

差速驱动轮式移动机器人路径规划新策略

史恩秀¹ 黄玉美¹ 朱从民² 张亚旭¹

1. 西安理工大学, 西安, 710048

2. 中国人民解放军总后勤部建筑工程研究所, 西安, 710032

摘要:针对差速驱动型轮式移动机器人的特点,并依据 Hermite 多项式的特性,提出了基于 Hermite 插值的轮式移动机器人(WMR)路径规划方法。仿真结果表明,采用所设计的路径规划方法为 WMR 进行路径规划,在确保它平稳跟踪规划路径的同时,可保证 WMR 以要求的姿态到达目标点。在此基础上,将该方法应用于自主研制的轮式移动机器人 XAUT. AGV100 上进行了实验研究。实验结果验证了仿真结果的正确性。采用所设计的路径规划方法对移动机器人进行路径规划时,在保证它以要求的姿态准确到达目标点的前提下,有效地提高了移动机器人路径跟踪的运动平稳性。

关键词: Hermite 插值; 差速驱动型轮式移动机器人; 路径规划; 轨迹跟踪; 运动控制

中图分类号: TP242.2

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.23.008

A Novel Method of Planning Path for DDWMR

Shi Enxiu¹ Huang Yumei¹ Zhu Congmin² Zhang Yaxu¹

1. Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048

2. Institute of Constructure Engineering of General Logistic Department of PLA, Xi'an, 710032

Abstract: According to the motion characteristics of WMR and the characteristics of Hermite polynomial which has the continuous curvature, a novel method of path planning for DDWMR was proposed based on Hermite interpolation. The method was used to plan path in order to control DDWMR moving smoothly to the target with accurate pose(position and attitude). It is proved that WMR can arrive on the target with accurate pose and the driving wheels changes smoothly and continuously through by the simulation. After that, the experiments were done on XAUT. AGV100 made by authors. It is verified that the designed method insures DDWMR to arrive at the target with the pose required and track the planned path stably through by experiments. It is indicated that the proposed path planning method is effective when it is used to plan path for DDWMR. It can control WMR to move smoothly along the path planed, and arrive at the target with an accurate pose.

Key words: Hermite interpolation; differentially driving wheeled mobile robot(DDWMR); path planning; trajectory tracking; motion control

0 引言

轮式移动机器人(wheeled mobile robot, WMR)是自动化制造系统中重要的物流工具之一,被广泛应用于 FMS(flexible manufacture system)、CIMS(computer intelligent manufacture system)等无人生产车间以完成物料的自动搬运。因此,对其在目标点处的位置和姿态(两者合称位姿)有严格的要求。为快速、安全、准确地将物料运输到目的地,要求 WMR 应具有环境感知、路径规划和运动控制等功能。移动机器人的工作效率在很大程度上取决于其运动路径。根据 WMR 工作环境的已知程度,路径规划分为环境信息完全已知的全局路径规划和环境信息部分已知或完全未知的基于传感器感知的局部路径规划。全局路径规划可离线进行,规划路径的精确程度取决于获取环境信息的准确度。在相邻两目

标点之间,为 WMR 规划一条路径可采用的方法很多,如蚁群法^[1]、人工势场法^[2]、神经网络法^[3]。Dubins^[4]对 WMR 进行路径规划时,假设路径由两段圆弧和连接它们的切线段组成,此假设虽可获得长度最小的规划路径,但对于 DDWMR,会因路径曲率变化不连续而无法控制它准确跟踪路径,最终影响它到达目标点的精度。近年来,一些学者提出了基于高次参数曲线的路径规划方法^[5]以解决路径曲率不连续问题,甚至将加速度的连续性也考虑在内^[6]。文献^[7]在二维空间和三维空间探讨了 Dubins 路径、回旋曲线等问题,以寻求一种多移动机器人场合下的等距离路径的规划方法。但这些方法实现起来较复杂,且对于 WMR,没有必要要求其加速度连续。

