

轮式移动机器人轨迹跟踪控制算法的研究

尉成果, 赖欢, 王太江

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决轮式移动机器人平面运动控制问题, 将平面几何理论应用于轨迹跟踪控制中。建立了机器人平面运动模型, 并以此为基础研究了直线和圆弧的轨迹跟踪控制算法; 提出了导航圆方法, 将机器人实时位置信息和目标轨迹之间的角度偏差及位置偏差合成一个角度, 然后对该角度进行了PID调节; 在实验中, 将直线、圆弧轨迹跟踪算法实际运用于机器人的运动控制。研究结果表明, 该算法能将机器人轨迹的偏差有效地控制在 ± 1 cm以内。

关键词: 轮式移动机器人; 轨迹跟踪; 算法; 比例-积分-微分调节

中图分类号: TP242; TH113 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0730-03

Research on algorithm of wheeled mobile robot's trajectory tracking control

YU Cheng-guo, LAI Huan, WANG Tai-jiang

(Facility Design and Instrument Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to satisfy the plane motion control of wheeled mobile robot, the plane geometry theory was investigated. A planar motion model as the basis for the study of linear and circular trajectory tracking control algorithm was established. A navigation round was presented to synthesize an angle by calculating the deviation of both angle and position between the robot's real-time location and the target trajectory. Secondly, a PID controller to achieve the intended trajectory tracking was made. The linear and circular trajectory tracking algorithm was practically applied in robotics. The experimental results show that the error is controlled in ± 1 cm.

Key words: wheeled mobile robot; trajectory tracking; algorithm; proportion-integral-derivative(PID) control

0 引言

目前, 自主移动机器人的研究是一个十分活跃、具有广泛应用前景的前沿研究领域。其移动机构有: 轮式、腿式、履带式、蛇形式和复合式等方式。其中轮式移动机器人在自主移动机器人领域占有较为重要的地位, 具有运动速度快、控制简单等特点, 在自动码垛生产线、无人驾驶车辆、火星车等领域应用广泛。自20世纪80年代以来, 关于轮式移动机器人的研究越来越多, 在研究课题中, 路径规划和轨迹跟踪控制问题又占据相当重要的地位^[1-6]。

轮式移动机器人的运动控制就是控制机器人的

运动速度和运动方向, 使机器人沿着预定的轨迹和速度运动^[7-8]。笔者研究的轮式移动机器人是一个四轮移动小车, 两个前轮为万向轮, 两个后轮分别通过单独的电机和驱动器驱动, 实现差速驱动。该轮式移动机器人的运动可以简化为一个两轮的小车在平面内做旋转和平移合成运动^[9-10]。

本研究首先给出轮式移动机器人的运动模型, 然后给出在绝对坐标系下的轨迹跟踪算法。为了简化机器人轨迹跟踪, 把轨迹分为圆弧和直线两种, 复杂的曲线采用这两种线型来拟合, 并分别进行轨迹跟踪的算法研究。最后将该算法应用到机器人实际运动控制中, 在实践中检验该算法的正确性。

1 机器人运动控制模型

1.1 机器人控制模型

为了充分发挥轮式移动机器人的运动性能,本研究中的机器人选用直流伺服电机驱动,并对电机做速度闭环控制。同时为了满足轨迹跟踪控制,机器人配有实时定位系统,主控制器根据机器人位置和给定轨迹之间的偏差,通过一定算法分配左右驱动轮的速度。最后,本研究通过脉宽调制(PWM)调节电机电压进行速度调节,实现轨迹跟踪。

1.2 机器人运动数学模型

在平面坐标系中,机器人位置信息为 $R_{ob} = [x, y, q]^T$, x 、 y 表示平面坐标, θ 表示机器人朝向。为了简化控制,本研究把机器人运动轨迹简单分为直线运动和圆弧运动两种,对于复杂曲线,则由这两种曲线进行拟合。圆弧运动时给定圆心和半径,圆心为 $R_o = [x_0, y_0, 0]^T$, 半径为 R , 速度为 V , 转动角度为 $\Delta\theta$, 机器人运动数学模型如图1所示,则转动矩阵为:

$$K = \begin{bmatrix} \cos(Dq) & -\sin(Dq) & 0 \\ \sin(Dq) & \cos(Dq) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

