繰返し順変換によるロボットの運動制御[J]. 日本機械学会論文集(c 編), 1993, 59, 564: 125 - 130.
- [6] 李保国,张春熹. 双轮移动机器人安全目标追踪与自动避障算法[J]. 控制理论与应用, 2007, 24 (4): 535 - 540.
- [7] 张帆,周庆敏. 移动机器人避障路径规划算法的研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24 (2 - 2): 212 - 213.

- [7] 杨奎河,单甘霖,赵玲玲. 最小二乘支持向量机在故障诊断中的应用[J]. 计算机科学, 2007, 34 (1): 289 - 291.
- [8] 周辉仁,郑丕谔. 基于 GA 和 Bootstrap 的最小二乘支持向量机参数优选[J]. 系统仿真学报, 2008, 20 (12): 3293 - 3296.
- [9] 邓乃扬,田英杰. 支持向量机—理论、算法与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] V N Vapnik 著,张学工译. 统计学习理论的本质[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [11] 杨洁,郑宁,刘董,罗时贵. 基于遗传算法的 SVM 带权特征和模型参数优化[J]. 计算机仿真, 2008, 25 (9).
- [12] 王小平,曹立明. 遗传算法:理论、应用及软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002.
- [13] 康立山,谢云,尤矢勇,罗祖华. 非数值并行算法(第一册)模拟退火算法[M]. 北京:科学出版社, 1994.
- [14] 周明,孙树栋,彭炎午. 基于遗传模拟退火算法的机器人路径规划[J]. 航空学报, 1998, 19 (1): 198 - 120.
- [15] Liu Huan, Yu Lei Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17 (5): 491 - 502.



[作者简介]

张大为(1979 -),男(汉族),山东潍坊人,硕士研究生,讲师,主要从事智能检测、模式识别方向的研究。

段哲民(1954 -),男(汉族),陕西白水人,教授,博士生导师,现任西北工业大学电子信息学院副院长,教育部电子科学与信息工程类专业教学指导分委员会委员,兼任全国电子高等教育学会副秘书长,主要从事电路与系统、智能检测、模式识别方向的研究。

李 鹏(1984 -),男(汉族),河北石家庄人,硕士研究生,主要从事智能检测、模式识别方向的研究。

张晓辉(1980 -),男(汉族),陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事智能检测、模式识别方向的研究。



[作者简介]

张 勤(1964 -),女(汉族),辽宁锦州人,副教授,主要研究方向为机器人、加工中心等多轴控制机械。

曲宁玺(1984 -),男(汉族),河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为机器人控制技术。

李 艳(1985 -),女(汉族),湖南衡阳人,硕士研究生,研究方向为轮式移动机器人控制技术。

神谷好承(1949 -),男,日本金泽人,教授,博士生导师,研究方向是机械力学控制,智能机械学,机械系统设计和控制等。