本文以差速驱动型 WMR(即 XAUT. AGV100)为研究对象,利用 Hermite 多项式曲率变化连续的特点,提出了基于 Hermite 插值的移动机器人路径规划方法,在 WMR 的两

收稿日期: 2011-07-21

目标点间为其进行路径规划,使差速驱动型 WMR 跟踪规划路径,可保证其运动的平稳性和路径跟踪的准确性,同时可保证 WMR 在目标点的位姿要求。

1 差速驱动型 WMR 运动方程

XAUT, AGV100 是一种在平面上运动的差速转向式 WMR,为便于讨论,分别建立 WMR 坐标系 $o_a x_a y_a z_a$ 及其工作空间坐标系 $oxyz$,如图 1 所示。WMR 的位置用坐标系 $o_a x_a y_a z_a$ 原点 o_a 在坐标系 $oxyz$ 中的位置 (x_a, y_a) 表示,姿态用两坐标轴 x_a 和 x 间的夹角 θ 表示,即 WMR 位姿可表示为 $P = [x \ y \ \theta]^T$ 。欲控制 WMR 以设定的速度 v_c 沿规划路径 $f(x, y) = 0$ 运动,控制其左右驱动轮的运动速度 $U_c = [v_l \ v_r]^T$ 即可。

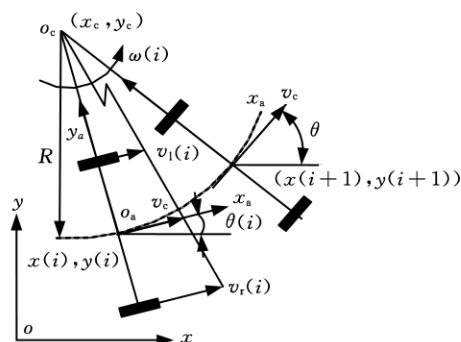


图 1 DDWMR 航位推算

设 $t(i)$ 时刻,WMR 在路径 $f(x, y) = 0$ 上,位姿为 $P(i) = [x(i) \ y(i) \ z(i) \ \theta(i)]^T$,且姿态与所在轨迹的切线方向一致,为控制 WMR 跟踪规划路径,要求 $U_c(i)$ 与速度 $v_{a,c} = [v_c \ \omega_c]^T$ 满足:

$$U_c(i) = A v_{a,c}(i) = \begin{bmatrix} 1 & -B/2 \\ 1 & B/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c(i) \\ \omega_c(i) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

或

$$v_{a,c}(i) = A^{-1} U_c(i) \quad (2)$$

其中, B 为两驱动轮间距, $v_c(i)$ 与 WMR 的角速度 $\omega_c(i)$ 满足:

$$\omega_c(i) = v_c(i)/R(i) \quad (3)$$

式中, $R(i)$ 为 WMR 在路径 $f(x, y) = 0$ 上的点 $(x(i), y(i))$ 处的曲率半径。

假设车体所在路面平整,运动过程中车轮与地面间为纯滚动,车体参数如轮径、轮距等保持不变,则在 $t(i+1)$ 时刻 WMR 的位姿 $P(i+1)$ 为

$$P(i+1) = P(i) + H(i) U_c(i) \quad (4)$$

$$H(i) = \frac{T_c}{2} \begin{bmatrix} \cos[\theta(i) + d\theta(i)] & \cos[\theta(i) + d\theta(i)] \\ \sin[\theta(i) + d\theta(i)] & \sin[\theta(i) + d\theta(i)] \\ -2/B & 2/B \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$d\theta(i) = T_c \omega_c(i)/2$$

