中国科学: 技术科学 2010 年 第 40 卷 第 9 期: 1029 ~ 1036
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

空中/地面机器人异构协同技术研究: 现状和展望

段海滨*, 刘森琪

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 北京 100191
* E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2009-08-01; 接受日期: 2009-10-09
国家自然科学基金项目(批准号: 60975072, 60604009)、教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(批准号: NCET-10-0021)、北京科技新星计划(批准号: 2007A017)、中央高校基本科研业务费-领航创新基金 A 类(批准号: YWF-10-01-A18)和北京航空航天大学蓝天新星(科研类)计划(2008 年度)资助

摘要 多空中/地面机器人异构协同是一个新的前沿性技术领域, 该技术可拓宽空中机器人和地面机器人的应用范围, 提高其侦察、搜救及执行其它任务的效率. 本文对空中/地面机器人的异构协同技术中的群集运动、编队控制、编队控制稳定性分析、网络控制、实际应用等核心问题进行了系统综述, 并分析空中/地面机器人异构协同技术的未来发展趋势.

关键词
空中机器人(UAV)
地面机器人(UGV)
异构协同

1 引言

随着科学技术的迅猛发展和空中对抗力量的不断升级, 防空武器也越来越先进, 作战飞机竞相采用最新技术, 其战术技术性能不断攀升, 战斗机和飞行员的生存环境越来越恶劣. 在这种情形下, 空中机器人(又称无人机, uninhabited aerial vehicle, UAV)应势而生. 与有人机相比, UAV 具有零伤亡、连续性强、高超速过载、隐身性能好、战斗展开和作战准备时间短、全寿命费用相对较低等优势. 这些优势提高了高风险目标突防能力、压制敌防空系统能力、纵深目标攻击能力与主宰战场空间能力, 使其能够在战略、战役和战术层作战中发挥多种独特的作用, 并将在未来战争中处于突出地位. 面向日趋复杂的现代战场环境, 战术任务具有多重性与复杂性, 单架 UAV 几乎无法完成指定的作战任务, 多 UAV 协同已经成为 UAV 作战使用的必然选择. 多 UAV 协同任务规划从功能上包括多 UAV 协同任务分配和多 UAV 协同路径规划. 任务分配指为多 UAV 协调一致完成任务, 考虑各种约束条件, 对 UAV 分配攻击目标, 确定打击目标的武器, 进行武器配置和编队配置等. 路径规划根据 UAV 任务的约束条件、飞行器性能以及战场环境等因素同时为多个 UAV 设计完成任务的多条飞行路径(包括空域和时域信息), 并满足 UAV 在空间和时间上的协调致关系.

在多地面机器人(unmanned ground vehicle, UGV)系统的许多应用领域中, 要求多 UGV 在作业和运动过程中保持一定的队形, 尤其是在完成军事任务的过程中, 保持队形显得更为重要. 所谓编队控制就是指多个 UGV 在前进的过程中, 保持某种队形, 同时又要适应环境(例如障碍物)约束的控制技术. 研究较多的队形有横队形、纵队形、菱形和楔形, 这主要是从军事需要的角度考虑的. 多 UGV 保持一定的队形至少有以下两点好处.

(1) 分获取当前环境信息. 单个 UGV 的传感器获取信息的能力是有限的, 如果多个 UGV 保持一定的队形, 而每个 UGV 的传感器负责获取自己周围的环境信息, 这样就可以保证比较完整地获得 UGV 群

引用格式: Duan H B, Liu S Q. Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: Current status and prospects. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 1349–1355, doi: 10.1007/s11431-010-0122-4

体当前活动区域的环境信息, 对于实现侦察、搜寻及安全巡逻等任务是有利的.

(2) 可以增强抵御外界入侵的能力, 作战过程中, UGV 通过保持队形, 可以抵抗多方向的入侵, 增加自身安全性, 群居动物按一定队形行进可以有效抵抗掠食者的现象就是一例.

此外, 研究多 UGV 的队形保持问题, 对于自动公路系统及战斗机编队等也有指导意义, 因为它们的共同之处都是多个智能体协作实现共同的目标.

