

双轮差动机器人曲线算法设计与实现

武晓康, 谢成钢, 罗武胜

(国防科学技术大学, 长沙 410073)

摘要: 针对非完整约束系统的双轮差动机器人转向不灵活、绕过障碍时行进速度不连续这一问题, 分析了双轮差动移动机器人运动学模型, 提出了路径规划圆弧化的方法; 在此基础上设计的圆弧控制算法, 使机器人能够连贯绕过障碍, 匀速达到目的地; 算法使机器人的平均速度由 0.9 m/s 提高到 1.6 m/s, 满足了对机器人快速机动要求, 缩短了行进时间, 仿真结果证明了上述控制算法的可行性, 并且该运动控制算法已应用于 Robocon 比赛。

关键词: 运动学模型; 差动移动机器人; 运动控制; 曲线算法

A Curve Algorithm Design And Implementation of Differential Drive Mobile Robot

Wu Xiaokang, Xie Chenggang, Luo Wusheng

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: This paper aims to solve the problem of the differential drive mobile robot with nonholonomic constraints system inflexible steering around the obstacle and, traveling velocity discontinuity, analyzes the differential drive mobile robot kinematics model, and provides the arced-path planning method. Base on these ideas, the arc control algorithm was designed, which can make the robot around the obstacle coherently and, reach the destination uniformly. Increasing the average speed of the robot from 0.9 m/s to 1.6 m/s, meets the requirements of rapid maneuver, shortening the travel time. The simulation results proved the feasibility of motion control algorithm that has been applied to the Robocon Competition.

Keywords: kinematic model; differential drive mobile robot; motion control; curve algorithm

0 引言

双轮差动机器人是典型的非完整约束系统。学者们对此作了大量研究, 对各种控制任务提出了许多控制算法, 成果丰硕。Brockett^[1]应用微分流形的工具研究了无漂流系统 (Driftless System) 的控制问题。Amthony M. Bloch^[2]等人阐述了非完整约束系统的运动特性和控制特性, 并介绍了非完整约束系统的基本控制方法。Guy Gampion^[3]等人深入系统地研究了轮式移动机器人的结构特性和运动学以及动力学模型。为设计控制算法奠定了理论基础。

以上学者提出了很多理论研究, 但在实际运用中有很多难以实现的细节。并且以上算法中更多强调控制的精度, 而不能使机器人快速反应。在实际应用中, 有时需要机器人能快速绕过障碍行进到目的地。

差动机器人传统绕障行进策略是: 直线运动到障碍前, 停止后转过一定角度, 再直线前进到指定位置停下。停止前后的加减速使机器人整体速度没有发挥到很好的水平。

为了减少行进时间, 希望机器人能够光滑跟踪一条曲线, 不需要停止转弯, 以减少加减速过程来提高平均速度。本文设计了一种基于转弯半径和转弯速度为目标, 通过位置和角度反馈修正的圆弧控制算法。

1 双轮差动机器人的运动学模型

机器人在惯性坐标系中的姿态如图 1 所示。其中, 坐标系 OXY 为惯性坐标系, P 点为机器人上的一个参考点, 坐标系 $O'X'Y'$ 为以 P 点为原点的车体固连坐标系, X' 轴与 X 轴的夹角为 θ 。机器人的姿态 (Posture) 可以用 P 点在惯性坐标系中的坐标 (x, y) 和 θ 表示, 即可用三维矢量 $\xi = (x, y, \theta)^T$ 表示。同时, 还可以得到由惯性坐标系到车体固连坐标系的坐标旋转矩阵如下^[4]:

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

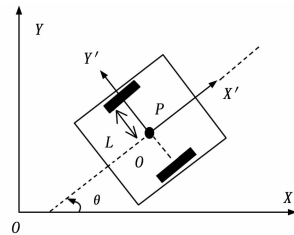


图 1 车体分析图

轮面相对于车身是固定的。轮子的轴心 A 点到机器人上的参考点 P 点的距离为 l , PA 与 X' 轴的夹角为 α , 与轮子的轴线的夹角为 β 。轮子的半径为 r , 绕其轴的旋转角度为 $\varphi(t)$ 。