式中, T_c 为控制周期。

由式(4)知,根据 WMR 当前位姿和目标位姿,调节控制量 U_c 可使它以要求的位姿到达目标地。

由于对 WMR 在目标点的位姿有要求,若两点间所规划的路径具有曲率连续变化的特点,则可容易地控制 WMR 沿规划的路径运动,并以要求的姿态到达目标点。

2 基于三次 Hermite 插值的 WMR 路径规划方法

Hermite 插值方法是常用的插值方法,所得到的 Hermite 多项式可保证插值曲线通过起始点和目标点,还可保证曲线在这两点处的切线斜率。若控制 DDWMR 跟踪此多项式所表示的路径,由于路径段内曲率是连续变化的,这不仅有利于对 WMR 的运动控制,而且可保证 WMR 以要求的姿态到达目标点。

设在 WMR 进行路径规划时,它在坐标系 $oxyz$ 中的位姿为 $P_1 = [x_1 \ y_1 \ \theta_1]^T$,根据其任务要求,到达目标点时的位姿为 $P_2 = [x_2 \ y_2 \ \theta_2]^T$ (图 2)。本文利用 Hermite 多项式的特点,在满足其速度、加速度限制的条件下,根据 WMR 的起点 P_s 和目标点 P_e 的位姿信息,采用三次 Hermite 插值法在路径节点间为其规划出一条可行的运动路径。

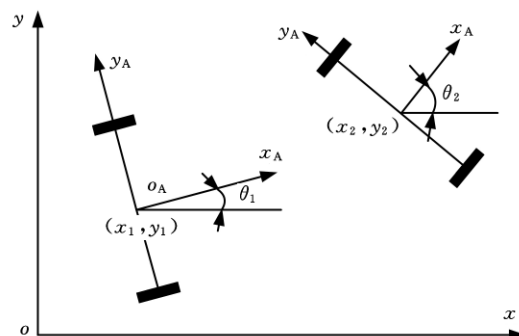


图 2 WMR 路径点信息

2.1 Hermite 插值曲线

已知函数 $y = f(x)$ 在 n 个互不相同的点 x_1, x_2, \dots, x_n 处对应的函数值 y_1, y_2, \dots, y_n 及对应的导数值 $\dot{y}_1, \dot{y}_2, \dots, \dot{y}_n$,可以得到次数不超过 $2n-1$ 次的多项式 $H_{2n-1}(x)$,并满足:

$$\left. \begin{aligned} H_{2n-1}(x_i) &= y_i \\ \dot{H}_{2n-1}(x_i) &= \dot{y}_i \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

则 $H_{2n-1}(x)$ 可表示为

$$H_{2n-1}(x) = \sum_{j=1}^n y_j h_j(x) + \sum_{j=1}^n \dot{y}_j \bar{h}_j(x) \quad (7)$$

其中, $h_j(x)$ 、 $\bar{h}_j(x)$ 都是 $2n-1$ 次多项式,即

$$\left. \begin{aligned} h_j(x) &= [1 - 2\dot{w}_j(x_j)(x - x_j)]w_j^2(x) \\ \bar{h}_j(x) &= (x - x_j)w_j^2(x) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$w_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n (x - x_i)}{\prod_{i=1}^n (x_j - x_i)} \quad i \neq j \quad (9)$$

Hermite 插值多项式为

$$H_{2n-1}(x) = \sum_{j=1}^n [1 - 2\dot{w}_j(x_j)(x - x_j)]w_j^2(x)y_j + \sum_{j=1}^n (x - x_j)w_j^2(x)\dot{y}_j \quad (10)$$

2.2 路径曲率及运动控制量

根据 WMR 路径规划时的条件, 已知信息为

$$\left. \begin{aligned} y_i &= H_3(x_i) \\ \dot{y}_i &= \dot{H}_3(x_i) = \tan\theta_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(8)和式(9)得

$$\left. \begin{aligned} w_i(x) &= \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \\ h_i(x) &= (1 - 2\frac{x - x_i}{x_i - x_j})(\frac{x - x_j}{x_i - x_j})^2 \\ \bar{h}_i(x) &= (x - x_i)(\frac{x - x_j}{x_i - x_j})^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式(7)可得规划路径的曲线方程

