

双参考点切换的多移动机器人队形运动控制方法

沈捷¹, 费树岷², 张兴华¹, 林锦国¹

(1. 南京工业大学 自动化与电气工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为描述机器人队列的运动过程, 从相对位姿的角度定义了多移动机器人的队形模型. 在传统leader-following队形控制的基础上, 引入切换控制思想, 每对领路机器人与跟随机器人之间设计3个控制器, 对应跟随机器人中轴线上两参考点分别设计两个运动子控制器, 控制领路机器人与跟随机器人之间的相对位姿; 切换控制器根据系统处于平衡状态时, 跟随机器人线速度的符号切换运动控制器, 从而保证队列收敛到目标队形. 仿真实验结果表明, 机器人队列表现出良好的整体一致性, 队列运动更加平稳.

关键词: 队形运动控制; 多移动机器人; 切换控制; 位姿

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Formation motion control for multiple mobile robots based on switching control between two reference points

SHEN Jie¹, FEI Shu-min², ZHANG Xing-hua¹, LIN Jin-guo¹

(1. School of Automation and Electrical Engineer, Nanjing University of Technology, Nanjing Jiangsu 210009, China;

2. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: A model of formation is developed by considering the relative position and the orientation between two robots. On the basis of the traditional leader-following schema, the idea of switching control is introduced into the formation control for multiple mobile robots. There are three controllers between the leading robot and the following robots. Two motion sub-controllers, which control the relative position and the orientation between the leading robot and the following robots, are designed corresponding to two reference points on the axis of the following robot chassis. The switching condition of the two sub-controllers is based on the sign of the linear speed of the following robot when the system reaches the state of equilibrium. Therefore, the queue constituted by multiple mobile robots can converge to the desired formation. The results of simulation show that the queue constituted by multiple mobile robots performs the desirable uniform movements, and the formation of the queue is performed smoothly in the course of movement.

Key words: formation motion control; multiple mobile robots; switching control; position and orientation

1 引言(Introduction)

队形协调控制问题是多机器人系统中具有代表性的基本问题之一. 多移动机器人队形的实现可以使得多机器人系统更加有效地完成任务, 已被应用于军事侦察^[1]、空间飞行器控制^[2,3]、合作搬运物体^[4]等领域, 因此控制队列整齐协调地运动已成为研究热点之一^[5,6]. 常用的运动控制方法有两类: 一类是虚拟结构法^[7,8], 主要思想是将机器人队形看成一个刚体的虚拟结构, 每个机器人是这个虚拟结构上相对位置固定的一点, 机器人跟踪刚体对应固定点的运动即可. 该方法的优点是简化了任务的描述和分配, 容易指定机器人群体的行为; 缺点是需要增加定位系统, 属于一种集中控制方法, 可靠性较差.

另一类是基于行为的控制方法^[1,9~13], 将机器人群体行为分解为若干便于实现的子行为以完成复杂任务. 文献[1]将队列整体运动行为分解为向目标运动、避让静态障碍物、避让其它机器人和保持队形等子行为. 机器人个体在运动过程中采取区域控制方式. 这种方法简单方便, 适合实物机器人的控制和演示, 但不利于数学分析, 很难应用于高质量队形运动的场合. 文献[9~13]采用了leader-following方式控制队形, 将机器人群体分解为若干对领路机器人和跟随机器人, 向目标点运动子行为由领路机器人负责, 保持队形子行为由跟随机器人负责. 通过控制两者之间的相对距离和相对角度, 使整个队列收敛到期望队形. 这种方法建立了运动学模型, 根据输入

输出反馈线性化得到指数稳定的控制器, 便于理论分析, 队形的控制精度也较高. 但建立在极坐标中运动学模型存在固有的奇异点问题, 会严重影响系统的性能. 文献[13]在文献[9~11]的基础上, 提出在笛卡儿坐标系中建立运动学模型, 从而成功避免了模型中存在的奇异点问题. 以上文献大多以领路机器人和跟随机器人之间的距离和方位角为参数描述队形. 这种队形描述方式不够严格, 跟随机器人可以正向或反向跟随领路机器人, 从而整个队列的运动显得不够整齐. 领路机器人前进或后退, 可能使系统状态由稳定平衡点转化为不稳定平衡点, 在外界干扰作用下, 跟随机器人的方向会发生剧烈变化, 从而影响整个队列的运动平稳性.

