

复杂地形环境下多机器人编队控制方法

张瑞雷, 李 胜[†], 陈庆伟, 杨 春

(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对复杂地形地面崎岖起伏的特点, 提出了一种多机器人系统编队控制方法. 首先, 分析了复杂地形环境下的系统队形模型. 通过建立三维地形环境下编队系统的误差模型, 并运用空间投影法将其映射到二维平面上, 对系统的编队误差进行分析. 然后利用李雅普诺夫函数构造控制器, 并根据环境中的特定地形设计相应的编队行驶策略, 实现了多机器人系统在复杂地形环境下的编队控制. 最后, 通过3种典型复杂地形环境下两种非完整移动机器人的编队仿真, 验证了该方法的有效性.

关键词: 复杂地形; 多机器人系统; 编队控制; 非完整移动机器人

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Formation control for multi-robot system in complex terrain

ZHANG Rui-lei, LI Sheng[†], CHEN Qing-wei, YANG Chun

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: We study the problem of formation control for multi-robot system in a rugged and undulating terrain environment. First, the formation model of the multi-robot system in complex terrain environment is analyzed in detail. Second, the three-dimensional formation model of this system is simplified to a two-dimensional coordinate system via space projection method; and then, the formation system error is analyzed. The controller is constructed by using Lyapunov theory, and the driving strategies are designed for the specific terrains. In this way, the multi-robot formation control in complex terrain environment is realized. Finally, simulation experiments of three kinds of typical complex terrain conditions and two kinds of nonholonomic mobile robots are given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: complex terrain; multi-robot system; formation control; nonholonomic mobile robot

1 引言(Introduction)

多机器人系统自出现以来, 由于其相比单机器人系统所具有诸多优点, 使其在军事、工农业生产、空间探索、交通控制、医疗与服务行业等领域具有良好的应用前景并已经得到了一定的实际应用, 成为越来越多学者关注的热点^[1]. 然而, 对于多机器人系统的研究仍主要集中在平坦地形环境下, 随着相关研究的不断深入, 在一些地形较为复杂的环境如灾害现场、山区丘陵以及外星球探测等领域的研究就显得越来越重要. 在复杂地形环境下, 机器人在运动过程中可能会发生滑转和滑移等问题, 机器人驱动轮的形变以及地表与机器人摩擦力和环境密切相关, 使得在复杂地形条件下的多机器人编队的研究更具挑战, 研究成果实用性更强. 在一些危险的场合, 利用智能机器人系统代替人进行有风险操作, 如辐射环境检测、外太空探索和灾害救援, 不仅可以提高效率, 也可以减免人员伤亡, 具有重要的社会意义. 编队控制是多机器人

系统的一个重要研究方向, 在上述领域有着广阔的应用价值, 目前, 学者进行编队研究的机器人主要有地面移动机器人^[2-4]、无人飞行器^[5-7]、卫星^[8]和自主式潜水器^[9-10]等; 控制算法主要有基于行为(behavior-based)法^[2-4]、虚拟结构(virtual-structure)法^[11-13]和领航跟随(leader-follower)法^[14-16].

基于行为的编队方法^[2-4], 实现简单, 适用于不确定的环境, 但精度差, 常用于对编队精度要求不高的场合并且很难进行精确的数学分析; 虚拟结构法^[11-13]和领航跟随法^[14-16]都分别需要虚拟结构和领航机器人全状态信息, 在此基础上, 设计算法, 实现编队控制. 虚拟结构法通常利用图论知识设计编队拓扑, 把编队整体看作一个刚性结构, 编队中任意机器人的故障都可能导致编队失败. 文献[11]提出分布式控制结构有效地克服了上述问题. 文献[12]对编队过程中可能出现的通信故障等问题做了相应的研究. 文献[13]将虚拟结构法和路径跟踪法相融合实现了多机

收稿日期: 2013-09-03; 录用日期: 2013-12-02.

[†]通信作者. E-mail: lisheng@njust.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074023, 51175266); 江苏省高校自然科学基金资助项目(12KJB510008); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13-0207).

机器人系统的动态编队控制. 文献[14]针对输入受约束的一类非完整移动机器人, 设计控制策略实现了编队控制. 文献[15]提出的编队控制算法致力于解决非完整移动机器人使用反馈线性化的队形控制方法所产生的一些问题, 但其算法实现需要队形满足内三角形的关系. 文献[16]在此基础上提出改进的编队控制算法, 实现了包括线性队形在内的队形控制.

上述研究都是基于平坦硬质地面中的非完整移动机器人“纯滚动”和“无滑动”的假设进行的. 随着移动机器人研究的深入, 崎岖路面和起伏山地环境, 以及机器人转向和前行受限于地表特征的复杂性容易导致机器人发生明显的滑动, 不符合上述假设, 相关研究成果难以直接应用于复杂地形, 因此, 机器人在复杂地形环境中的控制问题被日益关注. 文献[17]总结了空间探索机器人在行星和月球探测的研究成果, 包括机器人架构、控制和协调合作等方面. 文献[18]对轮式机器人在松软崎岖的地形环境可能发生的纵向滑转和侧向滑移等问题进行了解析. 文献[19]研究了四足步行机器人控制问题, 提出了一种利用身体运动来克服崎岖地形环境的方法. 文献[20]对一种铰接式移动机器人穿越崎岖地面时的运动学进行了建模和分析, 做出了接触角估计, 并根据其运动学模型, 提出了一种滑转估计方法, 分别在崎岖地形和沙地上进行了实验验证. 文献[21]对多机器人协作运输时环境地形起伏不平, 运输过程中机器人和物体发生滑动的问题, 提出了起伏地形环境中的协作运输策略, 结合编队思想, 实现了多机器人协作推箱子等任务.

