

平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用

白天翔^{1,2,3} 王帅^{1,3} 沈震^{1,2,4} 曹东璞^{2,5} 郑南宁⁶ 王飞跃^{1,7}

摘要 本文将基于 ACP (Artificial societies, computational experiments, parallel execution) 的平行系统思想与机器人领域相结合, 形成一种软硬件相结合的框架, 为无人机、无人车、无人船在复杂环境中实验、学习与实际工作提供便捷、安全的平台, 即平行无人系统. 本文从平行机器人的基本概念出发, 提出平行无人系统的基本框架, 并介绍了各模块的基本功能与实现方法, 探讨了其中的关键技术. 然后本文围绕无人机、无人车、无人船三个方面展望了无人平行系统在实际中的应用和所面临的挑战, 提出了平行无人系统的未来发展方向.

关键词 平行系统及理论, 平行机器人, 软件定义机器人, 无人车, 无人机, 无人船

引用格式 白天翔, 王帅, 沈震, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行机器人与平行无人系统: 框架、结构、过程、平台及其应用. 自动化学报, 2017, 43(2): 161–175

DOI 10.16383/j.aas.2017.y000002

Parallel Robotics and Parallel Unmanned Systems: Framework, Structure, Process, Platform and Applications

BAI Tian-Xiang^{1,2,3} WANG Shuai^{1,3} SHEN Zhen^{1,2,4} CAO Dong-Pu^{2,5}
ZHENG Nan-Ning⁶ WANG Fei-Yue^{1,7}

Abstract In this paper, we propose a framework to incorporate robotics and software-defined surrogates using the ACP-based parallel systems theory. The framework offers a flexible, cost-effective and safe platform to develop and conduct experiments on UAVs, UGVs, USVs and AUVs, and links unmanned vehicles with cyber-physical-social systems (CPSS). This paper focuses on the structure of the proposed framework and each of the functional modules. Relevant tools, as well as further applications and challenges of the proposed system are also discussed.

Key words Parallel system and parallel theory, parallel robotics, software-defined robotics, UAV (unmanned aerial vehicle), UGV (unmanned ground vehicle), USV (unmanned surface vehicle)

Citation Bai Tian-Xiang, Wang Shuai, Shen Zhen, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel robotics and parallel unmanned systems: framework, structure, process, platform and applications. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(2): 161–175

收稿日期 2016-12-28 录用日期 2017-02-01
Manuscript received Dec. 28, 2016; accepted Feb. 1, 2017
本文责任编辑 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong

1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 中国 2. 青岛智能产业技术研究院 青岛 266000 中国 3. 中国科学院大学 北京 100049 中国 4. 中国科学院云计算中心 东莞 523808 中国 5. 英国克兰菲尔德大学驾驶员认知与自动驾驶实验室 克兰菲尔德 MK43 OAL 英国 6. 西安交通大学人工智能与机器人研究所 西安 710049 中国 7. 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心 长沙 410073 中国

1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100190, China 2. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266000, China 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China 4. Cloud Computing Center, CAS, Dongguan 523808, China 5. Driver Cognition and Automated Driving Laboratory, Cranfield University, Cranfield MK43 OAL, UK 6. Institute of Artificial Intelligence and Robotics (IAIR), Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China 7. Research Center of Military Computational Experiments and Parallel Systems, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

1 引言

无人机与自动驾驶无疑是近年来科学界、产业界、新闻界的宠儿. 几十年来, 各型自动机械与工业机器人极大提升了人类的生产力, 将人们从单调乏味的体力劳动中解放出来. 同时, 人们也希望机器人更加智能, 更加自主, 更加系统化, 进一步承担更多的生产活动, 并参与到日常生活中. 伴随着这样的期望, 人们对于无人设备的诞生喜闻乐见, 热切关切它们的发展, 也不断提高着对其的期望. 现在, 无人机已飞入寻常百姓家, 无人车、无人船也进入了公众视野, 智能无人载具已初具规模. 如何系统化地管理无人载具, 如何控制、优化、协调无人系统, 已成为一个引人关注的研究问题.

无人机 (Unmanned aerial vehicle, UAV) 的历史可以追溯到第一次世界大战, 英国的卡德尔和皮切尔两位将军提议研制一种不用人驾驶的小型飞

机,飞到敌军上空投下炸弹.在海湾战争与伊拉克战争中,这一设想真正被用在了战场上.美国军用无人机出色地完成了侦查与打击任务,证明了固定翼无人战机有潜力成为未来战场的主战力量,拉开了各国竞相研制固定翼军用无人机的序幕,并逐渐辐射到民用.得益于其结构简单、造价相对低廉、机动灵活等特点,旋翼无人机迅速成为了机器人研究^[1-2]与应用的热点问题.目前,世界上已有多款产品级的无人机,包括旋翼与固定翼,用于航拍、监控、勘探、农业生产等多项民用、商用活动.

从上世纪 70 年代开始,美国、英国等国率先开展了地面无人载具 (Unmanned ground vehicle, UGV),或简称无人车的研究.进入 21 世纪之后,随着计算能力加强、传感器精度提升、机器学习与模式识别算法的突破,无人车取得突破的条件逐渐成熟.2004 年,美国国防部先进技术研究院 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 开始举办一系列无人车比赛,无人车的研究得到空前关注.2014 年,Google 发布其无人车,并于 1 年后获得美国首个无人驾驶车辆许可证,引爆无人车热潮.随后, Tesla、Uber、百度等公司相继宣布自己的无人车计划,目前一些用户已经可以在日常行驶中体验无人驾驶.

无人船分为水面无人舰艇 (Unmanned surface vehicle, USV) 与水下无人潜航器 (Autonomous underwater vehicle, UAV, AUV).水面无人舰艇是继无人机、无人车、无人潜航器之后受到关注的无人自主项目.2016 年,美国宣布其“海洋猎手”型无人反潜舰已进入为期两年的测试阶段,引起社会对于无人船的热切关注.目前,无人船主要用于水样检测、水下探测、巡逻搜救等任务.尽管起步稍慢,但在无人车、无人机上使用的传感器融合、导航等技术亦可用于无人船,有助于无人船的研发工作.无人潜航器,又称自动潜水器,是一种水下机器人,包括螺旋桨潜航器与仿生机器鱼等.其研究可追溯到 1957 年华盛顿大学应用物理学实验室的“特种用途水下研究载具 (Self-propelled underwater research vehicle, SPURV)”.目前 AUV 主要用于水下勘探、水下作业、洋流监测等军用民用领域.