针对以上问题, 本文从相对位姿的角度定义了队列的队形模型, 使队列的运动情况更加清晰. 改变了以往跟随机器人的固定参考点方式, 采用了双参考点切换控制方式, 即跟随机器人在不同情况下, 选择机器人底盘上不同点(中轴线上的前后两点)作为自身的参考点. 基于leader-following方式引入切换控制思想, 对应跟随机器人的两个参考点, 分别设计两个运动子控制器, 控制领路机器人与跟随机器人之间的相对位姿. 切换控制器根据系统处于平衡状态时, 跟随机器人线速度的符号切换运动控制器, 保证队列收敛到目标队形, 使队列运动更加平稳.

2 问题描述与定义(Problem formulation and definition)

多个相互(直接或间接)协调合作的机器人所组成的整体称为机器人队列; 机器人选择参照系以确定自身位姿的方式称为队列的组织方式; 机器人队列根据组织方式所构成的排列结果称为机器人队形.

以往文献大多根据领路机器人和跟随机器人之间的相对位置^[9~13]构建目标队形, 如图1所示, 队列a、b、c被视为同一种队形. 其实队列b的队形是暂时的, 下一个时刻队形必然发生变化, 将队列a、b视为同一种队形仅考虑了队形的静态几何特征, 忽略了队形的动态特点. 队列c中 R_i 和 R_j 运动方向相反, R_j 采取后退方式跟随 R_i (即 $v_j = -v_i$). 对于有前后之分的机器人而言, 这种队形不符合仪仗队排列的习惯, 队列的运动情况显得不够整齐.

鉴于以往队形模型存在的缺点, 本文根据机器人间的相对位姿建立队形模型. 如图1所示, 给定的机器人队列 $R_1, R_2, \dots, R_n$, 记 l_{ij} 为 R_i 与 R_j 之间的相对距离; α_{ij} 为 R_i 位姿的方向与两机器人连线之间的夹角, 它描述了两机器人之间的相对位置方向; θ_i 是 R_i 位姿的方向角; $C_{ij} = (\theta_j - \theta_i) \in$

$[-2\pi, 2\pi)$ 是 R_j 与 R_i 位姿的方向角之差. 以上角度均以逆时针方向为正的原则加以确定, 其中 $i, j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j$.

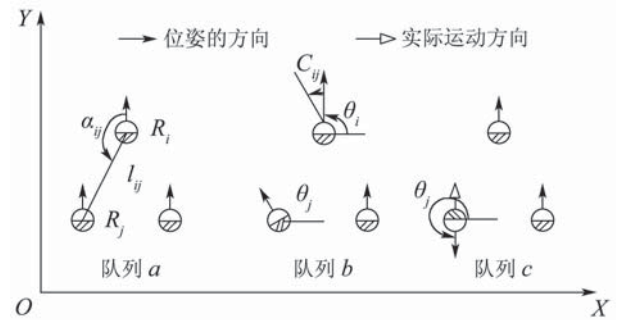


图1 机器人队列的队形

Fig. 1 Formation of robot queue

定义1 给定的机器人队列 $R_1, R_2, \dots, R_n$, 称 $F_B(t) = \{l_{ij}(t), \alpha_{ij}(t), C_{ij}(t) | ij \in B\}$ 为机器人队列 t 时刻的队形模型, 其中 B 为队列的组织方式.

注1 B 为下标集, 例如 $B = \{ij, jk, \dots\}$, ij 表示 R_j 以 R_i 为参照点. 并称 R_i 为 R_j 的领路机器人; R_j 为 R_i 的跟随机器人. 队列的组织方式不是本文研究的重点, 不再赘述.

定义1将机器人之间的相对参数 $l_{ij}, \alpha_{ij}, C_{ij}$ (机器人之间的相对距离、相对位置夹角、相对运动方向)作为队形模型的基本要素. 既考虑了队形的静态几何特征, 又兼顾了队形的动态特点, 细致地区分了队列a、b、c, 符合人们的常识, 避免队形模型不明确所带来的混乱, 为进一步设计和评价队列的控制方法奠定了基础.

本文研究的机器人个体各项参数完全一致, 都属于两轮差速机器人. 如图2所示, 两驱动轮轴线的中心点为 M , 后轮起支撑平衡作用, 机器人中轴线与前端后端的交点为 N, P , $|MN| = d_1, |MP| = d_2$. 字符上标用来区分不同机器人的 M, N, P 点, 如 M^j 表示第 j 个机器人的 M 点. 机器人驱动系统提供其运动所需要的线速度与角速度, 因此设计时其控制变量通常选为 $u = [v, \omega]^T$, 受机器人本身的驱动系统、转动惯量、与地面的摩擦力等因素的影响, u 的取值是受到限制的. 为方便与文献[13]的方法比较, 本文同样假设控制量的取值范围为矩形区域, 即 $|v| \leq v_M, |\omega| \leq \omega_M$, 其中 $v_M, \omega_M > 0$ 由机器人的特性参数决定.

