

基于穿戴式触觉反馈的人-多无人系统班组协同运动控制研究



曾洪¹,张竞天¹,文鹏程²,孙澄峰¹

1.东南大学,江苏南京 210096

2.航空工业西安航空计算技术研究所 机载、弹载计算机航空科技重点实验室,陕西西安 710065

摘要:针对一类典型的有人/无人系统协同应用,即搭载物资的多无人系统跟随有人系统穿过复杂区域到达目的地,在人机异构班组鲁棒维持编队并高效通过的需求牵引下,亟待发展向人员直观、灵敏、丰富地反馈态势信息的手段。为此,本文设计了基于触觉反馈的人机班组协同运动控制框架,研制了穿戴于双侧上臂的双模态触觉反馈装置,提出了分别通过振动和挤压触觉反馈向人员直观灵敏地提示路径导航和班组连通状态信息的方法。搭建了人-多无人系统班组协同运动控制仿真试验平台。试验结果表明,与视觉反馈相比,触觉反馈的态势信息使得班组任务完成时间平均缩短 17.9%,班组连通度平均提升 6%,验证了触觉反馈对人-多无人系统班组协同运动控制的有效性。

关键词:触觉反馈;有人/无人系统协同;多无人系统;编队控制;路径规划

中图分类号:TP242

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.04.009

近年来,有人/无人系统协同通过优势互补、分工协作已成为“反介入/区域拒止”战略破解、城市反恐、灾后救援等领域^[1-2]的重要方向之一,世界强国均大力开展研究。其特点是有人机、载人车、载人舰、单兵、救援员等有人系统与无人机、无人车、无人船等多无人系统(MRS)共处同一作业环境构成,人-多无人系统班组就近协同,解决了指挥人员异地控制无人系统的方式远程通信易受阻和时延大等缺陷,可在上述领域的复杂动态环境下提高反应速度和作业效能^[3]。搭载物资的多无人系统跟随有人系统运动穿过复杂区域到达指定地点是一类典型的有人/无人系统协同应用,为满足人机异构班组鲁棒地维持编队并高效通过的需求,迫切需要发展向人员直观、灵敏、丰富地反馈班组状态及任务路径导航等态势信息的手段^[4]。

针对此要求,研究人员提出了基于移动便携式装备向班组人员反馈态势的方案。Chen Mingxuan^[5]和 Kennel-Maushart^[6]等均采用了 HoloLens 增强现实头盔来呈现班组成员和环境感知信息,在开阔环境的试验结果表明,这种不占用双手的穿戴式装备与手持式的平板显示设备相比,

人员在获得丰富视听觉反馈的同时,不低头、不影响双手作业或持械,有助于提高班组整体作业绩效。然而在高空飞行、城市作战、灾后救援等视听觉退化(如光照多变、出现飞行视错觉、嘈杂喧闹、通道感知负荷重等)场景下,人员基于穿戴式视听觉反馈的态势感知能力将严重受限。由于人体触觉感受器与视听觉感受器相比具有分布广、灵敏等优势,近年来逐渐发展了面向班组人员的穿戴式触觉反馈态势感知手段。Tsykunov 等^[7]研制了振动触觉反馈手套,实现了多无人机系统编队尺寸变化的触觉表达。为解决 Tsykunov 等所使用的触觉反馈手套占用手部从而限制人员双手持械或作业的不足,Aggravi 等^[8]研制了穿戴于上臂的振动触觉反馈装置,结果表明基于振动触觉反馈可实现人员对人-多移动机器人系统班组连通状态的直观感知。然而,上述穿戴式触觉反馈装置都仅基于单一的振动模态,仅能表达单一的班组状态信息。

为进一步丰富态势信息的触觉表达以有力支撑人-多无人系统班组高效协同运动,本文设计了基于触觉反馈的人机班组协同运动控制框架,研制了一套穿戴于双侧上臂的

收稿日期:2024-08-15;退修日期:2024-11-05;录用日期:2025-01-09

基金项目:国家自然科学基金(62173089);航空科学基金(20171969007);装备预研教育部联合基金(8091B042206)

引用格式: Zeng Hong, Zhang Jingtian, Wen Pengcheng, et al. Research on coordinated motion control of Human-MRS team with wearable tactile feedback[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(4): 74-82. 曾洪, 张竞天, 文鹏程, 等. 基于穿戴式触觉反馈的人-多无人系统班组协同运动控制研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(4): 74-82.

双模态触觉反馈装置,分别通过振动和挤压触觉反馈向人直观灵敏地提示路径导航和班组连通状态。搭建了人-多无人系统班组协同运动控制仿真平台,通过试验验证了所实现的触觉反馈有助于提高班组运动效率和编队鲁棒性,适用于有人机-无人机、救援员-机器人等人机班组协同运动作业。

1 基于触觉反馈的人-多无人系统班组协同运动控制

本文所述的人-多无人系统班组协同运动控制系统框图如图1所示,包含三部分:基于连通性保持的班组编队控制、人员行进路径规划,以及用于提示人员班组状态和路径导航信息的穿戴式双模态触觉反馈。