在没有滑动的情况下, 车轮与地面的接触点与地面间无滑动。此时, 轮子的运动情况完全由 α, β, l, r 和 $\varphi(t)$ 确定。

收稿日期: 2014-04-03; 修回日期: 2014-05-04。

基金项目: 国家自然科学基金(61171136)。

作者简介: 武晓康(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事机器人控制, 图像视频分析方向的研究。

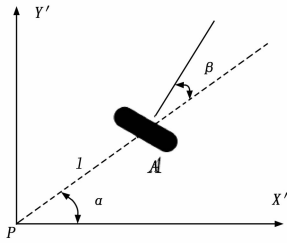


图 2 车轮分析图

如图 1, 图 2 所示, 双轮差动机器人装有两个轴心共线的固定轮。两个固定轮的大小和质量完全相同, 而且由性能相同的电机驱动。取轮轴中心连线的中点 P 为参考点, 并且车体固连坐标系的 Y' 轴与轮子的轴线重合。 P 到各个轮子的距离都为 L 。轮子的半径为 r 。两个轮子相对于车体的关系如下表:

表 1 双轮差动机器人的结构参数

轮子	$\alpha / (\text{rad})$	$\beta / (\text{rad})$	$l / (\text{mm})$
L_f	$\frac{\pi}{2}$	0	L
R_f	$-\frac{\pi}{2}$	0	L

由于系统非完整约束, 双轮差动机器人系统是非完整约束系统。系统的自由度为 2。表明双轮差动机器人系统有两个独立坐标变分, 瞬时运动只能是沿轮子方向的平动和绕参考点的旋转^[5]。

基于以上分析论证可以得到双轮差动移动机器人的姿态运动学模型^[6]为:

$$\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

虽然输入 (v, ω) 称为伪速度, 但有实际的物理意义, 表示机器人的线速度和角速度。

取描述机器人位形的广义坐标为 $q' = (x \ y \ \theta \ \varphi_L \ \varphi_R)^T$, 可得双轮差动移动机器人的位形运动学模型:

$$\dot{q}' = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi}_L \\ \dot{\varphi}_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \\ \frac{1}{r} & -\frac{L}{r} \\ -\frac{1}{r} & -\frac{L}{r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (3)$$

机器人的驱动电机速度 v_L, v_R 与机器人线速度 v 和角速度 ω 间的关系:

$$\begin{pmatrix} v_L \\ v_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r\dot{\varphi}_L \\ r\dot{\varphi}_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (4)$$

当控制系统以 (v, ω) 作为输入, 以姿态运动学模型为基础实现机器人的运动控制时, 最终的控制输出为电机的速度, 可以通过 (4) 式实现 (v, ω) 与 v_L, v_R 间的换算。

2 圆弧运动控制算法设计

绕过障碍的一段路径可以看作是一段圆弧连接两段直线而

成, 圆弧是车身沿该轨迹保持一定速度运动的过程。希望机器人中心速度在圆弧路径行进中保持最大。

转弯其实就是两轮速度有一定差值而能使车体有所偏移。但考虑电机和驱动实际情况, 两轮速度不能突变。必须平稳光滑提速, 也必须平稳光滑减速。

控制器设计采取控制量为姿态, 控制过程是路径跟踪^[7]。路径跟踪只能确保机器人速度快却无法确保终态稳定, 所以完成任务不只是能跟踪一段圆弧路径, 更重要的是根据电机和驱动性能把全部路径能有效地连接在一起。比如在机器人启动时平滑步进启动, 在将要到达指定位置时平滑结束保证终态稳定。

根据 (4), 进行矩阵变化可得:

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2L \\ -1/2L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_L \\ v_R \end{pmatrix} \quad (5)$$