本文所研究的问题并不包括机器人队列的组织方式、避障等经典问题, 只是针对编队运动的队形保持环节, 以定义1所描述的队形模型为基础, 在队列的组织方式不变的前提下, 设计合适的控制器, 使当前队形趋近目标队形, 即 $F_B \rightarrow F_B^*$.

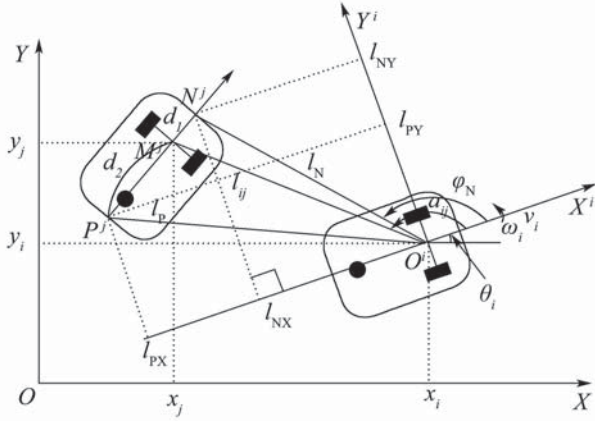


图2 leader-following队形控制示意图

Fig. 2 Leader-following formation control

3 队形控制方法设计(Design of formation control)

3.1 leader-following控制方式(Leader-following control schema)

XOY 是平面全局坐标系, R_i 在平面中的位置由 $M_i(x_i, y_i)$ 点确定, 位姿方向角 θ_i 是水平轴到 $\vec{M_i N_j}$ 的夹角, R_i 的位姿记为 $[x_i, y_i, \theta_i]^T$. $X^i O^i Y^i$ 是建立在 R_i 上的局部坐标系, 它以 M_i 点为坐标原点, $\vec{M_i N_j}$ 为 X^i 轴的正方向. M_i 点与 N_j, P_j 点之间的距离分别记为 l_N, l_P , l_N, l_P 在 X^i, Y^i 轴上的投影记为 $l_{NX}, l_{NY}, l_{PX}, l_{PY}$.

假设领路机器人的运动情况已由上层规划确定. 目标队形 $F_B^* = \{l_{ij}^*, \alpha_{ij}^*, C_{ij}^*\}$ 中 l_{ij}^*, α_{ij}^* 是两机器人 M 点之间的距离和相对位置夹角, 通过三角形边角关系, 很容易将转化为领路机器人 M 点和跟随机器人 N 点之间的距离和相对位置夹角 l_N^*, α_N^* , 队形参数的控制目标可转化为: $l_N \rightarrow l_N^*, \alpha_N \rightarrow \alpha_N^*, C_{ij} \rightarrow C_{ij}^*$. 为避免极坐标系中奇异点的不利影响, 在笛卡尔坐标系中建立运动学方程, 控制目标进一步转化为 $l_{NX} \rightarrow l_{NX}^*, l_{NY} \rightarrow l_{NY}^*, C_{ij} \rightarrow C_{ij}^*$, 下列式子具体推导过程参见文献[13]:

$$\begin{cases} l_{NX} = -(x_i - x_j - d_1 \cos \theta_j) \cos \theta_i - \\ \quad (y_i - y_j - d_1 \sin \theta_j) \sin \theta_i, \\ l_{NY} = (x_i - x_j - d_1 \cos \theta_j) \sin \theta_i - \\ \quad (y_i - y_j - d_1 \sin \theta_j) \cos \theta_i. \end{cases} \quad (1)$$

定义误差变量:

$$\begin{aligned} e_{NX} &= l_{NX}^* - l_{NX}, \\ e_{NY} &= l_{NY}^* - l_{NY}, \\ e_\theta &= C_{ij}^* - C_{ij}, \end{aligned}$$

有

$$(I) \begin{cases} \dot{e}_{NX} = \omega_i e_{NY} - v_j \cos C_{ij} + \omega_j d_1 \sin C_{ij} - \\ \quad \omega_i l_{NY}^* + v_i, \\ \dot{e}_{NY} = -\omega_i e_{NX} - v_j \sin C_{ij} - \\ \quad \omega_j d_1 \cos C_{ij} + \omega_i l_{NX}^*, \\ \dot{e}_\theta = \omega_i - \omega_j. \end{cases} \quad (2)$$

设计控制器使 e_{NX}, e_{NY} 指数收敛, 即

$$\begin{aligned} \dot{e}_{NX} &= -k_1 e_{NX}, \\ \dot{e}_{NY} &= -k_2 e_{NY}, \end{aligned}$$

