

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811038



单目视觉定位实现机器人跟踪的实验系统和控制方法

程前, 聂卓赞, 方浩澄, 邵辉

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 提出一种基于视觉定位的多机器人跟踪控制方法. 首先, 采用单目视觉定位技术, 建立平面物理坐标与视觉图像坐标之间的映射关系. 然后, 结合轮式移动机器人的运动学模型, 基于 Lyapunov 方法设计轨迹跟踪控制器. 最后, 结合视觉定位确定机器人的平面坐标位置, 分阶段规划机器人运动轨迹, 实现多机器人跟踪控制. 仿真和实验结果表明: 该方法具有可行性和有效性.

关键词: 视觉定位; 轨迹跟踪控制; Lyapunov 法; 多机器人

中图分类号: TP 242

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2019)04-0542-07

Experimental System and Control Method for Robot Tracking by Monocular Vision Positioning

CHENG Qian, NIE Zhuoyun, FANG Haocheng, SHAO Hui

(School of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper proposes a tracking control method for multi-robot based on vision localization. Firstly, the mapping relationship between plane physical coordinates and visual image coordinates is established by using monocular vision localization technology. Then, combined with kinematics model of wheeled mobile robot, a trajectory tracking controller is designed based on Lyapunov method. Furthermore, combined with visual positioning to determine robot's plane coordinate position, and trajectory planning is carried out for stages, the tracking control for multi-robot was realized. Simulation and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the method.

Keywords: visual positioning; trajectory control tracking; Lyapunov method; multi-robot

随着机器人技术的发展,以机械臂、自动导引运输车(AGV)、无人机等为代表的机器人在工业领域的应用逐渐增多. 在实际应用中,从最初单机器人的简单重复动作,到多机器人集群协同完成复杂任务,机器人的智能化水平越来越高. 当前,多机器人的协同控制逐渐成为机器人研究领域的主要问题^[1]. 对于单个机器人的跟踪控制问题,学者们提出了模糊控制算法、反步法及滑模控制等多种方案. 文献[2]基于模糊控制算法和有定位精度限制的全球定位系统(GPS),对农作物自主巡检机器人进行路径规划、轨迹导航跟踪,虽然系统在仿真中有较好的抗干扰性,但由于模糊控制算法自身的控制特点,必将导致系统的控制精度降低和动态品质变差. 文献[3]对轮式移动机器人的运动学模型进行分析,利用里程计进行位置定位,基于反步法设计出机器人的目标跟踪控制,仿真效果良好. 然而,反步法的计算量较大,系

收稿日期: 2018-11-13

通信作者: 聂卓赞(1983-),副教授,博士,主要从事先进控制理论与应用、机器人与智能系统的研究. E-mail: yezhuo-un2004@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61403149); 华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013082038)

统设计过于复杂,且由于里程的误差累计,对机器人位姿角度的计算往往不准确.文献[4]针对移动机器人的轨迹跟踪控制问题,提出带有变结构控制的切换函数滑模轨迹跟踪控制方法,但此控制律的设计需要大量运算,过于复杂.对于多机器人的跟踪控制问题,常用的方法有领航跟随法、基于行为法和虚拟结构法等^[5].文献[6]将基于行为法和虚拟结构法相结合,使系统获得很强的鲁棒性能,但无法精确控制跟踪的速度,且机器人之间的通信量巨大,对通信设备的要求颇高.本文在常规实验条件下,对单目视觉定位实现机器人跟踪的实验系统和控制方法进行研究.

1 单目视觉定位

定位作为机器人跟踪控制的最基本的环节,其准确度很大程度上影响跟踪控制的效果.定位主要分为相对定位和绝对定位,区别在于机器人是否已知自身初始位置^[7-8].2004 年,Fiala^[9]提出将视觉定位技术应用于实时多移动机器人平台,同时,视觉里程计这个概念被提出,弥补了传统轮式里程计受环境因素影响的缺陷^[10].其他学者也对此进行了相关研究^[11-12].在常规实验条件下,文中采用单目视觉识别目标物上的颜色特征点,获取目标物的位置信息,从而实现多机器人的单目视觉相对定位.