然而,尽管无人载具正在大步迈向成熟化、市场化,但距离其全面应用,成为生产生活的主力尚面临许多挑战.例如,无人载具能否在变化的、不定的、未知的环境中稳定工作?能否在多种任务中进行灵活有效的协调?能否在人机共同协作的复杂场景下找到完成任务的最优方案?这些都需要时间去检验,然而除了设备昂贵易坏,实验成本高等经济因素,还涉及到法律、伦理等社会问题,无人载具又处于难以实验的尴尬境地.

因此,我们提出使用处理复杂系统的 ACP 平行系统方法解决无人系统面临的问题.即将平行理

论与机器人的结合——平行机器人方法,应用于无人机、无人车、无人船领域中形成平行无人系统,连通物理、网络和社会空间,以数据为驱动推进无人机等的优化训练,走向系统化应用.

本文余下的部分组织如下:第二节首先介绍平行系统理论与 ACP 方法,然后介绍软件定义的机器人,并基于此介绍平行机器人与平行无人系统;第三节具体介绍平行无人系统的框架,以及如何实现平行无人系统;第四节对平行无人系统在无人机、无人车、无人船、综合协同四个领域的应用做出展望,并提出其核心技术与潜在研究点.最后,第五节对本文所述工作进行总结.

2 平行系统与平行机器人

对复杂系统的研究,或对本质上复杂性的科学问题的研究,往往不满足科学上“可实验”、“可重复实验结果”这两个要求.例如在正常城市道路,包括有人驾驶机动车、非机动车、行人等进行无人车的研究,就难以满足以上两个要求.一是目前法律尚不允许无人车参与正常交通,二是难以进行每次所有交通参与者,特别是行人,都具有相同行为模式的重复性实验.除了存在实验方面的难题,复杂系统也难以建立足够精确的以解析方式预测系统短期行为的模型^[3-4].综合以上两方面,通常对复杂系统只能进行离线、经验性、粗粒度分析,难以满足精度、实时性要求.这是由于对复杂系统的求解空间停留在实际系统本身所处的物理空间,对复杂系统的求解方法也停留在解析方法上.文献 [5] 将复杂系统面临的问题定义为不确定性 (Uncertainty)、多样性 (Diversity) 和复杂性 (Complexity),简称 UDC 问题.为更好地分析与处理复杂系统的 UDC 问题,必须拓展其求解空间,在新的空间中寻求新的求解方法,即基于 ACP 的平行系统方法.本章接下来的内容将首先介绍基于 ACP 的平行系统;然后介绍机器人领域中实现平行系统的关键元素,即软件定义的机器人;最后介绍平行系统与 ACP 方法在机器人领域上的应用,即平行机器人.

2.1 平行系统理论与 ACP 方法

“平行系统即由某个自然存在的实际系统及与之相对应的一个或多个虚拟或理想化的人工系统所共同组成的系统^[6]”.广义而言,任何结合数学模型、仿真模拟、甚至头脑中的假象推演,都可理解为使用平行系统解决实际问题.然而,如前文所述,复杂系统的精确解析数学模型难以得到,仿真模拟又存在无“真”可仿的尴尬情况,假想推演极度依赖管理者的个人经验,难以科学化描述.基于此,王飞跃研究员于 2004 年提出基于 ACP 的平行系统 (后文中简称平行系统),作为一种解决复杂系统管理与控制问题的科学研究与实践方法^[7-8].

图1所示为平行系统的基本框架(以实际系统对应一个人工系统为例)。平行系统由实际系统与人工系统构成,通过二者虚实互动的相互作用,实现对虚实系统的管理与控制、决策方案的实验与评估、有关人员的学习与培训三个主要功能模块^[7]。平行系统的主要目的是分析复杂系统问题,提出解决方案,评估解决方案。具体而言,平行系统通过建立与实际系统相对的人工系统,实现解空间的突破,二者相互联系,又可独立运行,各自具有对状态的观测与求解能力。实际系统的状态通过传感器得到,包括测量得到的即时或历史状态;人工系统的状态通过在人工系统中基于实时和历史数据计算推演得到,包括任何决策导致的历史、现在、未来任一时间点的状态。通过对比估计两个系统的行为与状态,可以实现对各自未来状况的预测与评估,据此调节各自系统的管理与控制方式,从而达到实施有效策略和学习与培训的目的。平行系统方法目前已在化工、交通等领域得到应用,并取得显著效果。

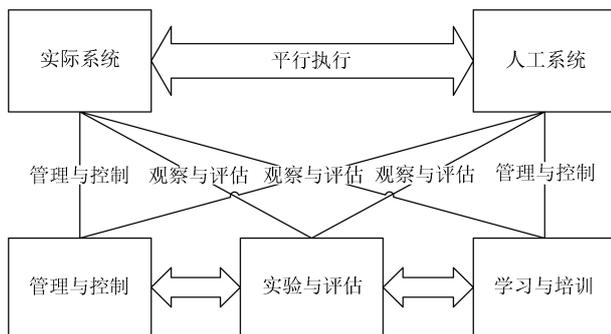


图1 平行系统基本框架

Fig. 1 The basic framework of parallel system

ACP 是使用平行系统解决复杂系统问题的指导思路,由王飞跃研究员于2004年提出。所谓ACP,即为人工社会(Artificial societies)、计算实验(Computational experiments)与平行执行(Parallel execution)的有机组合^[9]。换言之,ACP定义了实现平行系统的三个步骤:第一步,建立与实际系统相对应的人工系统;第二步,在人工系统中利用计算实验对所研究复杂问题进行分析与评估;第三步,实际系统与人工系统通过虚实互动的平行执行方式实现二者的管理与控制。

所谓人工系统,可视为传统数学解析方法建模的扩展,是广义的知识模型,是落实敏捷性(Agility)的基础。构建人工系统的方法有许多,例如各学科领域都有许多本领域数值仿真器或物理仿真器,亦可以通过多智能体建立代理模型或概率图模型的方法构建。人工系统首先应与实际系统具有特征一致性,还应具备计算快速、部署简单、可交互性等特点。计算实验是仿真模拟的升华,是在人工系统中通过计算推演得到复杂系统特性的手段,是确保复杂系