其中 $k_1, k_2 > 0$, 可推得:

$$v_j = (k_1 e_{NX} + \omega_i e_{NY} - \omega_i l_{NY}^* + v_i) \cos C_{ij} - (-k_2 e_{NY} + \omega_i e_{NX} - \omega_i l_{NX}^*) \sin C_{ij}. \quad (3)$$

$$\omega_j = [(-k_1 e_{NX} - \omega_i e_{NY} + \omega_i l_{NY}^* - v_i) \sin C_{ij} - (-k_2 e_{NY} + \omega_i e_{NX} - \omega_i l_{NX}^*) \cos C_{ij}] / d_1. \quad (4)$$

3.2 运动稳定性分析(Stability analysis of motion)

本节讨论固定参考点方式下(领路机器人的参考点为 M , 跟随机器人的参考点始终为 N), 系统(I)处于平衡状态(队列稳定运动)时, 跟随机器人的运动特点. 将式(3)(4)代入式(2), 系统(I)简化为

$$\dot{e} = [-k_1 e_{NX} \quad -k_2 e_{NY} \quad f]^T,$$

其中: $e = [e_{NX} \quad e_{NY} \quad e_\theta]^T, f = \omega_i - \omega_j$. 将系统(I)局部线性化得

$$\dot{e} = A e, A = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & 0 \\ * & * & \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \end{bmatrix}_{e=e_0},$$

其中 e_0 是系统的平衡点 $[0 \ 0 \ 0]^T$ 或 $[0 \ 0 \ \pi]^T$. 下面将根据领路机器人的运动状态, 分直线和曲线两种运动情况加以讨论.

1) 直线运动. $\omega_i = 0$. $\left. \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \right|_{e=e_0} = -v_i \cos(C_{ij}^* - e_\theta) / d_1$, 一般情况下 $C_{ij}^* = 0$, 领路机器人前进时 $v_i > 0$, 显然 $e_\theta = 0$ 时 $\frac{\partial f}{\partial e_\theta} < 0$, 说明 $[0 \ 0 \ 0]^T$ 为稳定平衡点; 反之 $e_\theta = \pi$ 时 $\frac{\partial f}{\partial e_\theta} > 0$, 说明 $[0 \ 0 \ \pi]^T$ 为不稳定平衡点. 队形参数收敛到期望队形, 要求系统状态收敛到 $[0 \ 0 \ 0]^T$. 队列稳定运动时, 跟随机器人的线速度记为 $\tilde{v}_j$, 因为 $\tilde{v}_j = v_i \cos C_{ij}^*$, 所以 $\left. \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \right|_{e=[0 \ 0 \ 0]^T} = -\tilde{v}_j / d_1$, 说明 $\frac{\partial f}{\partial e_\theta}$ 的符号由 $\tilde{v}_j$ 的符号决定.

2) 曲线运动. $\omega_i \neq 0$. 假设 $\Delta t \rightarrow 0$ 时段内时段内, v, ω 恒定不变, 此时机器人按同心圆运动,

$v_i = \omega_i r_i$, $|r_i|$ 是圆周运动的半径. 如图3所示, $l_M = |M_i M_j|$ 在 X_i, Y_i 轴上的投影记为 l_{MX}, l_{MY} , $|M_j N_j| = d_1$, $|M_i N_j| = l_N$.

$$\left. \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \right|_{e=e_0} = \frac{1}{d_1} [(\omega_i l_{NY}^* - v_i) \cos C_{ij} - \omega_i l_{NX}^* \sin C_{ij}]. \quad (5)$$

将

$$l_{MX}^* = l_{NX}^* - d_1 \cos C_{ij}^*, l_{MY}^* = l_{NY}^* - d_1 \sin C_{ij}^*$$

代入式(5), 当 $e_\theta = 0$ 时

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \right|_{e=[0 \ 0 \ 0]^T} &= \\ \frac{1}{d_1} [-v_i \cos C_{ij}^* + \omega_i (l_{MY}^* \cos C_{ij}^* - l_{MX}^* \sin C_{ij}^*)] &= \\ \frac{\omega_i}{d_1} (-r_i \cos C_{ij}^* + |AM_j|) = -\frac{\omega_i}{d_1} r_j. \end{aligned} \quad (6)$$

队列稳定运动时, $\omega_i = \omega_j$, 因此 $\left. \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \right|_{e=[0 \ 0 \ 0]^T}$ 的符号由 $\tilde{v}_j$ 的符号决定. 当 $e_\theta = \pi$ 时, $\left. \frac{\partial f}{\partial e_\theta} \right|_{e=[0 \ 0 \ \pi]^T} = \frac{\omega_i}{d_1} r_j$, 与 $e_\theta = 0$ 时的情况正好相反.