首先,假设视觉目标对象所处的像平面坐标为 (u,v) ,由于摄像头安装位置与地面存在一定高度和俯仰角,如图 1 所示.因此,像平面中的坐标 (u,v) 并不是实际世界坐标系(WCS)中的坐标,需要进行坐标转换,才能得出世界坐标系中的坐标 (x,y) .

像平面坐标 (u,v) 转换为世界坐标系中的坐标 (x,y) 的公式^[13]为

$$x = \frac{uh}{(f\sin\theta_{EL} + v\cos\theta_{EL})}, \quad y = \frac{h(v\sin\theta_{EL} - f\cos\theta_{EL})}{(f\sin\theta_{EL} + v\cos\theta_{EL})}. \tag{1}$$

式(1)中: h 为摄像头中心到基平面的高度; f 为摄像头的焦距; θ_{EL} 为摄像头的俯仰角.

由光学成像基本原理可知:摄像头在固定角度和水平高度下,图像所能识别的地面区域近似为梯形,并可通过实验方式测得地面区域坐标位置.像平面图像与地面区域的映射关系,如图 2 所示.

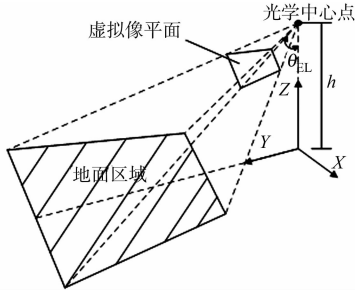


图 1 像平面坐标与世界坐标系关系图
Fig. 1 Diagram of relationship between plane coordinate and world coordinate system

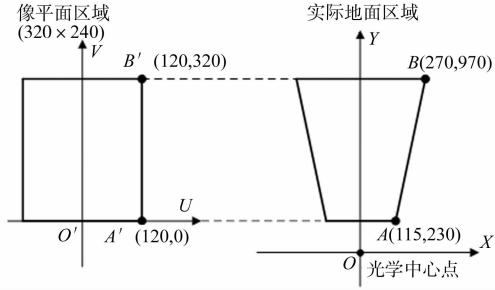


图 2 区域关系图(单位:mm)
Fig. 2 Regional relations diagram (unit: mm)

在轴对称条件下,测量定点坐标所在地面区域的位置数据,可得到映射计算公式.以某次实验为例(图 2),进行说明.通过测量,得出世界坐标系点 A 坐标为(115,230),点 B 坐标为(270,970).同时,在像平面坐标系下,点 A'坐标为(120,0),点 B'坐标为(120,320).得到梯形上、下底 2 个顶点在世界坐标系中的坐标后,结合两点的像平面坐标,代入式(1),反解出未知参数.若直接将点坐标代入式(1)计算 h,f,θ_{EL} ,则会显得十分复杂,故先将式(1)进行近似处理.即令 $a = \frac{f\sin\theta_{EL}}{h}, b = \frac{\cos\theta_{EL}}{h}, c = \sin\theta_{EL}, d = f\cos\theta_{EL}$ 并代入式(1),可得

$$x = \frac{u}{a + bv}, \quad y = \frac{cv - d}{a + bv}. \tag{2}$$

简化后的公式只需要计算出参数 $a \sim d$ 即可.将点 A,B,A',B'的坐标代入式(2),可得 $a = 1.043\ 5, b = -0.001\ 9, c = 0.597\ 2, d = -240.000\ 0$.由式(2)和计算出的参数值,可实现视觉定位.当目标对象出现在摄像头视野范围内,通过图像识别对象坐标 (u,v) ,利用式(2)计算出目标点在实际世界坐标系下的坐标 (x,y) ,确定目标点的相对位置.

