

弱通信条件下多机器人自主编队协调控制方法

张 坤¹ 石永福²
ZHANG Kun SHI Yongfu

摘 要

为提高弱通信条件下多机器人自主编队的准确性，减小队形偏差，开展了多机器人自主编队协调控制方法研究。首先，针对弱通信环境，设计高效稳定的通信协议，确保机器人之间能够实时、准确地交换信息，为协同工作提供了基础。其次，通过初始化机器人并形成统一的自主编队队形，使所有机器人的状态保持一致，为后续的协调控制提供了便利。在协调控制流程的设计上，建立了多机器人自主编队的工作区间模型，通过实时监测和动态调整，维持并优化编队的队形，实现了多机器人编队的协调控制目标。实验结果表明，所提出的方法在弱通信条件下能够显著提高多机器人自主编队的准确性和稳定性，减小队形偏差。

关键词

弱通信；自主；多机器人；编队；协调；控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.10.050

0 引言

在日益复杂的作业环境中，机器人系统被广泛应用于各种场景，如救援、勘探、农业等。特别是在这些场景中，机器人常常需要在弱通信条件下进行协同工作，以完成复杂的任务。多机器人系统的编队协调控制是确保任务高效、准确执行的关键。然而，在复杂多变的环境中，特别是在通信受限的条件下，如何确保多机器人系统能够实时、稳定地进行信息交换，实现编队的协调控制，成为当前研究的热点和难点。

文献[1]设计分布式观测器以估计领导者速度，采用基于虚拟结构、人工势函数和自适应增益技术的控制策略，确保网络化 Euler-Lagrange 系统实现期望的编队队形，同时处理通信时滞、碰撞规避和区域约束等挑战。但该方法在弱通信条件下，可能面临通信延迟和数据丢失的问题，可能导致系统稳定性和实时性降低，使得多机器人之间的信息共享和协同决策变得困难，限制了编队控制的准确性和效率。文献[2]通过建立多 UUV 编队模型，针对有无参考路径设计不同控制策略，采用模型预测控制进行路径跟踪与速度同步，或基于最小二乘的融合状态估计实现一致性编队控制。但该方法过于依赖预设的编队规则和策略，缺乏在动态环境中灵活调整的能力，导致机器人反应迟钝，难以适应快速变化的环境。因此，深入研究适用于弱通信条件下的多机器人自主编队协调控制方法，成为提升多机器人系统性能的关键。

针对以上挑战和不足，本文旨在研究弱通信条件下多机

器人自主编队协调控制方法，增强系统的适应性，使之能在多变环境中灵活应对，确保在信号传输不稳定时仍能保持稳定的编队和高效的协同工作，为多机器人技术的发展和應用提供有力支持。

1 弱通信条件下多机器人自主编队协调控制方法设计

1.1 弱通信条件下通信协议设计

在弱通信条件下，通信受限会导致机器人之间的信息交换变得困难，甚至可能出现通信中断的情况。这要求控制系统能够具备高度的容错性和鲁棒性，以应对通信故障和延迟^[3]。弱通信条件下，机器人之间的信息同步变得尤为重要。如果信息同步不准确，可能会导致编队出现偏差，甚至导致任务失败。因此，需要设计高效、准确的通信协议和同步机制，以确保机器人之间能够实时、准确地交换信息。数据包结构是通信协议的核心部分，直接影响数据传输的效率和准确性。本文设计的数据包结构如表1所示。该数据包结构紧凑且易于解析，有助于在带宽受限的环境下稳定传输数据。

表1 数据包结构参数

序号	通信协议参数	设置
1	通信介质	RS485
2	传输速度	9600 bit/s
3	起始字节	0xAA
4	设备 ID	1 字节（范围 0x01 ~ 0xFF，标识发送设备）
5	数据类型	1 字节（范围 0x01 ~ 0x0F，表示数据类型或功能代码）
6	数据长度	1 字节
7	数据字段	最大 255 字节
8	校验和	2 字节
9	结束字节	0xBB

1. 西北师范大学附属中学 甘肃兰州 730070

2. 西北师范大学计算机科学与工程学院 甘肃兰州 730070

为确保机器人之间的信息同步,本文引入了时间戳和心跳包两种同步机制。每个数据包中包含发送时间戳,以毫秒为单位,有助于接收方进行时间同步和延迟补偿。同时,每5 s发送一次心跳包以维持连接状态,并在长时间无数据传输时检测链路是否仍然活跃。

为应对数据传输过程中可能出现的错误,本文设计了重传机制和错误报告流程。当数据包丢失或校验和错误时,接收方应向发送方发送重传请求;对于无法恢复的通信错误,系统生成错误报告并通知相关人员进行处理。