本文在已有的研究成果基础上, 针对复杂地形环境的特点, 进行详细地分析, 然后融合领航-跟随法和空间投影法, 通过将三维地形环境下的编队系统映射到二维平面上进行分析, 来简化编队系统的误差模型; 接着利用李雅普诺夫函数构造控制器, 并对陡坡和峡谷等特殊地形设计编队行驶策略, 尽可能避免机器人在运动过程中出现滑转、滑移; 最后设计3组仿真, 通过对多机器人系统在不同地形环境下编队控制, 验证所提方法的有效性.

2 问题描述(Statement of the problem)

多机器人系统与环境密不可分, 环境是多机器人系统执行任务的空间, 其关系如图1所示.

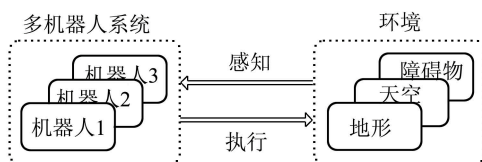


图1 多机器人系统与环境

Fig. 1 Multi-robot system and the environment

常见的地形环境主要有平坦地形、平缓起伏地

形、陡峭山地和峡谷等, 分别如图2(a)–2(d)所示. 目前, 多机器人系统编队控制研究大部分集中在平坦地形环境下, 没有考虑地形对编队控制的影响. 在复杂地形环境下, 多机器人编队安全行驶要求连续起伏的地形, 并且坡度不能太大, 否则随着坡度的增大, 机器人出现滑动和滚动的概率也相应增加, 并由于地面凹凸不平, 机器人在运动过程中出现颠簸, 导致控制精度下降, 严重时还可能出现卡死和翻倒等事故, 因此, 对于陡坡和峡谷等特定地形为了保证编队行驶安全, 必须设计相应的控制策略.

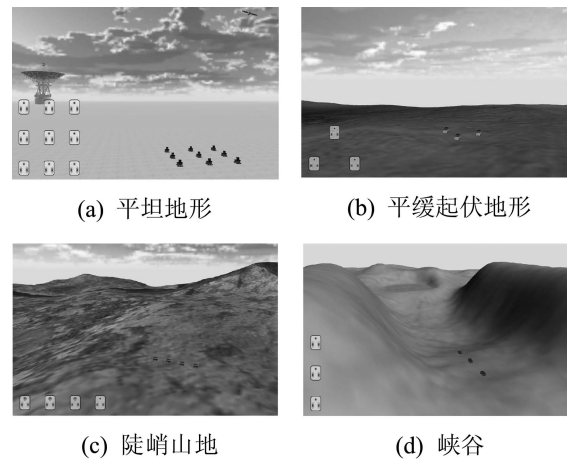


图2 环境与队形

Fig. 2 The environment and formation shape

多机器人系统的常见队形有三角形、线性和柱形等, 如图2(b)–2(d)所示. 对于领航-跟随法的编队系统, 编队的导航和主轨迹由领航机器人决定, 编队的队形由跟随机器人和相关队形参数决定. 在平坦地形下, 机器人 R 的空间位姿在 $x-y$ 坐标系下, 通常表示为 $\mathbf{p} = [x, y, \gamma]^T$, 其中: $(x, y)^T$ 为机器人的位置坐标, γ 为机器人的方位角. 跟随机器人对领航机器人的期望位姿为 $\mathbf{f} = [\rho, \varphi]^T$, 其中 ρ 和 φ 分别表示期望距离和角度. 在复杂地形环境下, 机器人 R 的空间位姿在 $x-y-z$ 坐标系下为 $\mathbf{p} = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$, 其中: z 为机器人的高度坐标, α 和 β 分别为机器人的俯仰角和横滚角. 由于机器人的坐标高度 z 、俯仰角 α 、横滚角 β 因地形变化而改变, 并不直接受机器人控制的影响, 所以本文在复杂地形环境下的多机器人系统的队形, 是指机器人编队投影到二维 xoy 平面上的队形.

3 控制器设计(Controller design)

机器人在 $x-y-z$ 坐标系下模型如图3所示, 其运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \alpha \cos \gamma, \\ \dot{y} = v \cos \alpha \sin \gamma, \\ \dot{z} = v \sin \alpha, \\ \dot{\gamma} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

其中: v 和 ω 分别为机器人的线速度和角速度, α 为机

机器人的俯仰角, γ 为机器人的方位角. 将其映射到 x - y 坐标系下为

$$\begin{cases} \dot{x} = v' \cos \gamma, \\ \dot{y} = v' \sin \gamma, \\ \dot{\gamma} = \omega, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $v' = v \cos \alpha$.