2 轨迹跟踪控制

2.1 基于 Lyapunov 法的跟踪控制律

采用 Lyapunov 法设计结构简单、性能稳定的单个机器人的跟踪控制律. 考虑一类双轮驱动差动转向移动机器人,其运动学模型,如图 3 所示. 图 3 中: L 为两轮之间的距离; v_L, v_R 分别为左、右轮速度; (x, y, θ) 为车辆当前位姿; (x, y) 为小车的几何中心坐标,假定该模型质心与中心重合; θ 为智能车速度矢量方向与 X 轴的夹角. 智能车的运动状态由线速度 v 和角速度 ω 决定^[14],其运动学方程^[15]为

$$\dot{x} = v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta, \quad \dot{\theta} = \omega. \tag{3}$$

式(3)中: $v = (v_L + v_R)/2$; $\omega = (v_L - v_R)/L$.

移动机器人常采用虚拟机器人的方式实现跟踪控制. 智能车位姿误差示意图,如图 4 所示. 图 4 中:小车的当前位姿为 $\boldsymbol{p} = [x \ y \ \theta]^T$;参考位姿(虚拟机器人)即规划的轨迹向量为 $\boldsymbol{p}_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$,规定逆时针方向为正方向;小车的当前运动状态为 $\boldsymbol{q} = [v \ \omega]^T$;参考运动状态为 $\boldsymbol{q}_r = [v_r \ \omega_r]^T$.

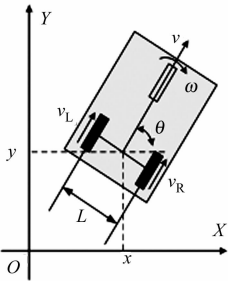


图 3 差动式智能车运动模型
Fig. 3 Differential intelligent vehicle motion model

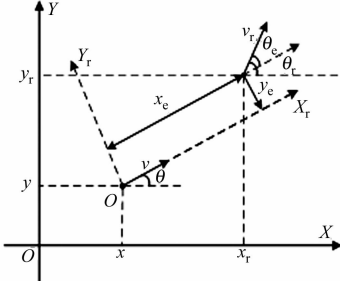


图 4 智能车位姿误差示意图
Fig. 4 Schematic diagram of intelligent parking information error

以 $X_r O Y_r$ 作为参考坐标系,其位姿误差 \boldsymbol{p}_e 为

$$\boldsymbol{p}_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}. \tag{4}$$

对位姿误差 \boldsymbol{p}_e 求微分^[16],结合式(4)可得

$$\dot{\boldsymbol{p}}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + \omega y_e - v \\ v_r \sin \theta_e - \omega x_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix}. \tag{5}$$

由式(5)可知:智能车的轨迹跟踪控制问题,即设计合适的输入控制量 $\boldsymbol{q} = [v \ \omega]^T$,使位姿误差 \boldsymbol{p}_e 有界且能够收敛于 0.

根据智能车的位姿误差 \boldsymbol{p}_e ,选取 V 函数作为 Lyapunov 函数,即

$$V = \frac{k_1}{2}(x_e^2 + y_e^2) + 2 \left(\sin \frac{\theta_e}{2} \right)^2 \geq 0. \tag{6}$$

式(6)中: $k_1 > 0$.

对 V 函数求微分,可得

$$\dot{V} = k_1 [x_e v_r \cos \theta_e - \omega x_e] + k_1 y_e v_r \sin \theta_e + (\omega_r - \omega) \sin \theta_e. \tag{7}$$

由式(7)可得控制律为

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos \theta_e + k_2 x_e \\ \omega_r + k_1 v_r y_e + k_3 \sin \theta_e \end{bmatrix}. \tag{8}$$

式(8)中:控制参数 k_1, k_2, k_3 皆大于 0.

为了证明该控制律的稳定性,将式(8)代入式(7),可得

$$\dot{V} = -k_1 k_2 x_e^2 - k_3 \sin^2 \theta_e \leq 0. \tag{9}$$

由式(6),(9)可知:选取的 Lyapunov 函数满足 Lyapunov 法的稳定性判据,该控制律是稳定的.

