

一种基于局部感知的多机器人动态跟随方法

杨丽^{1,2} 曹志强¹ 张文文¹ 周超¹ 谭民¹

摘要 主要研究了未知环境中的多机器人系统的无碰协调跟随问题, 提出了一种跟随机器人的基于局部感知的多模式控制方法, 分为到达、旋转角度调整、跟随、避障和随机搜索五种模式, 其中跟随模式采用模糊距离调整与角度调整策略实现对领航机器人的跟随并尽量与之保持一定的距离, 当需要避障时, 切线约束的避障策略使得自主机器人安全躲避潜在的危险. 该方法降低了多机器人系统对通讯的依赖性, 易于扩展, 通过实验对有效性进行了验证.

关键词 多机器人, 动态跟随, 局部感知, 多模式控制

DOI 10.3724/SP.J.1004.2010.00101

A Multi-robot Dynamic Following Approach Based on Local Sensing

YANG Li^{1,2} CAO Zhi-Qiang¹ ZHANG Wen-Wen¹ ZHOU Chao¹ TAN Min¹

Abstract This paper mainly focuses on cooperative dynamic following problem of multi-robot system in unknown environments. A multi-mode control approach based on local sensing is proposed, which includes five modes: arrival, rotating-angle, following, avoiding-obstacle and random-search modes. In the following mode, fuzzy distance adjustment and angle adjustment strategies are adopted to control the robot to follow its leader and keep a predefined distance from it. An obstacle avoidance strategy based on tangent restriction is given to prevent the robot from possible collisions. The proposed approach may reduce the dependence on communication with good expansibility and the experiment results verify its effectiveness.

Key words Multi-robot, dynamic following, local sensing, multi-mode control

近年来, 多机器人的协调与控制引起机器人研究学者的广泛兴趣与关注, 多机器人通过协调可以完成单机器人难以完成的复杂任务, 即使在多机器人工作环境突然发生变化甚至部分机器人出现故障等情况下, 系统仍然可能会继续执行预定的任务. 作为多机器人系统有代表性的研究内容之一, 动态跟随在军事、搜索、救援、安保等应用场合具有广泛的应用前景.

广义上, 多机器人动态跟随问题可描述为机器人与其他机器人或指定目标甚至敌方目标相对位姿(固定或动态调整)的控制, 涉及目标追踪、编队、跟随等问题. 很多学者开展了目标追踪的研究^[1-4], 采用了诸如模糊逻辑控制、人工势场法、概率方法等方法. 文献 [5] 设计了一种双回路的单移动机器人运动目标追踪与避障控制方案, 内层回路是目标追

踪算法, 外层回路根据超声传感器的信息对目标进行调整, 实现机器人在追踪目标的过程中避障. 文献 [6] 提出了一种基于全向视觉的多机器人系统编队控制方法, 将编队控制问题分解为每个机器人与指定的领航机器人之间相对位姿的 $l-\psi$ 控制或者是其与指定的两个领航机器人之间的 $l-l$ 控制, 依据输入输出反馈线性化方法, 控制机器人运动实现编队. 文献 [7] 研究了分布式多机器人利用局部感知及少量的通讯信息建立并保持多机器人之间相对位姿的方法. 每个机器人装有激光和视觉传感器, 通过与邻机器人保持指定的位姿关系从而呈现出系统的全局协调行为. 文献 [8] 提出了一种基于虚拟结构的多机器人协调方法, 将多机器人组成的团队看作是一个刚体的虚拟结构, 每个机器人是虚拟结构上相对位置固定的一点.

本文考虑局部感知的多个机器人固定相对位姿(相对距离和观测方位角)的动态跟随控制. 机器人通过感知可以获取相对于另一个机器人的距离和观测方位角; 通过超声传感器可以获取周围环境的障碍情况. 为实现未知环境中的动态跟随, 可将多机器人系统分解为 $N-1$ 组两个机器人的跟随控制, 其中 N 为多机器人系统的个数. 同组的两个机器人角色可以分为跟随和领航. 除引领整个系统运动的唯一的领航者不存在领航机器人外, 其他机器人均事先指定相应的领航机器人, 使其符合“跟随-领航”

收稿日期 2008-10-09 录用日期 2009-03-10
Manuscript received October 9, 2008; accepted March 10, 2009
国家自然科学基金(60805038, 60725309), 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2006AA04Z258) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China(60805038, 60725309) and National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2006AA04Z258)
1. 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室 北京 100190 2. 天津师范学院自动化与电气工程学院 天津 300222
1. Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222

角色关系. 跟随机器人力求保持与领航机器人的指定相对信息以实现协调, 同时还要躲避行进过程中可能出现的障碍. 从整个系统的角度, 动态协调跟随得以实现. 本文提出的基于局部感知的多模式控制方法, 不需要机器人之间信息交换, 系统扩展性较强. 受环境复杂性以及传感器限制, 所提方法适用于地面较平滑、光照相对均匀以及环境障碍物适度的场合.