机器人转过角度 $\Delta I = [0, 0, Dq]^T$ 后, 为 $R_{ob'} = [x', y', q']^T$ 。

且:

$$R_{ob'} = K \cdot (R_{ob} - R_o) + R_o + \Delta I$$

机器人运动模型如图1所示。

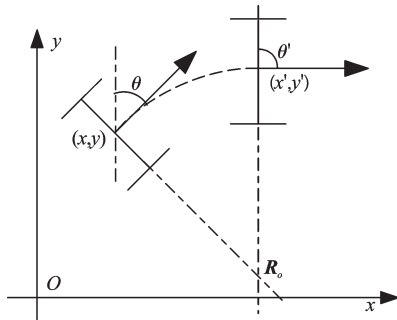


图1 机器人运动数学模型

2 轨迹跟踪控制算法

2.1 直线跟踪算法

本研究在算法中引入导航圆的概念(直线跟踪示意图如图2所示),即设定一个假想圆作为机器人的导航范围来计算轨迹跟踪时的纠偏角度。导航圆圆心为机器人两个驱动轮连线中点,半径为 R_0 , 目标直线由其上两点 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 确定。

直线方程为:

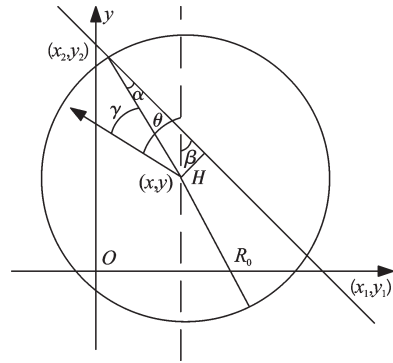


图2 直线跟踪示意图

$$(y_2 - y_1) \cdot (x - x_1) - (x_2 - x_1) \cdot (y - y_1) = 0 \quad (2)$$

式中: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) —目标直线上任意两点,运动方向从 (x_1, y_1) 到 (x_2, y_2) 。

H 为点到直线距离:

$$H = \frac{(y_2 - y_1) \cdot (x - x_1) - (x_2 - x_1) \cdot (y - y_1)}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \quad (3)$$

式中: H —机器人到目标直线的距离。

图2中各角度关系为:

$$\sin \alpha = \frac{H}{R_0} \quad (4)$$

$$\tan \beta = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \quad (5)$$

$$\gamma = \theta + \alpha - \beta \quad (6)$$

式中: α —机器人中心到目标点连线与目标直线夹角; β —目标直线与 y 轴夹角; γ —机器人当前方向与目标方向夹角;

可以求出角度 γ :

$$\gamma = \theta + \arctan\left(\frac{H}{R_0}\right) - \arctan\left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1}\right) \quad (7)$$

然后,只要使角度 γ 趋近于零,就可以实现轨迹跟踪。PID控制的原理为:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d(e(t))}{dt}] \quad (8)$$

式中: $u(t)$ —控制量; $y(t)$ —输出量; $r(t)$ —给定量; $e(t)$ —输入量和输出量之间的误差, $e(t) = r(t) - y(t)$; K_p —比例放大系数; T_i —积分时间; T_d —微分时间。

本研究对 γ 角采用数字PID控制,用矩形积分时,积分环节为:

$$\frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt = \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) \quad (9)$$

用差分代替微分为:

$$T_d \frac{d(e(t))}{dt} = \frac{T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \quad (10)$$

将式(9,10)代入式(8),PID算法变为:

$$u(k) = K_p + [e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T_s} (e(k) - e(k-1))] + u_0 \quad (11)$$

$$\text{其中: } K_i = \frac{K_p T_s}{T_i}; K_d = \frac{K_p T_d}{T_s}。$$

式中: u_0 —控制量的基值, 即 $k=0$ 时的控制; $u(k)$ —第 k 个采样时刻的控制; T_s —采样周期。

直线运动时无偏差的情况下, 左、右驱动轮速度分配相等, 机器人驱动轮距为 $2L$, 在无偏差情况下左、右轮速度分配为:

$$\begin{cases} V_L = V \\ V_R = V \end{cases} \quad (12)$$

有偏差的情况下, k 时刻, 速度分配为:

$$\begin{cases} V_L = V + u(k) \\ V_R = V - u(k) \end{cases} \quad (13)$$

2.2 圆弧跟踪算法

圆弧和直线的轨迹跟踪算法思想是一致的, 只是做法上有一些差异, 圆弧跟踪示意图如图3所示。首先本研究将目标圆心进行坐标系转化, 在机器人的坐标系内为 (x_0, y_0) 。图3中:

