

非完整移动机器人领航-跟随编队分布式控制^{*}

易 国^{1,2}, 毛建旭^{1,2}, 王耀南^{1,2}, 郭斯羽^{1,2}, 缪志强³

(1. 机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室 长沙 410082; 2. 湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082; 3. 香港中文大学机械与自动化工程学系 香港 999077)

摘 要:针对非完整移动机器人运动学模型的特点,并且考虑机器人之间的交互关系是局部的,提出了一种基于领航-跟随的非完整多移动机器人分布式编队控制方法。首先提出了一种分布式估计策略,为每个跟随机器人估计(虚拟)领航机器人的位置、方向、线速度等状态;接着利用每个跟随机器人的跟踪误差设计了编队控制算法;使用 Lyapunov 工具对算法进行了渐近稳定性和收敛性分析;最后,构建了多移动机器人视觉定位与控制实验平台,通过仿真和实验验证了所提算法的有效性。

关键词:非完整移动机器人;编队控制;领航-跟随;分布式控制

中图分类号: TP242.6 TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Distributed control for leader-follower formation tracking of multiple nonholonomic vehicles

Yi Guo^{1,2}, Mao Jianxu^{1,2}, Wang Yaonan^{1,2}, Guo Siyu^{1,2}, Miao Zhiqiang³

(1. National Engineering Laboratory for Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Department of Mechanical and Automation Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of the kinematic model of nonholonomic vehicle, considering that the interaction relationships among the vehicles are local, a distributed formation control algorithm for nonholonomic vehicles based on leader-follower is proposed in this paper. Firstly, a distributed estimation strategy is proposed, which estimates the states, including the position, orientation, and linear velocity of the (virtual) leader for each follower vehicle. Then, a formation control algorithm is designed based on the tracking error of each follower vehicle. An asymptotic stability and convergence analyses of the algorithm are performed using Lyapunov tools. Finally, the visual positioning and control experiment platform of multiple vehicles was constructed; and simulation and experiment results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: nonholonomic vehicle; formation control; leader-follower; distributed control

0 引言

近些年来,多移动机器人协调问题越来越受到人们的关注。与单机器人相比,多移动机器人系统拥有时间、空间、功能、信息和资源上的分布特性,从而在任务适用性、鲁棒性和可扩展性等方面表现出极大的优越性。多机器人编队控制是一个典型的多机器人协调问题,已经成为机器人学的研究热点^[1-4]。编队控制的目标在于通

过调整个体的行为,使一组机器人保持位置,实现特定几何形状。多机器人编队具有广泛的应用前景,如合作运输、侦察、搜索等。

从具体技术实现上来划分,目前多机器人编队方法主要包括基于行为的方法^[5-6]、基于图论的方法^[7-8]、虚拟结构法^[9-11]和领航-跟随法^[12-17]。每种编队方法都有各自的优缺点,根据工作环境的差异以及不同的任务需求,每种方法都进行了大量的研究。本文感兴趣的是多移动机器人基于领航-跟随的编队控制。

文献[12]基于控制 Lyapunov 法设计了一种新颖的用于多机器人编队控制与协作避碰的控制器函数,并将控制器应用到多个微小型移动机器人的编队控制中;文献[13-14]提出了多移动机器人领航-跟随编队的混合控制结构;文献[15]针对车式移动机器人的运动学模型特点,提出一种基于轨迹跟踪多机器人编队控制方法;文献[16]提出一种基于光滑非线性饱和函数的自适应模糊滑模轨迹跟踪控制算法;文献[17]研究了在机器人的控制输入受约束情况下的非完整移动机器人领航-跟随编队控制问题。在领航-跟随编队控制策略设计中,通常假设所有的跟随机器人知道领航机器人的全部状态。然而,当领航机器人和跟随机器人之间的交互是局部的,只有跟随机器人的子集能够访问领航机器人的信息。文献[18]考虑了交互是局部的情况,研究了受速度约束的非完整移动机器人领航-跟随编队控制问题。

与文献[18]类似,本文以非完整移动机器人为对象,在交互是局部的情况下,解决非完整移动机器人的编队控制问题。本文的主要贡献如下:1) 在领航-跟随机器人之间的通信拓扑结构和领航机器人的速度满足一定假设条件下,提出了分布式估计算法,为每个跟随机器人估计领航机器人的位置、方向和线速度等状态信息;2) 基于跟随机器人的跟踪误差设计了控制算法,利用 Lyapunov 工具分析了系统的稳定性和收敛性。