1 机器人感知

1.1 视觉感知

机器人视觉系统采用三个摄像机 $S_v(i)$ ($i = 1, 2, 3$), 从机器人中心到这三个摄像机光心的连线方向分别与各自的光轴方向相一致, 且分别与机器人当前运动方向右转 $\pi/2$ 方向、当前运动方向、当前运动方向左转 $\pi/2$ 方向相一致. 跟随机器人通过视觉识别领航机器人上的色标筒实现身份确认, 结合视觉标定, 进而获取估算的相对定位信息. 令 (d, θ) 为相对于领航机器人的距离和观测方位角.

定义 (u, v) 是图像坐标系上一点, (x, y, z) 是其在世界坐标系 w 上的坐标, 有

$$z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 M 是摄像机的内参数矩阵, 由摄像机标定得到.

记 (u_1, v_1) 和 (u_2, v_2) 分别为色标筒顶端和底端的点, (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 是它们在世界坐标系 w 上的坐标, $u_1 = u_2, z_1 = z_2, y_2 - y_1$ 是色标筒的实际高度, 则 d 可近似计算如下:

$$d = z_1 + d_c = z_2 + d_c = \frac{\alpha_y(y_2 - y_1)}{v_2 - v_1} + d_c \quad (2)$$

式中 α_y 由 M 得到, $v_2 - v_1$ 是色标筒在图像中的像素高度差, d_c 是摄像机与机器人中心之间的距离.

记 (u_T, v_T) 是色标筒的中心, u_d, θ_v 分别为图像的宽度和视野的宽度, 则 θ 近似计算如下:

$$\theta = - \left[\arctan \left(\frac{2u_T}{u_d} \cdot \tan \left(\frac{\theta_v}{2} \right) \right) + (i - 2) \cdot \frac{\pi}{2} \right], \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

考虑到视觉扰动和视野等影响, 跟随机器人在看不见领航机器人的情况下可能需要根据码盘和历史信息对领航机器人位置进行估计. 令 (d', θ') 表示

上一个周期的视觉信息或估计信息, D_l, D_r 分别表示上一周期左右轮行驶的距离, 则

$$\alpha' = \frac{D_r - D_l}{l_w} \quad (4)$$

$$D' = \frac{D_l + D_r}{2} \quad (5)$$

其中, l_w 表示机器人两驱动轮中心之间的距离, α' 表示上一周期的机器人转角, D' 为上一周期机器人中心行驶的距离.

当跟随机器人直行时, (d, θ) 估算如下:

$$\begin{cases} d = \sqrt{(d')^2 + (D')^2 - 2d'D' \cos(\theta')} \\ \theta = \theta' + \arcsin \left(\frac{D'}{d} \sin \theta' \right) \end{cases} \quad (6)$$

若跟随机器人做圆弧运动, 有

$$\begin{cases} d = \sqrt{(d')^2 + (D')^2 - 2d'D' \cos \left(\theta' + \frac{\alpha'}{2} \right)} \\ \theta = \theta' + \alpha' \end{cases} \quad (7)$$

1.2 超声传感器感知

移动机器人上安装超声传感器环 (见图 1), 传感器均匀分布在机器人上以获取周围环境的信息, 从机器人的正后方开始, 超声传感器按顺时针依次编号分别为 S_k ($k = 1, \dots, N$). 超声传感器 S_1 的探测范围是 $[-\pi, -\pi + \pi/N] \cup [\pi - \pi/N, \pi]$, 超声传感器 S_k ($k = 2, \dots, N$) 的探测范围是 $[-\pi + (2k - 3)\pi/N, -\pi + (2k - 1)\pi/N]$. 在该范围内探测到相关障碍 (包括环境障碍和其他机器人) 的距离为 ρ_s^k , 如果 S_k ($k = 1, \dots, N$) 没有探测到障碍, 记 $\rho_s^k = s_{\max}$, 否则 $\rho_s^k < s_{\max}$, 其中 s_{\max} 为超声传感器的最大测距范围.