$$\begin{aligned} H_3(x) &= (1 - 2\frac{x - x_1}{x_1 - x_2})(\frac{x - x_2}{x_1 - x_2})^2 y_1 + \\ & (1 - 2\frac{x - x_2}{x_2 - x_1})(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1})^2 y_2 + \\ & (x - x_1)(\frac{x - x_2}{x_1 - x_2})^2 \dot{y}_1 + (x - x_2)(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1})^2 \dot{y}_2 \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)所示的三次 Hermite 多项式要求在 x 方向为单调递增, 同时, 应避免在插值点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 处的切线斜率 \dot{y}_1 和 \dot{y}_2 为无穷大, 在选择规划路径的起点和终点时, 应满足 $|\theta_1 - \theta_2| < 180^\circ$ 。为此, 在进行路径规划时, 可用路径起点作为 WMR 路径坐标系的原点, 根据 WMR 的起始位姿 P_1 和目标位姿 P_2 , 由式(11)和式(12)可得路径坐标系下的路径节点信息为

$$\left. \begin{aligned} y_{P1} &= H_3(x_{P1}) = 0 \\ \dot{y}_{P1} &= \dot{H}_3(x_{P1}) = 0 \\ y_{P2} &= H_3(x_{P2}) = y_{P2} \\ \dot{y}_{P2} &= \dot{H}_3(x_{P2}) = \tan\theta_{P2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(13)和式(14)可得规划路径上的插值点 (x_P, y_P) 为

$$\begin{aligned} y_P &= H_3(x_P) = (1 - 2\frac{x_P - x_{P2}}{x_{P2}})(\frac{x_P - x_{P2}}{x_{P2}})^2 y_{P2} + \\ & (x_P - x_{P2})(\frac{x_P - x_{P2}}{x_{P2}}) \tan\theta_{P2} \end{aligned} \quad (15)$$

在 $t(i)$ 时刻, WMR 在路径某点处的位姿 $P_P(i) = [x_P(i) \ y_P(i) \ \theta_P(i)]^T$, 由式(15)可得

WMR 的运动路径曲率为

$$k = \frac{|-4b + \frac{a + (6x_P - 2x_{P2})\dot{y}_{P2}}{x_{P2}^2}|}{\{1 + [-bx_P + \frac{ax_P + (3x_P - 2x_{P2})x_P\dot{y}_{P2}}{x_{P2}^2}]^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (16)$$

$$a = 2[1 - \frac{2(x_P - x_{P2})}{x_{P2}}]y_{P2} \quad b = \frac{2x_P y_{P2}}{x_{P2}^3}$$

由式(16)可知, 所规划的路径曲线曲率连续, 因此, 当控制 WMR 沿此路径运动时, 可保证其左右轮速度连续变化并精确跟踪路径。

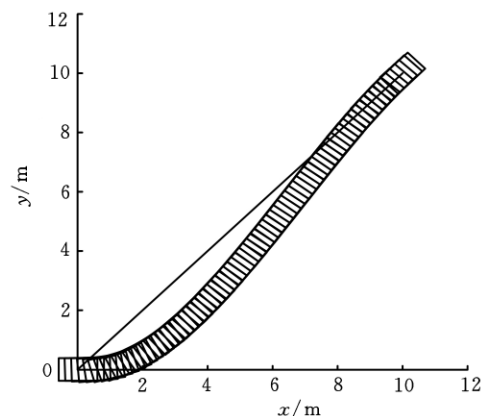
对 DDWMR 路径跟踪时, 根据其运动速度 v_c 求出 WMR 的 U_c , 即

$$\left. \begin{aligned} R(i) &= \frac{1}{k(i)} = \frac{B(v_r(i) + v_l(i))}{2|v_r(i) - v_l(i)|} \\ v_c &= v_r(i) + v_l(i) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