1 预备知识

1.1 符号定义

符号定义: $\mathbb{R}$ 和 $\mathbb{R}^+$ 分别表示实数集和非负实数集, $\mathbb{R}^n$ 表示 n 维实数空间, $\mathbf{I}_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为 n 维单位矩阵, $\otimes$ 表示 kronecker 积;对于可积函数 $f(t)$, 如果 $\int_0^\infty |f(s)| ds < \infty$, 则 $f(t)$ 属于 L_1 空间。

1.2 代数图论

对于领航-跟随的情形,跟随机器人之间的通信拓扑结构可以用一个有向图 $G = \{V, E, A\}$ 表示,有向图 G 由节点集合 $V = \{1, 2, \dots, n\}$, 边集合 $E \subseteq V \times V$, 邻接矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 组成。有向边 (j, i) 表示节点 i 可以访问节点 j 的状态。邻接矩阵 $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 中的元素定义为如果 $(j, i) \in E$, 则 $a_{ij} > 0$; 否则 $a_{ij} = 0$ 。假设对所有 i 有 $a_{ii} = 0$ 。如果邻接矩阵 A 对称(对所有 $i, j \in V$ 有 $a_{ij} = a_{ji}$), 则图 G 是无向的。与邻接矩阵 A 相关联的 Laplacian 矩阵 L 定义为:

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij}, & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

除了跟随机器人 $1 \sim n$, 多机器人系统中还包含一

个(虚拟)领航机器人,记为机器人 0 。领航机器人与跟随机器人之间的交互关系通过权值 a_{i0} 表示: $a_{i0} > 0$ 表示领航机器人与跟随机器人 i 相邻, 否则 $a_{i0} = 0$ 。令 $\mathbf{a} = [a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}]^T$, 定义矩阵 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为:

$$\mathbf{H} = \mathbf{L} + \text{diag}(\mathbf{a}) \quad (2)$$

根据文献[19]的研究,对于矩阵 $\mathbf{H}$, 有如下结论。

引理 1 矩阵 $\mathbf{H}$ 对称正定, 当且仅当无向图 G 连通, 且领航机器人至少与一个跟随机器人相邻(至少存在一个 $a_{i0} > 0$)。

1.3 问题描述

考虑一个由 n 个非完整移动机器人组成的多机器人系统, 机器人在笛卡尔空间的运动学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i = \omega_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_i, y_i, θ_i 表示机器人 i 的位置和方向, v_i, ω_i 分别为机器人 i 的线速度和角速度。由于轮式移动机器人无法发生侧向移动, 在其横轴上没有运动分量, 由式(3)可以看出机器人受到式(4)描述的约束, 是一种非完整约束。

$$\dot{x}_i \sin \theta_i = \dot{y}_i \cos \theta_i \quad (4)$$

在多机器人系统中, 假设存在一个虚拟领航机器人作为跟随机器人的运动提供参考信号, 领航机器人参考信号的表达式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_r = v_r \cos \theta_r \\ \dot{y}_r = v_r \sin \theta_r \\ \dot{\theta}_r = \omega_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_r, y_r, θ_r 表示领航机器人的位置和方向, v_r, ω_r 分别为领航机器人的线速度和角速度。

在非完整移动机器人的轨迹跟踪^[20]控制中, 常常假设领航机器人(参考信号)的线速度持续激励。本文同样基于此假设来实现编队跟踪误差的渐近收敛, 即 v_r, ω_r 满足以下条件。

假设 1 信号 $v_r, \omega_r, \dot{v}_r$ 存在且有界, 另外信号 $v_r(t)$ 持续激励, 即存在 $T, \mu > 0$ 使得对 $\forall t \geq 0$, 有:

$$\int_t^{t+T} |v_r(s)| ds \geq \mu \quad (6)$$

为表明方法的分布式性质, 每个机器人只能访问自身的状态信息和与之相邻的机器人的状态信息。本文使用无向图 $G = (V, E, A)$ 描述 n 个跟随机器人之间的通信拓扑结构。对应于图 G , 用 $\mathbf{a} = [a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0}]^T$ 表示领航机器人和跟随机器人之间的交互关系的权值。考虑如下假设。

假设 2 无向图 G 连通, 并且至少存在一个 $a_{i0} > 0$ 。

编队控制的目标在于调整各个体的行为使系统实现特定几何图形, 也即驱动移动机器人, 使它们的相对位置和方向满足期望的拓扑和物理约束。本文中, 多机器人

系统的期望队形由机器人 i 与领航机器人之间的相对位置 $\Delta_i = [\Delta_{ix}, \Delta_{iy}]^T \in \mathbb{R}^2$ 来描述。另外,跟随机器人与领航机器人的方向需要保持一致。因此,本文的任务是为每个机器人设计分布式控制律 v_i, ω_i ,使下列表达式成立:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x_i(t) - x_r(t))(t) = \Delta_{ix} \quad (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y_i(t) - y_r(t))(t) = \Delta_{iy} \quad (8)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_i(t) - \theta_r(t))(t) = 0 \quad (9)$$