统能够聚焦(Focus)的手段。计算实验应从由数据驱动,融合知识自动化、机器学习等方法,达到可计算、可优化、实时性等要求。平行执行是自适应控制等思想的推广,在虚实平行系统中构成大闭环反馈机制,是确保执行结果收敛(Convergence)的方法。所以说,基于ACP的平行系统可以实现复杂系统从UDC到AFC的跨越。

对于本文所述无人系统,由无人机、无人车、无人船等组成,名为“无人系统”,实为“人在环路的无人系统”,因为无人系统必将在未来渗入人类的日常生活中,形成一个庞大的复杂系统,环境时变,行为不定,具有前文所述UDC性质。为了实现对此复杂系统的控制,我们需要引入平行系统方法,建立无人平行系统,将求解空间由网络物理空间(Cyber-physical space, CPS)推到网络物理社会空间(Cyber-physical-social space, CPSS)。此时,如前文所述,我们首先需要搭建与实际无人系统相对应的平行无人系统,其载体便是软件定义的机器人。

2.2 软件定义的机器人

软件定义的概念源于近年来兴起的软件定义网络(Software defined network, SDN)。SDN将网络的控制与转发分离,结合开放的编程接口,实现网络的灵活控制。具体而言,SDN将网络设备从传统的专用软件、专用操作系统、定制硬件紧密结合的框架中走出来,形成网络控制部与硬件层相分离的双层结构,或者将控制部进一步细分为应用层与控制层的三层结构。通过这样的结构,网络控制可以通过软件逻辑实现,即在应用层设计控制逻辑,经由控制层控制底层硬件,管理人员无需专注于设计网络协议,从而提高网络管理的灵活性、可优化性、可移植性和可维护性。简而言之,SDN实现了网络控制的解耦、抽象化封装、逻辑集中控制。

借鉴于SDN的思路,我们期望对机器人也能实现解耦、抽象化、与逻辑集中控制,由此便产生了软件定义的机器人(Software defined robot, SDR)^[10]。

事实上,机器人长久以来都具有一定的控制层与硬件层相解耦的性质。如图2所示,传统机器人硬件结构一般由机器人控制器、主控制卡、运动控制卡、模拟、数字I/O卡、电源模块、传感器、伺服电机、伺服控制器、机械结构等组成,相互之间通过物理或电气连接,使用通信接口传输数据与控制指令。机器人软件包括主程序、中间级、驱动及接口层、操作系统内核、总线层。所以机器人本质上是软硬件分层结构,本身具有一定的软硬件解耦、抽象化、逻辑集中控制的特点。

然而,SDR在概念上更进一步。通过SDR,不仅机器人的软件与硬件相分离,更是机器人的知识与行为两部分相分离。

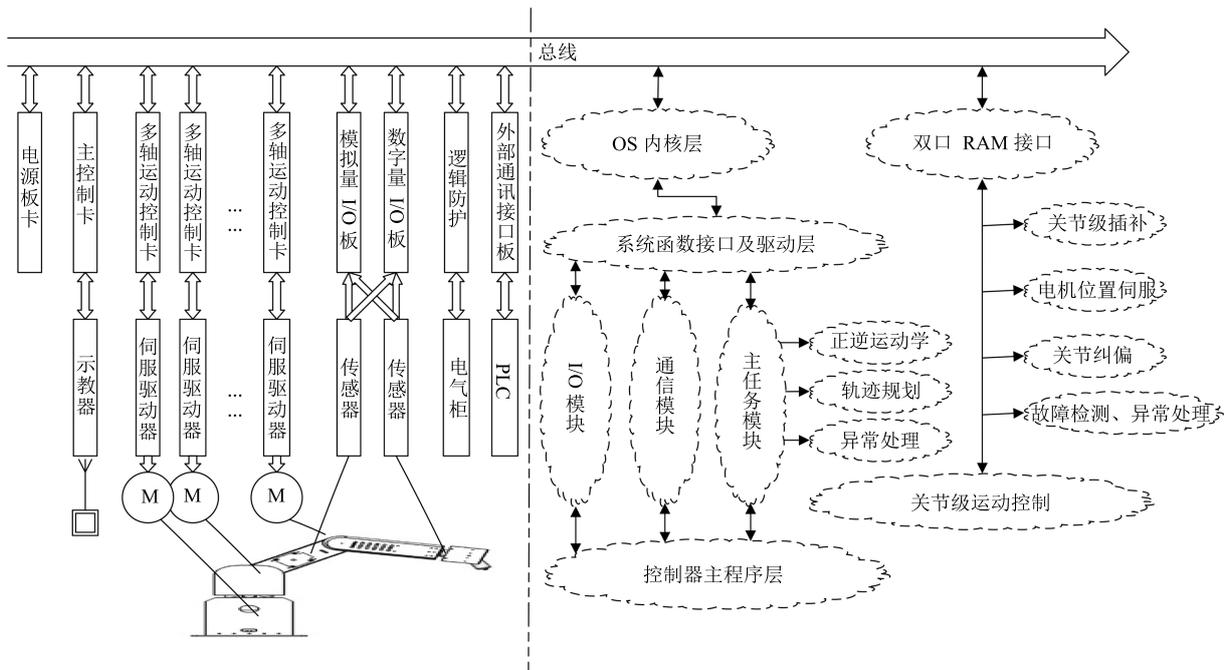


图2 机器人软硬件结构

Fig.2 Illustration of the hardware and software structures in robots

机器人起源于文学，由捷克斯洛伐克作家根据“苦工 (Robota)”变化得到，意思是“奴隶机器”，这不同于目前国际标准化委员会 (International Organization for Standardization, ISO) 对于机器人的定义^[11]。机器人最初以来被定义为可编程的远程操作机械手，后演变为自动化机器，而近年来，随着人工智能、云计算、数据融合等技术进步，对机器人的要求又有从自动化 (Automatic) 向自主化 (Autonomous) 变化的趋势。从中可以发现，人们对机器人的要求不再满足于机械式的执行，转向功能灵活、更具智能的方向。时至今日，随着服务机器人逐渐进入市场，机器人的功能从重复机械式的体力劳动，转向智能化、轻量式的服务。2016年召开的世界机器人大会上，近半数的展品都是这种机械结构简单，以其智能服务为卖点的服务机器人。特别是例如 Siri、Cortana、“小冰”等问答聊天软件，也被广泛称为机器人，文献 [10] 将其定义为知识机器人。这意味着，是否具有复杂的机械结构不再作为评判是否为机器人的标准。如今，机器人的评价标准应当改为：是否具有知识处理的能力和是否具有执行能力。SDR 正是对机器人的知识与行为解耦、抽象化、与逻辑集中。特别地，我们将具有执行能力的部分叫做物理机器人 (Physical robot)，而将进行知识处理的部分叫做软件定义的机器人 (Software-defined robot)，或简称软件机器人 (Software robot)。