1.1 基于连通性保持的班组编队控制

本文将人-多无人系统班组中的 N 个成员建模为二维质点,其二维位置坐标记为 $x_i \in R^2, i \in \{1, \dots, N\}$,每个无人系统建模为双积分器动力学模型

$$\ddot{x}_i = u_i, i \in \{1, \dots, N\} \quad (1)$$

式中, $u_i \in R^2$ 为施加于第 i 个无人系统的驱动力(控制指令)。本文采用可扩展性、鲁棒性和环境适应性较强的连通保持方法^[9]对班组进行编队控制。该方法基于梯度下降策略生成控制指令来驱动每个无人系统,以保持表征编队传感/通信图 g 的连接性。针对避障及无人系统之间不碰撞、保持视野可见、与邻接个体保持期望距离等编队控制目标,基于连通性保持的班组编队控制方法将其编码成邻接矩阵 $A \in R^{N \times N}$ (见图2),由此可计算得到编队图 g 的代数连通度,即图 g 的Laplace矩阵次小特征值 $\lambda_2^{[9]}$ (对于连通的图 $\lambda_2 > 0$,非连通的图则 $\lambda_2 = 0$,见图2)。

然后连通性保持的编队控制方法通过对图 g 代数连通度 $\lambda_2(x(t))$ 的势函数 $V^\lambda(\lambda_2(x(t))) \geq 0$ 计算梯度下降来获得第 i 个无人系统的控制指令 u_i 。将 $\lambda_2(x(t))$ 简记为 $\lambda_2(t)$ 。该势函数在 $\lambda_2^{min} > 0$ 处为一条垂直渐近线,当 $\lambda_2(t)$ 从 λ_2^{min} 递增至 $\lambda_2^{max} = \lambda_2^{min} + \Delta$ 时单调平稳下降,并当 $\lambda_2(t)$ 超过 λ_2^{max} 进一步增大时逐渐趋近于0。由梯度下降即可产生保持连通性的牵引力

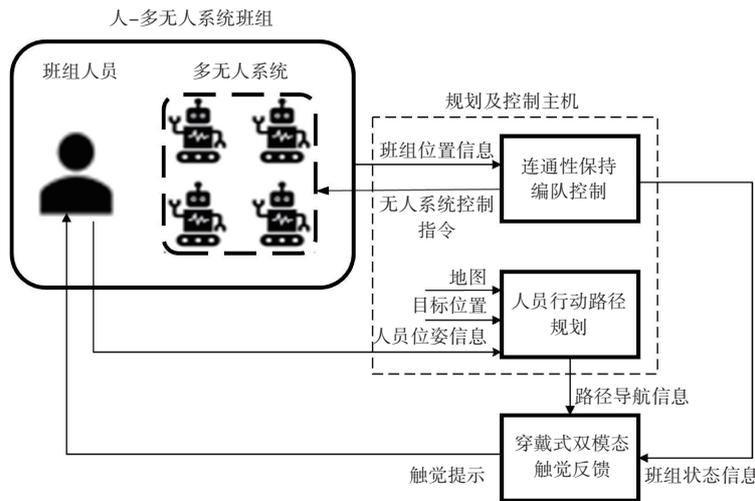


图1 人-多无人系统班组协同运动控制系统框图

Fig.1 Diagram of human-MRS team coordinated motion control system

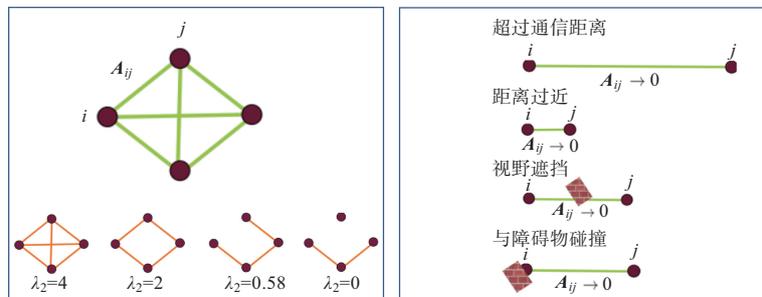


图2 图 g 的邻接矩阵及代数连通度 λ_2 示意图

Fig.2 Adjacency matrix and algebraic connectivity level λ_2 for graph g

$$F_i^j = -\frac{\partial V^2(\lambda_2)}{\partial \lambda_2} \sum_{j \in N_i} \frac{\partial A_{ij}}{\partial x_i} (v_{2i} - v_{2j})^2 \quad (2)$$

式中, N_i 为与第 i 个无人系统邻接的班组成员集, v_2 为 λ_2 对应的特征矢量。最终式(1)中无人系统的控制输入设计如下

$$u_i = F_i^2 - B_i \dot{x}_i \quad (3)$$

式中, $B_i \in \mathbf{R}^2$ 为保证控制器稳定的阻尼项。式(3)所示的编队控制器旨在实现 $\lambda_2(t) > \lambda_2^{\min} > 0$, 即维持编队图 g 的代数连通度恒正。对于编队中的班组成员无法建模为式(1)中的动力学模型, 不能由式(3)直接驱动, 本文将通过 1.3 节所述的触觉提示, 促进人员与班组中的多无人系统协同运动。

1.2 人员行进路径规划

除了通过上述控制技术保持编队连通性之外, 还需要为人员规划路径并引导其到达目的地。路径规划旨在根据人员当前位置计算得出能够到达目的地的最佳路径, 以向人员提供实时导航。