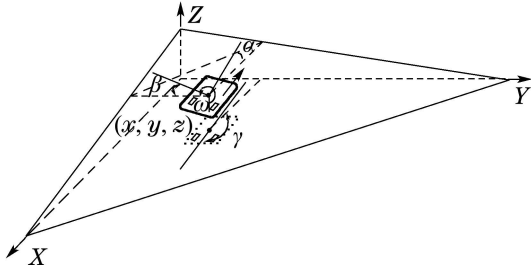


图3 机器人模型
Fig. 3 Robot model

一个典型的三角形编队如图4所示.

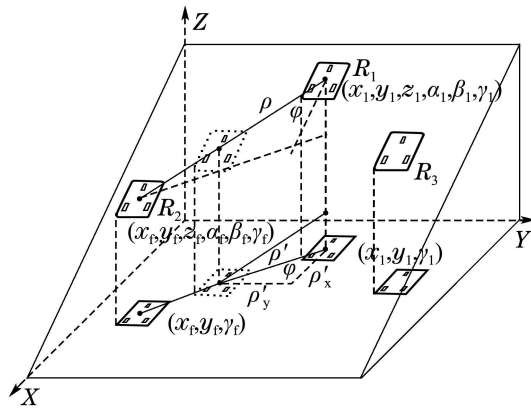


图4 三角形编队
Fig. 4 Triangle formation

领航机器人是 R_1 , 跟随机器人是 R_2, R_3 , R_3 已完成编队, 编队中各机器人的运动学模型相同. 机器人 R_1 的位姿为 $\mathbf{p}_1 = (x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$, 机器人 R_2 的位姿为 $\mathbf{p}_f = (x_f, y_f, z_f, \alpha_f, \beta_f, \gamma_f)^T$, 期望位姿 $\mathbf{f} = (\rho, \varphi)^T$, 分别表示 R_2 与 R_1 需要保持期望距离和角度. 由于机器人的坐标高度 z 、俯仰角 α 、横滚角 β 因地形变化而改变, 俯仰角 α 和横滚角 β 对编队队形无影响, 故忽略, 将 x - y - z 坐标系下编队通过投影简化到 x - y 坐标系下进行分析. 跟随机器人 R_2 与领航机器人 R_1 的期望位姿在 xoy 平面上为

$$\begin{cases} \rho' = \left[\frac{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2}{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2 + (z_1 - z_f)^2} \right]^{1/2} \rho, \\ \varphi' = \varphi. \end{cases} \quad (3)$$

跟随机器人 R_2 在 xoy 平面上期望位姿为

$$\begin{cases} x_d = x_1 - \rho' \cos(\gamma_1 + \varphi'), \\ y_d = y_1 - \rho' \sin(\gamma_1 + \varphi'), \\ \gamma_d = \gamma_1. \end{cases} \quad (4)$$

定义如下正则变换:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \gamma_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_f & \sin \gamma_f & 0 \\ -\sin \gamma_f & \cos \gamma_f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x_f \\ y_d - y_f \\ \gamma_d - \gamma_f \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: $(x_d - x_f, y_d - y_f, \gamma_d - \gamma_f)^T$ 为图4所示坐标系下的跟随机器人 R_2 在 xoy 平面上位姿误差, 跟随机器人 R_2 坐标变换后位姿误差为 $(x_e, y_e, \theta_e)^T$. 对式(5)求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{x}_e &= \omega_f y_e + \cos \gamma_f (v'_d \cos \gamma_d - v'_f \cos \gamma_f) + \\ &\quad \sin \gamma_f (v'_d \sin \gamma_d - v'_f \sin \gamma_f), \\ \dot{y}_e &= -\omega_f x_e - \sin \gamma_f (v'_d \cos \gamma_d - v'_f \cos \gamma_f) + \\ &\quad \cos \gamma_f (v'_d \sin \gamma_d - v'_f \sin \gamma_f), \\ \dot{\gamma}_e &= \omega_d - \omega_f, \end{aligned}$$

其中: $v'_d = v'_1 = v_1 \cos \alpha_1$, $\omega_d = \omega_1$, 并结合式(2)(5), 整理可得误差系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_e = \omega_f y_e - v'_f + v'_1 \cos \gamma_e, \\ \dot{y}_e = -\omega_f x_e + v'_1 \sin \gamma_e, \\ \dot{\gamma}_e = \omega_1 - \omega_f. \end{cases} \quad (6)$$

由此可见, 本文将三维地形下多机器人系统编队问题, 转化为跟随机器人在 xoy 平面上的轨迹跟踪问题, 并构造了其在 xoy 平面的误差系统模型, 通过寻求合适的控制律 v'_f 和 ω_f , 可使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_e| = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} |y_e| = 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} |\gamma_e| = 0$.