2 领航机器人状态分布式估计

在领航-跟随编队控制策略设计中,通常假设所有的跟随机器人都知道领航机器人的信息。然而,当领航机器人和跟随机器人之间的通信是局部的,也即只有跟随机器人的一个子集能够访问领航机器人的信息时,该假设条件不能满足。本节提出了分布式估计策略,仅使用局部信息来估计领航机器人的位置,方向和线速度等状态。

将需要对领航机器人估计的状态变量表示为:

$$\xi_r = [x_r, y_r, \theta_r, v_r]^T \quad (10)$$

用 $\xi_{ir} = [x_{ir}, y_{ir}, \theta_{ir}, v_{ir}]^T$ 表示跟随机器人 i 对 ξ_r 的估计值。为体现估计算法的分布式,估计律须遵循通信拓扑,只使用与之相邻的机器人的信息。

定义机器人 i 与其相邻的所有机器人的位置,方向和线速度的估计误差为:

$$e_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}(\xi_{ir} - \xi_{jr}) + a_{i0}(\xi_{ir} - \xi_r) \quad (11)$$

利用误差 e_i ,在假设条件 1 下,考虑如下估计律:

$$\dot{\xi}_{ir} = \frac{1}{\lambda_i}(-\Gamma_i e_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} \dot{\xi}_{jr} + a_{i0} \dot{\xi}_r) \quad (12)$$

式中: $\lambda_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} + a_{i0}$, $\Gamma_i \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 为对称正定矩阵。

对 ξ_{ir} 考虑分布式估计律(12),有以下结果:

定理 1 考虑估计律(12),如果假设 2 成立,则 ξ_{ir} 指数收敛于 ξ_r 。

对 e_i 关于时间变量求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{e}_i &= \sum_{j=1}^n a_{ij}(\dot{\xi}_{ir} - \dot{\xi}_{jr}) + a_{i0}(\dot{\xi}_{ir} - \dot{\xi}_r) = \\ \lambda_i \dot{\xi}_{ir} - \sum_{j=1}^n a_{ij} \dot{\xi}_{jr} - a_{i0} \dot{\xi}_r &= -\Gamma_i e_i \end{aligned} \quad (13)$$

由于 Γ_i 对称正定,可得指数收敛于 0。令 $\tilde{\xi}_i = \xi_{ir} - \xi_r$, $e = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_n^T]^T$, $\tilde{\xi} = [\tilde{\xi}_1^T, \tilde{\xi}_2^T, \dots, \tilde{\xi}_n^T]^T$,则式(11)可以改写为:

$$e = (H \otimes I_4) \tilde{\xi} \quad (14)$$

式中:矩阵 $H \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 定义为 $H = L + \text{diag}(a)$ 。在假设 2 条件下,应用引理 1,可知矩阵 H 对称正定,因此 e 指数收敛于 0,可以推出 $\tilde{\xi}$ 指数收敛于 0。定理 1 得证。

3 基于估计器的编队控制

本节提出了使用领航者估计状态的编队控制律,以实现编队控制目标式(7)~(9)。

利用跟随机器人对领航机器人的估计状态,按移动机器人跟踪控制研究中的通常做法,定义每个跟随机器人的跟踪误差为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_i \\ \tilde{\theta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_{ir} - \Delta_{ix} \\ y_i - y_{ir} - \Delta_{iy} \\ \theta_i - \theta_{ir} \end{bmatrix} \quad (15)$$

对式(15)求导,跟踪误差的动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i = +\omega_i \tilde{y}_i + v_i - v_{ir} \cos \tilde{\theta}_i + \eta_{ix} \\ \dot{\tilde{y}}_i = -\omega_i \tilde{x}_i + v_{ir} \sin \tilde{\theta}_i + \eta_{iy} \\ \dot{\tilde{\theta}}_i = \omega_i - \dot{\theta}_{ir} \end{cases} \quad (16)$$

其中 η_{ix} 和 η_{iy} 的定义为:

$$\begin{cases} \eta_{ix} = (v_{ir} \cos \theta_{ir} - \dot{x}_{ir}) \cos \theta_i + (v_{ir} \sin \theta_{ir} - \dot{y}_{ir}) \sin \theta_i \\ \eta_{iy} = -(v_{ir} \cos \theta_{ir} - \dot{x}_{ir}) \sin \theta_i + (v_{ir} \sin \theta_{ir} - \dot{y}_{ir}) \cos \theta_i \end{cases} \quad (17)$$