2.2 基于视觉定位的从车跟踪控制

2.2.1 跟踪控制系统设计思路 设计的基于 Lyapunov 法的跟踪控制律, 可对单个机器人实现良好的跟踪控制, 但对于多个机器人的跟踪控制, 考虑到基于行为法和虚拟结构法的设计过于复杂^[6], 且速度控制不够精确, 故采用领航跟随法, 以主车带动从车行进. 在此方法下, 多个机器人可以采用相同的参考轨迹进行跟踪控制, 理论上可做到协调和同步. 但由于每个机器人的动力学模型存在差异, 运行环境具有一定的不确定性, 很难保证多个机器人的同步控制. 基于领航跟随法的多移动机器人协调控制系统利用数种传感器对位置信息进行在线估计与校正, 可实现精确定位及同步控制^[17]. 然而, 这增加了系统的复杂程度, 并对系统的实时性要求颇高. 文中在以主车带动从车的领航跟随法下, 多机器人进行协调跟踪控制, 并利用单目视觉定位对从车的速度和轨迹进行修正的跟踪控制策略.

2.2.2 轨迹规划控制器 以主车实际位置为参考坐标, 通过主车摄像头确定从车的相对位置, 根据跟踪任务计算从车位置偏差, 分阶段生成从车的跟踪轨迹. 对于跟踪轨迹的生成, 使用设计的轨迹规划控制器实现. 结合图像传感器, 利用视觉定位技术识别从车的实际位置坐标 (x_1, y_1) , 并将其与期望坐标 (x_2, y_2) 发送给从车, 从车利用这 2 个坐标生成期望轨迹, 即两点的直线, 有

$$\theta_r = \int \omega_{r1} dt + \theta_{r0}, \quad x_r = \int v_{r1} \cos \theta_r dt, \quad y_r = \int v_{r1} \sin \theta_r dt. \tag{10}$$

式(10)中: (x_r, y_r, θ_r) 为参考位姿; $v_{r1} = v^*$, $\omega_{r1} = 0$ 分别为给定直线速度和转向速度; θ_{r0} 为直线轨迹方向, $\theta_{r0} = \arctan((y_2 - y_1)/(x_2 - x_1))$.

2.2.3 跟踪控制策略 基于视觉定位的跟踪控制策略, 如图 5 所示. 考虑从车在启动过程中, 可能处于任意初始位置, 故采用两段控制方式. 机器人运动示意图, 如图 6 所示.

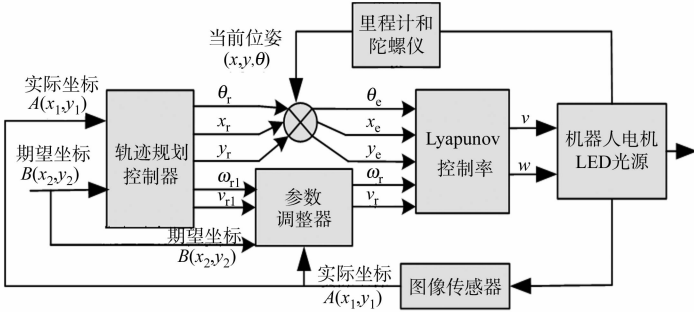


图 5 基于视觉定位的跟踪控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of tracking

control system based on vision location

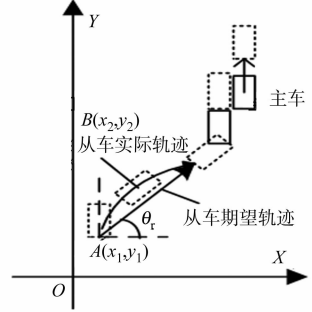


图 6 机器人运动示意图

Fig. 6 Robot motion sketch diagram

在第一阶段, 主车保持静止, 通过调整从车的位置和姿态, 使其到达期望的坐标位置上. 由于从车的运动目标是跟随主车的, 即需要其位姿角度与主车位姿角度差小于 $\pi/2$. 当存在特殊情况, 即从车的参考角度 θ_r 与实际角度 θ 的差值大于 $\pi/2$, 从车前进, 而主车不动, 则两车的距离变大. 通过视觉定位, 得知从车正远离主车, 主车则发送信号给从车, 从车遂旋转 $\pi/2$, 以此调整位姿.

利用设计的轨迹规划控制器, 生成位于期望坐标与实际坐标之间的直线轨迹. 在 Lyapunov 控制律下, 从车实现轨迹跟踪控制, 到达指定位置.