在侦察任务中, UAV 可以快速地侦察广阔的领域. 然而, 速度和高度的最小限制和高度的不确定性使 UAV 在定位地面目标受到了限制. 而另一方面, UGV 可以精确定位地面目标, 但它的缺点是侦察速度慢. UAV 和 UGV 在感知方面的能力互为补充. 首先, 装有摄像机和其他传感器可以获得待侦察环境的图像, 可以补充 UGV 摄像机获得的图像. 其次, UAV 可以飞过 UGV 前方的障碍, 为追踪目标的 UGV 提供全局图像和定位信息. UAV 可以获得全局地图, 并且 UAV 与 UGV 的协同的优势可以有效的解决地图构建问题. 再次, UAV 可以感知到 UGV, 同时 UGV 可以感知到 UAV, 三维传感网络可以解决定位和地图构建问题, 与 GPS 相比鲁棒性更好. UAV 与 UGV 的混合使用可以完成很多协同任务. 另外, 由于 UAV 和 UGV 在侦察等军事任务中明显的军事优势, UAV 和 UGV 协作在国防领域得到了极大关注.

本论文以研究多UAV/UGV 的异构协同技术(图 1)为核心, 对该领域所包含六个核心问题的国内外最新进展进行了综述: (1) 群集运动; (2) 编队控制; (3) 编队控制稳定性分析; (4) 网络控制; (5) 实际应用(如搜索定位、跟踪追逃等), 并对多 UAV/UGV 异构协同所存在的主要问题及未来发展趋势进行了展望.

图 1　多 UAV/UGV 异构协同想定

2　群集运动

文献[1~13]对异构智能体的群集运动进行了研究, 对其中的分散和合并、避撞等子问题进行了详细的研究; 其中, 文献[1]对群集运动的分散和合并进行了详细的分析, 并仿真验证了有效性; 文献[6, 11]在控制、群集智能体运动方面提出了势能力的概念, 同时对避撞问题给出了具体的分析; 文献[7, 13]研究了通过局部控制达到智能体同步的方法.

文献[1]提出如果在城市中部署上百辆 UGV, 如何使用 UAV 对 UGV 进行管理调度的问题. UAV 可以管理一组 UGV 并向其发出命令, 从而控制 UGV 从群集到小组的分散和从小组到集群的合并状况, 以及每个 UGV 组的队形及运动(如图 2 所示). 这些 UAV 称为“空中牧羊犬”.

文献[1]使用了 EM 算法对“空中牧羊犬”进行初始分配化, 分配到每个UGV 组, 提出了有效的层次分解行为——UGV 组的分散和合并. UGV 组的分散及合并能力在很多不同环境下是必要的, 如 UGV 组分散通过障碍, 搜索不同区域.

文献[2]针对 UGV 组提出了一种抽象模型, 使空中平台不需要特定专业知识即可控制 UGV 组. 抽象模型包含 UGV 组编队队形、位置和方向. 通过控制器驱动 UGV 组按编队队形进行运动, 同时避免碰撞和遵守由空中平台发出的指挥命令. 之前的研究工作[3, 4]中存在的关键限制是需要通过观察全局信息来提供模型状态的估计, 通过空中平台与 UGV 的信息交互提供相应信息.

文献[6]研究了由一队 UGV 和一组 UAV 构成的异构移动机器人编队在离散时间下的合作问题. UGV 之间通过时不变最邻近原则相互作用, 通过特

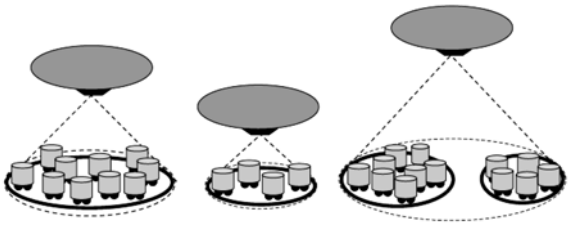

图 2　三架 UAV 引导多组 UGV

殊的通信协议使得其速度同步, 通过 UGV 之间势能力进行合并和分散动作. 地面机器人使用局部滞后信息估计他们的中心位置. 中心位置信息传送给空中机器人, 使其可以围绕这个中心盘旋, 同时避免碰撞. 对UGV组和UAV围绕中心飞行的稳定性进行了Lyapunov 稳定性分析. 文献[7]研究了一组非完整移动机器人的运动可以通过局部控制达到同步的问题. 同步策略受到 Reynolds 提出的早期群集模型[8, 9, 10]的启发, 用到控制律保证所有的智能体运动方向和速度渐进收敛到相同值上, 同时避免相互之间的碰撞.

文献[11]中每个机器人受到局部势场力和调整方向力(alignment force)的合力的控制, 前者控制机器人避免碰撞、保持在队内, 后者使各机器人运动方向趋于一致. 最后所有的机器人具有相同运动方向, 以固定的编队运动, 同时避免相互的碰撞. 文献[12]使用力传感器对机器人在未知环境中进行导航, 保证机器人位置运动到指定位置, 同时顺利解决冲突. 文献[13]提出了基于局部信息驱动机器人的控制方法, 被驱动机器人的局部信息来自于相邻的机器人. 在机器人移动的过程中相邻的机器人会发生不连续的改变, 但只有与其相邻最近的机器人和障碍才会影响机器人的运动. 这种控制方法中的不连续性不影响机器人组无碰撞运动的稳定性, 但文献没有对这种稳定性进行分析, 可以加入 Lyapunov 稳定性理论进行分析.