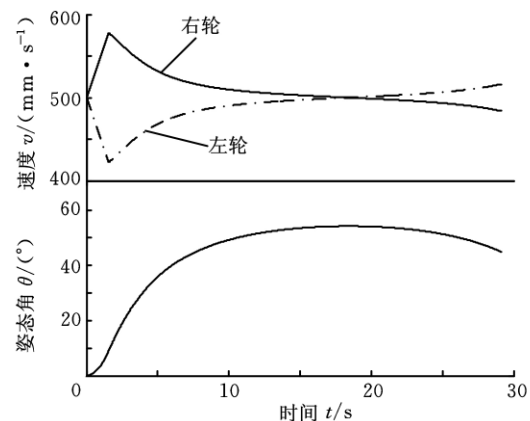
2.3 规划路径跟踪仿真

2.3.1 两点间的路径规划

设 WMR 的起始位姿 $P_1 = [0 \ 0 \ 0^\circ]$, 目标位姿 $P_2 = [10 \ 10 \ 45^\circ]$, 采用所设计的路径规划方法为其规划路径, 并控制 WMR 跟踪规划的路径, 仿真结果如图 3 所示。图 3a 所示为 WMR 跟踪规划路径时的运动轨迹曲线, 图 3b 所示为 WMR 跟踪路径时左右轮速度和其姿态角的变化曲线。



(a) 移动机器人的规划路径



(b) 移动机器人跟踪规划路径时的速度和姿态角曲线

图 3 WMR 跟踪二点一段插值路径

2.3.2 多点间的路径规划

WMR 通常工作在有障碍物的环境中,因此,运动过程中难免要避障。进行路径规划时,在保证其运动平稳性的情况下,还应使其以最短路径安全绕过障碍物,并准确到达目标点。不仅要考虑 WMR 的起始点和目标点的位姿 P_1 和 P_2 ,还必须考虑其绕过障碍物时的位姿。

设 WMR 需从起始点 $P_1 = [8 \ 6 \ 90^\circ]$ 运动到目标点 $P_2 = [2 \ 14 \ 180^\circ]$, 经中间点 $P_3 = [8 \ 8 \ 90^\circ]$ 和 $P_4 = [6 \ 12 \ 135^\circ]$, 其路径规划及其速度、加速度的仿真结果如图 4 所示。