在第二阶段, 多机器人在共同的期望轨迹作用下, 进行独立的轨迹跟踪控制. 此时, 主车和从车都处于运动状态. 由于图像传感器在运动过程中存在振动现象, 图像数据处理具有一定的延时, 视觉定位与实际位置存在偏差, 难以用于实时反馈控制. 因此, 在这一阶段, 视觉传感器用于判别从车与期望目标点之间的距离, 并对从车的独立运动过程进行适时调整和修正, 以确保多机器人的协同. 此时, 在单目视觉中, 假设存在一个虚拟机器人处于对主车的理想跟踪状态, 即期望状态, 协同控制目标要求从车机器人与虚拟机器人的距离保持在阈值 S 范围内.

假设虚拟机器人目标点坐标即期望坐标为 (x_2, y_2) , 从车视觉定位坐标即实际坐标为 (x_1, y_1) ; 设定坐标误差 E_x 与 E_y , 目标点与从车之间的距离阈值为 S , 则 $E_x = x_2 - x_1$, $E_y = y_2 - y_1$, 而 $S^2 = E_x^2 + E_y^2$. 由此计算位置误差, 且按照参数设定判据(表 1), 对相关控制律的参数进行调节. 表 1 中: v_{\pm} 为主

车速度. 如果 $\|(x_1, y_1) - (x_2, y_2)\|_2 > S$, 则对式(10)中的 ω_{r1} 和 v_{r1} 进行调节, 从而对基于 Lyapunov 法的跟踪控制律的控制参数 v_r 和 ω_r 进行设定, 进而控制机器人的运动状态, 使跟踪误差位于允许的范围, 即 $\|(x_1, y_1) - (x_2, y_2)\|_2 \leq S$, 达到视觉修正的目的.

表 1 参数设定依据

Tab. 1 Parameter setting basis

mm

$E_Y = y_2 - y_1$	$E_X = x_2 - x_1$		
	$E_X > 0$	$E_X = 0$	$E_X < 0$
$E_Y > 0$	$\theta_r = \arctan(E_Y/E_X), v_r > v_{\pm}$	$\theta_r = \pi/2, v_r > v_{\pm}$	$\theta_r = \pi - \arctan(-E_Y/E_X), v_r > v_{\pm}$
$E_Y = 0$	$\theta_r = \arctan(E_Y/E_X), v_r = v_{\pm}$	$\theta_r = \pi/2, v_r = v_{\pm}$	$\theta_r = \pi - \arctan(-E_Y/E_X), v_r = v_{\pm}$
$E_Y < 0$	$v_r = 0$	$v_r = 0$	$v_r = 0$

3 仿真实验与结果分析

3.1 系统平台

根据实际条件, 选用三轮智能机器人作为控制对象, 搭建多智能机器人系统平台. 系统平台由主机机器人和从机器人组成, 如图 7 所示.