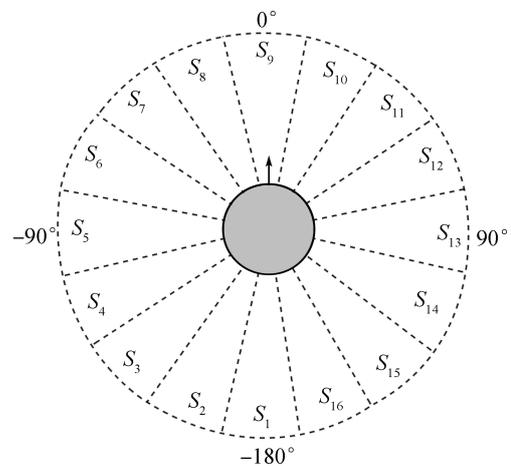


图 1 超声传感器分布 ($N = 16$)

Fig. 1 The layout of the sonar sensors ($N = 16$)

将超声传感器分为两组, $[-\pi + (N/4 + 1)\pi/N, -\pi + (\frac{7}{4}N - 1)\pi/N]$ 范围内的传感器 $\{S_{\frac{N}{8}+2}, S_{\frac{7}{8}N}\}$ 称为前方传感器组, $[-\pi, -\pi + (N/4 + 1)\pi/N] \cup [-\pi + (\frac{7}{4}N - 1)\pi/N, \pi]$ 范围内的称为后方传感器组. 基于前方传感器组获取机器人到障碍物的最小距离 $\min_{k \in (\frac{N}{8}+2, \frac{7}{8}N)}(\rho_s^k)$, 定义安全区 ($\min_{k \in (\frac{N}{8}+2, \frac{7}{8}N)}(\rho_s^k) > \rho_0$) 和避障区 ($\min_{k \in (\frac{N}{8}+2, \frac{7}{8}N)}(\rho_s^k) \leq \rho_0$), 其中 ρ_0 为一常数.

2 多机器人动态协调跟随方法

2.1 基于局部感知的多模式控制

要实现多机器人在未知环境中的动态跟随, 一方面, 跟随机器人应当跟随相应的领航机器人并保持一定的距离, 另一方面, 跟随过程应该无碰, 安全躲避可能遇到的障碍物. 本文提出了一种多模式控制方法, 共有五种模式.

到达模式 (AMode): 安全区内, 跟随机器人到达期望区域, 若此时看见领航机器人, 它停止运动, 若此时采用的是领航机器人的预测信息, 停止运动指定的 t_{c1} 个周期后放弃预测. 该模式用布尔变量 S_{AMode} 表征, $S_{AMode} = 1$ 表示此模式被激活.

旋转角度调整模式 (RAMode): 当跟随机器人满足 $\min_{k \in (1, N)}(\rho_s^k) \leq \rho_0$, 且与领航机器人之间的距离在一定范围内时, 采取原地注视的策略, 即跟随机器人按照与跟随模式相同的角度策略调整, 当角度调整到合适的范围, 若此时看见领航机器人则停止运动, 若此时采用的是领航机器人的预测信息, 停止运动指定的 t_{c1} 个周期后放弃预测. 该模式下, 当对领航机器人的实测观测方位角较大时, 旋转过程可能会丢失领航机器人的踪迹, 考虑到领航机器人的预测信息不够精确, 在刚丢失领航机器人踪迹的指定 t_{c2} 个周期内朝着领航机器人丢失的方向原地旋转. 该模式用布尔变量 S_{RAMode} 表征, $S_{RAMode} = 1$ 表示此模式被激活.

跟随模式 (FMode): 安全区内, 当 $S_{AMode} = S_{RAMode} = 0$ 且能获取领航机器人的信息时, 机器人通过模糊距离调整与角度调整策略 (详见第 2.2 节) 实现对领航机器人的跟随并保持一定的距离. 该模式用布尔变量 S_{FMode} 表征, $S_{FMode} = 1$ 表示此模式被激活.

避障模式 (AOMode): 避障区内, 当 $S_{RAMode} = 0$ 时, 机器人按照切线约束的避障策略 (详见第 2.3 节) 躲避可能碰到的障碍物. 该模式用布尔变量 S_{AOMode} 表征, $S_{AOMode} = 1$ 表示此模式被激活.