把式 (5) 代入 (3) 中, 可得双轮差动移动机器人的姿态和驱动电机速度 v_L, v_R 关系:

$$\dot{q} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta/2 & -\cos\theta/2 \\ \sin\theta/2 & -\sin\theta/2 \\ -1/2L & -1/2L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_L \\ v_R \end{pmatrix} \quad (6)$$

下面以该模型为对象来研究机器人路径跟踪问题。

该段运动控制的核心就是控制转向。轮式移动机器人的转向性能按照两侧车轮速度控制性能分类^[8]。

- (1) 独立式转向: 两侧互不影响, 高速侧轮速将保持不变。
- (2) 差速式转向: 一侧轮速的降低值为另一侧轮速增加值。
- (3) 降速式转向: 在低速轮降速的同时, 高速轮也按比例降速。

差速式转向的转弯半径极微小, 且不降低车体速度。在转弯前后始终以最大速度行进。和驾驶车辆一样, 当方向盘转过一定角度之后在再转过来。这样一个过程就会使车转过一定角度后直线前进。自动机器人没有人员操作, 需要设定一个反馈在车体转过一定角度之后开始调节。根据电机性能和调试机器人积累的经验, 在保持机器人运动稳定且无震荡前提下, 车体速度和调节角度具有一定线性关系, 把其简单化为正比例关系。

设转弯半径为 R , 定义转弯极限速度 $\begin{pmatrix} v_{L_turn} \\ v_{R_turn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{max} * (1 - L/R) \\ v_{max} * (-1 - L/R) \end{pmatrix}$, 调节角度为 θ_{adj} , 目标转角为 θ_t 。

$$\theta_{adj} = k_1 v \quad (7)$$

选择如下的反馈控制律:

$$\begin{pmatrix} v_L \\ v_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (v_{max} - v_{L_turn})/k_2 + v_L \\ (-v_{max} - v_{R_turn})/k_2 + v_R \end{pmatrix}; v_L \leq v_{L_turn} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} v_L \\ v_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(v_{max} - v_{L_turn}) * (\theta_t - \theta - \theta_{adj})^2 + v_{L_turn}}{\theta_{adj}^2} \\ \frac{(-v_{max} - v_{R_turn}) * (\theta_t - \theta - \theta_{adj})^2 + v_{R_turn}}{\theta_{adj}^2} \end{pmatrix} \quad (\theta_t - \theta) \leq \theta_{adj} \quad (9)$$

根据上述反馈公式, 当 $\lim_{t \rightarrow t'} \theta = \theta_t$ 运动系统 v_L, v_R 将稳定在中心速度 v 。

在有限时间内, θ 将稳定在目标角度, 机器人将保持该角

度以最大速度直线运动。

3 仿真实验与结果分析

仿真实验中对机器人路径、电机速度变化, 车体速度变化以及对机器人路程和时间也作了对比。

取距离的单位为 mm, 角度的单位为 rad。这里介绍机器人以 2 000 mm/s 的速度在半径为 $R = 300$ mm, 目标角度分别为 $\pi/2$ 的曲线运动仿真结果、折线走法仿真结果以及两者对比结果。以起始点为坐标原点。设: 机器人运动时初始姿态为: $q(0) = (600, 500, 0)^T$, 终止姿态为: $q(t) = (3\ 000, 3\ 000, \pi/2)^T$, 机器人的最大线速度为 $v = 2\ 000$ mm/s。

