

基于激光传感器定位的非完整 AGV 导引控制

杨素珍

(漳州职业技术学院机械工程学院, 福建 漳州 363000)

[摘要] 针对非完整 AGV (automatic guided vehicle) 复杂非线性系统的高精度自由路径导引控制问题, 提出一种基于激光传感器定位的路径跟随控制方法。首先在 Serret-Frenet 框架下建立 AGV 路径跟随运动学误差模型; 然后基于 Lyapunov 直接法设计渐进稳定路径跟随控制器, 解决 AGV 非完整约束控制的困难。最后采用多点激光反馈三角测量方法, 实现 AGV 的精确实时定位。仿真结果表明, 该控制器能够快速消除路径跟随误差, AGV 系统运行平稳, 能够精确跟随规定路径。

[关键词] 自动导向车; 导引控制; 路径跟随; 定位; 激光传感器

[中图分类号] TP 24

Guidance Control of Nonholonomic AGV with Location Based on Laser Sensor

YANG Suzhen

(School of Mechanical Engineering, Zhangzhou Institute of Technology, zhangzhou 363000, China)

Abstract: A path following control method based on laser sensor location is proposed for the high precision free path guidance control of the nonholonomic AGV complex nonlinear system. Firstly, the AGV path following kinematic error model was established under the Serret - Frenet framework, and then the progressive stabilization path following controller was designed based on the direct Lyapunov method to solve control difficulties with AGV nonholonomic constraint. Furthermore, accurate real - time positioning of AGV was realized by multipoint laser feedback triangulation. The simulation results show that the AGV system runs smoothly and can follow the specified path accurately based on the proposed controller.

Keywords: AGV; guidance control; path following; location; laser sensor

0 引言

自动导向车 (automatic guided vehicle, AGV) 是现代化物流的重要设备, 主要用于各种环境下的物料储运, 因其具有安全、灵活、高效等优点, 日益得到广泛应用。AGV 是移动机器人的一个重要应用分支, 导引控制 AGV 以一定的精度沿着特定轨迹运行是 AGV 进行预规划路径导航的基础。为了实现有效的导引控制, 首先得解决 AGV 的定位方法和控制方法的问题。激光传感器定位^[1]是利用 3 个及以上激光反射板的位置信息, 实现 AGV 的自定位。与磁点定位^[2]、RFID 定位^[3]、视觉定位^[4]等方法相比, 激光传感器定位更为灵活, 抗干扰能力强, 且定位精度高, 方便进行路径规划和自由路

径导引,成为目前 AGV 系统较为普遍应用的定位方法之一。导引控制方法可采用轨迹跟踪^[5]和路径跟随^[6],相比之下,路径跟随不要求参考轨迹随时间变化,其前进速度可自由设定,从而方便行程统计,更适用于 AGV 系统的集中调度规划。非完整 AGV 是一个复杂的多输入多输出非线性系统,由于受到非完整约束,运动空间受限,其路径跟随控制器设计难度较大。本文将对非完整 AGV 的数学模型、激光定位方法、路径跟随控制器算法进行研究,并给出仿真实验情况。

1 AGV 运动学模型分析

研究对象 (2,0) 型^[7]非完整 AGV 的结构如图 1 所示,它由车体、两个独立驱动轮和万向轮组成,其中: xoy 为全局惯性坐标系 $\{U\}$; $x_c o_c y_c$ 为局部坐标系 $\{F\}$; θ 为 AGV 的导向角度; O_c 为 AGV 的质心; d_e 为 O_c 与 O_p 之间的距离; θ_r 为路径曲线 O_p 点的切线与 x 轴的夹角; v 和 w 分别为 AGV 的线速度和角速度; 两驱动轮间的距离为 $2b$; 轮子半径为 r 。

万向轮用来提高 AGV 的载质量能力,通过控制两驱动轮的不同转速可实现 AGV 各种运动形式。

定义 AGV 的位姿为 $q = [x_c \ y_c \ \theta]^T$, 右左轮的转速为 $\psi = [\dot{\phi}_r \ \dot{\phi}]^T$, 则其运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{q} = Su, \\ u = C\psi. \end{cases} \quad (1)$$