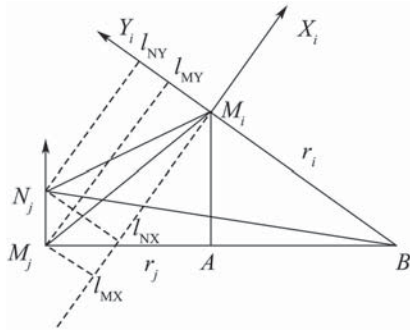


图3 两机器人之间距离示意图

Fig. 3 Distance between two robots

由此可见, 如果目标状态 $e = [0 \ 0 \ 0]^T$ 恰巧对应于不稳定平衡点, 目标队形可能无法达到. 随着队列运动变化, 目标状态可能对应不稳定平衡点或稳定平衡点, 并反复转换, 使得队形参数发生波动.

3.3 切换控制器设计(Design of switching controller)

为避免固定参考点方式存在的缺点, 在不同时刻以跟随机器人中轴线上 N 或 P 点为参考点, 分别设计运动子控制器, 即双参考点控制方式. 系统处于平衡状态时, 跟随机器人的线速度记为 $\tilde{v}_j$. 根据(3)可得

$$\tilde{v}_j = v_i \cos C_{ij}^* + \omega_i l_{ij}^* \sin(C_{ij}^* - \alpha_{ij}^*). \quad (7)$$

当 $\tilde{v}_j > 0$ 时, R_j 以 N_j 点为参考点并设计子控制器 I, $u_{j1} = [v_{j1} \ \omega_{j1}]^T$, 其中:

$$\begin{aligned} v_{j1} &= (k_1 e_{NX} + \omega_i e_{NY} - \omega_i l_{NY}^* + v_i) \cos C_{ij} - \\ &\quad (-k_2 e_{NY} + \omega_i e_{NX} - \omega_i l_{NX}^*) \sin C_{ij}, \\ \omega_{j1} &= [(-k_1 e_{NX} - \omega_i e_{NY} + \omega_i l_{NY}^* - v_i) \sin C_{ij} - \\ &\quad (-k_2 e_{NY} + \omega_i e_{NX} - \omega_i l_{NX}^*) \cos C_{ij}] / d_1. \end{aligned}$$

当 $\tilde{v}_j < 0$ 时, R_j 以 P_j 点为参考点并设计子控制器 II, $u_{j2} = [v_{j2} \ \omega_{j2}]^T$, 其中:

$$\begin{aligned} v_{j2} &= (k_1 e_{PX} + \omega_i e_{PY} - \omega_i l_{PY}^* + v_i) \cos C_{ij} - \\ &\quad (-k_2 e_{PY} + \omega_i e_{PX} - \omega_i l_{PX}^*) \sin C_{ij}, \\ \omega_{j2} &= [(k_1 e_{PX} + \omega_i e_{PY} - \omega_i l_{PY}^* + v_i) \sin C_{ij} + \\ &\quad (-k_2 e_{PY} + \omega_i e_{PX} - \omega_i l_{PX}^*) \cos C_{ij}] / d_2. \end{aligned}$$

其中 $k_1, k_2 > 0$. 当 $\tilde{v}_j < 0$ 时, 必然有 $v_i = 0, \omega_i = 0$, 队列处于静止状态, 不属于本文运动控制考虑的范畴. 最后, 为防止系统状态驻留在不稳定平衡点 $\hat{e}$ 上, 可额外施加一控制量(相当于干扰), 促使系统状态偏离不稳定平衡点. 综上所述, 切换控制器有如下形式:

$$u_j = \begin{cases} u_{j1} + \Delta u, & \tilde{v}_j > 0, \\ u_{j2} + \Delta u, & \tilde{v}_j < 0. \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\Delta u = \begin{cases} [v_M \ \omega_M]^T, & e = \hat{e}, \\ 0, & \text{其他}. \end{cases}$$

4 仿真研究(Simulation)

仿真实验的机器人队列中包含3个机器人. R_1 为领路机器人, R_2, R_3 为跟随机器人. 参数设置如下:

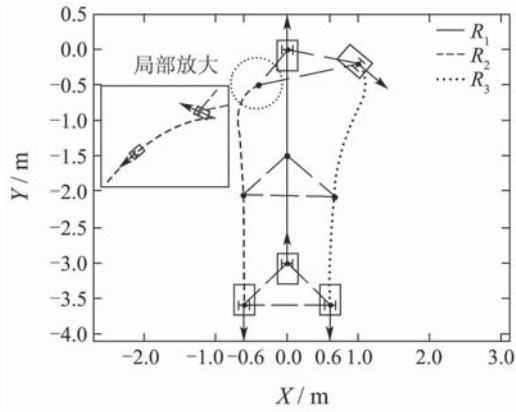
$$\begin{aligned} v_M &= 1 \text{ m/s}, \omega_M = 0.5\pi \text{ rad/s}, \\ d_1 &= 0.1, d_2 = 0.2, k_1 = k_2 = 1.5. \end{aligned}$$

R_1, R_2, R_3 的初始位姿分别是 $[0 \ 0 \ \pi/2]^T, [-0.4 \ -0.5 \ 5\pi/6]^T, [1 \ -0.2 \ 7\pi/4]^T$. 采用固定参考点(FRP)方式和双参考点(DRP)方式分别控制队列, 以 R_1, R_2 之间的队形参数为例, 比较两种控制方法的不同之处.