在通信协议设计中,对敏感数据进行加密处理以确保数据传输的安全性,同时预留一些未使用的字段或位以便将来根据需要进行扩展,并设置协议版本号以兼容旧版本设备。

通过上述流程,设计了一种适用于弱通信条件的多机器人自主编队协调控制通信协议,通过优化数据包结构、引入同步机制、设置错误处理流程以及考虑安全性与扩展性等,提升了编队控制的容错性和鲁棒性。在弱通信条件下实现机器人之间的高效、稳定通信,为多机器人自主编队协调控制提供了有力支持。

1.2 多机器人编队方法设计

通信协议是确保机器人之间能够高效、稳定地进行通信的基础,基于这个通信基础,初始化机器人并形成自主编队。为了确保机器人系统安全稳定地运行,首要步骤是激活其主电源。为此,将操作者面板上的断路器明确切换至“启动”或“激活”状态,以此确保主电源已经顺利接通。在正式接通电源之前,安全检查必不可少。这包括对机器人本体、核心控制器以及所有连接电缆的完整性进行全面检查,同时确保工作区域内没有任何可能干扰机器人运行的障碍物^[4]。启动机器人控制器,观察机器人的指示灯和显示屏,确认系统已成功启动并进入待机状态。机器人控制器启动后,会进行一系列的自检操作。自检无异常后,配置机器人的网络设置,使用无线局域网,确保机器人能够与控制系统和其他机器人进行通信^[5]。在此基础上,根据任务需求,确定编队的形状、大小和数量。为每个机器人分配唯一的ID和角色,领导者(leader)和跟随者(follower)^[6]。根据编队配置,设定领导者的位置为 $L(x_L, y_L)$,跟随者的位置为 $F(x_F, y_F)$,则两者之间的相对距离 d 和相对角度 θ 可以通过以下公式计算:

$$d = \sqrt{(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_F - y_L}{x_F - x_L}\right) \quad (2)$$

通过自动导航的方式,将机器人移动到指定的领导者与跟随者位置。在所有机器人到达初始位置后,进行编队对齐操作。领导者机器人发送对齐指令,跟随者机器人根据指令调整自身位置,使编队保持整齐^[7]。在编队对齐完成后,进行状态同步操作。领导者机器人将当前状态发送给跟随者机器人,确保所有机器人保持同步运动。在编队形成后,进行验证操作,确保编队的形状、大小和数量符合任务要求。如有需要,可以进行微调操作,优化编队的性能。

通过以上步骤,多机器人可以完成初始化并成功形成编队,确保所有机器人的状态一致,并且通信连接稳定可靠,为后续的任务执行做好准备。

1.3 多机器人自主编队协调控制

多机器人成功形成编队后,机器人按照预定的队形和规则排列,基于此,跟踪多机器人,对其自主编队进行协调控制^[8]。引入高度集成与精确控制的leader-follower控制机制。leader机器人作为领航者,不仅负责读取并解析目标位置信息,还通过精细控制其运动轨迹,为整个编队设定方向与速度基准。而跟随者机器人则充分利用其传感器套件,实时采集并融合周围环境信息,构建全局感知图景。通过控制逻辑与实时的决策制定,紧密追踪leader的运动状态,并根据预设的队形参数动态调整自身位置与朝向,要求每个机器人都具备高度的自主性与协同性,以应对各种突发情况与复杂环境挑战,直至全体机器人协同一致,确保编队结构的稳定与精确,从而实现多机器人自主编队协调控制。建立多机器人自主编队工作区间模型,如图1所示。

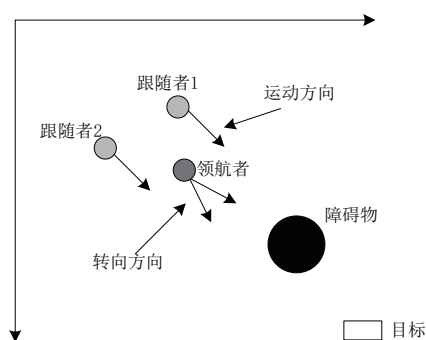


图1 多机器人自主编队工作区间模型

如图1所示,为实现特定任务目标,多机器人将执行一系列编队协调动作。这些动作涵盖多个关键阶段,首先是机器人需要自主导航至预设的集合点,以形成预定的队形配置;随后,整个编队需保持紧密且稳定的队形结构,共同移动到另一个目标位置;在此过程中,编队还需要灵活调整,以便在执行队形维持的同时,顺利执行其他附加任务^[9]。