地图信息是达成上述目的的基础。以灾后搜索救援为例, 本文假设可利用已有的建筑信息模型构建出环境的先验地图 M 。以 $r_{\text{grid}} \times r_{\text{grid}}$ 为最小单元将地图 M 进行划分, 地图上的每个栅格记为 M_{ij} , $i \in \{1, \dots, n\}$, $j \in \{1, \dots, m\}$, $n, m \in \mathbf{N}$, 其状态为被占用(如障碍物)或未占用, 如图 3 所示。将人员出发位置处的栅格记为路径规划算法的输入起点 $x_{\text{start}} \in M$, 目的地所在的栅格记为 $x_{\text{goal}} \in M$ 。

考虑到即便提供了导航, 仍不可避免地会出现人员偏离路径规划算法建议路径的情况。偏离建议路径的原因可

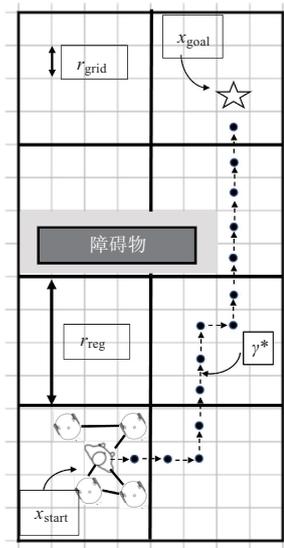


图3 路径规划示意图

Fig.3 Illustration of path planning

能是人员未能理解导航信息或对导航信息未作出正确反应, 或由于出现未能预见的突发情况(如在指示的路径上突然出现的障碍物)人员主动偏离原来路径。为了应对可能出现的人员偏离规划路径的情况, 受计算流网络两节点之间最大稳态流量的 Ford-Fulkerson 方法启发, 本文计算从地图上每个栅格到目的地的可行路径。为提高计算效率, 将地图 M 重新以块 r_{reg} 进行分割, 每块由若干栅格构成, 即 $r_{\text{reg}} = wr_{\text{grid}}$, $w \in \mathbf{N}$ 。本文首先使用宽度优先搜索算法计算从人员起始点 x_{start} 到目的地 x_{goal} 之间的最短路径 γ_1 , 将 γ_1 存储到路径列表 Γ 中并标记该路径所占用的栅格。然后从占用栅格数最少的块中随机挑选一个栅格作为起始点, 再次使用宽度优先搜索算法计算新的最短路径 γ_2 , 同样将 γ_2 存储到路径列表 Γ 中并标记该路径所占用的栅格。上述步骤不断重复直至地图 M 中的所有栅格被占用。每个地图只需要运行一次上述过程, 结束时地图 M 的所有栅格均被占用, 路径列表 Γ 中存储的所有可行路径的终点均为目的地, 最优路径 γ^* 即为从当前位置到目的地之间最短(被占用的栅格最少)的路径。

1.3 班组及导航信息的穿戴式双模态触觉反馈

根据上述两节可获取班组状态信息和路径导航信息, 然后将这些重要信息有效地反馈给班组中的人员。通过触觉反馈向班组中的人员提示人-多无人系统班组传感通信图 g 的连接性, 有助于人员及时调整其运动(如当人员感知到无人系统队友无法跟上自己时, 人员会降低运动速度); 而向人员反馈当前需要跟随的路径信息, 能够引导人员成功到达目的地。下面将分别介绍本文设计的穿戴式双模态触觉反馈装置、班组及导航信息的触觉反馈表达方法, 如图 4(b) 和图 4(c) 所示。

1.3.1 穿戴式双模态触觉反馈装置

本文设计的穿戴式双模态触觉反馈装置硬件结构图如图 5 所示, 由挤压及振动触觉执行器、主控驱动电路模块构成。通过 Ubuntu 上位机 ROS 框架下开发的编队控制和路径规划软件获取班组状态信息和路径导航信息后, 基于 Wi-Fi 无线连接和 TCP 协议传输给主控驱动电路模块, 再驱动振动触觉执行器和挤压触觉执行器工作, 从而将信息传递至穿戴该装置的班组成员。

整套装置的外观如图 6 所示, 共 4 个挤压臂带和 6 个振动单元。班组成员的双侧上臂通过尼龙绑带各穿戴两个挤压触觉执行器和三个振动触觉执行器。

穿戴于背部上方的主控模块如图 7 所示, 主要包括主控电路板(A)、4 个可控液压源(C)及其 3D 打印外壳(D、E、

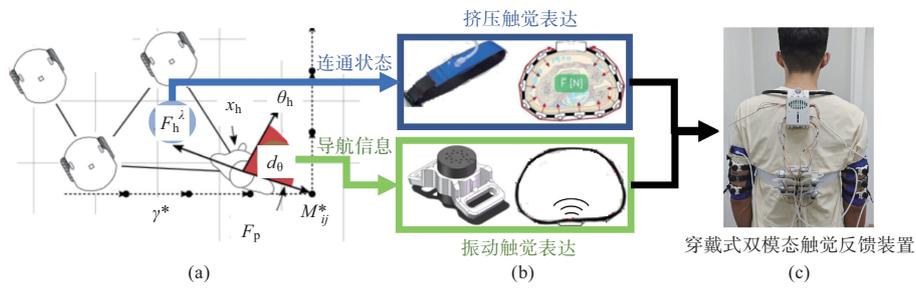


图4 班组及导航信息的穿戴式双模态触觉反馈

Fig.4 Wearable dual-mode tactile feedback for human-MRS team state and path guidance