文献 [10] 详细介绍了 SDR 的发展历史，认为 SDR 的思想起源于上世纪 90 年代初使用邮件和网页控制机器人系统的网络化机器人^[12]，并在基于

代理的控制方法 (Agent-based control, ABC) 等智能化方法的影响下逐渐走向软件化。新近提出的机器人地球 (RoboEarth)^[13-14]、机器人脑 (RoboBrain)^[15] 与云机器人 (CloudRobot)^[16] 等项目均是软件定义机器人思想的体现。文献 [10] 认为软件定义的机器人是物理机器人的“活”的本体知识描述、可视化信息中心。随着网络信息的爆炸式增长，网络上数据处理、知识操作等工作凸显出其 UDC 的特点。因而对软件机器人也提出了新的要求，即作为知识机器人处理知识任务，实现知识复杂系统从 UDC 转向 AFC。

物理机器人根植于物理空间与网络空间，得益于机电技术、控制技术、传感技术、物联网等技术，服务于工业自动化，可以执行在物理空间中移动、搬运、焊接等任务。软件机器人根植于网络空间、交互社会空间，在机器学习、人工智能、云计算、众包等技术的推动下，服务于知识自动化，可以执行搜索、推理、决策、优化、交互等知识任务。

本文所述无人系统不仅面临行驶、飞行等控制任务，还面临调度、协同等规划任务，可谓物理控制与知识处理两方面。因此须将物理机器人与软件机器人并举，形成平行机器人，实现无人系统在整个 CPSS 空间的控制与规划。

2.3 平行机器人与平行无人系统

2015年，王飞跃研究员在报告^[17]中第一次结合 ACP 平行系统理论与机器人学，提出平行机器人的概念，提出将机器人从 CPS 空间推向 CPSS 空

间, 从服务机械制造的物理机器人演化成为同时服务于知识工作的平行机器人。

$$\begin{aligned}
 \text{平行机器人} &= \\
 & \text{物理机器人} + i \quad \text{软件机器人} = \\
 & \sum \text{物理机器人} + i \quad \text{软件机器人} = \\
 & \text{物理机器人} + i \sum \quad \text{软件机器人} = \\
 & \sum \text{物理机器人} + i \sum \quad \text{软件机器人}
 \end{aligned} \quad (1)$$

平行机器人是物理机器人、软件机器人、仿真系统、物联网、数据库、广义的人工智能技术等相结合而成的机器人控制与管理系统。实际中, 物理机器人与软件机器人应形成一一对应、一多对应、多一对应、多多对应的组织结构。如式(1)所示。图3给出了平行机器人的框架, 由两个对应体和三个功能块组成通过物理机器人与软件机器人相互作用, 实现机器人管理与控制、机器人实验与评估、机器人学习与培训三个功能模块^[10]。

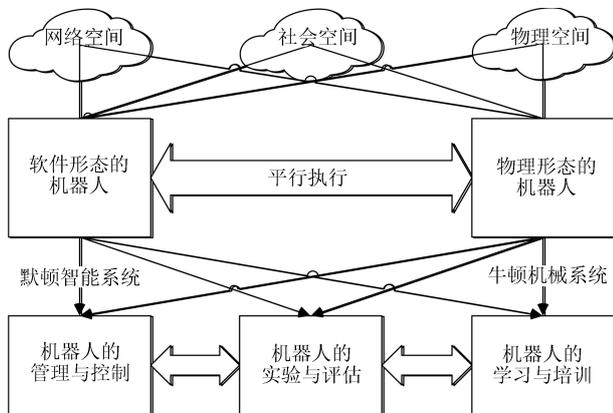


图3 平行机器人基本框架, 图片引用自 [10]
Fig. 3 Basic framework of parallel robotics
(the image is cited from [10])

对应于平行无人系统, 三个功能模块将分别实现如下基本功能: 学习与培训 — 可以是管理人员学习无人系统的管理调度经验, 也可以是无人机、无人车等机器人学习新算法、适应新应用场景; 实验与评估 — 管理人员或无人车、无人机等通过计算实验验证与评估新的管控方案或算法, 评估系统性能, 优化性能指标; 管理与控制 — 通过实际无人系统与软件定义无人系统的虚实互动, 在 CPSS 空间形成大闭环的自适应反馈机制, 使实际系统中无人车、无人机等更精确、快速地执行任务, 同时保证整个虚拟系统对真实系统的无偏估计与监控。

以无人车为例, 实际无人车通过物联网相互连接, 并通过通信网络连接数据库。软件定义的无人车等则从实际无人车在数据库中的软硬件结构信息

生成, 并通过通信网络与实际无人车相连, 与对应的无人车保持信息同步, 包括板载传感器数据、位姿数据、环境数据等。软件无人车工作于人工系统中, 使用实际无人车的实时传感数据结合数据库中的历史数据, 利用人工智能方法不断训练, 并通过在人工系统中进行计算实验来分析无人车算法的性能。需要指出的是, 软件无人车的传感数据是数字模拟信号与“人”的信号的综合, 是物理信号(设备)、心理信号(驾驶员)与社会信号(环境)的综合^[18]。当得到性能优异的算法之后, 软件无人车将算法下载到实际无人车中, 并在实际无人车运行时监控, 同时根据运行结果继续优化算法。这样组成了虚实系统交互迭代模式, 构成虚实反馈闭环。