每个机器人将其自身的状态信息（包括位置、速度、方向等）实时反馈给其他机器人和控制系统。机器人运动状态可以表示为向量形式：

$$q_c = (v, \varpi)^T \quad (3)$$

式中： v 表示机器人运动过程中产生的线速度， ϖ 表示机器人运动过程中产生的角速度， T 表示运动周期。

基于上述的多机器人编队形成形态、相对位置和角度信息，为每个机器人制定自己的运动计划。每个机器人按照自己的运动计划行动，与邻居机器人保持同步。设定 (X, Y) 表示机器人当前位置， (x, y) 表示机器人能够扫描到的位置。若 (x, y) 所在位置存在障碍物，则据此判断 (x, y) 在机器人运动方向的左侧还是右侧。若机器人与 (x, y) 的偏角大于 0 ，则障碍物在机器人运动方向的左侧，反之，小于 0 则在右侧。在多机器人自主编队协调控制中，避障至关重要。本文设计的多机器人避障控制策略包括以下几方面。

停止控制策略：当机器人检测到障碍物时，立即停止运动，并等待障碍物消失或改变位置后再继续运动^[10]。

绕行控制策略：机器人根据障碍物的位置和形状，规划出一条绕过障碍物的路径，并沿着该路径继续运动。计算公式为：

$$v_i = v_{i, \text{des}} + K_a(\mathbf{P}_{\text{obs}} - \mathbf{P}_i) \quad (4)$$

式中： $v_{i, \text{des}}$ 表示机器人 i 的期望速度向量， $\mathbf{P}_{\text{obs}}$ 表示障碍物的位置向量， K_a 表示避障控制增益。

避障跟随控制策略：在 leader-follower 编队中，当跟随者检测到障碍物时，可以根据领航者的运动状态和障碍物的位置，选择适当的避障动作，并继续跟随领航者运动。利用一致性算法，迭代更新机器人之间的信息交换，以确保整个编队能够逐渐收敛到预设的队形。在基于一致性的编队控制中，每个机器人根据它与邻居机器人的相对位置和速度信息来调整自己的状态。基于一致性的编队协调控制公式为：

$$v_i' = v_i + K_v \sum_{j \in N_i} (v_j - v_i) \quad (5)$$

$$\omega_i' = \omega_i + K_\omega \sum_{j \in N_i} (\omega_j - \omega_i + k_\theta(\theta_j - \theta_i)) \quad (6)$$

式中： ω_i 表示机器人 i 的角速度， v_j 、 ω_j 分别表示邻居机器人 j 的线速度和角速度， K_v 、 K_ω 、 k_θ 均表示控制参数， N_i 表示机器人 i 的邻居集合， θ_j 、 θ_i 表示机器人 j 和 i 与领导者的相对角度。按照上述协调控制公式，确保编队中的机器人能够保持队形并协同行动。根据机器人的状态反馈和全局环境信息，控制系统对编队进行实时调整，确保编队能够适应环境变化和任务需求的变化。

由此，通过多个控制策略，多机器人自主编队协调控制

性能得到了显著加强，包括更精细的运动控制、更灵活的避障策略和更稳定的队形保持机制。

2 实验分析

2.1 实验准备

在本次实验中，采用了三台移动机器人作为实验样本对象，如图 2 所示。



图 2 实验对象

机器人型号规格及配置如表 2 所示。

表 2 机器人型号规格及配置

序号	项目	参数
1	型号	R-Bot 3000
2	尺寸	长 30 cm × 宽 25 cm × 高 15 cm
3	重量	2.5 kg
4	电机与驱动	每台机器人配备了两组直流电机，分别用于驱动左右两侧的轮子。电机驱动采用 PWM 方式。

机器人采用嵌入式操作系统，提供了丰富的 API 和工具，用于编写和调试机器人的控制程序。每台机器人在无障碍物的情况下，最大直线运动速度可达 0.5 m/s ，最大角速度可达 $60^\circ/\text{s}$ 。这些机器人被精心设计和配置，以适应弱通信条件下的多机器人自主编队协调控制实验。实验中的控制程序采用 C++ 编写，以充分利用机器人的硬件性能。同时，C++ 也提供了强大的面向对象编程特性，使得控制程序更加易于维护和扩展。

2.2 协调控制结果分析

初始时刻，四台机器人的位置分别为： $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$ 、 $(0, 2)$ 、 $(0, 3)$ （单位： m ）。预设的编队队形为等边三角形，边长为 1 m 。在避障过程中，当机器人感知到距离障碍物小于 0.3 m 时，将启动避障算法并调整运动轨迹。实验过程中，每隔 0.1 s 记录一次机器人的位置和速度信息，以绘制运动轨迹图。图 3 为协调控制下多机器人编队与理想编队对比图。