考虑如下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} x_e^2 + \frac{1}{2} (y_e + k_\gamma \gamma_e)^2 + \frac{1}{k_y} (1 - \cos \gamma_e). \quad (7)$$

对式(7)求导, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x_e \dot{x}_e + (y_e + k_\gamma \gamma_e) (\dot{y}_e + k_\gamma \dot{\gamma}_e) + \frac{\dot{\gamma}_e}{k_y} \sin \gamma_e = \\ &= -x_e (v'_f - v'_1 \cos \gamma_e + k_\gamma \gamma_e \omega_f) + v'_1 \sin \gamma_e (y_e + \\ &= k_\gamma \gamma_e) + (\omega_1 - \omega_f) [k_\gamma (y_e + k_\gamma \gamma_e) + \frac{1}{k_y} \sin \gamma_e]. \end{aligned} \quad (8)$$

当取

$$\begin{cases} v'_f = k_x x_e + v'_1 \cos \gamma_e - k_\gamma \gamma_e \omega_f, \\ \omega_f = \omega_1 + v'_1 [k_y k_1 (y_e + k_\gamma \gamma_e) + \frac{k_2}{k_y} \sin \gamma_e], \end{cases} \quad (9)$$

其中 $k_1, k_2, k_x, k_y, k_\gamma$ 均为正常数, 将式(9)代入式(8), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_x x_e^2 + v'_1 \sin \gamma_e (y_e + k_\gamma \gamma_e) - v'_1 [k_y k_1 (y_e + \\ &= k_\gamma \gamma_e) + \frac{k_2}{k_y} \sin \gamma_e] [k_\gamma (y_e + k_\gamma \gamma_e) + \frac{1}{k_y} \sin \gamma_e] = \\ &= -k_x x_e^2 + v'_1 \sin \gamma_e (y_e + k_\gamma \gamma_e) - \\ &= v'_1 [(k_1 + k_2) \sin \gamma_e (y_e + k_\gamma \gamma_e) + \\ &= k_y k_\gamma k_1 (y_e + k_\gamma \gamma_e)^2 + \frac{k_2}{k_y k_\gamma} \sin^2 \gamma_e]. \end{aligned} \quad (10)$$

如果 $k_1 + k_2 = 1$, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_x x_e^2 - \frac{k_2}{k_y k_\gamma} v'_l \sin^2 \gamma_e - \\ &k_1 k_y k_\gamma v'_l (y_e + k_\gamma \gamma_e)^2 < 0, \end{aligned}$$

并将 $v'_f = v_f \cos \alpha_f$, $v'_l = v_l \cos \alpha_l$ 代入式(9), 可得跟随机器人 R_2 的控制律为

$$\begin{cases} v_f = \frac{k_x}{\cos \alpha_f} x_e + \frac{\cos \alpha_l}{\cos \alpha_f} v_l \cos \gamma_e - \frac{k_\gamma}{\cos \alpha_f} \gamma_e \omega_f, \\ \omega_f = \omega_l + v_l [k_y k_1 (y_e + k_\gamma \gamma_e) + \frac{k_2}{k_\gamma} \sin \gamma_e] \cos \alpha_f. \end{cases} \quad (11)$$

当机器人处于开阔平坦地形时,

$$\begin{cases} v_f = k_x x_e + v_l \cos \gamma_e - k_\gamma \gamma_e \omega_f, \\ \omega_f = \omega_l + v_l [k_y k_1 (y_e + k_\gamma \gamma_e) + \frac{k_2}{k_\gamma} \sin \gamma_e], \end{cases} \quad (12)$$

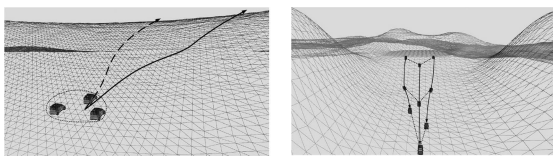
其中: k_x, k_y, k_γ 分别为 x_e, y_e, γ_e 的参数, 当参数 k_x, k_y, k_γ 取值较大时误差收敛较快, 但控制量 v_f 和 ω_f 的平滑度会下降, 当参数 k_x, k_y, k_γ 取值较小时, 控制量 v_f 和 ω_f 会过小, 控制效果不明显, 误差收敛时间过长. 当控制律分别用于两轮差动机器人和车式移动机器人时, 需要结合相应的运动学模型进行转换, 分别为

$$u_{\text{left}} = v_f - \frac{r}{2} \omega_f, \quad u_{\text{right}} = v_f + \frac{r}{2} \omega_f, \quad (13)$$

$$u_{\text{rear}} = v_f, \quad u_{\text{front}} = \arctan \frac{l \omega_f}{v_f}, \quad (14)$$

其中: u_{left} 和 u_{right} 为两轮差动机器人左右轮速度控制量, r 为车轮半径, u_{rear} 和 u_{front} 为车式移动机器人后轮前进速度和前轮转向角度控制量, l 为前后轮轴距.

上述控制律只合适编队在平缓连续起伏的地面上跟随机器人完成和保持编队行驶, 如果遇到陡坡和峡谷等特殊地形, 为了保证编队系统的行驶安全, 采取的策略分别如图5(a)–5(b)所示. 对于陡坡地形, 机器人通过自身传感器实时测量俯仰角, 在上坡过程中尽量避免沿着坡度最陡的路线行驶, 如5(a)中虚线所示, 而是通过转向增加行驶距离尽量降低自身在上坡过程中的俯仰角, 如5(a)中实线所示, 减小较大坡度对编队行驶的影响, 降低机器人翻倒和卡死的几率. 对于峡谷地形, 编队利用激光传感器测量峡谷的宽度, 通过队形的灵活变换通过, 如图5(b)所示, 编队在进入峡谷前为三角形编队, 进入后队形由三角形向柱形收缩, 以保证编队安全通过峡谷.