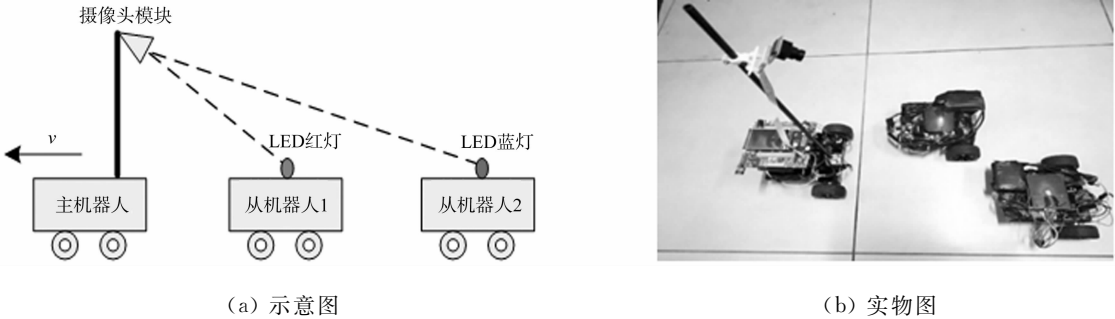


图 7 多机器人系统平台

Fig. 7 Multi-robot system platform

3.2 仿真分析

采用根据基于 Lyapunov 法设计控制律(式(8)), 在 MATLAB 上进行小车轨迹跟踪控制仿真, 验证该控制律的准确性. 首先, 假设机器人初始位姿为 $[0, 0, 0]^T$, 其所要追踪的轨迹初始位姿为 $[0, 0, \frac{\pi}{2}]^T$, 控制器参数设定为 $k_1 = 20.0, k_2 = 0.5, k_3 = 1.5$. 由图 8 可知: 机器人能够迅速地跟踪期望轨迹, 位姿误差在 6 s 内迅速收敛于 0, 收敛过程稳定, 可达到理想的控制效果.

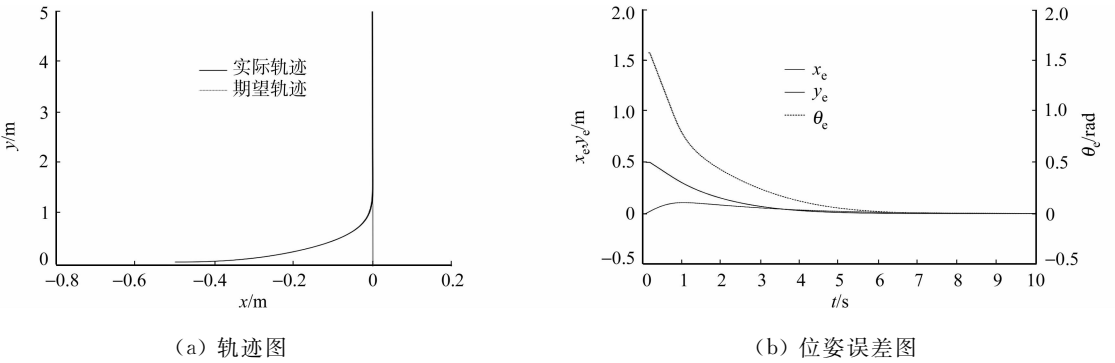


图 8 轨迹跟踪控制仿真曲线

Fig. 8 Simulation curve of trajectory tracking control

为了更加立体地对控制律的性能进行分析, 采用滑模控制律^[4]在同一初始条件下进行 MATLAB 仿真, 且 v_r 都设为 0.2. 滑模控制轨迹跟踪控制仿真曲线, 如图 9 所示. 切换函数 s 与控制律 q 分别为

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \theta_e + \arctg(v_r y_e) \end{bmatrix}, \tag{11}$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e + k_1 \frac{s_1}{|s_1| + \sigma_1} \\ \omega_r + \frac{\partial m}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial m}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e) + k_2 \frac{s_2}{|s_2| + \sigma_2} \\ 1 + \frac{\partial m}{\partial y_e} x_e \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\partial a / \partial v_r = y_e / (1 + (v_r y_e)^2), \quad \partial a / \partial y_e = v_r / (1 + (v_r y_e)^2). \quad (13)$$

式(12), (13)中: σ_1, σ_2 为正小数; $m = \arctg(v_r y_e)$.

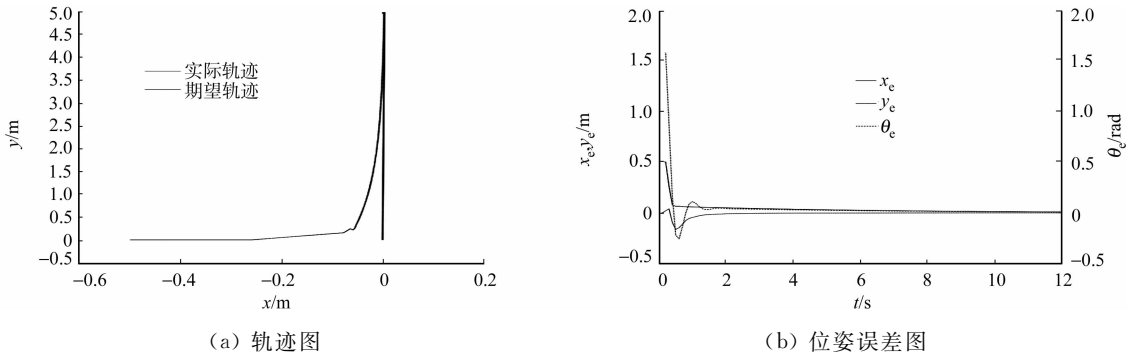
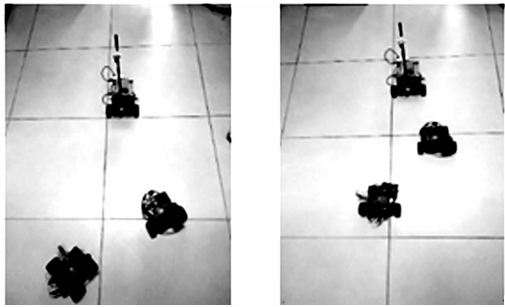