3 系统架构与软硬件平台

本文所述无人平行系统由无人车、无人机、无人船组成, 但是其活动与人类密切相关, 整个系统也应受到人类的监督管理, 因而本无人平行系统名为“无人”, 实为“有人在环”, 不仅处理控制任务, 也需处理知识任务。因此, 我们提出使用多智能体建模平行系统的方法^[19], 运用分层的、模块化的软硬件架构, 以实现满足需求的 ACP 平行无人系统。

3.1 系统架构与主要流程

平行无人系统是 ACP 平行系统理论在无人车、无人机、无人船协同调度中的实践, 用于解决无人系统在设计与运行过程中的不确定性、多样性与复杂性问题, 因此本系统参考 ACP 平行系统在其他领域应用的基本框架^[20], 并依据无人车、无人机、无人船协同调度的特点、面向的任务等, 对其中主要分层结构与功能模块进行定制。

图4所示为基于 ACP 平行无人系统的流程图, 以无人车为例。平行无人系统包括实际系统、人工系统、社会系统3个核心部分, 计算实验与平行执行两个主要流程, 与知识自动化、学习与优化、可视化三个核心功能模块。

实际系统由实际无人车、及其所在环境组成, 其中环境应包括影响其执行机构和传感器的所有环境变量; 人工系统由软件定义的无人车即仿真人工环境组成, 仿真人工环境由车载或外部传感器得到环境参数, 由人工系统通过数据库中的场景生成器创建; 社会系统由真实用户和网民组成, 用户通过交互界面产生需求信号, 同时传入实际系统与人工系统, 网民则通过社会信号传感器产生舆情信号, 传入人工系统; 数据库包含模型库、算法库、场景库、用户资料库等。

计算实验包含5个功能模块, 包括核心仿真模块、数据中心模块、实验设计模块、学习与优化模块与实验评估模块, 通过模块间的相互作用, 最终将实验结果返回给用户或管控人员。计算实验的框架如

图 5 所示.

文献 [21] 指出, 平行执行可分为整体平行执行、局部平行执行、混合平行执行 3 类. 由于平行无人系统既涉及微观层面每辆无人车、无人机的单独控制, 也涉及对于整个交通系统、无人机集群的联合控

制, 因而我们选择混合平行执行的架构. 平行执行的框架如图 6 所示. 通过比较实际系统与人工系统的输出误差, 自适应调整人工系统与其子模块, 再通过计算实验调整实际系统, 以使实际输出满足要求, 同时与人工系统的输出误差趋近于零.