(a) 上坡

(b) 峡谷

图5 编队行驶策略

Fig. 5 Formation driving strategy

4 仿真实验(Simulation validation)

本文通过3种典型复杂地形环境, 两种非完整移动机器人的编队仿真来验证算法的有效性. 为了使仿真更为真实, 本文采用MRDS4(microsoft robotics developer studio 4)搭建3D仿真平台^[22]. 该软件提供逼真的物理引擎(physX)和完备调试接口, 能够精确模拟真实的环境场景, 同时也可以将仿真数据导入MATLAB中进行研究和分析. 仿真中, R_1 为领航机器人, R_2, R_3 为跟随机器人, 机器人位姿和速度等相关参数可以通过调用MRDS4中虚拟传感器来获得. 仿真的控制周期 $T = 50.0 \text{ ms}$.

仿真1中, 3个Pioneer 3DX机器人初始位姿分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= (0, 0, 0, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T, \\ \mathbf{p}_2 &= (-3, 3, 0, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T, \\ \mathbf{p}_3 &= (-3, -3, 0, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T, \end{aligned}$$

R_2 和 R_3 的期望位姿参数分别为

$$\mathbf{f}_2 = (1.0, -\frac{\pi}{2})^T, \quad \mathbf{f}_3 = (1.0, \frac{\pi}{2})^T,$$

机器人的车轮半径为 $r = 0.08 \text{ m}$, 控制器参数为 $k_x = 1.1$, $k_y = 0.6$, $k_\gamma = 3.0$. R_1, R_2 和 R_3 先完成线性编队, 保持队形做直线运动30 s后做螺旋形运动. 编队做直线和螺旋形运动的场景如图6(a)–6(b)所示, 各机器人的运动轨迹如图6(c)所示, R_1 的姿态如图6(d)所示, 地形起伏程度可由 R_1 的俯仰角 α 和横滚角 β 看出, 由于方位角 γ 的范围为 360° , 因此当机器人旋转超过一周会出现跳变, 但角度误差的计算通过相应处理, 避免了其对跟随机器人控制量的影响. 跟随机器人跟踪的位置误差定义为 $p_e = \sqrt{x_e^2 + y_e^2}$, 角度误差定义为 γ_e . 如图6(e)所示, 由此可知, R_2, R_3 迅速完成编队, 并以较小误差保持队形. 由于跟随机器人配置位姿远离起始位姿, 会有较大的初始误差. 各机器人的线速度控制量 v , 角速度控制量 ω , 分别如图6(f)所示. 在该仿真实验中, 编队做直线运动时, 各机器人速度相同, 做螺旋形运动时 R_2 走外圈线速度较大, R_3 走内圈线速度较小. 跟随机器人在平坦地形上的跟踪精度高于起伏地形.

仿真2中, 3个车式移动机器人的初始位姿分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_1 &= (0, 0, -13.2, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T, \\ \mathbf{p}_2 &= (-5, 5, -13.2, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T, \\ \mathbf{p}_3 &= (-5, -5, -13.2, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T, \end{aligned}$$

R_2 和 R_3 的期望位姿分别为

$$\mathbf{f}_2 = (4.0, -\frac{\pi}{4})^T, \quad \mathbf{f}_3 = (4.0, \frac{\pi}{4})^T,$$

机器人的轴距 $l = 1.3 \text{ m}$, 各控制器的参数为 $k_x = 1.2$,

$k_y = 0.4, k_\gamma = 6.0$. R_1, R_2 和 R_3 先完成三角形编队, 然后保持队形翻越陨石坑. 编队保持三角形队形上坡和下坡场景如图7(a)和7(b)所示, 各机器人的运动轨迹如图7(c)所示, R_1 的姿态如图7(d)所示. R_2, R_3 的位置误差和角度误差如图7(e)所示. 各机器人的后轮速度控制量 v 和前轮转向角度控制量 θ 分别如图7(f)所示. 在该仿真中, 由图7(a)–7(d)可知, 地形环境比仿真实验1恶劣, 地形起伏大, 编队在上坡和下坡的颠簸比较剧烈, 陨石坑的内坡比外坡更陡, 上坡时编队误差明显大于下坡时. 由于机器人在前行过程中出现滑动和卡住等现象, 跟随机器人的角度误差受到地形环境影响较大, 但编队依然能够保持队形行驶. 跟随机器人在平缓起伏地形上的跟踪精度高于陡峭起伏地形.