对每个机器人考虑如下控制律:

$$\begin{cases} v_i = v_{ir} \cos \tilde{\theta}_i - k_1 \tilde{x}_i \\ \omega_i = -k_2 \tilde{\theta}_i + \dot{\theta}_{ir} - k_3 \frac{\sin \tilde{\theta}_i}{\tilde{\theta}_i} v_{ir} \tilde{y}_i \end{cases} \quad (18)$$

式中:控制增益 k_1, k_2, k_3 为正,将式(18)代入式(16),可得闭环系统:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i = -k_1 \tilde{x}_i + \omega_i \tilde{y}_i + \eta_{ix} \\ \dot{\tilde{y}}_i = -\omega_i \tilde{x}_i + v_{ir} \sin \tilde{\theta}_i + \eta_{iy} \\ \dot{\tilde{\theta}}_i = -k_2 \tilde{\theta}_i - k_3 \frac{\sin \tilde{\theta}_i}{\tilde{\theta}_i} v_{ir} \tilde{y}_i \end{cases} \quad (19)$$

由于 ξ_{ir} 指数收敛于 ξ_r ,容易验证 η_{ix} 和 η_{iy} 指数收敛于 0。在对闭环系统(19)进行稳定性分析之前,首先给出一个引理。

引理 2 设 $V: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ 连续可微, $W: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ 满足一致连续,对任意 $t \geq 0$ 有:

$$\dot{V}(t) \leq -W(t) + f(t) \sqrt{V(t)} \quad (20)$$

式中: $f(t)$ 在 L_1 空间取非负值,则可以推出 $V(t)$ 有界并且当 $t \rightarrow \infty$ 时 $W(t) \rightarrow 0$ 。

首先,证明 $V(t)$ 有界。根据式(20),有:

$$\dot{V}(t) \leq f(t) \sqrt{V(t)} \quad (21)$$

这表明以下不等式成立:

$$\frac{d(\sqrt{V(t)})}{dt} \leq \frac{f(t)}{2} \quad (22)$$

对不等式两端从 0 ~ t 取积分,可得:

$$\sqrt{V(t)} \leq \left(\sqrt{V(0)} + \int_0^t \frac{f(s)}{2} ds \right) \quad (23)$$

因为 $f(t)$ 属于 L_1 空间,所以 $V(t)$ 是有界的。因此对任意 $\sigma > 0$, 存在一个正的 γ , 使得:

$$\sqrt{V(t)} \leq \gamma, \forall \sqrt{V(0)} \leq \sigma \quad (24)$$

根据式(20)以及 $\forall \sqrt{V(0)} \leq \sigma$, 可得:

$$\dot{V}(t) \leq -W(t) + \gamma f(t) \quad (25)$$

对不等式两端从 $0 \sim t$ 取积分, 可得:

$$V(t) + \int_0^t W(s) ds \leq V(0) + \gamma \int_0^t f(s) ds < \infty \quad (26)$$

式(26)表明 $W(t)$ 属于 L_1 空间。利用 Barbalat 引理, 可推出 $W(t)$ 渐近收敛于 0。由此引理 2 得证。使用引理 2 来研究闭环系统式(19)的稳定性。

定理 2 对系统式(3)考虑控制律式(18), 闭环系统式(19)是全局渐近稳定的, 因此如果假设 1 和 2 成立, 则编队控制目标实现。

考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\tilde{x}_i^2 + \tilde{y}_i^2 + \frac{1}{k_3} \tilde{\theta}_i^2 \right) \quad (27)$$

对函数 V_2 关于时间变量求导, 并将式(19)代入, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \sum_{i=1}^n \left(\tilde{x}_i \dot{\tilde{x}}_i + \tilde{y}_i \dot{\tilde{y}}_i + \frac{1}{k_3} \tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i \right) = \\ &\sum_{i=1}^n \left(-k_1 \tilde{x}_i^2 - \frac{k_2}{k_3} \tilde{\theta}_i^2 + \tilde{x}_i \eta_{ix} + \tilde{y}_i \eta_{iy} \right) = W_1 + W_2 \end{aligned} \quad (28)$$

其中 W_1, W_2 的定义为 $W_1 = \sum_{i=1}^n \left(-k_1 \tilde{x}_i^2 - \frac{k_2}{k_3} \tilde{\theta}_i^2 \right)$,

$$W_2 = \sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i \eta_{ix} + \tilde{y}_i \eta_{iy}).$$

根据 Lyapunov 函数 V_2 的定义, 可以看出 V_2 满足:

$$V_2 \geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2, V_2 \geq \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \quad (29)$$