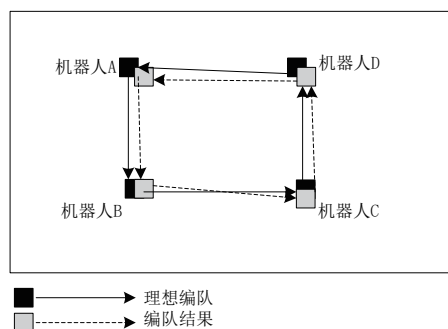


图3 多机器人编队结果

由图3的对比结果可以看出，本文提出的协调控制方法应用后，多机器人编队与理想编队较为接近。

由于实验是在弱通信条件下进行，设定了每台机器人的通信范围为10 m。在这个范围内，机器人能够稳定地传输数据和指令。选择将队形偏差作为此次实验的性能评估指标。队形偏差指的是实际编队形状与预设编队形状的偏差程度。

在本次实验中，对比了本文提出的多机器人自主编队协调控制方法（简称方法A）与文献[1]、文献[2]提出的两种常规协调控制方法（方法B和方法C）在弱通信条件下的队形偏差，如图4所示。

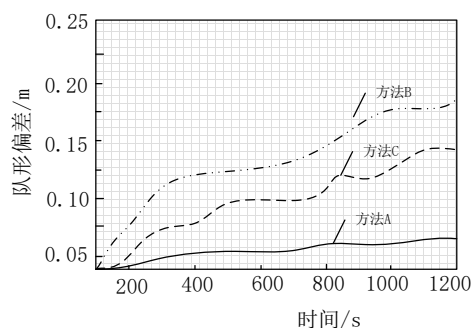


图4 多机器人自主编队的队形偏差

由图4的对比结果可以看出，在弱通信条件下，本文提出的方法在队形偏差控制方面表现出较好的性能。随着通信时间的增加，三种方法的队形偏差均有所增大，但本文提出方法的增大幅度相对较小，且整体队形偏差保持在较低水平。相比之下，另外两种常规方法在通信条件较差时，队形偏差增加得更为明显。由此对比结果可知，本文提出的多机器人自主编队协调控制方法在弱通信条件下具有较高的队形控制精度和稳定性，为实际应用提供了有力的技术支撑。

3 结语

针对通信条件受限的特定场景，本文所研究的多机器人自主编队与协调控制策略将为这一领域的发展注入新的活

力。在通信资源有限的环境中，这一方法能巧妙利用每一份资源，确保信息传递精确与迅速，从而使多机器人系统在各种复杂环境下都能保持高效、稳定的运行状态，为技术的进一步应用奠定良好基础。

参考文献：

- [1] 杨吉康,于晋伟,杨卫华.网络化 Euler-Lagrange 系统的分布式编队机动控制[J].应用数学和力学,2023,44(7):870-883.
- [2] 徐红丽,邱少雄,李瑞峰,等.弱通信条件下基于 MPC 与融合状态估计的多 UUV 编队控制方法[J].无人系统技术,2022,5(4):32-39.
- [3] 付雷,秦一杰,何顶新,等.基于改进人工势场法的多机器人编队避障[J].控制工程,2022,29(3):388-396.
- [4] 杨洋,王征,胡致远,等.无人水下航行器编队控制研究现状及技术综述[J].舰船电子工程,2022,42(2):1-7+94.
- [5] 杨翊,周星群,胡志强,等.基于视觉定位的水下机器人无通信高精度编队技术研究[J].数字海洋与水下攻防,2022,5(1):50-58.
- [6] 高继勋,黄全振,赵媛媛.基于领航跟随的多机器人编队控制方法[J].中国测试,2021,47(11):8-13.
- [7] 齐晓龙,杨旭光.离散异构多自主系统时变输出编队跟踪控制[J].系统仿真学报,2022,34(1):36-44.
- [8] 胡凯,陈旭,杨平化,等.基于滑模变结构控制多机器人协同编队的研究综述[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2022,14(2):197-211.
- [9] 伍锡如,邢梦媛.分数阶多机器人的领航-跟随型环形编队控制[J].控制理论与应用,2021,38(1):103-109.
- [10] 徐雪松,曾智,邵红燕,等.基于个体-协同触发强化学习的多机器人行为决策方法[J].仪器仪表学报,2020,41(5):66-75.

【作者简介】

张坤(1978—),男,甘肃榆中人,本科,中学高级教师,研究方向:信息技术教育。

石永福(1968—),男,甘肃庄浪人,本科,教授,研究方向:计算机科学与技术。

(收稿日期:2024-07-11)