式中: S 为 WMR 的广义 Jacobian 矩阵; $u = [v \ w]^T$ 为速度输入矢量,各矩阵取为

$$S = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} r/2 & r/2 \\ r/(2b) & -r/(2b) \end{bmatrix}。$$

定义坐标系 $\{U\}$ 到坐标系 $\{F\}$ 的旋转矩阵为:

$${}^U_F R = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 0 \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

又因为

$$\theta_r = \text{atan}(\text{d}y_p/\text{d}x_p) = \text{atan}(y_p'^{-1}), \quad (3)$$

$$\vec{w}_p = \text{d}\theta_r/\text{d}t = \text{d}\theta_r/\text{d}\vartheta \dot{\vartheta} = (x_p'(\vartheta)y_p''(\vartheta) - y_p'(\vartheta)x_p''(\vartheta))\dot{\vartheta}/(x_p'^2(\vartheta) + y_p'^2(\vartheta)) = c(\vartheta)\dot{\vartheta}, \quad (4)$$

式中: ϑ 为路径起始点到 O_p 点的轨迹长度, O_p 与 O 重合时 $\vartheta = 0$; 有界且可微的 $c(\vartheta)$ 为路径 O_p 点的曲率。则在 Serret - Frenet 框架下有如下关系成立:

$$(\text{d}\vec{OO_c}/\text{d}t)_U = (\text{d}\vec{OO_p}/\text{d}t)_U + {}^U_F R^{-1}(\text{d}\vec{O_pO_c}/\text{d}t)_F + {}^U_F R^{-1}(\vec{w}_p \times \vec{O_pO_c})_F。 \quad (5)$$

其中:

$$[\vec{OO_c}] = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 0 \end{bmatrix}, [\vec{OO_p}] = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 0 \end{bmatrix}, [\vec{O_pO_c}] = \begin{bmatrix} 0 \\ d_e \\ 0 \end{bmatrix};$$

而

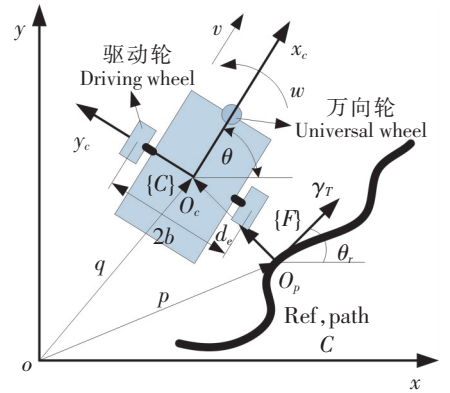


图 1 AGV 路径跟随原理图

Fig.1 Schematic diagram of AGV path following

$$\vec{w}_p \times \overrightarrow{OO_p} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c(\vartheta)\dot{\vartheta} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ d_e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\vartheta)d_e\dot{\vartheta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

定义 AGV 新的坐标状态集合为 $(\vartheta, d_e, \theta_e)$ ，结合式 (1)、式 (5) 和式 (6) 可得 AGV 的路径跟随运动学模型为^[8]：

$$\begin{cases} \dot{\vartheta} = v \cos \theta_e / (1 - c(\vartheta)d_e), \\ d_e = v \sin \theta_e, \\ \dot{\theta}_e = w - (v \cos \theta_e c(\vartheta)) / (1 - c(\vartheta)d_e). \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\theta_e = \theta - \theta_r$ 。式 (7) 表明非完整 AGV 系统为一个变量耦合的多输入多输出非线性系统。

2 AGV 激光传感器定位方法

AGV 使用的激光传感器通常也称为激光测距仪，其工作原理是测量发射光束与从物体表面漫反射光束的时间差，并结合激光的传播速度，计算出其与反射物体之间的距离。为了获得更好的反射效果，提高测量精度，反射物体通常采用专用的激光反射板。该反射板安装于 AGV 所处空间的已知位置，在 AGV 初始位置已知后，激光传感器内部的激光头进行周期性的固定角度旋转扫描，从而可获得 3 个或以上反射板的位置和角度信息，再应用三角测量法和统计方法获得自身的定位信息。和其他定位方法相比，该方法具有不易受环境影响，测量速度快，定位精度高的特点。