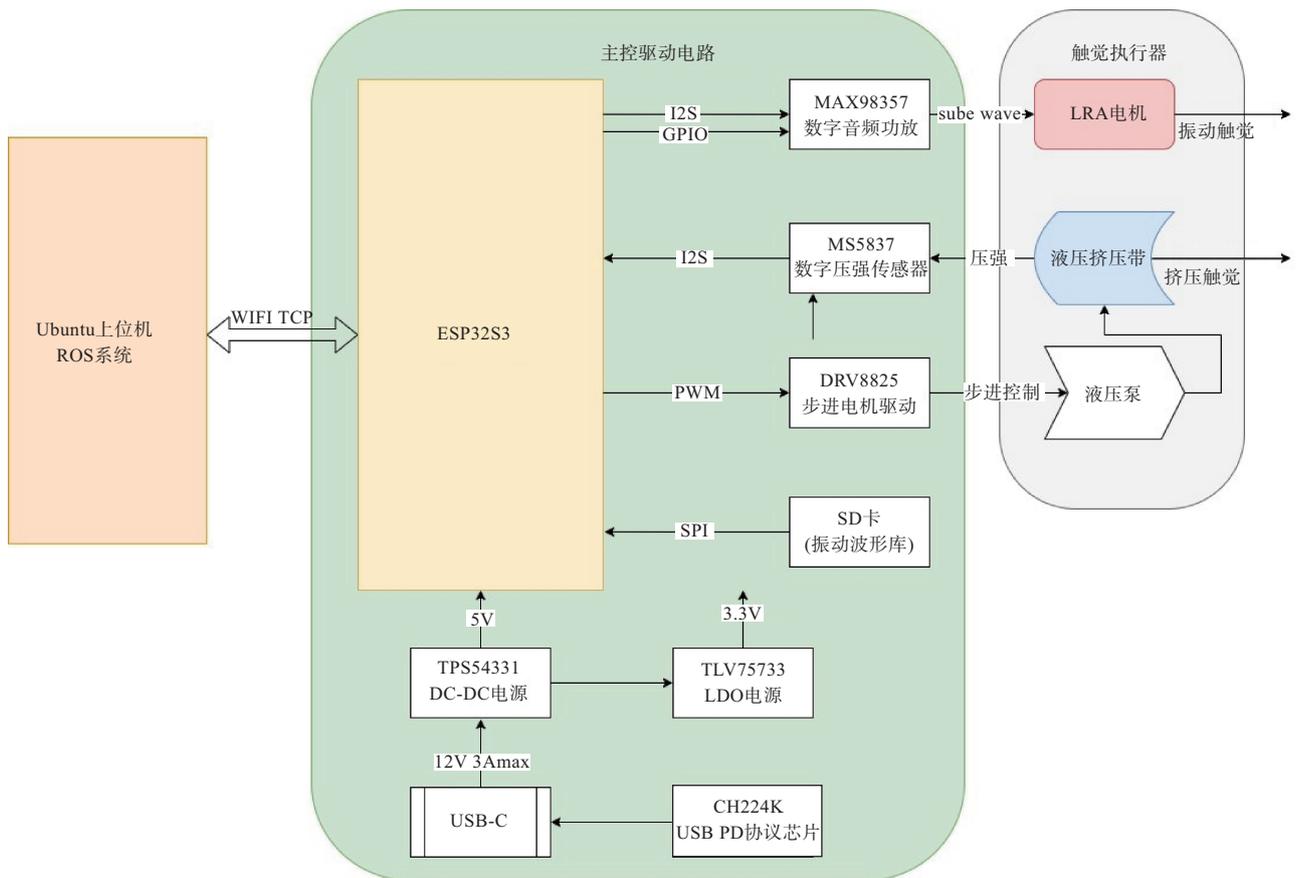


图5 穿戴式双模态触觉反馈装置硬件结构图

Fig.5 Structure for wearable dual-mode tactile feedback device

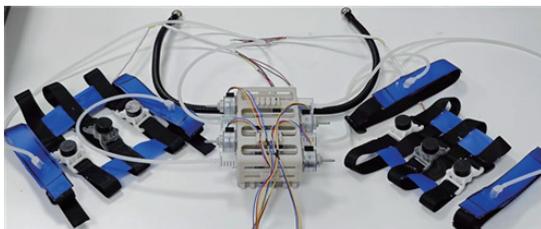


图6 穿戴式双模态触觉反馈装置外观

Fig.6 Appearance of wearable dual-model tactile feedback device

F)。主控模块固定穿戴于与肩同高的背部,采用波纹软管(G)的设计使得主控模块的穿戴可随不同体型变化而进行调整。

振动触觉执行器选用了Z轴振动方向的线性谐振驱动器,振动垂直作用于人体皮肤表面,且其动子具有较大质量,相较于常用的偏心旋转质量振动马达加速度更高、响应频率更宽、振动效果更好。振动触觉执行器的支撑框架采用热塑性聚氨酯弹性体(TPU)材料,由激光烧结技术制造,