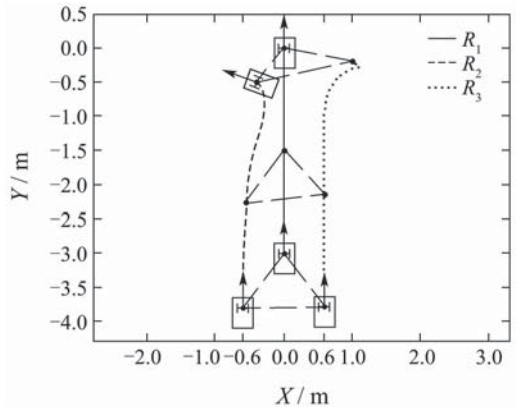
实验1 目标队形

$$\begin{aligned} F_B^* &= \{(l_{12}^*, \alpha_{12}^*, C_{12}^*), (l_{13}^*, \alpha_{13}^*, C_{13}^*)\} = \\ &\quad \{(1, 2.5, 0), (1, -2.5, 0)\}. \end{aligned}$$

R_1 以 $v_1 = -0.5 \text{ m/s}$, $\omega_1 = 0 \text{ rad/s}$ 的速度带领队列直线后退, 采用固定参考点方式, 队列的运动轨迹如图4(a)所示. R_1, R_2 之间的队形参数收敛为 $(0.85, 2.36, -\pi)$, 未能收敛到目标队形. 在同样的条件下, 采用双参考点方式, 容易验证 $\tilde{v}_j < 0$, 跟随机器人以 P 点为参考点, 队列的运动轨迹如图4(b)所示. R_1, R_2 间的队形参数收敛为 $(1.00, 2.50, 0.00)$, 收敛到目标队形. 跟随机器人运动中调整方向与领路机器人一致, 队列运动的效果更整齐.



(a) 队列运动轨迹(FRP)



(b) 队列运动轨迹(DRP)

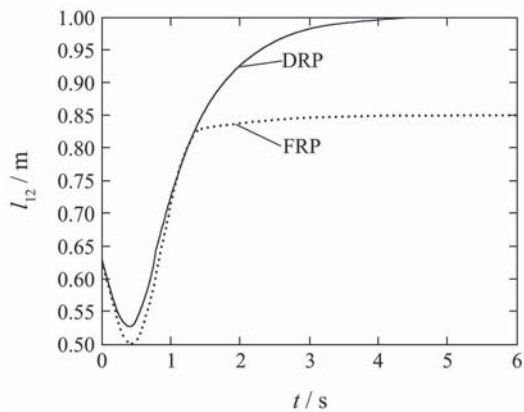
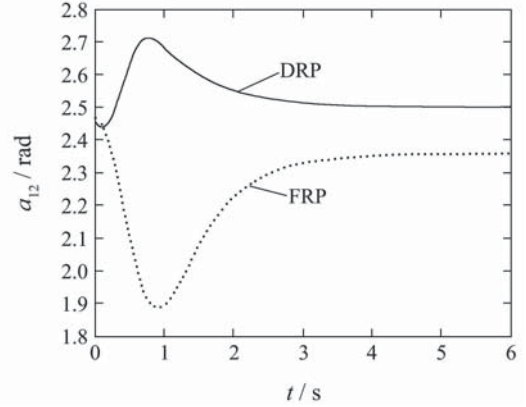
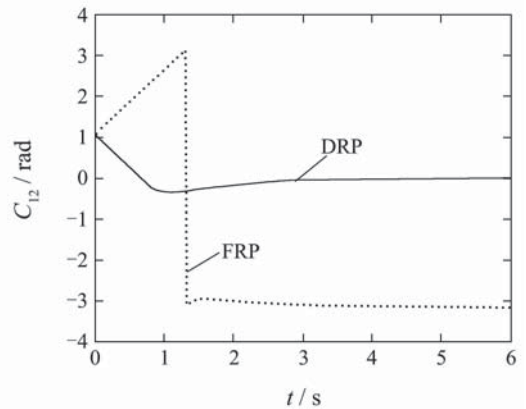
(c) 队形参数 l_{12} 的比较(d) 队形参数 α_{12} 的比较(e) 队形参数 C_{12} 的比较