3　编队控制

文献[14~24]深入讨论了编队控制问题, 而编队控制是实现多UAV/UGV异构协同中的关键技术. 其中, 文献[14]使用视觉传感器进行编队控制, 具有很好的鲁棒性; 文献[17, 23, 24]使用导航函数对队形进行控制, 文献[19, 20]使用了跟随领航者方法.

文献[14]描述了用于合作完成任务的多机器人协调框架, 其中视觉用于确定相对位置、方向和保持队形. 文献[17]中提到了UAV按一定队形一致的沿某一方向扫描网格区域. 队形控制与速度同步相结合才能使 UAV 群组成一定的队形, 并按指定方向一起飞行. 为达到这个目的, 文中使用了文献[18]群集算法, 用多智能体导航函数替换智能体间的势能函数.

文献[19]和文献[20]在智能体编队上使用了领队跟随互联, 并通过状态反馈和编队控制有向图得以实现. 编队控制有向图 $F_c=(V, E, D)$组成如下:

(1) 有限集 $V=\{v_1,\cdots, v_p\}$包含 p 个顶点, 每个顶点 v_i 的映射为一个控制系统 $\dot{x}_i=f_i(t, x_i, u_i)$, 其中 $x_i\in R^n$, $u_i\in R^m$;

(2) 边集合 $E\subset V\times V$, 对编队中领队跟随关系进行编号;

(3) 边规范的有限集 $D=\{d_{ij}\}$, 其中对于每条边 (v_j, v_i), 变量 $d_{ij}\in R^n$ 表示智能体 i 与智能体 j 需要的相对位置.

通过文献[21, 22]得知ISS系统的互联有ISS性质. 将整个编队图分解为一些深度为 2 的简单子图, 把这些子图作为原始结构单元. 可以分解为这些子图的图形可以认为是广义的同一类构造. 文献[20]中使用了分散调整方向控制器进行编队控制, 如图 3 所示.

文献[23]提出了通过导航函数使得一组移动智能体形成特定队形的方法. 连通图和几何图论的性质会影响导航函数的形式. 这个方法是集中式的, 但势能函数是以完全分布式构建的. 对导航函数的分析表明多智能体组的通信协议影响到这个组的运动规划能力. 这个机制是构建一个可以证明是正确的、全局收敛的分布式机制的第一步, 同时可以评估这种分布式的性能. 文献[24]中结合用于快速导航函数的离散反馈合理的设计势能函数以达到全局渐进收敛和避撞的目的. 这种方法可用于任意形状的机器人, 只要可行解存在就一定能得到可行解, 这种非完整控制器设计可以用于独轮 UGV. 文献[24]没有考虑可能存在的曲率约束问题.

4　编队控制稳定性分析

文献[18~20, 25]对群集运动和编队控制的稳定性进行了分析. 文献[25]使用积分反步的方法对机器人动态系统稳定性进行了分析; 文献[18]证明了用于群集运动的分布式合作控制器具有渐进稳定性; 文献[19, 20]对领队控制的编队稳定性进行了分析, 文

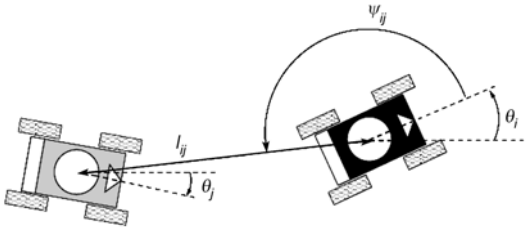

图 3　使用分散调整方向控制器的三个 UGV 编队

献[19]给出了多种稳定队形结构, 同时用实验数据证明了其稳定性, 文献[20]量化了领队给编队网络的输入传播, 并获得了观察误差对稳定性的影响.

文献[25]提出了离散系统中积分反步的新方法, 用于分析非完整 UGV 动态系统稳定性. 仿真研究表明这种方法可以有效减轻离散非完整控制器中自激振动的问题. 这种方法不仅可以用于非完整系统, 还可以应用在严格离散非线性反馈系统, 而且这种反步离散参考控制信号有助于减弱自激震动的影响.