以仅 3 个反射板的激光定位三角测量法为例，其定位原理如图 2 所示。图中， $A(x_1, y_1)$ ， $B(x_2, y_2)$ 和 $C(x_3, y_3)$ 为 3 个激光反射板的已知安装位置， $\angle AO_cD = \theta_1$ ， $\angle DO_cB = \theta_2$ ， $\angle DO_cC = \theta_3$ 为当前时刻激光传感器扫描检测获得的反射板与 AGV 前进方向的夹角（顺时针为正值），则有如下方程成立：

$$\tan(\theta_i + \hat{\theta}) = (\hat{y}_c - y_i) / (\hat{x}_c - x_i), (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

基于非线性方程牛顿迭代法^[9]，便可求解得到 AGV 当前时刻的位姿 $\hat{q} = [\hat{x}_c \ \hat{y}_c \ \hat{\theta}]^T$ ，根据路径类型即可求得系统反馈误差量 $e = [d_e \ \theta_e]^T$ 。

AGV 常见的路径轨迹为直线和圆弧。对于直线轨迹 $ax + by + c = 0$ ，AGV 路径跟随误差值 d_{el} 和 θ_{el} 分别为

$$\begin{cases} d_{el} = \pm |a\hat{x}_c + b\hat{y}_c + c| / \sqrt{a^2 + b^2}; \\ \theta_{el} = \hat{\theta} - \theta_l. \end{cases} \quad (9)$$

式中：AGV 初始位置在直线上方时 d_{el} 取正，反之取负值； θ_l 为直线的倾斜角度。

对于圆轨迹 $(x_c - c_1)^2 + (y_c - c_2)^2 = R^2$ ，AGV 路径跟随误差值 d_{ec} 和 θ_{ec} 分别为

$$\begin{cases} d_{ec} = \sqrt{(\hat{x}_c - c_1)^2 + (\hat{y}_c - c_2)^2} - R; \\ \theta_{ec} = \hat{\theta} - \text{atan2}(y_c - c_2, x_c - c_1) + \pi/2. \end{cases} \quad (10)$$

3 激光导引控制器设计

为了实现 AGV 的精确导引控制，减小系统扰动的影响，控制器的设计是一个关键。本文 AGV 路径跟随控制器的设计目标是：给定 $x - y$ 平面的参考路径 C 和有界且时间可微的 AGV 移动速度 $v(t)$ ，

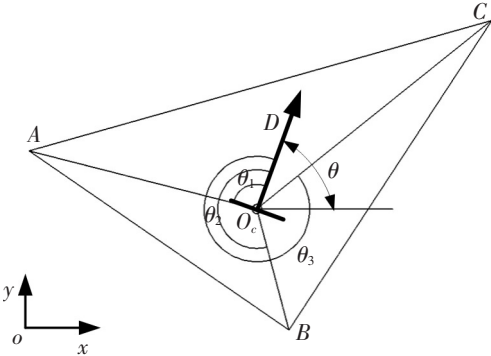


图 2 激光定位三角测量法示意图
Fig.2 Schematic diagram of triangulation measure method with laser positioning

设计 (光滑) 反馈控制律 $w = k(\vartheta, d_e, \theta_e, v(t))$, 使得: $\lim_{t \rightarrow \infty}(d_e(t)) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty}(\theta_e(t)) = 0$ 。

令 $\chi = \dot{\theta}_e$, 定义具有 C^1 光滑的正定 Lyapunov 函数为

$$V = \theta_e^2/2 + k_2 d_e^2/2。 \tag{11}$$

式中, k_2 为正的常数。对式 (11) 求导, 并将式 (7) 代入可得

$$\dot{V} = \theta_e \dot{\theta}_e + k_2 d_e \dot{d}_e = \theta_e \chi + k_2 d_e v \sin \theta_e \tag{12}$$

设计控制律为

$$\chi = w - v \cos \theta_e c(\vartheta)/(1 - c(\vartheta) d_e) = -k_1 v^2 \theta_e - (k_2 d_e v \sin \theta_e + k_3 d_e^2)/\theta_e。 \tag{13}$$