图4 队列运动和队形参数仿真结果

Fig. 4 Simulation result about movement of robot queue and formation parameters

实验2 将曲线运动与直线运动结合起来, 分为两个阶段, 前阶段目标队形

$$F_B^* = \{(l_{12}^*, \alpha_{12}^*, C_{12}^*), (l_{13}^*, \alpha_{13}^*, C_{13}^*)\} = \{(1, 2.89, 0.51), (0.79, -2.23, 0.51)\},$$

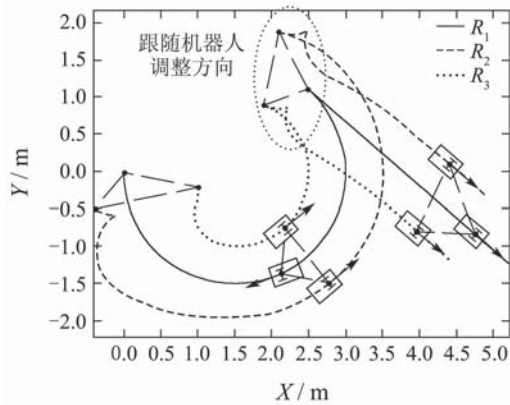
R_1 以 $v_1 = -0.6 \text{ m/s}$, $\omega_1 = 0.4 \text{ rad/s}$, 带领队列运动10 s; 后阶段目标队形

$$F_B^* = \{(l_{12}^*, \alpha_{12}^*, C_{12}^*), (l_{13}^*, \alpha_{13}^*, C_{13}^*)\} = \{(1, 2.64, 0), (0.79, -2.48, 0)\},$$

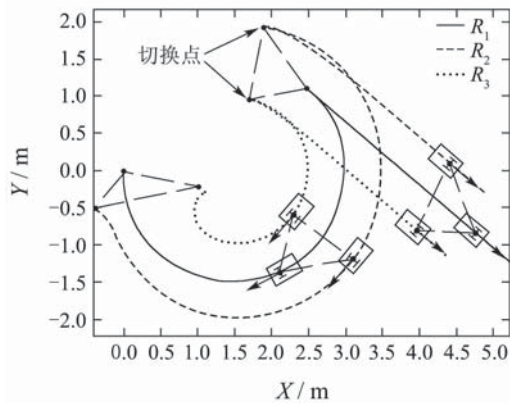
R_1 以 $v_1 = 0.6 \text{ m/s}$, $\omega_1 = 0 \text{ rad/s}$ 运动6 s, 为便于分析, 不考虑加速度的影响.

固定参考点方式下队列的运动轨迹如图5(a)所示. 前阶段 R_1, R_2 之间的队形参数逐渐收敛为 $(0.85, 2.74, -2.74)$, 未能收敛到目标队形; 后阶段队形稳定时, 系统正好处于稳定平衡点, R_1, R_2 之间的队形参数收敛为 $(1.00, 2.64, 0.00)$, 与目标队形一致. 在同样的条件下, 采用双参考点方式, 前阶段由于 $\tilde{v}_j < 0$, 以 P 点为参考点, 控制器II工作; 后阶段 $\tilde{v}_j$

< 0 , 以 N 点为参考点, 同时切换到控制器I, 队列运动轨迹如图5(b)所示. 两阶段 R_1, R_2 之间的队形参数分别收敛为 $(1.00, 2.89, 0.51), (1.00, 2.64, 0.00)$, 与各阶段的目标队形相符. 仿真结果说明双参考点方式存在明显优势, 特别在 $10 \sim 13$ s之间, 由于切换了参考点, l_{12} 基本无变化, 而固定参考点方式下 l_{12} 变化较剧烈.



(a) 队列运动轨迹(FRP)



(b) 队列运动轨迹(DRP)