图 9 滑模控制轨迹跟踪控制仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of sliding mode control trajectory tracking control

由图 9 可知: 虽然从车可以很快地靠近期望轨迹, 但真正收敛到期望轨迹是在 $y = 2 \text{ m}$ 之后, 且运动过程中也依然伴随着一些抖振, 这对小车而言有些许危害. 而对于所设计的控制律, 小车运动则很平缓, 也有较好的收敛效果, 方法简便、有效.

将上述策略应用于移动机器人实验平台. 设一从车的期望位置为 $(0, 400)$, 另一从车的期望位置为 $(200, 750)$, 形成一个普通三角形队形. 实验过程示意图, 如图 10 所示. 图 10(a) 为三车的起始状态, 进入控制第一阶段, 即机器人就位阶段. 此时, 主车保持静止, 从车在非期望位置的任意位置. 图 10(b) 为控制第二阶段, 即机器人跟踪行驶阶段. 对其中一辆从车的实验情况进行分析. 视觉定位下的从车跟踪主车的动态过程, 如图 11 所示. 图 11 中: s 为相对于坐标轴的距离.



(a) 起始状态 (b) 机器人跟踪行驶阶段

图 10 轨迹跟踪行驶实验示意图

Fig. 10 Experimental diagram of track tracking running

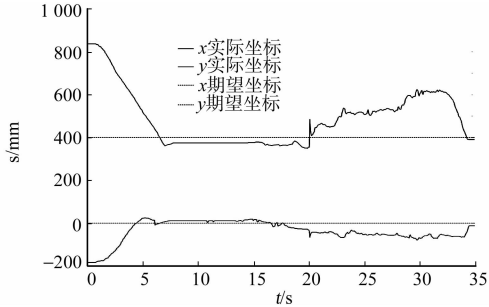


图 11 从车运动过程坐标变化曲线

Fig. 11 Coordinate change curve of slave vehicle motion process

直线编队要求从车与主车保持一条直线, 并设定从车就位期望坐标为 $(0, 400)$, 主、从车间距为 400 mm , 允许的最大误差为 250 mm . 由图 11 可知以下 3 点结论.

1) 在 $t = 0 \text{ s}$ 时, 开始第一阶段. 从车所处初始位置坐标为 $(-183, 837)$, 主车保持静止, 在得到期望坐标后, 从车开始运动, 并且迅速响应进行轨迹跟踪, 在 7.5 s 左右, 到达距期望坐标 15 mm 附近. 在此阶段, 从车响应迅速且跟踪精度较高.

2) 在 $t = 15 \text{ s}$ 时, 进入第二阶段. 主车开始直线运动, 从车坐标发生变化, 控制器不断生成期望轨迹, 从车跟随轨迹运动, 保持所设定的间距同时运动. 当主车开始运动后, 从车 Y 轴坐标增大, 即从车与主车之间的距离增大, 此时, 从这段误差的产生到控制器响应, 再到驱动电机运转之间存在一定的滞后

时间,且由于摄像头视觉检测到的光源位置本身存在误差,从车会落后于期望位置运动.当两车间距接近允许的最大误差 250 mm 时,利用表 1 所设定的判据,对从车的线速度 v_{r1} 和角速度 ω_{r1} 进行调节.