可以得到以下不等式:

$$\sum_{i=1}^n |\tilde{x}_i| \leq \sqrt{2nV_2}, \sum_{i=1}^n |\tilde{y}_i| \leq \sqrt{2nV_2} \quad (30)$$

因此可得:

$$W_2 \leq (\max_{1 \leq i \leq n} |\eta_{ix}| + \max_{1 \leq i \leq n} |\eta_{iy}|) \sqrt{2nV_2} \quad (31)$$

因为 η_{ix}, η_{iy} 均指数收敛于 0, 所以函数 V_2 满足引理 2 中的条件。由此可以推出 W_1 趋于 0。 W_1 趋于 0, 则有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}_i(t) = 0 \quad (32)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\theta}_i(t) = 0 \quad (33)$$

由于 $\tilde{\theta}_i$ 趋于 0, 根据式(19)中 $\dot{\theta}_i$ 的方程, 在假设 1 条件下有 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\sin \tilde{\theta}_i(t) / \tilde{\theta}_i(t)) = 1, \lim_{t \rightarrow \infty} |v_r(t)| > 0$, 应用 Barbalat 引理, 可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{y}_i(t) = 0 \quad (34)$$

因为 $x_{ir}, y_{ir}, \theta_{ir}$ 分别指数收敛于 x_r, y_r, θ_r , 并且 $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{\theta}_i$ 收敛于 0, 说明控制目标式(7) ~ (9)得以实现。定理 2 得证。

4 仿真和实验验证

本节将进行仿真和实验研究, 验证所提出控制策略的有效性, 下列各物理量使用国际单位制(SI)中单位。

4.1 仿 真

首先采用 3 个跟随机器人和一个虚拟领航机器人组成的多机器人系统在 MATLAB 下进行数值仿真。机器人 1、2、3 和虚拟领航机器人 0 之间的通信拓扑结构如图 1 所示。令 $p_i = [x_i, y_i, \theta_i]^T$ 表示机器人的位姿, 其中 $p_1(0) = [5, 2, 0]^T, p_2(0) = [-3, 3, -0.5]^T, p_3(0) = [0, 0, -1]^T, p_r(0) = [3, 3, 0]^T$ 。虚拟领航机器人的线速度为 $v_r(t) = 3 \sin(\pi t / 30)$, 角速度设定为如下分段函数:

$$\omega_r(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 10 \\ -\pi^2 / 20 \sin(\pi t / 10), & 10 \leq t < 20 \\ 0, & 20 \leq t \end{cases} \quad (35)$$

跟随机器人与领航机器人期望的相对位置为 $\Delta_1 = [-2, 0]^T, \Delta_2 = [-4, 2]^T, \Delta_3 = [-4, -2]^T$ 。估计律的参数设置为 $\Gamma_i = I_4$, 控制律的参数设置为 $k_1 = 1, k_2 = 1, k_3 = 1$ 。各估计变量的初始值在 $[-1, 1]$ 之间取随机值。仿真结果中, 估计误差如图 2 所示, $\|\xi_{ir} - \xi_r\|$ 收敛于 0。编队跟踪的结果如图 3 所示, 图 3(a)表明跟随机器人在虚拟领航者的带领下形成一个三角形队形; 编队跟踪误差如图 3(b)所示, 收敛于 0; 机器人的线速度和角速度如图 3(c)所示, 3 个跟随机器人的线速度与角速度渐近与虚拟领航机器人保持一致。仿真结果表明控制目标式(7) ~ (9)得以实现。