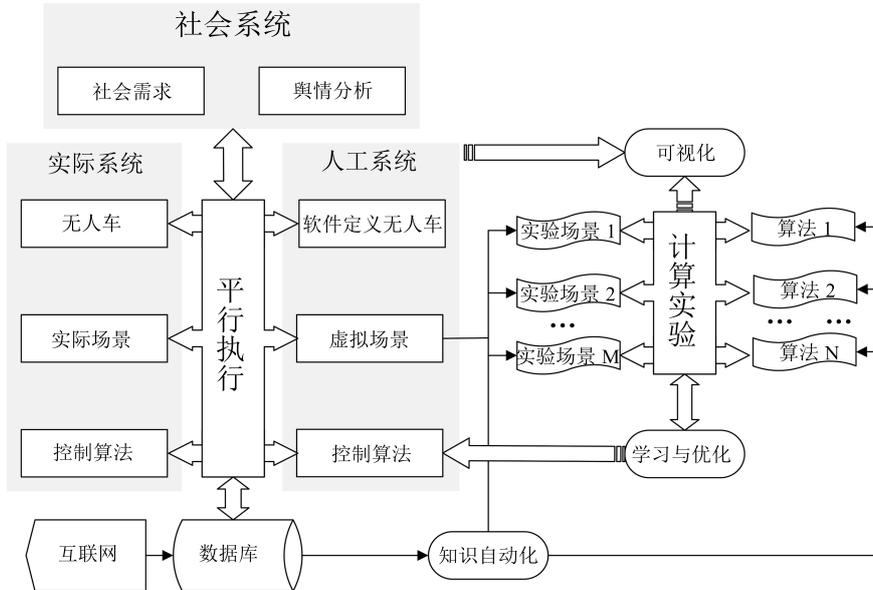


图 4 ACP 平行系统流程图

Fig. 4 Flow chart of an ACP based parallel system

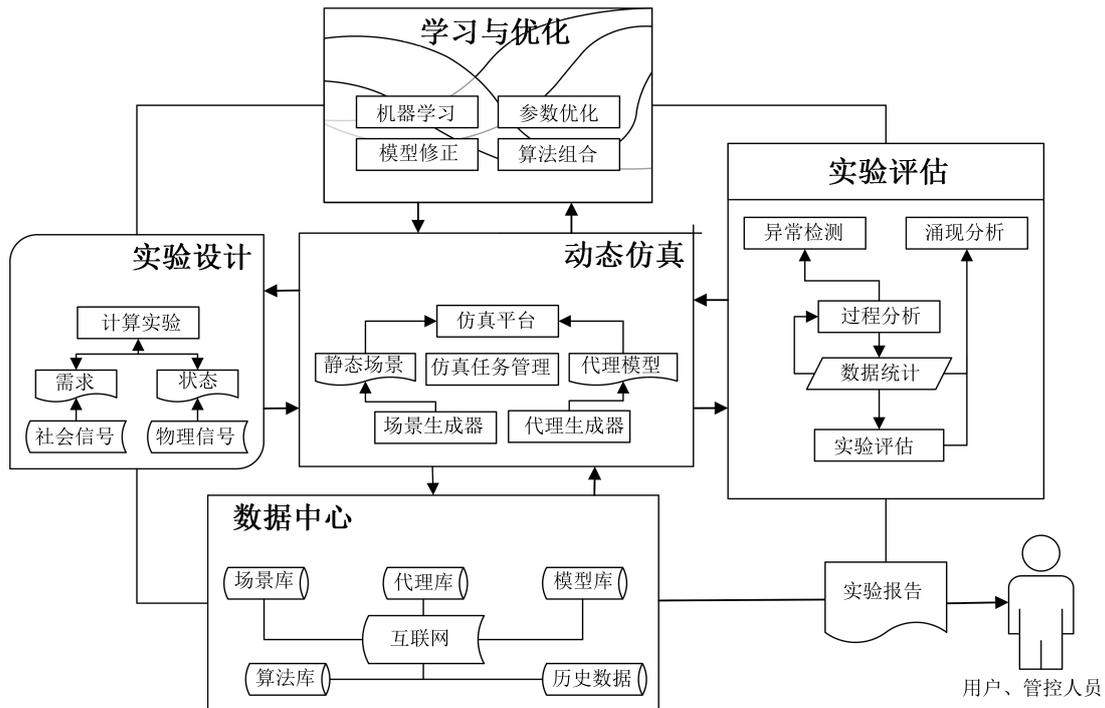


图 5 平行无人系统计算实验框架

Fig. 5 Framework of computational experiments in parallel unmanned systems

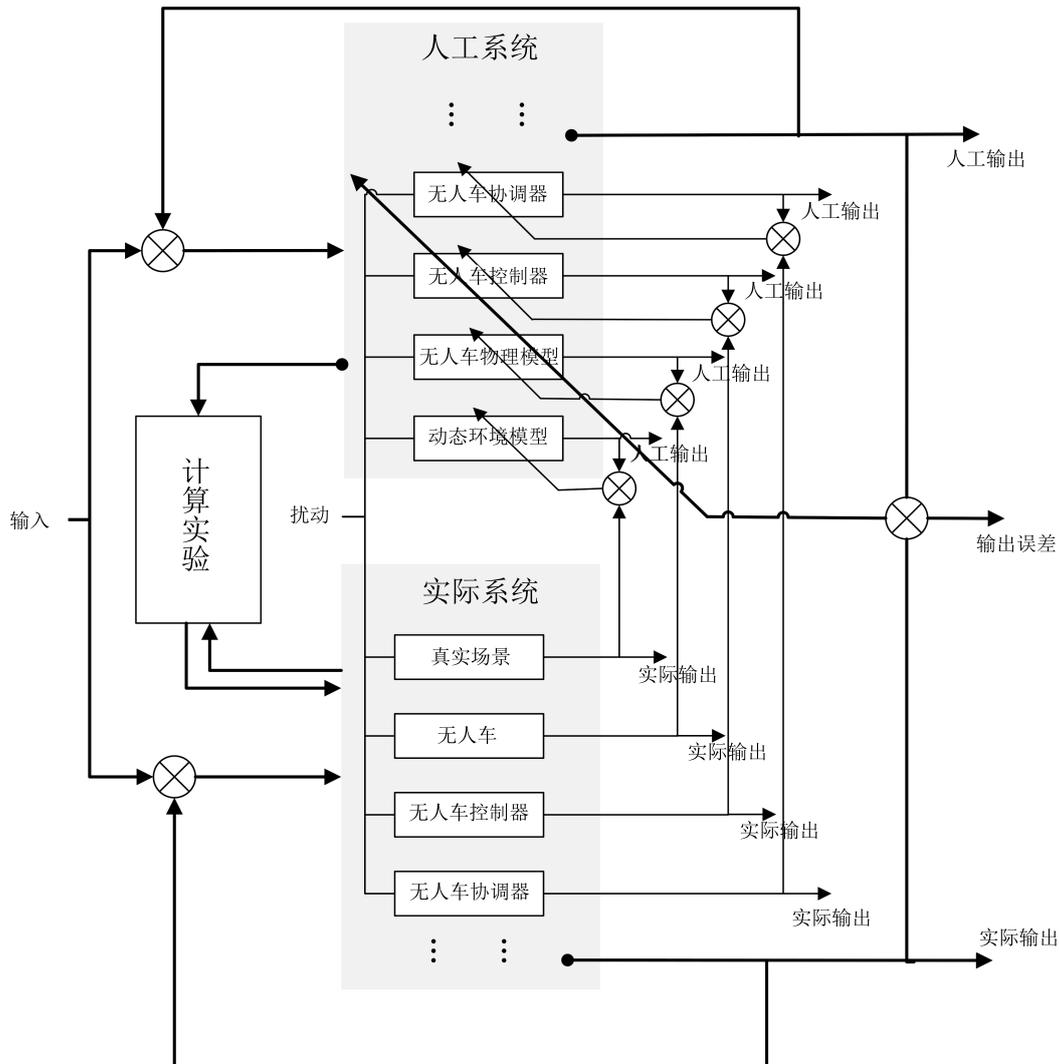


图6 平行无人系统混合平行执行框架与原理

Fig. 6 Framework of the hybrid parallel execution process in parallel unmanned systems

3.2 主要功能模块

3.2.1 知识自动化模块

知识自动化可以狭义上理解为基于知识的服务,包括基于信息的服务、基于情报的服务、基于任务的服务、基于决策的服务等. 广义上而言,知识自动化是一种改变知识的产生、获取、分析、影响实施的自动化方法^[5].

对于无人系统中的知识自动化,是互联网数据库到计算实验的连线,即通过自然语言处理、数据挖掘、规则推演、机器学习、智能规划、专家系统、网络众包、平行动态规划^[22]、平行学习等方法^[23],自动从自然语言理解任务信息,生成试验场景,生成备选控制算法,设计机器学习模式的过程^[24].

平行无人系统的知识自动化流程如下. 模块首先从用户类自然语言的需求描述中使用自然语言处理与规则推理解析出实际任务; 然后使用智能规划

方法、或求助于专家系统得到计算实验方案; 之后借助搜索方法或众包方法从数据库与互联网中得到算法集, 和场景元素; 最后使用智能规划方法得到备选算法集并生成计算实验场景, 进行计算实验. 计算实验所得结构存入数据库更新初始参数, 同时反馈回知识自动化模块, 调优智能规划模块.

3.2.2 学习与优化模块

学习与优化模块用于在计算实验的过程中选择并训练算法, 也用于在实际系统运行过程中算法的优化调参.

此处学习与优化模块泛指使用机器学习方法, 或其他优化与控制方法在计算实验过程中优化算法选择, 调节算法参数, 可以是最优控制、模糊规则推理、遗传算法、蚁群算法、动态规划、人工神经网络等控制领域的优化方法, 也可以是强化学习、深度学习、迁移学习等人工智能方法. 文献 [7] 指出, 由于

复杂系统的行为的不可预测性, 通常也难以给出量化的优化指标. 对复杂系统的研究并不能单纯地求解, 而是应找出可以优化的解决方案, 该方案应具有可行性、有效性、经济性、实时性.