随机搜索模式 (RSMode): 安全区内, 当跟随机器人看不到领航机器人又缺少相关预测信息时, 它原地旋转搜索领航机器人, 若无效果, 则随机运动搜

索. 该模式用布尔变量 S_{RSMode} 表征, $S_{RSMode} = 1$ 表示此模式被激活.

上述各个模式的选择机制可用事件描述如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{AMode} \quad S_{AMode} = (C_1 \cup (C_2 \cap C_9)) \cap \\ \quad C_3 \cap (C_6 \cup C_7) = 1 \\ \text{RAMode} \quad S_{RAMode} = ((C_1 \cap C_5) \cup (C_2 \cap \bar{C}_{10} \cap \\ \quad (\bar{C}_8 \cup C_9) \cap C_5) \cup (C_2 \cap C_{10})) \cap \\ \quad ((C_{11} \cap \bar{S}_{AMode}) \cup C_4) = 1 \\ \text{FMode} \quad S_{FMode} = (C_1 \cup C_2) \cap C_3 \cap \\ \quad \bar{S}_{AMode} \cap \bar{S}_{RAMode} = 1 \\ \text{AOMode} \quad S_{AOMode} = C_4 \cap \bar{S}_{RAMode} = 1 \\ \text{RSMode} \quad S_{RSMode} = (\bar{C}_1 \cup \bar{C}_2) \cap C_3 = 1 \end{array} \right. \quad (8)$$

其中, 布尔变量 C_i ($i = 1, \dots, 11$) ($C_i = 1$ 表示事件发生) 具体含义如下所述:

C_1 : 跟随机器人能直接通过视觉系统识别并获得领航机器人的信息;

C_2 : 跟随机器人预测领航机器人;

C_3 : $\min_{k \in (\frac{N}{8}+2, \frac{7}{8}N)}(\rho_s^k) > \rho_0$;

C_4 : $\min_{k \in (\frac{N}{8}+2, \frac{7}{8}N)}(\rho_s^k) \leq \rho_0$;

C_5 : 领航机器人相对于跟随机器人的期望距离 d_p 与实际距离 d 之差满足 $d_p - d \geq d_{c1}$ 其中 d_{c1} 为常数;

C_6 : d_p 与 d 的偏差满足 $|d_p - d| \leq d_{c2}$, 且期望观测方位角 θ_p 和观测方位角 θ 的偏差满足 $|\theta_p - \theta| \leq \alpha_{c1}$, 其中 d_{c2} 和 α_{c1} 为常数;

C_7 : d_p 与 d 的偏差满足 $|d_p - d| \leq d_{c2}$, 且 θ_p 和 θ 的偏差由 $|\theta_p - \theta| \leq \alpha_{c1}$ 过渡到 $\alpha_{c1} < |\theta_p - \theta| \leq \alpha_{c2}$, 其中 α_{c2} 为常数;

C_8 : 跟随机器人停止运动;

C_9 : 跟随机器人停止运动后 t_{c1} 个周期内;

C_{10} : 刚丢失领航机器人踪迹的 t_{c2} 个周期内, 且最后一次对领航机器人的实测距离满足 $d_p - d \geq d_{c1}$, 实测观测方位角满足 $|\theta| > \theta_c$, 其中 θ_c 为常数;

C_{11} : $\min_{k \in (1, \frac{N}{8}+1)}(\rho_s^k) \leq \rho_0 \parallel \min_{k \in (\frac{7}{8}N+1, N)}(\rho_s^k) \leq \rho_0$.

2.2 模糊距离调整与角度调整策略

本策略依据 d, θ (通过视觉测量得出或者通过码盘和历史信息估计得出), 控制跟随机器人运动使得 $d \rightarrow d_p, \theta \rightarrow \theta_p$, 其中 d_p, θ_p 分别是跟随机器人和领航机器人之间的期望距离和观测方位角. 采用模糊控制建立距离 d 与机器人速度大小 v_f 之间的关联, 通过双输入单输出模糊控制器进行实现^[9]; 根据跟随机器人与领航机器人的期望观测方位角 θ_p 与观测方位角 θ 之差 $e_\theta = \theta_p - \theta$, 采用比例控制器

$u_\theta = k_\theta e_\theta$ 控制机器人的速度方向. 为了增强稳定性及快速收敛, 做如下改进: 当 $|e_\theta| \leq \alpha_{c1}$ 时即认为机器人方向合适, 而后只有满足 $|e_\theta| > \alpha_{c2}$ 时才需要进行方向调整.