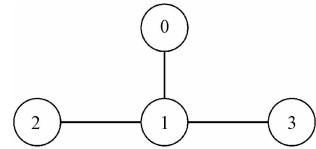


图 1 机器人之间的通信拓扑

Fig. 1 The communication topology among vehicles and leader

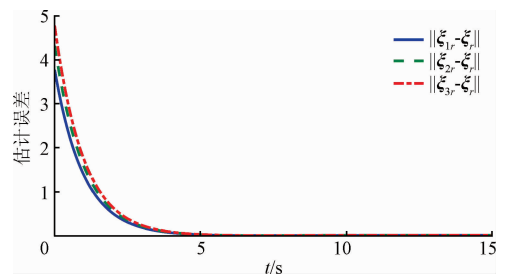
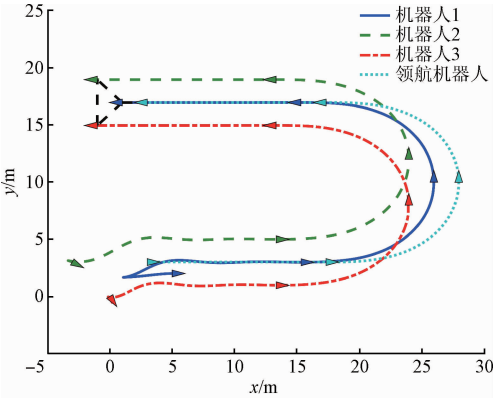
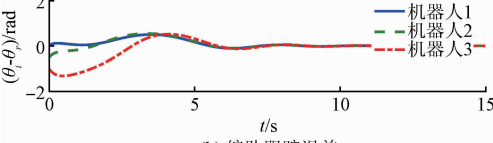
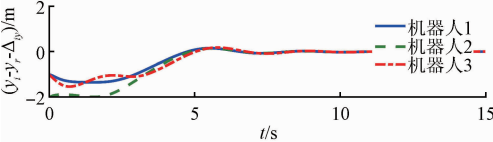
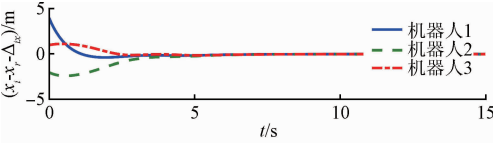


图 2 估计误差 $\|\xi_{ir} - \xi_r\|$

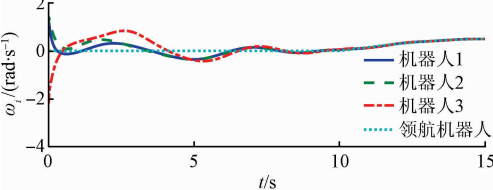
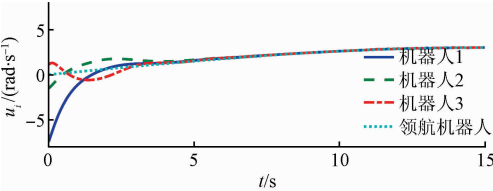
Fig. 2 The estimation errors $\|\xi_{ir} - \xi_r\|$



(a) 机器人在平面的轨迹
(a) The plane trajectories of the vehicles



(b) 编队跟踪误差
(b) Formation tracking errors



(c) 机器人的线速度和角速度
(c) The linear velocity and angular velocity of the vehicles

图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

4.2 实 验

4.2.1 视觉定位与实验平台

基于视觉导引定位移动机器人具有导引精度高、性价比好等特点^[21]。实验部分,以 3 个双轮差分驱动式移动机器人作为实验对象,利用视觉传感器对机器人的位姿

信息进行测量。课题组研制的多个非完整移动机器人视觉定位系统与实验平台如图 4 所示,安装在场景顶部的以太网摄像机用于捕获场景图像,使用粘贴在移动机器人顶部的小的等腰三角形的图像特征计算移动机器人的位置和方向信息。摄像机为针孔模型,利用直接线性变换(direct linear transformation, DLT)^[22]方法计算图像平面与地平面的 2D 单应关系。利用视觉伺服平台(visual servoing platform, ViSP)库^[23]中的 dots tracking 方法跟踪获取每一个移动机器人三角形图案的边缘点。利用 OpenCV 中的三角形拟合方法^[24]拟合边缘点,获得三角形顶点在图像中的坐标。根据 2D 单应关系计算出机器人的位姿信息,作为控制算法的输入。通过调整左右驱动轮直流电机的速度来实现机器人的运动。直流电机自带精度为 390 线/圈的 AB 相增量式霍尔编码器,机器人的速度控制通过底层驱动实现。移动机器人与计算机通过 WiFi 进行通信。