文献[18]提出了分布式合作控制器, 该控制器基于局部导航函数, 在一组移动智能体编成指定队形得到几乎全局渐进稳定性, 同时避免相互之间的碰撞. 队形和方向的稳定性可能是受智能体之间相对位置的影响, 而非与邻近智能体之间距离的影响. 只要局部导航函数的参数调整为基于环境的几何关系和网络的度, 只要局部导航函数基于环境的几何关系及互联网络的度是调整好的, 渐进稳定性即可以得到证明. 反馈控制器可以使智能体避开静态指向障碍, 并利用邻近智能体信息和网络邻近智能体的通信按指定队形进行编队. 这种方法在三智能体组和四智能体组的仿真中验证了其有效性. 网络参数、协议和信息流对分布式编队稳定机制的性能的影响, 以及与理想中心式选择控制框架相比性能方面的缺陷进行量化还需要进一步研究.

文献[19]提出了一种分析基于跟随领航者方法(leader-follower)的互联多机器人队形稳定性的方法. 这种方法利用基本跟随领航者方法互联的输入状态稳定特性, 并通过这种特性在网络中的传播建立全局稳定界限. 利用类似建立起互联网安全系统的概念, 制定一种较之串行或网格稳定度更弱形式稳定度的协议, 从而在领队输入与编队稳态误差之间建立起了联系. 文献[19]主要研究了机器人循环互联, 如何包含在 ISS 框架之下. 文献[19]的方法给出了不同的多种稳定队形结构, 并在关于稳定性的网络协议相关实验数据下进行了证明. 其目前研究是把 ISS 性质用代数图论框架表示出来, 这种框架探讨了网络协议与稳定性的关系, 怎样选择网络协议调高通信的稳定性和有效性, 这两个性质如何影响全队的稳定性和通信.

文献[20]研究了基于领队跟随的移动智能体编队稳定性问题, 得到了关于领队动作如何影响编队互联误差的非线性增益估计. 领队编队稳定性(leader to formation stability, LFS)增加定量误差放大, 关系到互联协议的稳定, 并为不同编队协议提供了安全界限. 基于 LFS 增益的分析为提高编队的安全性、鲁棒性和其他特性. LFS 是基于领队跟随编队的稳定性, 可以量化领队传给编队网络的输入的传播, 并获得观察误差对稳定性的影响. 这种方法提供了用于分析性计算的性能指标, 并可以计算最坏情况下极限误差界限. 最后, 通过 LFS 得到的最坏情况下的终态误差界可以用来检查一个特定的与误差相关的编队设计方案.

5 网络控制

自 Wiener N 的《Cybernetics: Or the Control and Communication in the Animal and the Machine》[26]一书出版以来, 人们一直在思考如何提高人与机器之间的通信能力. 随着控制、网络及通信技术的发展和相互渗透, 控制系统结构越来越复杂, 空间分布越来越广, 对系统控制性能的要求也越来越严格. 文献[27~32]将网络控制应用于异构智能体的协同控制. 文献[30]说明了网络和控制系统相互影响, 文献[31]在多智能体之间使用了 TDMA 通信协议以达到对智能体组的控制, 文献[32]在 MANET(military ad-hoc networks)基础上实现了异构智能体的网络控制. 文献[27]提出了有效定位传感网中节点的算法, 使用这种基于扩展卡尔曼滤波的方法在定位节点时几乎不需要任何先验知识. 网络中每个节点可以根据邻居节点位置估计自身位置, 并使用消息传递算法向邻居节点传输自身信息. 这样网络的定位问题通过节点自身估计得以解决.

信息交互是协同控制的基本要素. 在搜索营救等需要态势评估的任务背景下, 文献[28]提出了维持端到端通信的策略. 根据信号强度和感知的网络带宽两项链路质量指标, 设计低水平分布式无功控制器对单个智能体运动进行约束, 并在室外环境多 UGV 实验平台上进行了实验验证, 证明了这种设计的有效性和可行性. 文献[29]给出了在时不变最邻近原则的智能体互联系统稳定的情况下, 相邻智能体之间传播状态信息的时延不影响系统的稳定性. 通过研究特定级别非负矩阵的性能, 可以在离散时间下看到这一点, 通过观察系统的轨迹没有受到延迟动态局部的影响. 但在通信协议是时变下的情况结

果需要进一步研究. 文献[30]讨论了网络和控制系统的相互影响. 随着对物理网络机构结构和动态性了解的深入, 这些对闭环控制系统的影响和控制网络的能力可以进行大量研究. 文献[31]中地面智能体通过时不变规则进行相互作用, 使用 TDMA 通信协议达到速度同步, 借助势能力保持智能体组的合并和分散. 文献[32]提出了动态部署 UAV 充当中继站使得不能直接通信的地面 MANET 节点实现全连通通信, 并用启发式算法寻找实现全连通所使 UAV 的最少数目和 UAV 对应的部署(如图 4 所示).