在算法的选择方面, 学习与优化模块是通过在人工系统平台上进行大量计算实验, 训练或优化模型参数或控制策略得到解决方案的方法, 可分为过程优化与自学习两类. 过程优化是指算法本身不具有误差反传等根据实验结果直接修正参数的能力, 因而需要通过遗传算法等方法找寻最优解决方案, 例如 PID 控制. 此类算法模型相对简单, 可用解析的方法证明其稳定性, 求解时收敛快, 但对人工系统的建模精度的要求较高, 对参数漂移更敏感. 具有自学习能力的算法是指待调节算法本身具有自适应、误差反向传播、试错学习等功能, 可以依据计算实验结果直接调整模型参数, 例如神经网络. 此类算法模型复杂, 计算耗费大, 收敛速度较慢, 但对模型参数不敏感, 算法可迁移性强, 可在人工系统训练后迁移到实际系统中进一步训练, 因而更适合在学习与优化模块中使用.

3.2.3 可视化模块

可视化模块用于将实际系统与人工系统的运行状态以各种形式实时呈现给用户或管理与控制工作人员.

可视化模块应具备的功能可分为软件定义的机器人可视化、人工系统可视化、舆情系统可视化、评估系统可视化 4 部分. 其中软件机器人应具有三维模块化展示机器人各模块外观与状态的功能、实时展示传感数据的功能; 人工系统可视化模块应具有 VR 展示功能, 并显示环境参数; 舆情系统应具有展示当前舆情数据以及舆情需求分析结果的功能; 评估系统应具有显示训练进度、算法性能、历史数据分析的功能.

3.3 软硬件框架

基于 ACP 的平行无人系统包含实际环境中的物理系统, 与虚拟环境中的人工系统, 涉及实际无人车、无人机、无人船等, 以及数据库、计算平台、计算机网络等, 因而需要设计合理的软硬件结构. 下文分别对软件定义的机器人、人工系统与计算实验平台的软硬件结构以及整体网络结构进行介绍.

3.3.1 软件定义的机器人

软件定义的机器人是构建平行无人系统的基本单元, 图 7 展示了软件定义的机器人的软硬件架构, 以无人车为例. 软件定义的机器人分为实际与虚拟两部分, 二者的主程序模块通过通信网络相互连接, 并分别控制自身其余模块. 实际无人车部分呈分层模块化架构, 从顶向下依次是主程序层、任务层、运动控制层、系统与驱动层、内核层、硬件层. 软件定

义无人车部分也是分层模块化设计, 从顶向下依次是主程序层、任务层、运动规划层、虚拟运动控制层. 除了主程序间通过网络通信外, 实际无人车的硬件异常检测模块也通过网络之间连接到虚拟无人车中断模块, 以提高系统对紧急状况的响应速度.

软件定义的机器人可以使用 ROS 框架加以实现. ROS 是一个机器人开源元操作系统, 自 2010 年发布后便吸引了科研人员与机器人爱好者的广泛关注, 目前已成长为机器人软件的事实标准 (De facto standard)^[25]. ROS 是可基于 Unix 平台运行, 支持 Python、C++、Lisp 编程语言, 通过通信模块实现松耦合的点对点进程网络, 并形成分布式进程框架. ROS 拥有庞大的社区, 具有丰富的工具包与接口, 积累了大量最新的驱动、算法代码, 并配有丰富的文档. 综上, 我们选用 ROS 框架开发软件定义的机器人, 首先在于其框架与代码便于开发与维护软硬件机器人; 其次, ROS 提供了方便的点对点通信方式以实现软硬件机器人的相互通信; 最后, ROS 提供了丰富的仿真软件接口, 便于软件定义的机器人接入计算实验.

3.3.2 人工系统与计算实验平台

图 8 展示了计算实验平台的系统构架与基本元素. 系统运行的基本流程如图 (以使用 Gazebo 仿真软件为例) 所示, 首先由场景生成器、代理生成器、GIS (Geographic information system) 地图, 生成模拟情景文件与代理行为文件; 加入软件机器人, 产生机器人文档、参数文档. 然后根据用户需求, 在仿真器中生成模拟情景下的运动仿真任务; 之后通过仿真器中的仿真实验不断优化调整参数文档; 最后将仿真结果通过 2D/3D/VR 界面反馈给用户, 用户产生新的需求.

可以看出, 仿真器是计算实验平台的核心, 仿真器的选择直接决定计算实验的性能. 机器人仿真器种类繁多, 详细对比请参考 [26–27]. 计算实验平台的仿真器的选取需要考虑以下几点: 是否具有足够的物理保真度, 是否具有良好的编程接口, 是否便于生成模型, 是否具有良好的可视化扩展功能, 是否具有与 ROS 的接口, 是否开源, 是否具有丰富的开发文档等. 满足以上需求的开发平台有很多, 例如 Gazebo^[28] 或 V-Rep^[29] 均可作为计算实验平台的仿真器.

3.3.3 整体网络结构

平行无人系统不只是针对单个无人车、无人机、无人船服务, 更需要从整体上对所有无人单位进行规划, 从而使整个系统的总体行为得到优化, 增强其对于整个社会的积极影响. 因此, 需要将各个无人车、无人机、无人船的目标和行为进行集中协调. 图 9 所示为平行无人系统的网络拓扑结构. 可以看出, 系统呈现分布式与分层式的组织结构, 从个体规划

到局部规划中心,再到全局规划中心,每一层中各个中心只负责本区域的协调与优化问题,再由上一层统一协调.通过这样的网络结构可以赋予个体更多的自由度,允许在优化集体目标的时候,个体还可以

寻求自身的最优解,因此系统具有在不同粒度上规划寻优的能力.同时,分层的结构可以将计算分配给子成员,减轻总控制中心的计算压力.更多关于分布式机器人协同作业的内容可参考 [30-31].