2.3 切线约束的避障策略

如果机器人需要避障, 它会分析周围环境的状况, 产生一系列不可通行区域, 通过去掉这一系列可能与障碍物发生碰撞的运动方向集合, 再结合一定的评价函数挑选出合适的方向实现动态未知环境中机器人的无碰跟随运动, 具体步骤如下所述:

步骤 1. 根据获取的前方传感器组信息, 计算超声所对应的不可通行区域.

对于超声传感器 $S_k (k = N/8 + 2, \dots, 7N/8)$, 若 $\rho_s^k > \rho_0$, 不可通行区域 Ψ_s^k 为 \emptyset ; 若 $\rho_s^k \leq \rho_0$, 以图 2 所示机器人环境为例, 构建 S_k 相应的不可通行区域 Ψ_s^k . 图 2 中, S_k 探测到环境中的障碍物 O_{ob1} , S_k 的探测范围是 $\overrightarrow{O_i P_{k1}}$ 和 $\overrightarrow{O_i P_{k2}}$ 之间的区域, 即 $\alpha = 2\pi/N$. 机器人的半径是 r , 在 S_k 的可探测范围边界点分别做与机器人相切的切线得到 $P_{k1}P_{k4}$ 、 $P_{k2}P_{k3}$, 切点分别为 P_{k4} 、 P_{k3} , 做 $\overrightarrow{O_i P_{k5}} \parallel \overrightarrow{P_{k4}P_{k1}}$ 、 $\overrightarrow{O_i P_{k6}} \parallel \overrightarrow{P_{k3}P_{k2}}$, $|\overrightarrow{O_i P_{k1}}| = |\overrightarrow{O_i P_{k2}}| = \rho_s^k + r$. 这里依据切线法确定不可通行区域. 由直角三角形 $O_i P_{k1} P_{k4}$, $\beta_1 = \arcsin(|\overrightarrow{O_i P_{k4}}|/|\overrightarrow{O_i P_{k1}}|) = \arcsin(r/(\rho_s^k + r))$, 同理可得 $\beta_2 = \beta_1 = \arcsin \frac{r}{\rho_s^k + r}$, 于是不可通行区域为 $[-\pi + (2k - 3)\pi/N - \beta_1, -\pi + (2k - 1)\pi/N + \beta_2]$, 考虑到机器人在绕行障碍物时, 应该与障碍物保持一定的距离, 因此, 还应对不可通行区域进行适当的外扩膨胀, 设膨胀角为 α_{extra} , 于是, 膨胀后的 Ψ_s^k 可给定为 $[-\pi + (2k - 3)\pi/N - \beta_1 - \alpha_{extra}, -\pi + (2k - 1)\pi/N + \beta_2 + \alpha_{extra}]$.

步骤 2. 合并不可通行区域, 对获得的所有不可通行区域 $\bigcup_{k=N/8+2}^{7N/8} \Psi_s^k$ 按照其左边界大小顺序排序, 进行遍历, 如果有相邻的区域重叠则合并并且进行更新, 重复这一过程直到不再有新的更新, 最终得到机器人当前环境下的不可通行区域 Ψ , 并得到 $\overline{\Psi} = [-\pi, \pi) - \Psi$.

步骤 3. 结合目标信息, 进行运动决策.

当 $\overline{\Psi} \neq \emptyset$ 时, 机器人需要在 $\overline{\Psi}$ 中挑选一个较好的方向, 设计如下的代价函数:

$$F(\vartheta_f) = -c_{goal} \times \theta + c_{feasible} \times \vartheta_f \quad (9)$$

式中, $\vartheta_f \in \overline{\Psi}$, c_{goal} 和 $c_{feasible}$ ($c_{goal} + c_{feasible} = 1$) 是权值系数. 首先在 $\overline{\Psi} \cap [-\pi/2, \pi/2]$ 范围内选取使 $|F(\vartheta_f)|$ 取最小值的方向 ϑ_f 做为机器人下次期望运动的方向, 若没有选到合适的方向会在整个 $\overline{\Psi}$ 内选取. 若机器人没有领航机器人的任何信息, 首先在 $\overline{\Psi}$

$\cap [-\pi/2, \pi/2]$ 范围内选取满足 $\min_{\vartheta_f \in \overline{\Psi}} |\vartheta_f|$ 的方向 ϑ_f 作为机器人下次期望运动的方向, 若没有选到合适的方向再在整个 $\overline{\Psi}$ 内选取. 当选取的期望运动方向满足 $|\vartheta_f| > \vartheta_{const}$ 时, $|\vartheta_f| = \vartheta_{const}$, 其中 ϑ_{const} 是机器人一个控制周期内的最大转角.