6　空中/地面机器人异构协同应用

6.1　搜索定位

近来很多研究中, 自动目标识别是进行侦察搜索的 UAV 的一项任务, 对侦察搜索区域进行图像数据收集并上传给地面控制中心进行分析, 确定潜在目标. 这种中心式自动目标识别中存在一些问题, 如用于侦察的 UAV 的数目, 进行中心定位时交互信息的网络时延和对定位中心进行攻击系统的感知能力. 文献[33]通过分布式系统解决了这些问题, 该文献描述了一种基于多智能体的样机系统, 受昆虫群落的启发该系统使用群集技术, 分布式控制 UAV 在仿真环境中进行自动目标识别. 文献[34]描述了一个用于环境感知的多 UAV 和 UGV 组合的分散式结构, 并根据传感信息融合问题已有的方法提出了理论框架, 这使得不同来源的信息得到融合, 可用于搜索任务和跟踪多个地面目标.

作为 DARPA-MARS2020 计划的一部分在城市环境中部署多队机器人, 文献[35]需要考虑三个重要问题: 态势感知方法的发展, UAV 和 UGV 协同感知和保持通讯队形的射电图结构. 该文献还提出了一种分布式数据融合(decentralized data fusion, DDF)方法, DDF 可提供等价与线性卡尔曼滤波的分布式估计框架. 射电连接图的一个功能是返回搜索环境中两位置间的信号强度, 而且可用于规划多机器人任务以增强通信网络(如图 5 所示).

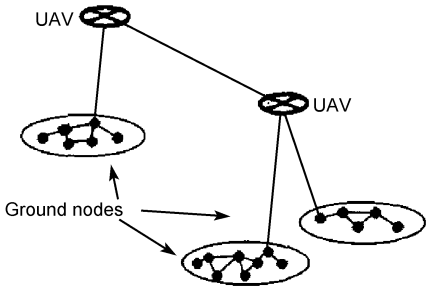

图 4　包含三个分离地面节点和两个可通信 UAV 的 MANET

文献[36]提出了基于视觉模拟器估计方法的完整系统, 使得微型 UAV 在室内环境协助 UGV 导航, 其主要实验设备如图 6 所示.

UGV 系统使用摄像机和姿态估计方法对 UAV 的位置和高度进行估计. 估计值提供给 UAV 的外环控制信号使其保持在目标位置, 高度和指向 UGV 方向. UAV 的控制信号由 UGV 产生传送给驾驶系统. 地面站提供了操作 UGV 的图形用户界面, 并且可以设定 UAV 的目标位置, 高度和指示方向. 每个系统的具体描述如图 7 所示.

6.2　跟踪追逃

随着安全问题在世界范围内日益成为严重问题, 安装在 UAV 上的空中视频监视系统无论在民用还是军用方面均发挥着越来越重要的作用. 对地面移动目标的侦察跟踪是 UAV 视频监视系统的关键. 当前,