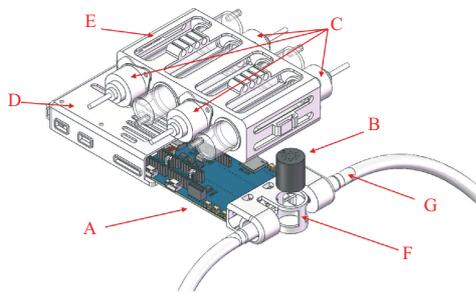


图7 穿戴于背部上方的主控模块

Fig.7 Device controller module wear on the back

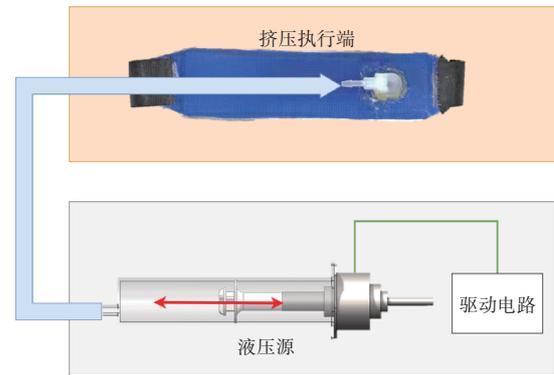


图9 基于直线步进电机的液压驱动

Fig.9 Hydraulic drive with linear stepping motor

具有良好的柔韧性、减震性。

为解决刚性挤压触觉装置穿戴舒适性差、体积重量大的不足,本文设计了基于液压驱动的柔性挤压臂带。挤压臂带的液腔整体长度为115mm,宽度为25mm,采用弹性TPU薄膜和不可拉伸的尼龙TPU复合材料热密封结合的工艺制造。图8展示了柔性挤压臂带液腔制作过程。液腔填充好液体后使用尼龙绑带与其形成臂带,采用直线步进电机挤压液体,可在上臂皮肤产生挤压感(见图9)。考虑到每个人的手臂在负载下的变形略有不同,采用有凝胶保护和防磁不锈钢帽的超小型凝胶填充压力传感器并将其与液腔连通,以测量液压源产生的压强,实现精确的挤压触觉装置力控制。

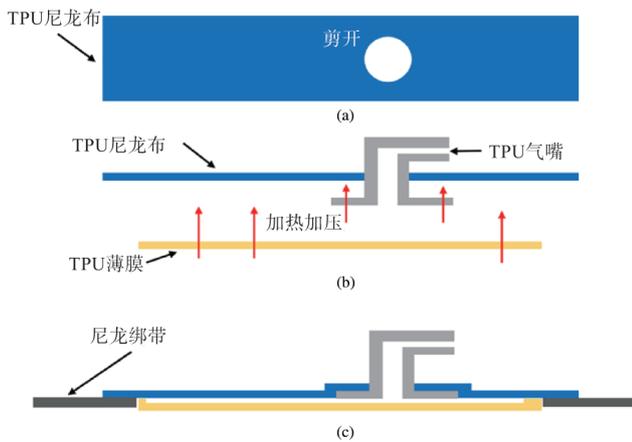


图8 柔性挤压臂带液腔制作过程

Fig.8 Fabrication procedure of soft squeeze-tactile feedback armband

1.3.2 班组及导航信息的触觉反馈表达方法

Young 等利用多种触觉模式,分别反馈不同信息,相较于将不同信息合成后只通过一个通道反馈而言,直观性更强、体验感更佳。同时,考虑到振动触觉反馈常用于表达方向信息,挤压触觉可传达持续进行的信息。因此,本文设计

的双模态触觉反馈装置使用了振动触觉反馈路径导航信息,采用挤压触觉反馈班组状态信息。对于每个触觉模态,采取分布穿戴于上臂的触觉执行器分时工作的方式,以减小各执行器间的相互串扰,影响人员感知;同时,为避免振动触觉和挤压触觉同时工作导致模态耦合影响人员感知和决策,设计了两种触觉反馈模态的优先级,保证同一时刻仅有一种触觉反馈模态工作。考虑到维持编队连通性对班组成员的安全性至关重要,因此挤压触觉反馈优先工作,其反馈完毕后,振动触觉反馈再开始工作。

对于班组状态,本文主要向班组成员反馈编队连通性信息。尽管班组中的无人系统可由式(3)来控制其运动(其中 F_i^a 为驱动第 i 个无人系统维持一定编队代数连通度的约束力),但无法像控制无人系统那样通过式(3)来直接控制人员的运动。因此本文使用挤压触觉反馈来表达 F_h^a ,以使得人员可感知到其运动对编队连通性的影响并相应调整其运动。如图10所示,图中左和右上的A、B、C、D共4个蓝色带代表穿戴于两臂上的4个挤压臂带,其中A、D臂带穿戴于相对人体中心的偏外侧,而B、C臂带穿戴于相对人体中心的偏内侧。通过人员穿戴的4个挤压触觉臂带两两组合的激活来表达 F_h^a 的方向(相对于人员前进方向,即将人员运动的平面划分为前、后、左、右4个区域,依次对应AD、BC、AB、CD两两臂带同时挤压),并通过施加比例挤压力来表达 F_h^a 的大小。