当 $\overline{\Psi} = \emptyset$ 时, 表明机器人无法发现合适的方向, 机器人原地左转.

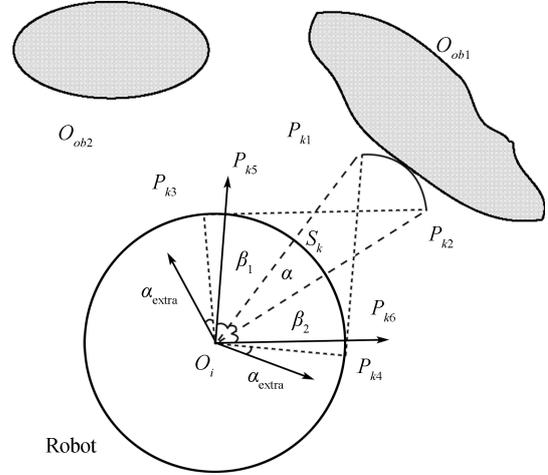


图 2 超声传感器 S_k 对应的不可通行区域构建

Fig. 2 The forbidden zone corresponding to sensor S_k

3 实验

下面采用中国科学院自动化研究所研制的智能机器人 AIM 对本文所提出的方法进行验证. 如图 3 所示, 每个机器人都配有码盘、3 个 CCD 摄像机和 16 路超声传感器. 机器人半径 r 为 0.24 m, 两驱动轮中心之间的距离 l_w 为 0.27 m; 每个摄像机视野范围约 60° , 其与机器人中心之间的距离 d_c 为 0.1 m. 实验有关参数如下: $\rho_0 = 0.6$ m, $k_\theta = -1$, $\alpha_{extra} = 3^\circ$, $c_{feasible} = 0.4$, $c_{goal} = 0.6$, $d_{c1} = -0.2$ m, $d_{c2} = 0.2$ m, $\alpha_{c1} = 16^\circ$, $\alpha_{c2} = 20^\circ$, $t_{c1} = 2$, $t_{c2} = 5$, $\theta_c = 55^\circ$, $\vartheta_{const} = 40^\circ$.

实验 1. 采用两个移动机器人, 领航者 Leader 手动拖动, 跟随机器人 Follower 动态跟随的运动轨迹 (通过码盘数据绘制) 如图 4 所示. 依据视觉传感器信息, Follower 相对于 Leader 的初始距离和初始观测方位角分别为 3 m 和 5° , 希望与 Leader 保持 1.4 m 的距离和 0° 的观测方位角. S_l 和 S_f 分别为 Leader 和 Follower 的起点, E_l 和 E_f 分别为这两个机器人的终点. 可以看出, 跟随机器人 Follower 能成功地绕过探测到的障碍物 Obs_1 和障碍物 Obs_2 , 实现对领航者 Leader 的跟随.