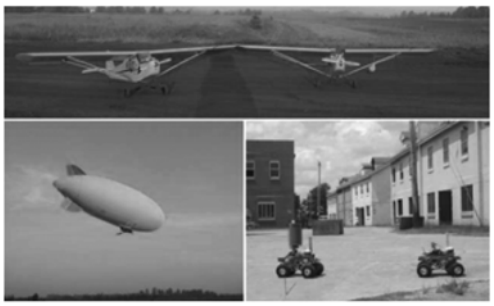

图 5　实际 UAV 和 UGV 组成的编队

图 6　主要实验设备: 微型 UAV 和 UGV

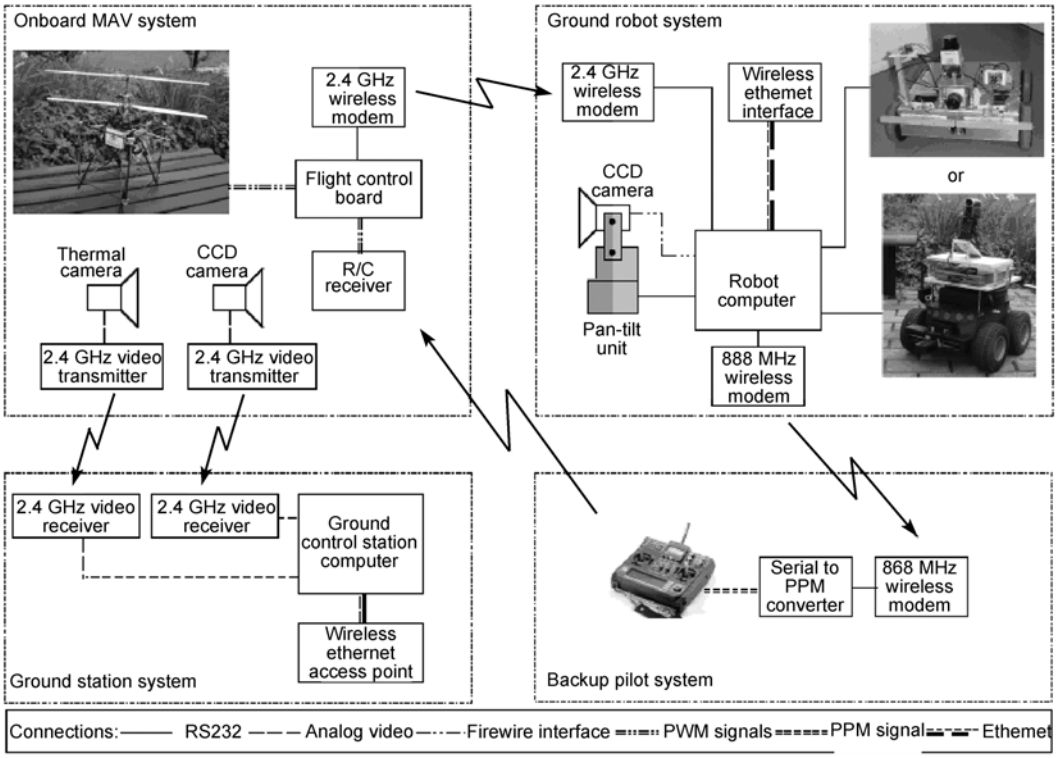

图 7　多 UAV/UGV 异构协同实验系统子部分及其之间的互联

随着 UAV 技术的发展, 图像分析理论和硬件使得全天候长距离监视任务成为可能. 文献[37]给出了如图 8 所示的视频监视系统.

文献[38]提出了一种系统导向/控制导向的智能体框架-混合智能控制体(hybrid intelligent control agent, HICA). HICA 以混合控制系统为核心, 基于知识的规划与协作与原有的混合控制相结合达到协调控制多模式动态复合系统的目的, 并将这种方法用于控制UAV和UGV编队进行追逃演习. 这种方法与已有的协作控制智能体编队方法相比关键优势在于没有忽视智能体内部动态的不稳定影响, HICA 的智能体包含稳定内部动态结构. 图 9 给出了一个多 UAV 和 UGV 进行追逃概念想定.

图 9 中, UAV 和 UGV 编队协作捕获用一个 UGV 表示的逃避物. 假设没有先验地图存在, UGV 可以感知到其周围有限区域, 而 UAV 可以飞的足够低以对逃避物进行定位, 并报告逃避物位置. 通过 UAV 跟踪地面移动目标对于很多侦察、监视和目标捕获等 UAV 众多任务来说是非常关键的. 对于提到这些任务, UAV 上装载合适的传感器以便执行所需的任务. 在很多情况下, 由摄像头组成的跟踪传感器可感知到前方或侧面

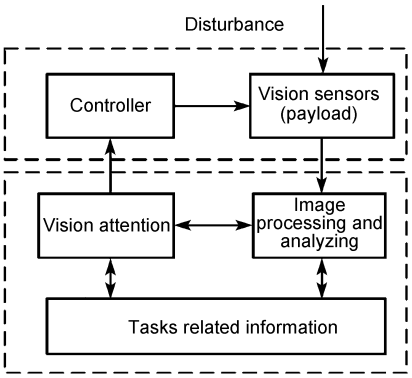

图 8　基于视频监视系统的主动视觉图像

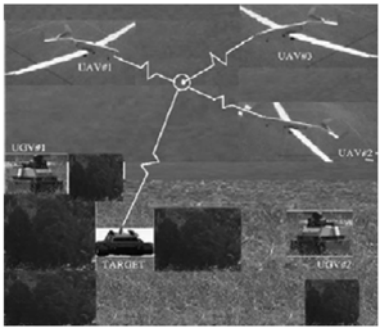

图 9　多 UAV 和 UGV 进行追逃概念想定

情况. 跟踪问题对于 UAV 是一个典型问题, 自动地、动态的定位 UAV 使得地面移动目标保持在 UAV 摄像机的感知范围内[39]. 文献[40]描述的动态系统中包含输入转矩和摩擦力, 控制方法使用了反步控制, 经证明跟踪误差可以渐进稳定收敛到原点.