$$H = R - \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (14)$$

式中: H —机器人到目标圆最近点的距离。

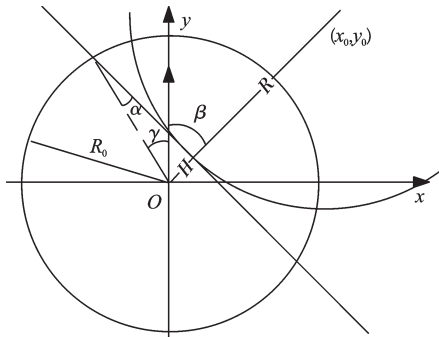


图3 圆弧跟踪示意图

图3中各角度关系为:

$$\sin \alpha = \frac{H}{R_0} \quad (15)$$

$$\tan \beta = \frac{x_0}{y_0} \quad (16)$$

$$\gamma + \alpha = \pi/2 - \beta \quad (17)$$

$$\gamma = \pi/2 - \arcsin(\frac{H}{R_0}) - \arctan(\frac{x_0}{y_0}) \quad (18)$$

式中: α —机器人中心到目标点连线与目标圆切线的夹角, β —目标圆心在机器人坐标系下的方向角, γ —机器人当前方向与目标方向夹角。

本研究对角度 γ 进行目标为零的PID控制, 具体方法同直线跟踪。

机器人驱动轮距为 $2L$, 在无偏差情况下左、右轮

速度分配为:

$$\begin{cases} V_L = \frac{R+L}{R} V \\ V_R = \frac{R-L}{R} V \end{cases} \quad (19)$$

有偏差的情况下, k 时刻, 速度分配为:

$$\begin{cases} V_L = \frac{R+L}{R} V + u(k) \\ V_R = \frac{R-L}{R} V - u(k) \end{cases} \quad (20)$$

2.3 调试结果

直线跟踪调试时, 本研究给定目标直线为 X 轴, 通过给机器人一定扰动, 分析其矫正速度和强度来判断是否能够有效纠偏。直线跟踪调试结果如图4所示, 实验中, 机器人启动后, 强行转动 21° , 在前进至 200 cm 处完成矫正。可见, 机器人在这种大扰动下能够迅速矫正位姿, 具有较好的轨迹跟踪性能。

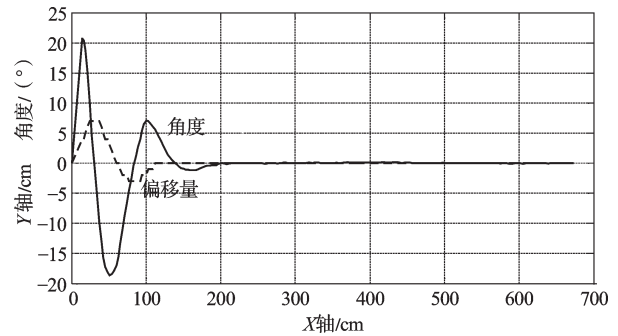


图4 直线跟踪调试结果

圆弧跟踪调试时, 本研究采用了初始位置偏差的方法, 设定目标圆心为 $(103, 0)$, 半径为 102 , 初始位置 $(0, 0)$, 速度为 1.5 m/s , 启动时由于位置偏差和离心力作用, 出现了一次超调现象, 但是在转过 60° 后矫正回来, 圆弧跟踪调试结果如图5所示。

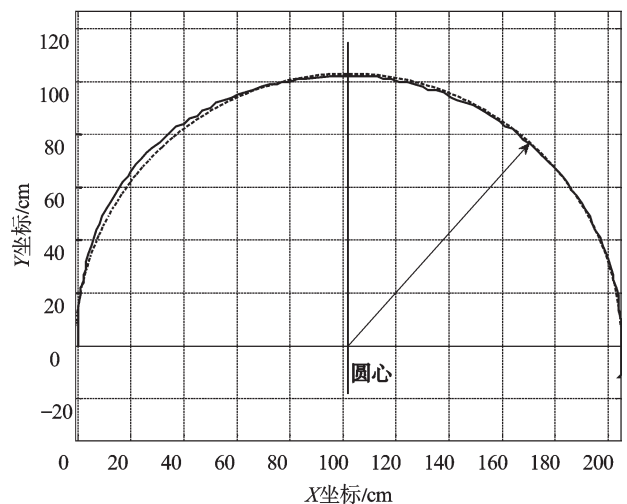


图5 圆弧跟踪调试结果

(下转第736页)