为提供路径导航信息的触觉表达,定义 M_{ij}^* 为当前所跟随路径 γ^* 下一个栅格的中心。假设人员穿戴的计算单元能够定位人员位于 x_h ,并在路径列表 Γ 中搜索路径获得 M_{ij}^* ,如图4(a)所示,则路径导航矢量为

$$F_p = M_{ij}^* - x_h \quad (4)$$

沿当前路径下一个应到达点的方向计算如下

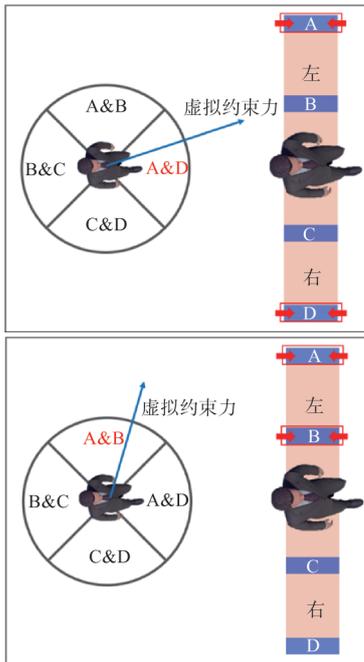


图10 班组连通性信息的挤压触觉反馈表达

Fig.10 Squeeze-tactile display for human-MRS team connectivity

$$\theta_p = \arctan((M_{j,y}^* - x_{h,y}) / (M_{j,y}^* - x_{h,x})) \quad (5)$$

该方向指示人员应移动的方向。根据人员在世界坐标系下的朝向 θ_h ，本文通过振动触觉来表达角度差异 $d_0 = \theta_p - \theta_h$ 以及角度差异变化率 $\dot{d}_0 = (\theta_p - \theta_h) / \Delta t$ ，从而引导人员向下一栅格中心转动或移动。具体来说， $|d_0|$ 越大，离头部越远的左臂或右臂振动执行器被激活，当人员调整朝向直至 $|d_0|$ 小于阈值后，双臂穿戴的振动执行器停止工作。 $|\dot{d}_0|$ 较小时，即人员朝向调整过慢时，将设置振动执行器频率接近于人体较敏感的振动频率（约160Hz），以强化人体对此振动反馈的感知，提高引导力度；当人员调整过快则减小振动执行器工作频率，降低引导力度。具体参数设置如表1、表2和图11所示。

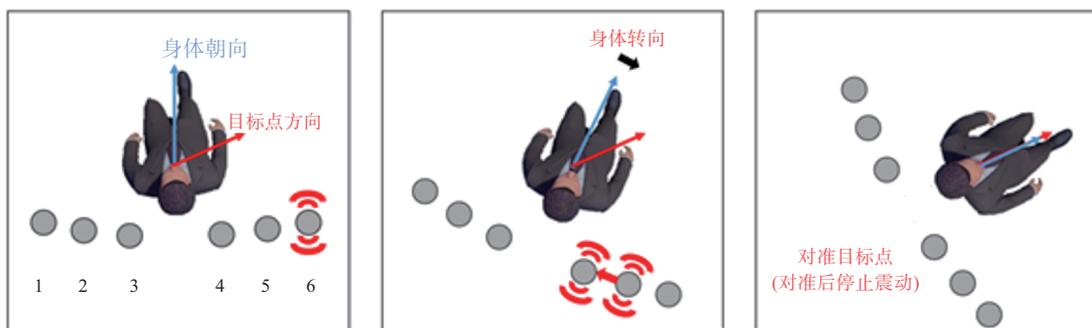


图11 d_0 的振动触觉表达示意图

Fig.11 Illustration of vibro-tactile display for d_0

表1 根据角度差异 d_0 所激活的振动触觉执行器

Table 1 Vibro-tactile actuator activated based on d_0

$d_0 / (^\circ)$	执行器编号	$d_0 / (^\circ)$	执行器编号
[0, 15]	无	[0, -15]	无
[16, 30]	3	[16, -30]	4
[31, 60]	2	[31, -60]	5
[61, 180]	1	[61, -180]	6

表2 根据角度差异变化率所设定的振动频率

Table 2 Vibration frequency set based on $|\dot{d}_0|$

$ \dot{d}_0 / ((^\circ)/s)$	振动频率/Hz
[0, 5]	160
[6, 15]	120
[16, 30]	80
[31, 45]	60
[46, 60]	40
>60	20

2 试验设计与结果

本文的试验将模拟灾后搜索救援场景下，应急救援人员带领多个携带医疗物资/食物的地面移动机器人穿越嘈杂的复杂灾后城市环境到达目的地以开展救援。为验证在人-多无人系统班组协同运动过程中使用触觉反馈向班组人员提示班组及导航信息的有效性，本文首先搭建了人-多无人系统班组仿真平台，然后开展了触觉反馈和视觉反馈两种条件的试验，最后比较并分析了两种试验条件下任务性能指标及主观评分的差异。

2.1 人-多无人系统班组仿真平台搭建

人-多无人系统班组仿真平台架构如图12所示。基于ROS和Gazebo仿真环境开发的虚拟班组（由一名虚拟人员以及4台环绕护送人员的虚拟地面移动机器人组成）和虚拟城市环境（具有墙体、障碍物、过道等城市环境元素）设置在一台Ubuntu操作系统的电脑上，并运行编队控制、路径