3) 在 $t=31.5\text{ s}$ 时,主车停止运动, v_{r1} 和 ω_{r1} 得到调节,使从车迅速靠近主车,保持间距 400 mm.

4 结 束 语

采用单目视觉定位技术,实现多机器人的相对定位,克服传统里程计、GPS 等方法误差大的缺陷;设计基于 Lyapunov 方法的跟踪控制器,解决了诸如反步法、滑模控制等方法的收敛振荡、实施困难等局限;提出在领航跟随法下,对从车的行车状态进行实时修正的跟踪策略.提出的基于视觉定位的多机器人跟踪方法是行之有效的,为多机器人的跟踪控制提供了一种简便、实用的方法.

参 考 文 献:

[1] 高振宇,郭戈.多自主水面航行器协同编队控制研究现状与进展[J].信息与控制,2018,47(5):513-525. DOI:10.13976/j.cnki.xk.2018.7381.

[2] BENGOCHEA-GUEVARA J M, CONESA-MUÑOZ J, ANDÚJAR D, *et al.* Merge fuzzy visual servoing and GPS-based planning to obtain a proper navigation behavior for a small crop-inspection robot[J]. Sensors, 2016, 16(3):276 (1-23). DOI:10.3390/s16030276.

[3] 李胜,马国梁,胡维礼.基于 Backstepping 方法的车式移动机器人轨迹追踪控制[J].东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(2):248-252.

[4] 叶涛,侯增广,谭民,等.移动机器人的滑模轨迹跟踪控制[J].高技术通讯,2004,14(1):71-74. DOI:10.3321/j.issn:1002-0470.2004.01.015.

[5] 王祥科,李迅,郑志强.多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J].控制与决策,2013(11):1601-1613.

[6] REN Wei, BEARD R W. A decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach [C]// American Control Conference, Denver: IEEE Press, 2003:1746-1751. DOI:10.1109/ACC.2003.1239847.

[7] 王志,朱世强,李月华,等.基于视觉里程计和自然信标融合的移动机器人定位算法[J].农业工程学报,2017,33(10):70-77. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.009.

[8] CHEN Jiaju, DIXON W E, DAWSON M, *et al.* Homography-based visual servo tracking control of a wheeled mobile robot[J]. Robotics, 2006, 22(2):406-415. DOI:10.1109/IROS.2003.1248907.

[9] FIALA M. Vision guided control of multiple robots[C]// Proceedings of Computer and Robot Vision, Ontario: IEEE Press, 2004:241-246. DOI:10.1109/CCCRV.2004.1301450.

[10] 丁文东,徐德,刘希龙,等.移动机器人视觉里程计综述[J].自动化学报,2018,44(3):385-400. DOI:10.16383/j.aas.2018.c170107.

[11] HAN Y, HAHN H. Visual tracking of a moving target using active contour based SSD algorithm[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2005, 53(3):265-281. DOI:10.1016/j.robot.2005.09.005.

[12] 杨芳,王朝立.不确定非完整移动机器人的轨迹跟踪控制[J].控制工程,2012,19(2):258-261. DOI:10.3969/j.issn.1671-7848.2012.02.019.

[13] 李庆,郑力新,潘书万,等.使用单目视觉的移动机器人导航方法[J].计算机工程与应用,2017,53(4):223-227. DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.1607-0157.

[14] 尉成果,赖欢,王太江.轮式移动机器人轨迹跟踪控制算法的研究[J].机电工程,2012,29(6):730-736. DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2012.06.027.

[15] 鄢立夏,马保离.轮式移动机器人的位置量测输出反馈轨迹跟踪控制[J].控制理论与应用,2016,33(6):763-771. DOI:10.7641/CTA.2016.50348.

[16] KANAYAMA Y, KIMURA Y, MIYAZAKI F, *et al.* A stable tracking control method for an autonomous mobile robot[C]// Conference on Robotics and Automation, Cincinnati: IEEE Press, 1991:384-389. DOI:10.1109/ROBOT.1990.126006.

[17] LIANG Xinwu, LIU Yun, WANG Hesheng, *et al.* Leader-following formation tracking control of mobile robots without direct position measurements[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 61(12):4131-4137.