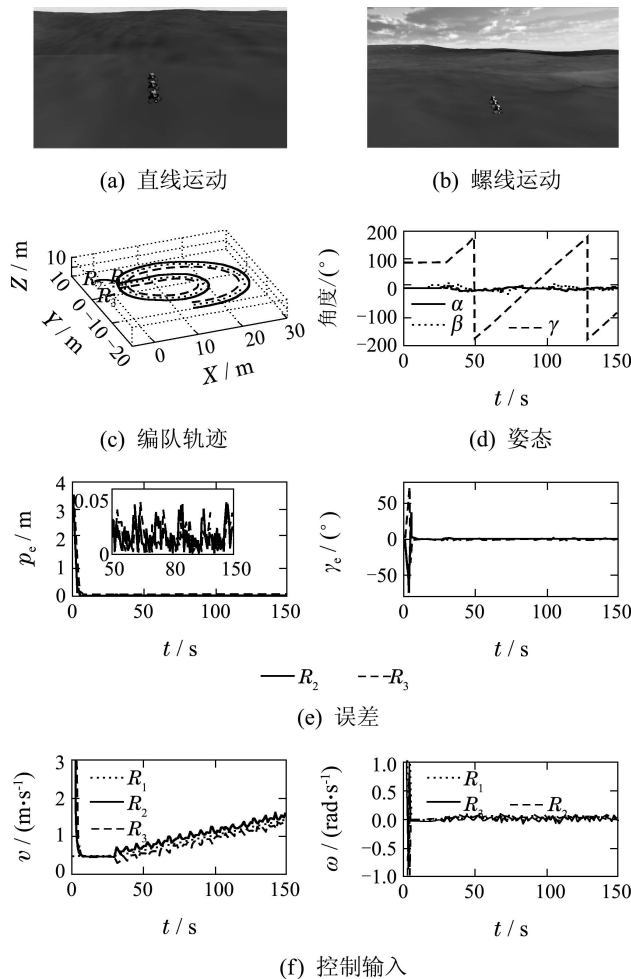
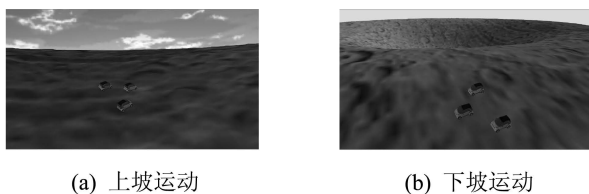


图 6 平缓起伏地形编队仿真
Fig. 6 Formation simulation in gentle undulating terrain environment



(a) 上坡运动 (b) 下坡运动

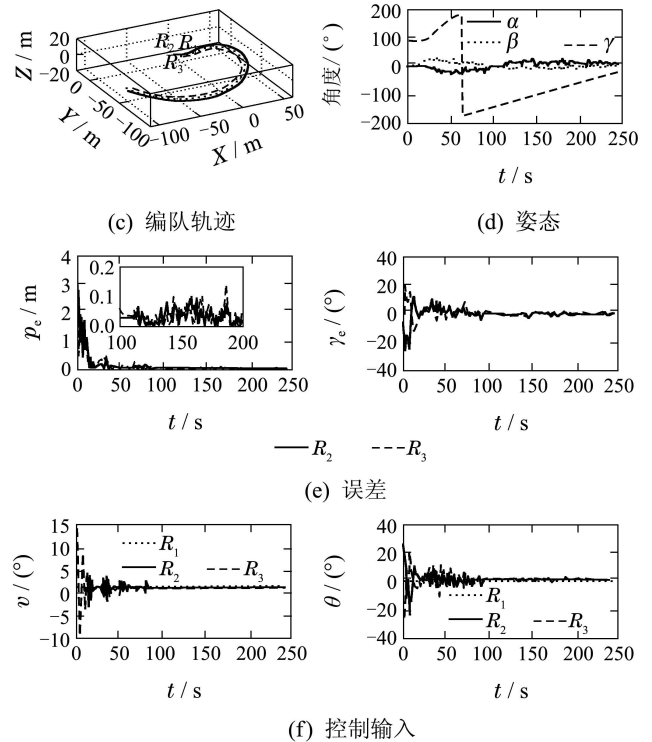


图 7 陨石坑编队仿真

Fig. 7 Formation simulation in meteor crater environment

仿真3中, 3个车式移动机器人的初始位姿分别为

$$p_1 = (-4, 1, 0, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T,$$

$$p_2 = (-4, 4, 0, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T,$$

$$p_3 = (-4, -2, 0, 0, 0, \frac{\pi}{2})^T,$$

三角形队形的期望位姿参数分别为

$$f_2 = (4.0, -\frac{\pi}{4})^T, f_3 = (4.0, \frac{\pi}{4})^T,$$

柱形队形的期望位姿参数分别为 $f_2 = (4.0, 0)^T$ 和 $f_3 = (8.0, 0)^T$, 机器人的轴距 $l = 0.62$ m, 各控制器的参数为

$$k_x = 1.0, k_y = 0.5, k_\gamma = 5.0.$$

R_1, R_2 和 R_3 先完成三角形编队, 保持队形下坡, 然后切换为柱形队形穿越峡谷, 通过峡谷后还原为三角形队形行驶. 编队以柱形队形穿越峡谷和三角形队形上坡场景如图8(a)–8(b)所示, 各机器人的运动轨迹如图8(c)所示, R_1 的姿态如图8(d)所示, R_2, R_3 的位置误差和角度误差如图8(e)所示. 各机器人的控制输入 v 和 θ 分别见图8(f). 在该仿真中, 由领航机器人 R_1 的位姿可知行驶过程颠簸比较剧烈, 队形变换过程中以及上下坡的崎岖地形对机器人的转向带来了较大的影响, 跟随机器人的角度误差较大, 但位置误差较小, 队形保持良好, 各机器人的后轮前进速度和前轮转向角基本相同, 随着地形起伏程度的不同, 编队控制精度会受到相应的影响, 但仍能较好地保持队形.