实验 2. 采用三个移动机器人, 其中领航者 Leader 手动拖动, 跟随机器人 Follower 1 跟随

Leader, 其相对于 Leader 的初始距离和初始观测方

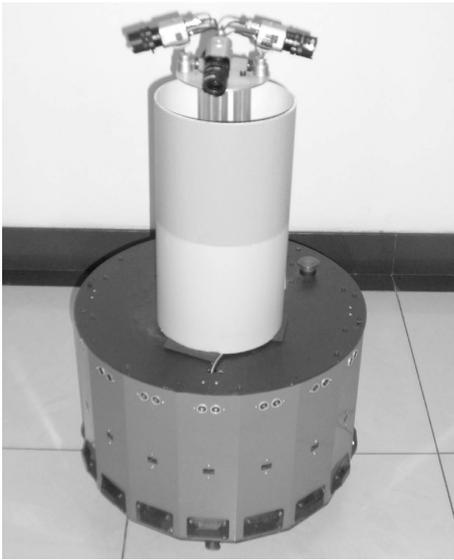


图 3 智能机器人 AIM

Fig. 3 The experiment robot AIM

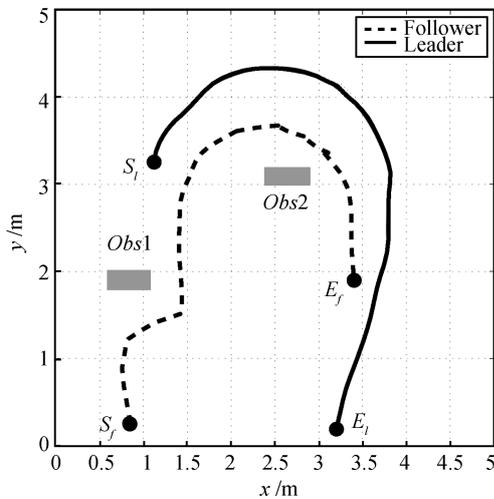


图 4 实验 1 的两机器人的运动轨迹

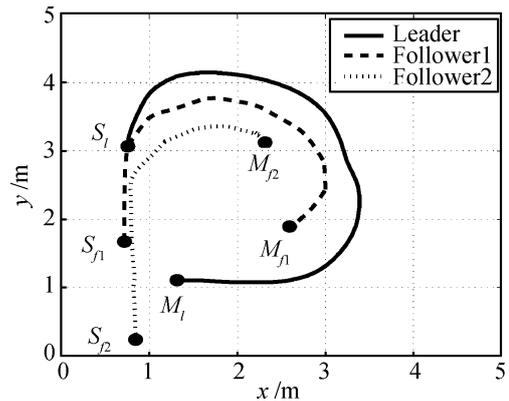
(Obs1: 0.47 m × 0.2 m, Obs2: 0.49 m × 0.18 m)

Fig. 4 The trajectories of two robots for Experiment 1

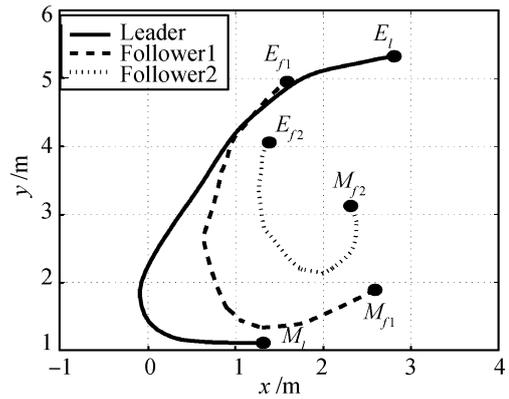
(Obs1: 0.47 m × 0.2 m, Obs2: 0.49 m × 0.18 m)

位角分别为 1.39 m 和 1.5°; 跟随机器人 Follower 2 跟随 Follower 1 (即 Follower 1 为 Follower 2 的领航机器人), 其相对于 Follower 1 的初始距离和初始观测方位角分别为 1.43 m 和 -5°. Follower 2 与 Follower 1、Follower 1 和 Leader 之间希望保持的期望距离均为 1.0 m, 期望观测方位角均为 0°. 跟随轨迹 (通过码盘数据绘制) 如图 5 (a) 和图 5 (b) 所示. S_l 、 S_{f1} 和 S_{f2} 分别为 Leader、Follower 1 和 Follower 2 的起点, M_l 、 M_{f1} 和 M_{f2} 分别为它们的中间点, E_l 、 E_{f1} 和 E_{f2} 分别为它们的终点. 图 6 给

出了相应跟随机器人的跟随误差 (与领航机器人期望保持的距离和实际距离的偏差, 实际距离是通过视觉感知获取或者通过码盘和历史信息估计得出的) 随时间变化的曲线. 可以看出, 当领航者 Leader 由起点 S_l 经过 M_l 到 E_l 时, Follower 1 和 Follower 2 都力求与其相对应的领航机器人保持期望的距离和观测方位角, 进而实现多机器人系统整体跟随, 表明了所提控制方法的有效性. 受机器人视觉测量、不精确的码盘数据、环境障碍, 以及为了应对上述不精确性而赋予跟随机器人一定的误差范围 (当跟随误差在设定范围内, 跟随机器人认为已经成功跟随, 停止运动) 等影响, 跟随存在一定的偏差.