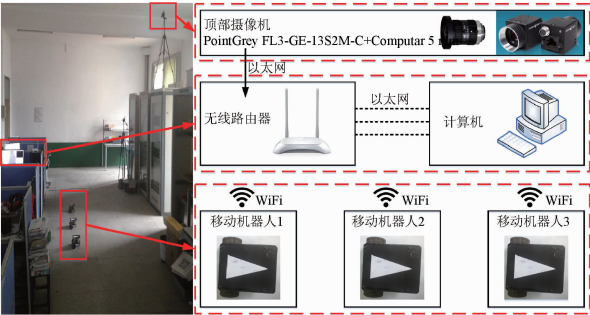


图 4 多移动机器人实验平台

Fig. 4 Multiple vehicle experiment platform

4.2.2 多移动机器人实验

机器人 1、2、3 和虚拟领航机器人 0 的通信拓扑结构与仿真相同,如图 1 所示。跟随机机器人的初始位姿为 $p_1(0) = [0.5, 1.1, 0.3]^T$, $p_2(0) = [0.3, 1.8, -0.3]^T$, $p_3(0) = [0.3, 0.7, 0]^T$ 。虚拟领航机器人的初始位姿为 $p_r(0) = [1, 1.5, 0]^T$, 线速度和角速度分别为 $v_r(t) = 0.1 \tanh(t)$, $\omega_r(t) = 0.1 \cos(0.2t)$ 。期望相对位置为 $\Delta_1 = [0, -0.2]^T$, $\Delta_2 = [-0.5, 0.3]^T$, $\Delta_3 = [-0.5, -0.7]^T$ 。参数设置中 $k_1 = 2, k_3 = 10$, 其余参数与仿真相同。机器人在视觉定位系统中的轨迹如图 5 所示。实验结果如图 6 所示,图 6(a)、(b)表明 3 个机器人实现了期望的队形,编队跟踪误差收敛于零,具有良好的性能。图 6(c)也说明 3 个跟随机机器人的线速度和角速度分别收敛于虚拟领航机器人的线速度和角速度。

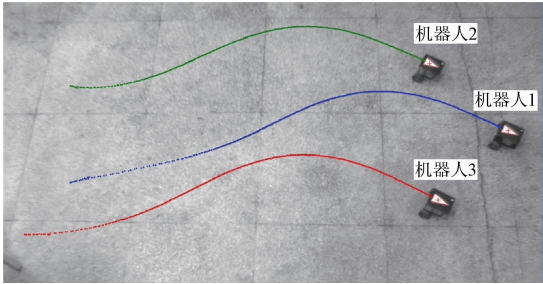


图5 机器人在视觉定位系统中的轨迹
Fig.5 Vehicle trajectory in visual positioning system

5 结 论

通过对非完整移动机器人领航-跟随编队控制问题的研究,无须假设每个跟随机器人知道(虚拟)领航机器人的状态,通过分布式估计领航机器人的状态,并利用每个跟随机器人的跟踪误差设计了编队控制算法。本文所提出的方法,通过数值仿真和一组差分驱动轮式移动机器人作为实验对象进行实验验证,仿真和实验结果中编队跟踪误差收敛于0,机器人的线速度和角速度大小有界且在一定合理范围,表明了所提出控制算法有效性。

参考文献

[1] CHEN Y Q, WANG Z. Formation control: A review and a new consideration [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2005 : 3181-3186.

[2] 刘银萍,杨宜民. 多机器人编队控制的研究综述[J]. 控制工程, 2010, 17(增刊3): 182-186.

LIU Y P, YANG Y M. Formation control of multi-robot research [J]. Control Engineering of China, 2010, 17(Suppl.3): 182-186.

[3] 王祥科,李迅,郑志强,等. 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, 28(11): 1601-1613.

WANG X K, LI X, ZHENG ZH Q, et al. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1601-1613.

[4] OH K K, PARK M C, AHN H S. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53(3): 424-440.

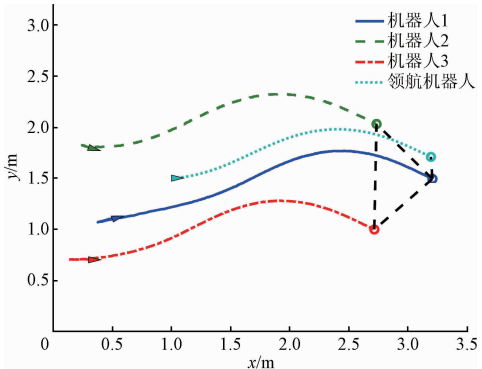
[5] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6): 926-939.

[6] LAWTON J R, BEARD R W, YOUNG B J. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(6): 933-941.

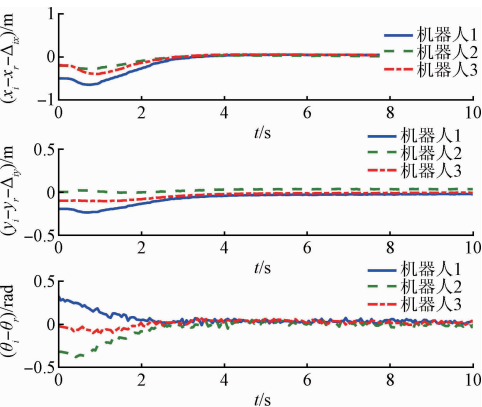
[7] DESAI J P. A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations [J]. Journal of Field Robotics, 2002, 19(11): 511-525.

[8] REN W, SORENSSEN N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.