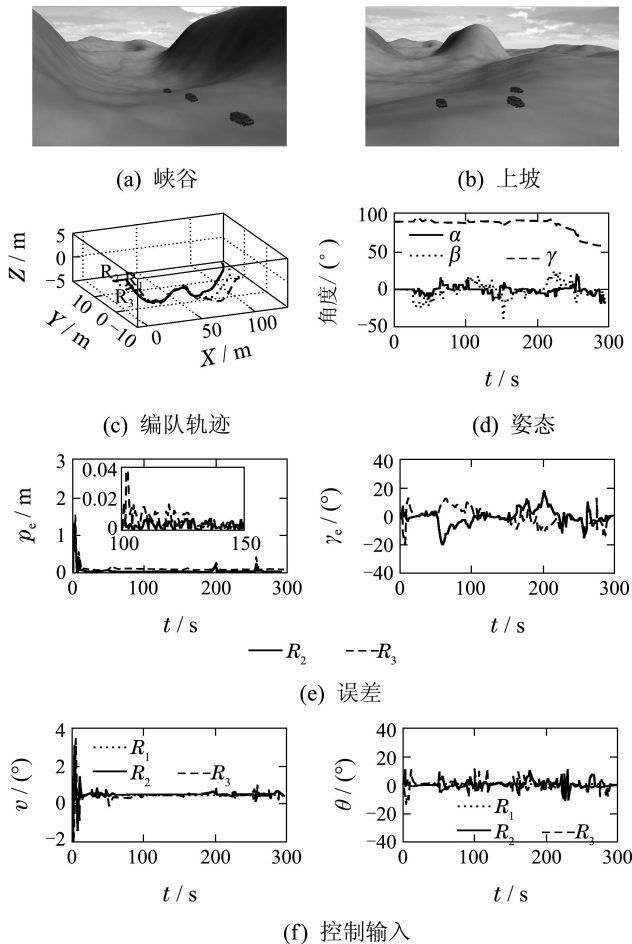


图8 陡峭起伏地形编队仿真

Fig. 8 Formation simulation in steep undulating terrain environment

注1 从仿真1到仿真3地形复杂程度加剧,凹凸和起伏明显,但是编队位置误差较小,队形保持较好,角度误差却越来越大(如图6(e), 7(e)和8(e)所示). 编队角度误差示意图9所示,这是由于非完整移动机器人由于地形条件和自身结构限制出现转向困难和驱动轮悬空等问题导致,需要进一步研究.

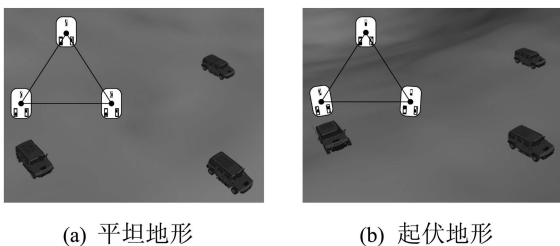


图9 编队角度误差

Fig. 9 Formation orientation error

5 结论(Conclusions)

本文通过对复杂地形环境下多机器人系统编队控制问题的研究,提出了相应的编队控制方法. 首先,运用领航-跟随法和空间映射法,将三维地形上的编队

控制问题转化为二维平面上跟随机器人的轨迹跟踪. 然后,利用李雅普诺夫理论,构造控制器并针对特定地形设计了相应的行驶策略. 最后,通过仿真可知跟随机器人能快速形成编队,并以较小的位置误差保持队形在复杂地形上行驶,验证了本文所提方法的有效性和控制器的良好性能,但由于受到地形环境对机器人前进和转向等影响,主要有打滑和卡住等,随着地形起伏程度的加剧,角度误差明显增大,还需要深入研究. 下一步还需要研究内容还有动态障碍物环境下多机器人如何精确保持队形并避障和机器人间通信故障和模型不确定性对编队性能的影响等.