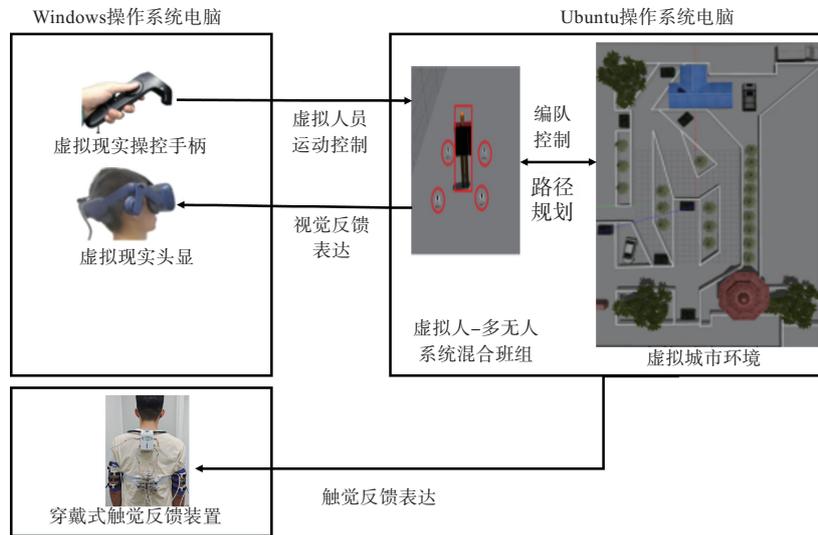


图12 人-多无人系统混合班组仿真平台架构

Fig.12 Diagram of human-MRS simulation platform

规划和信息反馈程序。另一台 Windows 操作系统的电脑设置基于 Unity 开发的虚拟现实交互软件,其中使用 HTC Vive Pro 手柄控制班组中虚拟人员的线速度和角速度, HTC Vive Pro 头显呈现班组人员第一人视角的虚拟场景。穿戴式触觉反馈装置接收来自 Ubuntu 操作系统电脑的信息以驱动装置工作。Windows 操作系统电脑及穿戴式触觉反馈装置均通过 WiFi 与 Ubuntu 操作系统电脑进行通信。基于人-多无人系统班组仿真平台的试验场景如图 13 所示。



图13 基于人-多无人系统班组仿真平台的试验场景

Fig.13 Experimental scenario with human-MRS team simulation platform

2.2 试验任务及对比条件

2.2.1 试验任务

试验中 HTC Vive Pro 头显向受试者呈现第一人视角的虚拟场景(见图 13),受试者控制虚拟人员运动,同时基于触

觉或视觉反馈尽可能地维持班组连通性,并根据导航信息带领多机器人从起点尽快到达指定目标点。

2.2.2 试验对比条件

本文开展了两种反馈条件的试验:触觉反馈条件下穿戴触觉装置并按 1.3.2 节所述方式实施反馈;视觉反馈条件下触觉反馈装置不工作,而是在头显第一人视角画面中通过红色和蓝色箭头分别表达班组连通约束力矢量 F_k^c 和路径导航矢量 F_p ,并采取与触觉反馈一样的班组连通性优先反馈策略(因此视觉反馈条件下每个时刻仅呈现单个箭头)。本文共招募了 10 名受试者(2 名女性,8 名男性,年龄 22 ~ 30 岁)参加试验,每名受试者以随机顺序完成两种条件下的试验共 6 次(每个反馈条件各 3 次),正式试验前受试者分别在两种条件下熟悉一次。同一试验条件和人员的数据求平均后再进行分析。

2.3 试验结果

本文记录了平均完成任务时间和试验过程中编队平均代数连通度 λ_2 (值越大,编队连通性维持得越鲁棒)。

图 14 为两种反馈条件下的平均完成任务时间。配对 T 检验分析显示两种反馈条件下的任务完成时间表现出显著性差异($p=0.008$)。这一结果与现有文献的发现一致:人对视觉反馈的反应时间(约 250 ~ 300ms)通常比触觉反馈的响应时间(约 100 ~ 150ms)更长^[10]。

两种反馈条件下的编队平均代数连通度如图 15 所示。配对 T 检验分析显示两种反馈条件下的编队平均代数连通度也表现出显著性差异($p=0.04$)。其原因可能如下:班组人员在观察环境的同时还要辨认不同颜色的箭头(分别对

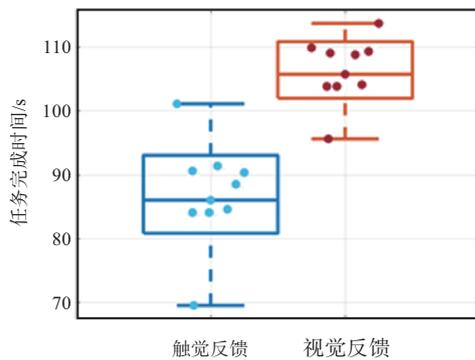


图 14 两种反馈条件下的平均完成任务时间

Fig.14 Average completion time for two feedback conditions

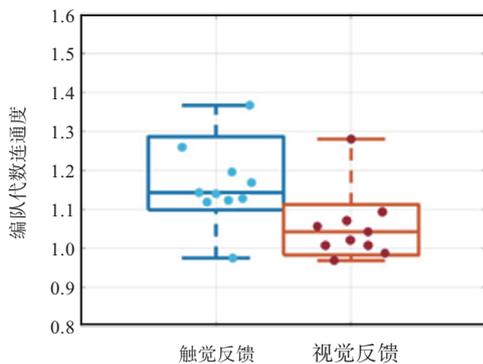


图 15 两种反馈条件下的编队平均代数连通度

Fig.15 Average algebraic connectivity level for two feedback conditions

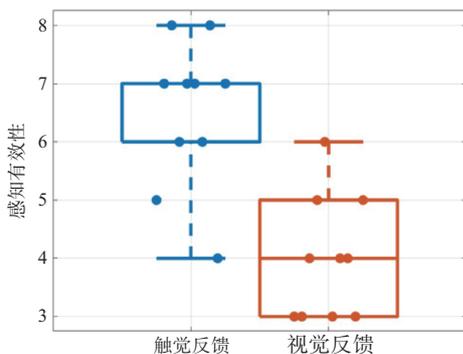


图 16 两种反馈条件的感知有效性评分

Fig.16 Perceived effectiveness for two feedback conditions

应班组状态信息和导航信息), 极易造成视觉感知和脑力负荷过重, 从而可能出现忽视班组状态所对应红色箭头的情况, 造成在行进过程中编队连通性未得到及时维护; 而在触觉反馈条件下, 班组状态和导航信息分别使用挤压和振动触觉表达, 便于人员分辨, 同时通过触觉表达信息不会显著增加视觉通道的负荷, 对班组人员及时调整运动维护编队连通性提供了可能。