7　空中/地面机器人异构协同技术研究展望

UAV/UGV 异构协同技术的研究还处于起步阶段, 目前得到的理论及技术应用结果仍然有限, 很多理论需要进一步的研究. 本文主要对国内外在 UAV/UGV 异构协同领域的最新进展进行了评述, 目前该领域尚存在一些问题需要进一步研究:

(1) 研究更广泛意义下的基于动态、时变拓扑结构的多 UAV/UGV 异构群集运动系统; 建立更完整的群集运动性能分析与评价理论体系, 在分析结果的指导下, 实现群集系统的参数自调整, 也是一个很有发展前途的方向. 而且目前的研究多停留在多智能体仿真的层次上, 如何构造复杂环境下的实用化多 UAV/UGV 群集系统, 也是一个非常有意义的研究方向.

(2) 对于多 UAV/UGV 异构群集运动和编队控制的协同控制的方法较多, 各种方法的稳定性还需要进一步的分析, 可通过 Lyapunov 稳定性理论来进行验证.

(3) 在多 UAV/UGV 所用的异构网络控制中, 不同控制模式下对网络通信协议的要求不同, 而且网络控制技术还存在时延、丢包、多包传输和网络调度等问题, 已有文献中对网络通信进行了假设, 简化的通信协议, 得到了较好的仿真结果. 而在实际控制中网络的不确定延迟、大延迟和数据包丢失等是基于网络的空中/地面机器人异构协同面临的关键问题.

(4) 多 UAV/UGV 异构协同覆盖在战场情报收集、监视和侦察(intelligence, surveillance, and reconnaissance, ISR)等军事应用有着重要作用, 从目前的国内外的实验平台来看, 信息的获取主要是通过分布式的摄像机、视觉传感器等器件的原始数据进行数据融合而得到, 使用的设备较为复杂, 在设备改进方面可以融入模块化设计的概念, 优化目标识别的过程, 提高目标定位的效率.

(5) 对于跟踪追逃问题, 当前大多数研究模型对移动目标的运动及其环境的假设比较简单, 仅是初步验证了跟踪移动目标的可行性; 而在具体实际环境中, 由于环境的不确定性、移动目标具有一定的智能则会使追逃问题变得复杂, 在这种情况下, 可以融入博弈论的观点, 使得跟踪追逃问题更具有实际意义.

8　结束语

国际上对 UAV/UGV 异构协同问题的研究已经成为一个新的热点, 而我们国内在这一领域的研究才刚刚起步. 目前该领域还有很多关键问题亟待解决, 对于 UAV/UGV 异构协同进行深入研究不仅在军事和民用领域均具有非常广阔的应用前景, 而且也是现代机器人系统朝着综合化、智能化和先进化发展的重要技术基础.

参考文献

1 Grocholsky B, Keller J, Kumar V, et al. Cooperative air and ground surveillance: A scalable approach to the detection and localization of targets by a network of UAVs and UGVs. IEEE Robot Autom Mag, 2006, 13: 16–26

2 Chaimowicz L, Kumar V. Distributed Autonomous Robotic Systems. Japan: Springer, 2007. 243–252

3 Nathan M, Jonathan F, Vijay K. Controlling a team of ground robots via an aerial robot. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego: IEEE, 2007. 965–970

4 Michael N, Belta C, Kumar V. Controlling three dimensional swarms of robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Orlando: IEEE, 2006. 964–969

5 Reynolds C. Flocks, birds, and schools: a distributed behavioral model. Comput Graph, 1987, 21: 25–34

6 Tanner H G, Christodoulakis D. Decentralized cooperative control of heterogeneous vehicle groups. Robot Auton Syst, 2007, 55: 811–823

7 Tanner H G, Jadbabaie A, George J. Flocking in teams of non-holonomic agents. Lecture Notes in Control and Information Sciences, 2009. 229–239

8 Reynolds C. Flocks, birds, and schools: a distributed behavioral model. Comput Graph, 1987, 21: 25–34

9 Vicsek T, Czirok A, Ben J E. Novel type of phase transitions in a system of self-driven particles. Phys Rev Lett, 1995, 75: 1226–1229

10 Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. IEEE T Automat Contr, 2002, 48: 988–1001

11 Tanner H G, Jadbabaie A, Pappas G J. Coordination of multiple autonomous agents. In: Proceedings of the 11th Mediterranean Conference on