(a)



(b)

图 5 实验 2 的三机器人的运动轨迹

Fig. 5 The trajectories of three robots for Experiment 2

4 结论

本文提出了一种基于局部感知的多模式控制方法用于多机器人系统固定相对位姿 (相对距离和观测方位角) 的跟随控制. 跟随机器人通过到达、旋转角度调整、跟随、避障和随机搜索五种模式, 保持与相应领航机器人的指定相对信息, 且躲避行进过程中可能出现的障碍. 所提方法通过实验进行了验证.

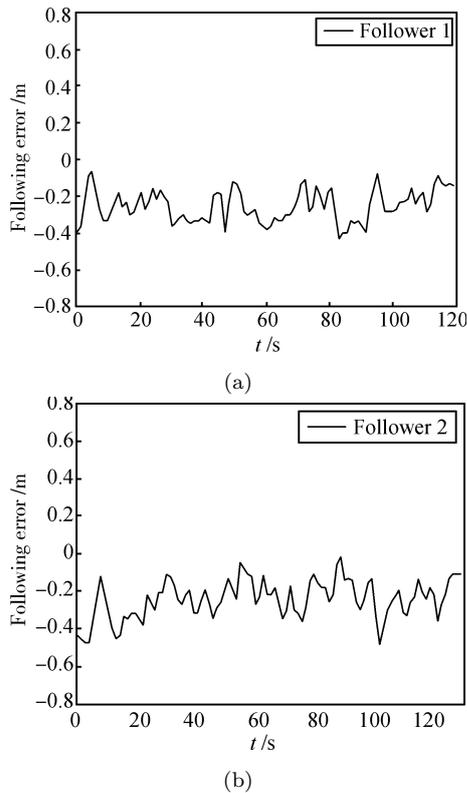


图 6 实验 2 的跟随误差曲线

Fig. 6 The following error curves for Experiment 2

References

- Li T H S, Chang S J, Tong W. Fuzzy target tracking control of autonomous mobile robots by using infrared sensors. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2004, **12**(4): 491–501
- Luo R C, Chen T M, Su K L. Target tracking using a hierarchical grey-fuzzy motion decision-making method. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2001, **31**(3): 179–186
- Mottaghi R, Vaughan R. An integrated particle filter and potential field method for cooperative robot target tracking. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Florida, USA: IEEE, 2006. 1342–1347
- Derenick J C, Spletzer J R, Hsieh M A. A graph theoretic approach to optimal target tracking for mobile robot teams. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego, USA: IEEE, 2007. 3422–3428
- Li Bao-Guo, Zong Guang-Hua. Moving-target tracking and obstacle avoidance control algorithm for unicycle mobile robots. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2007, **28**(2): 445–450
(李保国, 宗光华. 双轮移动机器人运动目标追踪与避障控制算法. *航空学报*, 2007, **28**(2): 445–450)
- Das A K, Fierro R, Kumar V, Ostrowski J P, Spletzer J, Taylor C J. A vision-based formation control framework. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 813–825
- Fredslund J, Mataric M J. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, **18**(5): 837–846

- Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 1997, **4**(4): 387–403
- Yang L, Cao Z Q, Tan M, Liu G P. Vision-based fuzzy coordination control for multiple robots. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics, Automation, and Mechatronics*. Chendu, China: IEEE, 2008. 521–524



杨丽 中国科学院自动化研究所博士研究生, 天津工程师范学院讲师. 主要研究方向为多机器人系统协调控制. 本文通信作者. E-mail: ylsxj@126.com
(YANG Li Ph.D. candidate at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, lecturer at Tianjin University of Technology and Education. Her research interest covers coordination and control of multi-robot system. Corresponding author of this paper.)



曹志强 中国科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为多机器人系统和仿生机器人.
E-mail: zqcao@compsys.ia.ac.cn
(CAO Zhi-Qiang Associate professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot system and biomimetic robot.)



张文文 中国科学院自动化研究所硕士研究生. 主要研究方向为多机器人系统.
E-mail: zhwenwen@126.com
(ZHANG Wen-Wen Master student at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Her main research interest is multi-robot system.)



周超 中国科学院自动化研究所助理研究员. 主要研究方向为仿生机器鱼设计与协调.
E-mail: zhouchao@compsys.ia.ac.cn
(ZHOU Chao Assistant professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers design and coordination of biomimetic robot fish.)



谭民 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为多机器人系统, 先进机器人和仿生机器人.
E-mail: tan@compsys.ia.ac.cn
(TAN Min Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers multi-robot system, advanced robot, and biomimetic robot.)