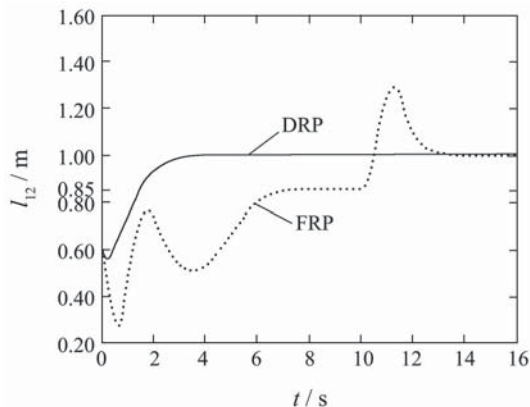
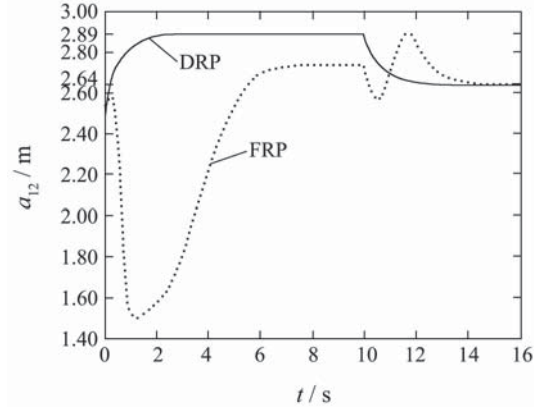
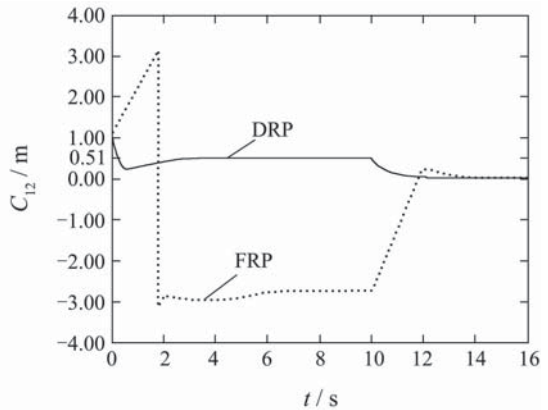
(c) 队形参数 l_{12} 的比较(d) 队形参数 α_{12} 的比较(e) 队形参数 C_{12} 的比较

图5 队列运动和队形参数仿真结果

Fig. 5 Simulation result about movement of robot queue and formation parameters

5 结论(Conclusion)

以往队形描述相对简单, 跟随机器人采用固定参照点的控制方式, 导致队形参数变化较大, 运动效果稍显杂乱. 本文从相对位姿的角度定义了多移动机器人的队形模型, 在此基础上, 跟随机器人在不同时刻选择中轴线上的前后两点作为参考点, 对应设计运动子控制器. 根据目标队形计算跟随机器人的线速度, 根据该速度的符号切换运动子控制器, 保证队列收敛到目标队形. 本质上这是一种基于leader-following方式的切换控制方法, 该方法很容易推广到多个领路机器人的情况. 最后, 为了使机器人队列表现出更好的整体性, 不仅需要研究队形的控制方法, 合理调整领路机器人的线速度和角速度也是保持队形的重要环节, 需要进一步探讨.

参考文献(References):

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

- [2] BEARD R W, LAWTON J, HADAEGH F Y. A coordination architecture for spacecraft formation control[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2001, 9(6): 777 – 790.
- [3] ACIKMESE B, HADAEGH F Y, SCHARF D P. Formulation and analysis of stability for spacecraft formations[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 461 – 474.
- [4] GROSS R, BONANI M, MONDADA F. Autonomous self-assembly in swarm-bots[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, 22(6): 1115 – 1130.
- [5] CHEN Y Q, WANG Z M. Formation control: a review and a new consideration[C] // *Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway: IEEE, 2005: 3181 – 3186.
- [6] 任德华, 卢桂章. 对队形控制的思考[J]. *控制与决策*, 2005, 20(6): 601 – 606.
(REN Dehua, LU Guizhang. Thinking in formation control[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(6): 601 – 606.)
- [7] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structure[J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387 – 403.
- [8] XIN M, BALAKRISHNAN S N, PERNICKA H J. Multiple spacecraft formation control with θ -D method[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 485 – 493.
- [9] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Controlling formations of multiple mobile robots[C] // *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 2864 – 2869.
- [10] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(6): 905 – 908.
- [11] FIERRO R, DAS A K, KUMAR V. Hybrid control of formation of robots[C] // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Seoul, Korea: IEEE, 2001: 157 – 162.
- [12] SHAO J, XIE G, WANG L. Leader-following formation control of multiple mobile vehicles[J]. *IET Control Theory & Applications*, 2007, 1(2): 545 – 552.
- [13] LI X H, XIAO J Z, TAN J D. Modeling and controller design for multiple mobile robots formation control[C] // *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Shenyang, China: IEEE, 2004: 838 – 843.

作者简介:

沈捷 (1976—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为多机器人规划与控制、混杂(切换)系统控制与设计, E-mail: shenjienj@163.com;

费树岷 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性控制、机器人控制, E-mail: smfei@seu.edu.cn;

张兴华 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高性能交流电机控制、非线性解耦控制, E-mail: zxhnjut@163.com;

林锦国 (1957—), 男, 教授, 研究方向为机器人视觉与智能检测、系统演化理论与应用, E-mail: zdhljg@163.com.