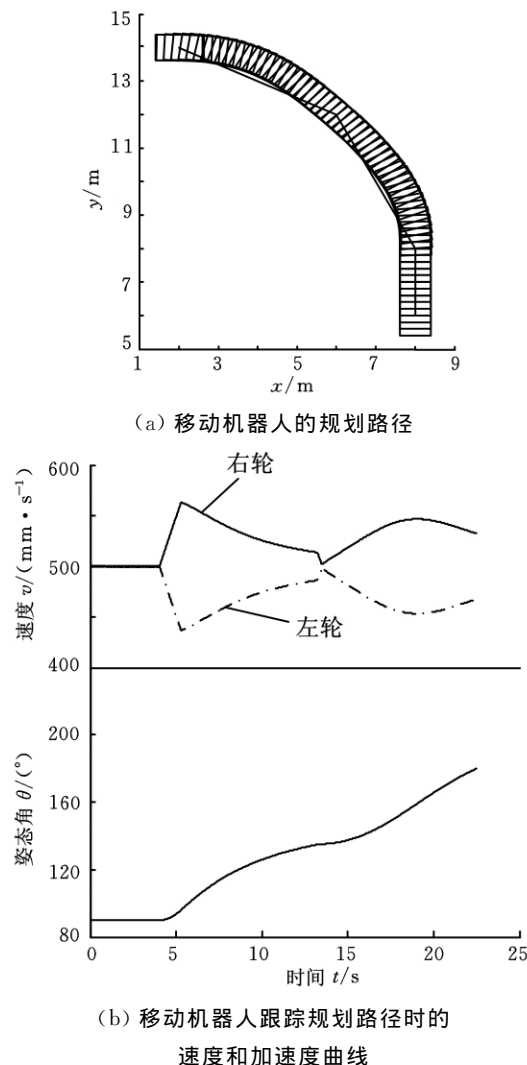


图4 WMR跟踪四点三段插值路径

仿真结果表明,采用基于三次 Hermite 插值的路径规划方法对 WMR 进行路径规划,当控制其跟踪该路径时,可确保 WMR 以要求的姿态到达目标点,提高了 WMR 的运动控制精度;同时,由于 WMR 在运动过程中左右轮速度无突变,所以提高了其运动稳定性。

3 实验

为了检验本文设计的路径规划方法的实用

性,在轮式移动机器人 XAUT-AGV100 上进行了跟踪规划路径实验。设 AGV 从 S 点以要求的姿态运动到 E 点,设计图 5 所示的实验现场。两标识物间的位置关系已知。

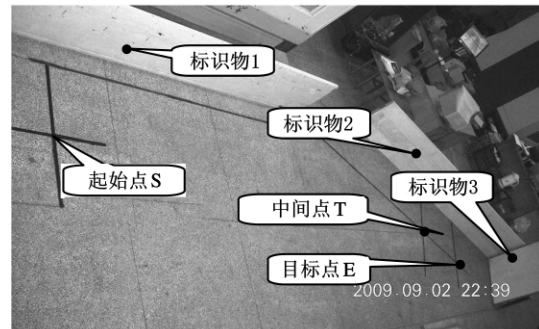


图5 实验现场

为验证 AGV 到达目标点的准确性,根据模拟量超声波传感器的检测特性,在 AGV 一侧的前后分装一传感器以检测其距标识板的距离,在 AGV 的前方左右两边分装一开关量超声波传感器(图 6)。由于开关量超声波传感器不具有测距功能,设置其远距点 $d_{\max} = 1500\text{mm}$,远距点 $d_{\min} = 500\text{mm}$ 。当传感器的输出信号发生第一次变化即 AGV 到达 T 点时减速;当发生第二次变化即 AGV 到达 E 点时停止。

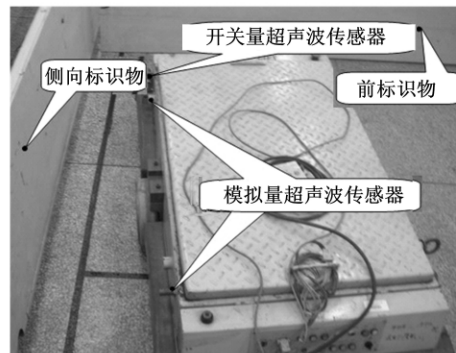


图6 实验装置

根据模拟量超声波传感器的测量值(分别为 298mm 和 302mm)和手工测量值知,AGV 的初始位姿为 $P_1 = [-8 \ -500 \ 0.27^\circ]$ 。AGV 在目标点 E 的位姿为 $P_2 = [5866 \ -1700 \ -30^\circ]$ 。在运动程序中控制 AGV 的运动速度为 0.5m/s ,加速度为 0.5m/s^2 。采用基于三次 Hermite 插值的路径规划方法在 S 点与 E 点对 AGV 进行路径规划并控制其跟踪该路径运动到 E 点。AGV 的运动轨迹曲线如图 7 所示。运动结束后,根据模拟量超声波传感器的检测值可得 AGV 中心距离 2 号标识物的距离 d_s 和相对其姿态角 θ ;手工测得 AGV 车体前端距离 3 号标识物的距离 d_f 。实验结果如表 1 所示。