参考文献(References):

- [1] ALESSANDRO F, LUCA I, DANIELE N. MultiRobot systems: a classification focused on coordination [J]. *IEEE Transactions on System Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2004, 34(5): 2015 – 2028.
- [2] TUCKER B, RONALD C A. Behavior-based formation control for multirobot teams [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, 14(6): 926 – 939.
- [3] JONATHAN L, RANDAL B, BRETT J Y. A decentralized approach to formation maneuvers [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(6): 933 – 941.
- [4] 杨帆, 刘士荣, 董德国. 编队控制中的机器人行为与基于服务的运动行为结构设计 [J]. *机器人*, 2012, 34(1): 120 – 128. (YANG Fan, LIU Shirong, DONG Deguo. Robot behavior and service-based motion behavior structure design in formation control [J]. *Robot*, 2012, 34(1): 120 – 128.)
- [5] 宋敏, 魏瑞轩, 沈东, 等. 基于非线性动态逆的无人机编队协同控制 [J]. *控制与决策*, 2011, 26(3): 448 – 452. (SONG Min, WEI Ruixuan, SHEN Dong, et al. UAV formation control based on nonlinear dynamic inversion [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(3): 448 – 452.)
- [6] 李少斌, 陈炎财, 杨忠, 等. 具有通信延迟的多无人机编队飞行控制 [J]. *信息与控制*, 2012, 41(2): 142 – 146. (LI Shaobin, CHEN Yancai, YANG Zhong, et al. Formation flight control of multi-UAVs with communication delay [J]. *Information and Control*, 2012, 41(2): 142 – 146.)
- [7] 魏瑞轩, 茹常剑, 祁晓明. 通信延迟条件下无人机编队重构的自主安全控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(9): 1099 – 1108. (WEI Ruixuan, RU Changjian, QI Xiaoming. Autonomous safety control of unmanned aerial vehicle formation reconfiguration under communication delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(9): 1099 – 1108.)
- [8] 吴锦杰, 刘昆, 韩大鹏, 等. 基于对偶四元数的卫星主从式编队姿轨跟踪的优化控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(9): 1069 – 1078. (WU Jinjie, LIU Kun, HAN Dapeng, et al. Optimized tracking-control for attitude and orbit of satellite formation flying using dual quaternion [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(9): 1069 – 1078.)
- [9] WANG Y, YAN W, LI J. Passivity-based formation control of autonomous underwater vehicles [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(4): 518 – 525.
- [10] 王银涛, 严卫生. 多自主水下航行器系统一致性编队跟踪控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(3): 379 – 384. (WANG Yintao, YAN Weisheng. Consensus formation tracking control of multiple autonomous underwater vehicle systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(3): 379 – 384.)

- [11] WEI R, NATHAN S. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, 56(4): 324 – 333.
- [12] JAWHAR G, HASAN M, MAAROUF S. Formation path following control of unicycle-type mobile robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(5): 727 – 736.
- [13] HASAN M, JAWHAR G, MAAROUF S. Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(7): 1147 – 1155.
- [14] LUCA C, FABIO M, DOMENICO P. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints [J]. *Automatica*, 2008, 44(5): 1343 – 1349.
- [15] SHAO J, XIE G, WANG L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2007, 1(2): 545 – 552.
- [16] 杨丽, 曹志强, 谭民. 不确定环境下多机器人的动态编队控制 [J]. 机器人, 2010, 32(2): 283 – 288.
(YANG Li, CAO Zhiqiang, TAN Min. Dynamic formation control for multiple robots in uncertain environments [J]. *Robot*, 2010, 32(2): 283 – 288.)
- [17] SCHENKER P S, HUNTSBERGER T L, PIRJANIAN P, et al. Robotic automation for space: planetary surface exploration, terrain-adaptive mobility, and multi-robot cooperative tasks [C] // *Intelligent Robots and Computer Vision XX: Algorithms, Techniques*. Boston: SPIE, 2001, 4572: 12 – 28.
- [18] DING L, GAO H, GUO J. Terramechanics-based analysis of slipping and skidding for wheeled mobile robots [C] // *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*. Hefei: IEEE, 2012: 4966 – 4973.
- [19] LOC V G, KOOA I M, TRAN D T. Improving traversability of quadruped walking robots using body movement in 3D rough terrains [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(12): 1036 – 1048.
- [20] 徐贺, 刘星, 张振宇, 等. 铰接式五轮移动机器人接地角估计及滑转测量 [J]. 机器人, 2013, 35(2): 208 – 217.
(XU He, LIU Xing, ZHANG Zhenyu, et al. Contact angle and slippage estimation of an articulated mobile robot with five wheels [J]. *Robot*, 2013, 35(2): 208 – 217.)
- [21] 杨帆, 刘士荣, 仲朝亮, 等. 起伏地形环境中多移动机器人协作运输策略 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(7): 857 – 866.
(YANG Fan, LIU Shirong, ZHONG Chaoliang, et al. Cooperative transport strategy for multiple mobile robots in the environment with undulating terrain [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(7): 857 – 866.)
- [22] NATHAN M, JONATHAN F, VIJAY K. Experimental testbed for large multirobot teams [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2008, 15(1): 53 – 61.

作者简介:

张瑞雷 (1985–), 男, 博士研究生, 研究领域为机器人智能控制、多机器人系统协调控制等, E-mail: zhangrelay@qq.com;

李胜 (1976–), 男, 博士, 副教授, 研究领域为非线性控制系统、欠驱动控制系统等, E-mail: robnust@foxmail.com;

陈庆伟 (1963–), 男, 博士, 教授, 研究领域为智能控制与智能系统、高精度轨迹跟踪系统, E-mail: cqw1002@sina.com;

杨春 (1989–), 男, 博士研究生. 研究领域为机器人导航、机器人路径规划等, E-mail: yangguang326@126.com.