Control and Automation. Washington D C, 2003. 3448–3453
12 Dushyant P, Herbert T. Hybrid velocity/force control for robot navigation in compliant unknown environments. Robotica, 2006, 24: 745–758
13 Tanner H G. Flocking with obstacle avoidance in switching networks of interconnected vehicles. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE, 2004. 3006–3011
14 Spletzer J, Das A K, Fierro R. Cooperative localization and control for multi-robot manipulation. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui: IEEE, 2001. 567–573
15 Alur R. A framework and architecture for multirobot coordination. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Experimental Robotics. Honolulu: IEEE, 2000. 977–995
16 Desai J, Ostrowski J P, Kumar V. Controlling formations of multiple mobile robots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Leuven: IEEE, 1998. 2864–2869
17 Tanner H G. Switched UAV-UGV cooperation scheme for target detection. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Roma: IEEE, 2007. 3457–3462
18 Herbert G T, Amit K. Formation Stabilization of Multiple Agents Using Decentralized Navigation Functions. Robotics: Science and Systems I, MIT Press, 2005. 49–56
19 Herbert G T, Vijay K, George J P. Stability properties of interconnected vehicles. In: Proceedings of the 15th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems. Notre Dame: IEEE, 2002. 1–12
20 Herbert G, George J P, Vijay K. Leader-to-formation stability. IEEE T Robotic Autom, 2004, 20: 433–455
21 Krstic M, Kanellakopoulos I, Kokotovic P. Nonlinear and Adaptive Control Design. New York: John Willey and Sons, 1995
22 Isidori A. Nonlinear Control Systems II. Berlin: Springer, 1999
23 Herbert G T, Amit K. Towards decentralization of mutli-robot navigation functions. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Barcelona: IEEE, 2005. 4143–4148
24 Tanner H G, Loizou S, Kyriakopoulos K J. Nonholonomic stabilization with collision avoidance for mobile robots. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Hawaii: IEEE, 2001. 1220–1225
25 Tanner H G, Kyriakopoulos K J. Discontinuous backstepping for stabilization of nonholonomic mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D C: IEEE, 2002. 3948–3953
26 Wiener N. Cybernetics: Or the Control and Communication in the Animal and the Machine. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1948
27 Joseph D, Sanjiv S, Benjamin G. Decentralized mapping of robot-aided sensor networks. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. California: IEEE, 2008. 583–589
28 Mong-ying A H, Anthony C, Vijay K. Towards the deployment of a mobile robot network with end-to-end performance guarantees. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Florida: IEEE, 2006. 2085–2090
29 Tanner H G, Christodoulakis D K. State synchronization in local-interaction networks is robust with respect to time delays. In: Proceedings of 44th IEEE Conference on Decision and Control. Spain: IEEE, 2005. 4945–4950
30 Clauset A, Tanner H G, Abdallah C T, et al. Controlling across complex networks; emerging links between networks and control. Annu Rev Control, 2008, 32: 183–192
31 Tanner H G, Christodoulakis D K. Cooperation between aerial and ground vehicle groups for reconnaissance missions. In: Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego: IEEE, 2006. 5918–5923
32 Chandrashekar K, Dekhordi M R, Baras J S. Providing full connectivity in large ad-hoc networks by dynamic placement of aerial platforms. In: Proceedings of IEEE Military Communications Conference. Monterey: IEEE, 2004. 1429–1436
33 Prithviraj D. A multiagent swarming system for distributed automatic target recognition using unmanned aerial vehicles. IEEE T Syst Man Cy A, 2008, 38: 549–563
34 Ben G, Selcuk B, Vijay K. Synergies in feature localization by air-ground robot teams. In: Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics. Singapore: IEEE, 2004. 353–362
35 Chaimowicz L, Cowley A, Gomez-Ibanez D. Deploying air-ground multi-robot teams in urban environments. In: Proceedings of the 2005 International Workshop on Multi-Robot Systems. Washington D C: IEEE, 2005. 1–12
36 Rudol P, Wzorek M, Conte G. Micro unmanned aerial vehicle visual serving for cooperative indoor exploration. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana: IEEE, 2008. 1–10
37 Li Z J, Ding J R. Ground moving target tracking control system design for UAV surveillance. In: Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan: IEEE, 2007. 1458–1463
38 Fregene K, Kennedy D C, Wang D W L. Toward a systems- and control-oriented agent framework. IEEE T Syst Man Cy B, 2005, 35: 999–1012
39 Ariyur K B, Fregene K O. Autonomous tracking of a ground vehicle by a UAV. In: Proceedings of American Control Conference. Seattle: IEEE, 2008. 669–671
40 Jorge L P, Chaouki T A, Herbert G T. Leader-follower control with odometry error analysis. In: Proceedings of European Control Conference, Kos, Greece, 2007. 3783–3789