图 7 AGV 跟踪单段三次 Hermite 曲线轨迹实验图

表 1 XAUT, AGV100 跟踪规划路径实验结果 mm

实验次数	前超声波 后超声波		AGV 相对侧标识板		
	距离 d_1	距离 d_2	距离 d_s	角度 $\theta(^{\circ})$	距离 d_t
1	299.91	301.84	300.88	0.01	501
2	299.46	295.89	297.68	-0.02	498
3	302.14	304.26	303.20	0.01	503
4	301.02	295.23	298.13	-0.03	498
5	297.22	302.06	299.64	0.02	500
6	301.47	305.78	303.63	0.02	505
最大值			303.63	0.02	505
最小值			297.68	-0.03	498
目标值			300	0.00	500
误差范围			± 3.63	± 0.03	± 2

由实验曲线可知,AGV 可平稳地运动至目标点。由表 1 可知,采用所设计的路径规划方法对 DDWMR 进行路径规划,当其沿该路径路径时,到达目标点的定位误差为 $\pm 3.63\text{mm}$,姿态角定位误差为 $\pm 0.03^{\circ}$ 。定位精度可满足工业生产中对 AGV 定位精度的要求(位置定位精度 $\pm 25\text{mm}$,姿态角定位误差为 $\pm 1^{\circ}$)。实验结果表明,本文设计的基于 Hermite 插值的路径规划方法可应用于 AGV 的实际路径规划中。无论 AGV 的起始位姿如何,在 AGV 的运动能力范围内,AGV 能完成其规划路径的跟踪,并能以要求的位姿平稳地运动到目标点。

4 结束语

本文以自主研制的物料搬运型轮式移动机器人 XAUT, AGV100 为研究对象,根据 DDWMR 的结构特点,针对其路径规划问题进行了研究,提出了基于三次 Hermite 插值的移动机器人局部路径规划方法。将所设计的路径规划方法用于 XAUT, AGV100,对其进行了局部路径规划与跟踪控制仿真实验。仿真结果表明,所设计的局部

路径规划方法能较好地满足 WMR 速度连续变化的要求,最重要的是,能够保证 WMR 以要求的位姿到达目标点,无论其平滑性,还是移动机器人跟踪路径时运动的平稳性等均有明显的优势。

在 XAUT, AGV100 上进行了仿真实验研究,验证了所设计的路径规划方法的有效性。实验结果验证了仿真结果的正确性。研究结果表明,采用所设计的路径规划方法对 WMR 进行路径规划,在保证其以要求的姿态准确到达目标点的前提下,有效地提高了 WMR 在跟踪路径过程中的运动平稳性。

参考文献:

[1] Tan Guanzheng, He Huan, Sloman A. Ant Colony System Algorithm for Real-time Globally Optimal Path Planning of Mobile Robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(3): 279-285.

[2] Shi Enxiu, Cai Tao, He Changlin. Study of the New Method for Improving Artificial Potential Field in Mobile Robot Obstacle Avoidance[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Jinan, 2007: 282-286.

[3] Lebedev D. Neural Network Model for Robot Path Planning in Dynamically Changing Environment [J]. Modeling and Analysis of Information Systems, 2001, 18(1): 12-18.

[4] Dubins L E. On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents [J]. Amer. J. Math., 1957, 79(3): 497-517.

[5] Piazzzi A, Romano M, Bianco C G L. G3-splines for the Path Planning of Wheeled Mobile Robots[C]//Proc. 2003 Eur. Control Conf., Cambridge, 2003.

[6] Bianco C G L, Piazzzi A, Romano M. Smooth Motion Generation for Unicycle Mobile Robots Via Dynamic Path Inversion[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 884-891.

[7] Madhavan S. Path Planning of Multiple Autonomous Vehicles[D]. Cranfield; Cranfield University, 2007.

(编辑 陈 勇)

作者简介:史恩秀,女,1966 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院副教授。主要研究方向为移动机器人导航与运动智能控制方面的研究。发表论文 30 余篇。黄玉美,女,1941 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院教授。朱从民,男,1971 年生。总后勤部建筑工程研究所高级工程师。张亚旭,男,1986 年生。西安理工大学机械与精密仪器工程学院硕士研究生。