式中, k_1 和 k_3 为正的常数。将式 (13) 代入式 (12) 可得

$$\dot{V} = \theta_e (-k_1 v^2 \theta_e - (k_2 d_e v \sin \theta_e + k_3 d_e^2)/\theta_e) + k_2 d_e v \sin \theta_e = -k_1 v^2 \theta_e^2 - k_3 d_e^2 \leq 0。 \tag{14}$$

假设

$$\lim_{t \rightarrow \infty}(v(t)) \neq 0, \tag{15}$$

则由 $\dot{V} = 0$ 所确定的点集 R^* 中, 只有 $d_e = 0$ 且 $\theta_e = 0$, 因此系统的平衡点为 R^* 内的最大不变集, 根据 LaSalle 不变性原理有, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 存在吸引域 D_{de} 和 $D_{\theta e}$, 使得在其内的给定初始值 $d_{e0} \in D_{de}$, $\theta_{e0} \in D_{\theta e}$, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty}(d_e(t)) = 0, \lim_{t \rightarrow \infty}(\theta_e(t)) = 0$ 。可见, 本文设计的路径跟随控制器:

$$u = \begin{bmatrix} v \\ -k_1 v^2 \theta_e - (k_2 d_e v \sin \theta_e + k_3 d_e^2)/\theta_e + (v \cos \theta_e c(\vartheta))/(1 - c(\vartheta) d_e) \end{bmatrix}, \tag{16}$$

可以保证系统是渐近稳定的。

4 仿真实验分析

为了验证本文方法的有效性, 在 Matlab 环境下进行仿真实验。仿真时间为 10 s; 采样周期为 0.01 s; AGV 结构参数取: $r = 0.04$ m, $b = 0.2$ m; 路径跟随控制器取: $k_1 = 10, k_2 = 6, k_3 = 1$; AGV 的初始速度 $v = 1.414$ m/s, $w = 0$ rad/s; 直线轨迹参数为: $a = 1, b = -2, c = 0$; AGV 的初始位姿分别取为: $(1 \text{ m}, 2.1 \text{ m}, 2\pi/5), (1 \text{ m}, 0.5 \text{ m}, \pi/3)$ 。路径跟随情况如图 3~图 5 所示, 可见本文控制器可保证多个位姿下 AGV 的稳定导引控制。

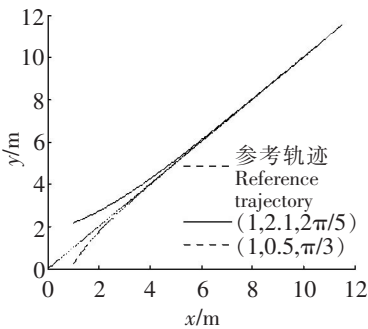


图 3 直线路径跟随

Fig.3 Path following of line

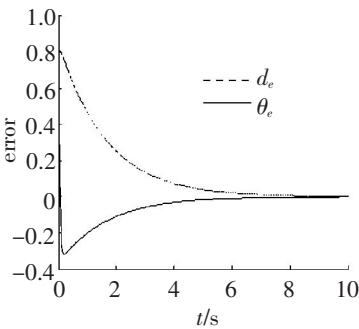


图 4 位姿 1 跟随误差

Fig.4 Following error of pose one

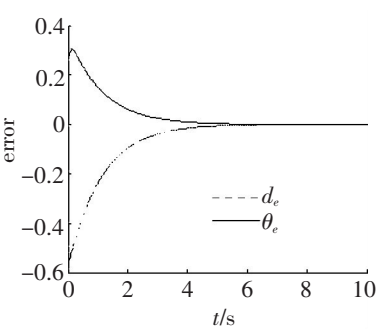


图 5 位姿 2 跟随误差

Fig.5 Following error of pose two

圆弧路径跟随实验, 圆弧轨迹参数为: $c_1 = 3, c_2 = 3, R = 2$; AGV 的初始位姿取为: $(3 \text{ m}, 5.2 \text{ m}, \pi/4)$ 。实验结果如图 6、图 7 所示, 系统距离误差到达稳态的时间为 1.89 s, 角度误差到达稳态的时间为 2.08 s。达到稳态后, 距离稳态误差均值绝对值为 1.9044×10^{-4} m, 角度稳态误差均值绝对值为 3.986×10^{-5} rad, 可见本文设计的控制器有较好地控制效果。圆弧跟踪的两轮速度输出如图 8 所示, 速度没有大跳变, 可见采用路径跟随的方式进行 AGV 导引控制有利于系统的平稳运行。