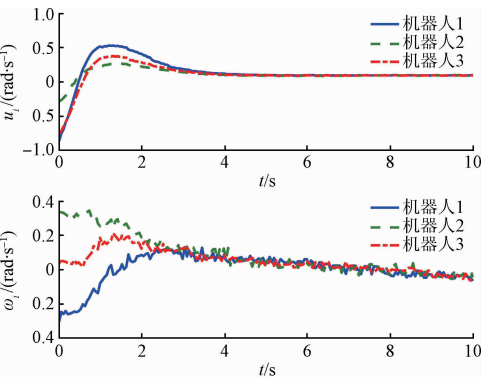
[9] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous



(a) 机器人在平面的轨迹
(a) The plane trajectories of the vehicles



(b) 编队跟踪误差
(b) Formation tracking errors



(c) 机器人的线速度和角速度
(c) The linear velocity and angular velocity of the vehicles

图6 实验结果
Fig.6 Experiment results

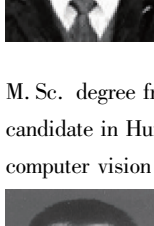
- Robots, 1997, 4(4): 387-403.
- [10] DO K, PAN J. Nonlinear formation control of unicycle-type mobile robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(3): 191-204.
- [11] SADOWSKA A, BROEK T D, HUIJBERTS H, et al. A virtual structure approach to formation control of unicycle mobile robots using mutual coupling [J]. International Journal of Control, 2011, 84(11): 1886-1902.
- [12] 张大伟, 孟森森, 邓计才. 多移动微型机器人编队控制与协作避碰研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 578-585.
- ZHANG D W, MENG S S, DENG J C. Formation control and cooperative collision avoidance for multiple mobile miniature robots[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 578-585.
- [13] FIERRO R, DAS A K, KUMAR V, et al. Hybrid control of formations of robots [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2001: 157-162.
- [14] SHAO J, XIE G, WANG L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles [J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 545-552.
- [15] 王保防, 张瑞雷, 李胜, 等. 基于轨迹跟踪车式移动机器人编队控制 [J]. 控制与决策, 2015, 30(1): 176-180.
- WANG B F, ZHANG R L, LI SH, et al. Formation control for car-like mobile robots based on trajectory tracking[J]. Control and Decision, 2015, 30(1): 176-180.
- [16] 葛媛媛, 张宏基. 基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 746-755.
- GE Y Y, ZHANG H J. Trajectory tracking algorithm for robot based on adaptive fuzzy sliding mode control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 746-755.
- [17] CONSOLINI L, MORBIDI F, PRATTICIZZO D, et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints [J]. Automatica, 2008, 44(8): 1343-1349.
- [18] YU X, LIU L. Distributed formation control of nonholonomic vehicles subject to velocity constraints [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1289-1298.
- [19] HONG Y G, HU J P, GAO L X. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology [J]. Automatica, 2006, 42(7): 1177-1182.
- [20] WANG Y N, MIAO ZH Q, ZHONG H, et al. Simultaneous stabilization and tracking of nonholonomic mobile robots: lyapunov-based approach [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(4): 1440-1450.
- [21] 张建鹏, 楼佩煌, 钱晓明, 等. 多窗口实时测距的视觉导引 AGV 精确定位技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1356-1363.
- ZHANG J P, LOU P H, QIAN X M, et al. Research on precise positioning technology by multi-window and real-time measurement for visual navigation AGV [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1356-1363.
- [22] ABDEL-AZIZ Y, KARARA H, HAUCK M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2015, 81(2): 103-107.
- [23] MARCHAND E, SPINDLER F, CHAUMETTE F. ViSP for visual servoing: A generic software platform with a wide class of robot control skills [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2005, 12(4): 40-52.
- [24] PÂRVU O, GILBERT D. Implementation of linear minimum area enclosing triangle algorithm [J]. Computational and Applied Mathematics, 2016, 35(2): 423-438.

作者简介



易国, 2008 年于湖南师范大学获得学士学位, 2011 年于湖南大学获得硕士学位, 现为湖南大学博士研究生, 主要研究方向为机器视觉、多机器人系统协调控制。

E-mail: yiguo@126.com



Yi Guo received his B. Sc. degree from Hunan Normal University in 2008 and his M. Sc. degree from Hunan University in 2011. Now he is a Ph. D. candidate in Hunan University. His main research interest includes computer vision and cooperative control for multi-robot systems.

毛建旭(通讯作者), 1993 年于南昌大学获得学士学位, 1999 年于东华理工大学获得硕士学位, 2003 年于湖南大学获得博士学位, 现为湖南大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理与模式识别。

E-mail: maojianxu@hnu.edu.cn

Mao Jianxu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanchang University in 1993, his M. Sc. degree from East China University of Technology in 1999 and his Ph. D. degree from Hunan University in 2003. Now he is an associate professor and doctoral supervisor in Hunan University. His main research interest includes computer vision, image processing and pattern recognition.