装生产线上,利用闭环控制系统原理控制钢管行进速度,确保钢管在自动涂装生产线上能保持匀速行进。通过对开环速度历史曲线与闭环速度历史曲线的比较以及闭环控制前和闭环控制后大型钢管防腐涂层漆膜厚度的变化情况的比较分析。

得出的结果表明,基于HMI与PLC的位移闭环控制系统能使钢管在大型自动涂装生产线滚轮行走系统上以恒速行进,在喷漆条件固定的条件下,能提高漆膜的均匀性,确保漆膜质量,提高漆膜的防腐性能,同时还能降低成本节约资源,具有一定的工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] 孟繁强,姚慧健,孙华林,等. 无溶剂聚氨酯涂料在大口径钢管顶管工程中的应用[J]. 中国给水排水,2007,23(2): 96-98.
- [2] 张自力,李 华,魏铁成,等. 大口径钢管内涂层涂覆设备的设计与应用[J]. 涂装与电镀,2009(5):12-16.
- [3] 符红羽. PLC在涂装生产线中的应用[J]. 机电工程技术,2001,30(4):37-38.
- [4] 赵红顺,葛朝阳. 基于PLC和变频技术控制的金属涂覆生产线[J]. 自动化博览,2008(4):64-65.
- [5] 王 丽. 基于自动生产线控制系统的应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
- [6] 谢汝生,张松顺,贺思德. HMI在PLC控制系统中核子秤评定系统中的应用[J]. 计算机测量与控制,2002,10(6): 388-389.
- [7] 陆秀玲. 提高PLC控制系统可靠性的措施[J]. 机电工程技术,2004,33(1):71-72.
- [8] 冯焕银,何世恩,谭子美. 闭环控制的调速系统研究[J]. 西部探矿工程,2010(8):90-92.
- [9] 黄元辉. 多普勒激光测速技术在二次冷轧机组中的应用[J]. 宝钢技术,2005(6):23-26.
- [10] 侯冠华,刘 磊,周 涛,等. 多普勒激光测速仪在冷轧带钢厚度控制中的应用[J]. 自动化应用,2010(7):60-62.
- [11] 冯星华,张海洪,谈士力. PLC与个人计算机间串行通讯及程序设计[J]. 机电一体化,2000(1):21-24.

[编辑:李 辉]

(上接第732页)

3 结束语

本研究采用导航圆方法,解决了平面轨迹跟踪问题中偏移量和运动方向的综合问题。相比于“单独计算角度偏差和距离偏差,然后对二者进行加权处理”的方法,本研究所介绍算法在轨迹跟踪时将复杂的位置和角度偏差信息综合到一个角度量中,使得轨迹跟踪更加简洁,同时也增加了控制系统的稳定性。调试结果显示,该算法可以使轨迹跟踪达到 $\pm 1\text{ cm}$ 的精度,能够满足一般机器人作业时自主导航和定位的需要。

参考文献(References):

- [1] 化建宁,符秀辉,郑 伟,等. 基于运动描述语言的轮式移动机器人控制[J]. 机器人,2006,28(3):315.
- [2] 孙 宇,张世琪,崔康吉. AGV自动导引技术[J]. 中国机械工程,1996,7(6):31-32.
- [3] CHRISTENSEN H I. Localization and navigation of a mobile robot using natural point landmarks extracted from data[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 2000, 33(3): 131-142.
- [4] 章小兵,乔 茹,赵光兴. 基于改进蚁群算法的移动机器人全局路径规划[J]. 机电工程,2009,26(3):90-93.
- [5] 宫金超,李晓明. 基于粒子群优化算法的小型足球机器人路径规划[J]. 机电工程,2010,27(12):116-120.
- [6] 冯建农,柳 明,吴 捷. 自主移动机器人智能导航研究进展[J]. 机器人,1997,19(6):468-478.
- [7] 刘子龙,丁玉静,江艳霞. 四轮移动机器人跟随控制[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(5):1348-1350.
- [8] 陶 辉,吴怀宇,程 磊,等. 轮式移动机器人FastSLAM算法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2011,16(1):42-44.
- [9] 彭忆强,惠艳翠. 移动机器人智能避障算法仿真研究[J]. 西华大学学报:自然科学版,2010,29(2):28-30.
- [10] TREVELYAN J. Simplifying robotics—a challenge for research[J]. **Robotics and Autonomous Systems**, 1997, 30(4):207-220.

[编辑:李 辉]