当式 (7)、(8) 中的参数 $k_1 = 10, k_2 = 20$ 时, 可以得到较好的控制效果。

从图中 3、4 可以看到机器人启动时速度不能突变, 需要光滑启动; 停止时不能骤停, 需要一定调节才能保证停止位置准确。

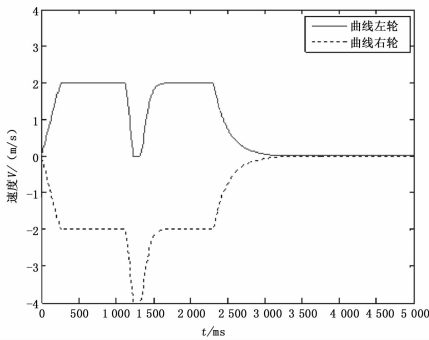


图 3 曲线运动各轮速度随时间变化关系图

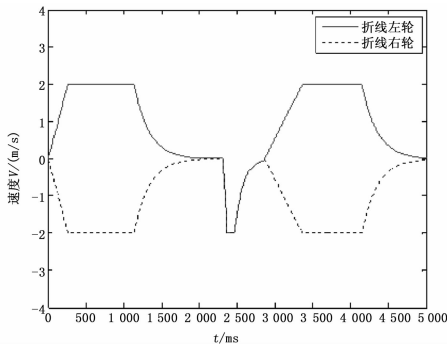


图 4 折线运动各轮速度随时间变化关系图

从图中 5~6 可以看到机器人折线运动之所以慢是因为多次加减速, 这个过程不仅使平均速度低, 行进里程比曲线还多, 而且减损电机和驱动寿命。

实验结果显示该控制算法能够使得机器人平稳地沿圆弧运动, 提高了平均速度缩短了机器人行进时间。这表明该算法完全可以应用于机器人绕障行进控制。

在实际行进过程中机器人曲线达到指定位置的平均速度为 1.6 m/s; 而折线的平均速度 0.9 m/s。实际运动过程中, 折线运动到达目的地需要 14 s 左右, 曲线运动需要 8~9 s。圆弧运动控制算法在自动机器人上调试效果良好, 机器人控制性能

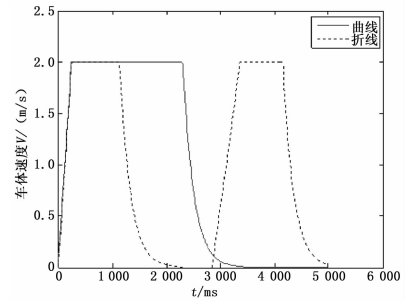


图 5 车体中心速度随时间变化关系图

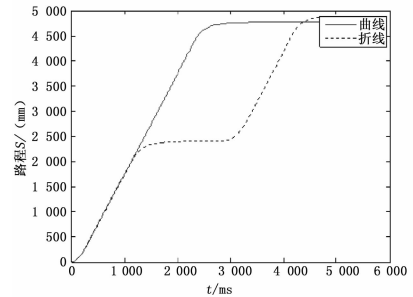


图 6 车体运动时路程和时间关系图

得到改善。并且该算法可以使自动机器人转过任意角度后直线前进。说明该算法具有通用性。

4 结论

本文设计并实现了一种圆弧曲线控制算法使机器人可以快速绕过单一障碍行进到指定目的地。与传统路径行进控制相比, 它使双轮差动机器人行进更加灵活。下一步将进一步研究双轮差动机器人连续越障的曲线控制。

参考文献:

- [1] Brockett R W. Asymptotic stability and feedback stabilization. In Differential Geometric Control Theory [M]. R. W. Brockett, R S Millman, and H J Sussmann, Eds. Boston, MA: Birkhuser, 1983.
- [2] Bloch A McClamroch, N H and Reyhanoglu, Controllability and Stability Properties of a Nonholonomic Control System [A]. In Proceedings of 29th IEEE Conference on Decision and Control [C]. 1990.
- [3] Gampion G, Bastin G, Andr ea Novel. B. d', Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots [A]. 9th In IEEE Transactions on Robotics and Automation [C]. 1996, 12: 47-61.
- [4] 季秀才, 郑志强, 柳林. 双轮差动机器人平台上任意参考点的轨迹跟踪控制 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [5] 孙世贤, 黄圳圭, 唐乾刚, 等. 理论力学教程 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007.
- [6] 邱秉权. 分析力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998.
- [7] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [8] 孙逢春, 张承宁. 装甲车辆混合动力电传动技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.