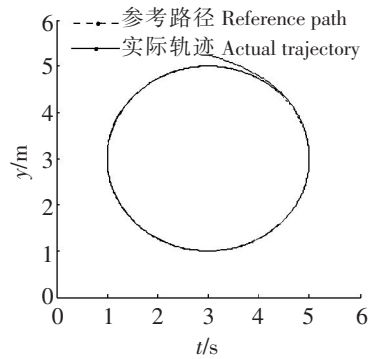


图 6 圆路径跟随
Fig.6 Path following of circle

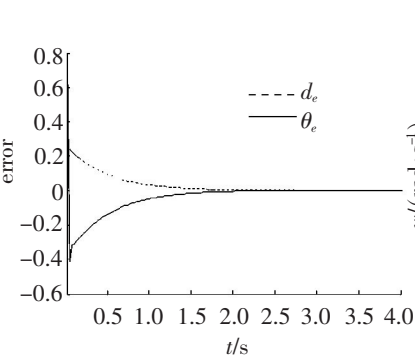


图 7 圆路径跟随误差
Fig.7 Error of circle following

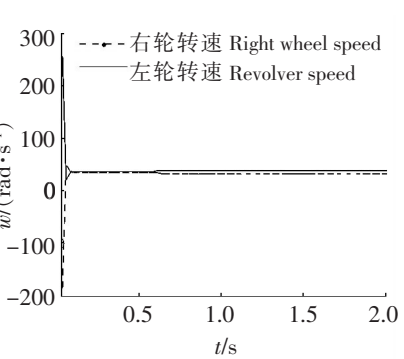


图 8 速度输出情况
Fig.8 Output of speed

5 结 论

本文从定位方法和控制器设计两个方面研究了非完整 AGV 的路径导引控制问题，建立了包含 AGV 参考点与参考路径之间距离误差和角度误差的路径跟随误差控制模型，分析激光传感器多点反馈定位原理，并给出直线和圆弧路径的误差计算模型。借助 Lyapunov 理论，获得渐进稳定且结构简单的路径跟随控制器。仿真试验表明，该控制器能够快速消除路径跟随误差，且误差值较小，下一步将进行实际 AGV 系统研究。

[参 考 文 献]

[1] TOSHIHIRO TSUMURA, HIROSHI OKUBO, NOBUO KOMATSU. A 3-D position and attitude measurement system using laser scanners and corner cubes [C] // Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System Yokohama. Japan: IEEE, 1993: 26-30.

[2] YUSONG PANG, ADRANA LOPEZ DELA CRUZ, GABRIEL LODEWIJKS. Bipolar magnetic positioning system for automated guided vehicles [C] //2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Eindhoven University of Technology. Eindhoven. Netherlands: IEEE, 2008: 4-6.

[3] SOONSHIN HAN, HYUNGSOO LIM, JANGMYUNG LEE. An efficient localization scheme for a differential-driving mobile robot based on RFID system [J]. IEEEtransact-tions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3362-3369.

[4] 刘进, 齐晓慧, 李永科. 基于机器视觉的 AGV 路径跟踪 [J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(8): 132-146.

[5] NGUYEN HUNG, JAE SUNG IM, SANG-KWUN JEONG, et al. Design of a sliding mode controller for an automatic guided vehicle and its implementation [J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2010, 8(1): 81-90.

[6] 武星, 楼佩煌. 基于运动预测的路径跟踪最优控制研究 [J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 565-569.

[7] CAMPION G, BASTIN G, D'ANDREA-NOVEL B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic modes of wheel mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robots and Automation, 1996, 12(1): 47-62.

[8] K D DO, J PAN. Robust path following of underactuated ships using Serret-Frenet frame [C] //Proceedings of the American Control Conference. Denver: IEEE, 2003: 2000-2005.

[9] 陈传森, 胡宏伶, 雷蕾, 等. 非线性方程组的 Newton 流线法 [J]. 计算数学, 2012, 34(3): 235-258.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)