受试者在试验结束后被要求立即对两种反馈条件在试验中的感知有效性进行主观评分(采用10点的两极里克特量表, 0代表“极低”, 10代表“极高”)。图16为评分结果。Wilcoxon符号秩检验显示两种反馈条件的评分存在显著性差异($p=0.021$)。除一人之外, 其余受试者均认为完成所设计的试验任务触觉反馈比视觉反馈更有效。

3 结束语

针对现有面向班组人员的触觉反馈装置模态单一反馈信息有限的问题, 本文研制了一套穿戴于双侧上臂的双模态触觉反馈装置, 提出了基于振动和挤压触觉反馈向班组人员提示路径导航和班组连通状态信息的方法。本文搭建了人-多无人系统班组协同运动控制仿真试验平台, 试验结果验证了所实现的触觉反馈对人-多无人系统班组协同运动控制的有效性。

值得指出的是, 本文所设计的人机班组协同运动控制框架中的编队控制和路径规划方法, 将来可根据具体应用进行替换。综上所述, 本文所提的触觉反馈方案在有人机-多无人机、救援员-多机器人等人机班组协同运动控制方面具有应用潜力。

AST

参考文献

- [1] 胡月, 丁萌, 姜欣言, 等. 一种面向有人/无人直升机协同打击的地面目标任务分配方法[J]. 航空科学技术, 2019, 30(10): 64-69.
Hu Yue, Ding Meng, Jiang Xinyan, et al. Ground target assignment of manned/unmanned helicopters for coordinated attack [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(10): 64-69. (in Chinese)
- [2] 李家伟, 张洪欣, 徐瑞林. 基于脑机接口的无人机编队控制系统设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 104-110.
Li Jiawei, Zhang Hongxin, Xu Ruilin. Design of UAV formation control system based on brain-computer interface data[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 104-110. (in Chinese)
- [3] Dorigo M, Theraulaz G, Trianni V. Reflections on the future of swarm robotics[J]. Science Robotics, 2020, 49(5): 4385.
- [4] Young S N, Peschel J M. Review of human machine interfaces for small unmanned systems with robotic manipulators[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2020, 50(2):

- 131-143.
- [5] Chen Mingxuan, Zhang Ping, Wu Zebo, et al. A multichannel human-swarm robot interaction system in augmented reality[J]. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 2020, 2(6):518-533.
- [6] Kennel-Maushart F, Poranne R, Coros S. Interacting with multi-robot systems via mixed reality [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2023:11633-11639.
- [7] Tsykunov E, Agishev R, Ibrahimov R, et al. SwarmTouch: guiding a swarm of micro-quadrotors with impedance control using a wearable tactile interface[J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2019, 12(3):363-374.
- [8] Aggravi M, Pacchierotti C, Giordano P R. Connectivity-maintenance teleoperation of a UAV fleet with wearable haptic feedback [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, 18(3): 1243-1262.
- [9] Giordano P, Franchi A, Secchi C, et al. A Passivity-based decentralized strategy for generalized connectivity Maintenance [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2013, 32(3): 299-323.
- [10] Darvish K, Penco L, Ramos J, et al. Teleoperation of humanoid robots: a survey[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(3):1706-1727. (in Chinese)

Research on Coordinated Motion Control of Human-MRS Team with Wearable Tactile Feedback

Zeng Hong¹, Zhang Jingtian¹, Wen Pengcheng², Sun Dengfeng¹

1. Southeast University, Nanjing 210096, China

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne and Missileborne Computer, AVIC Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710065, China

Abstract: One of the typical manned and unmanned systems coordination applications is that the multi-robot systems (MRS) carrying payloads follow the manned system to pass through the complex environment to reach the destination. With the requirements for robust human-MRS team formation maintenance and high efficiency for task completion, it is necessary to offer intuitive, sensitive and rich feedback means to the human teammate, so as to improve his/her situation awareness about the team and the environment. To this end, this paper designed the human-MRS team coordinated motion control framework with the wearable tactile feedback, developed a dual-mode tactile feedback device worn on both upper arms, and proposed the tactile display method for the path guidance and the team connectivity level with vibro-tactile and squeeze-tactile feedback, respectively. A simulated platform of human-MRS team coordinated motion control was built, and experimental results show that the average task completion time has been reduced by 17.9%, and the average connectivity level has improved by 6% with the tactile feedback, compared to those with the visual feedback. These results have verified the effectiveness of the proposed approach.

Key Words: tactile feedback; manned and unmanned systems coordination; multi-robot systems; formation control; path planning

Received: 2024-08-15; **Revised:** 2024-11-05; **Accepted:** 2025-01-09

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62173089); Aeronautical Science Foundation of China (20171969007); Ministry of Education Joint Foundation (8091B042206)