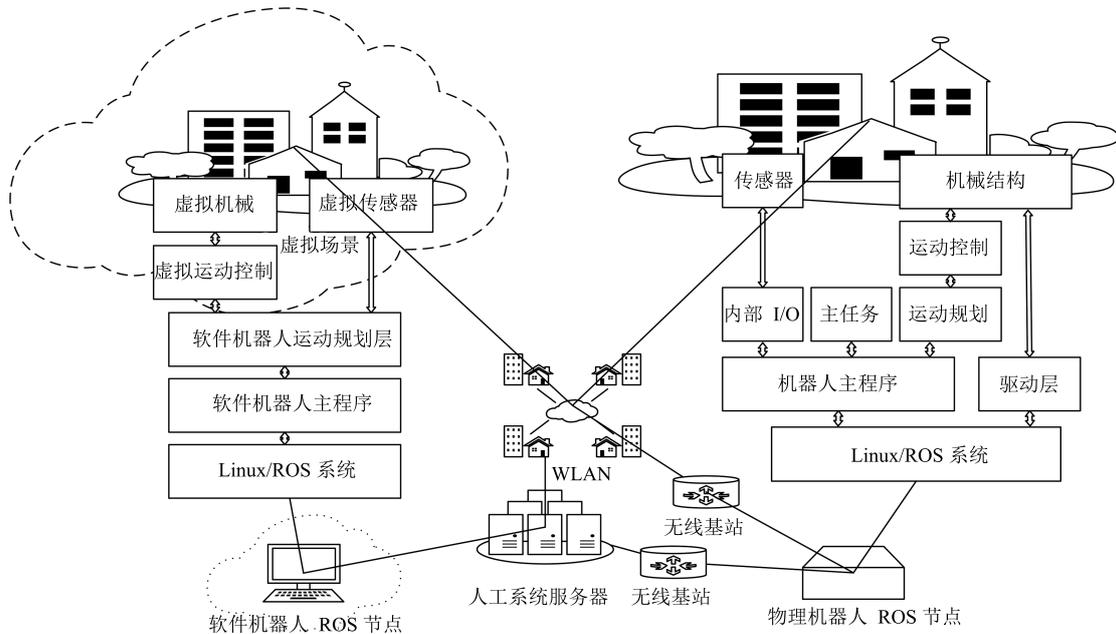


图 7 软件定义的机器人的软硬件框架

Fig. 7 Framework of software-defined robotics

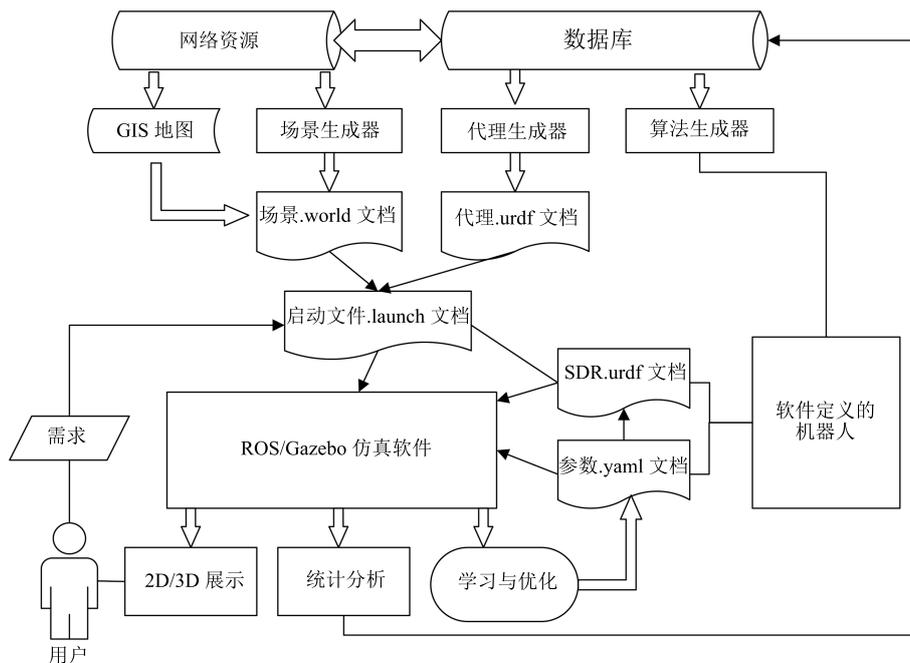


图 8 基于 ROS/Gazebo 的人工系统计算实验平台框架

Fig. 8 Illustration of a computational experiment platform in the artificial system based on ROS/Gazebo

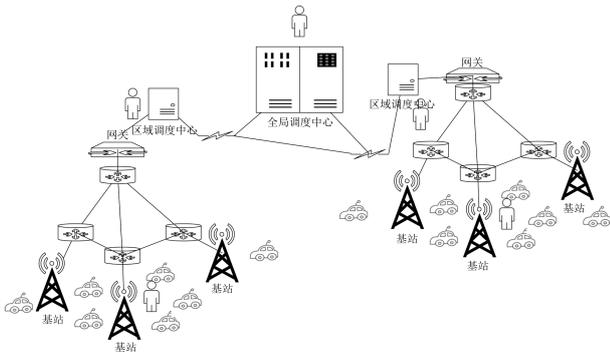


图9 平行无人系统网络拓扑

Fig. 9 Network topology of a parallel unmanned system

4 平行无人系统的应用

本章展望了平行无人系统在无人车、无人机、无人船中的应用,并分析了将会面临的挑战,同时指出了可能的研究方向。

4.1 平行无人机系统

无人机是利用无线遥控技术、自动导航技术控制执行特定任务的不搭载人员的飞行器,主要分为无人固定翼飞机、无人多旋翼飞行器、无人直升机、无人飞艇等,是近十年机器人领域研究的热点问题。受飞行条件、价格、结构复杂度等因素的影响,多旋翼无人机在民用领域,例如航拍、搜索、监控等,得到了更多的关注,其中四旋翼更是由于其机械结构简单、盘旋能力、高机动性的特点成为多旋翼无人机最受欢迎的结构。本节将围绕四旋翼无人机介绍无人系统在其中的应用。

4.1.1 平行系统在无人机领域中的应用

无人机控制器设计

四旋翼无人机一般由机体、螺旋桨、无刷电机与电子调速器、飞行控制器、惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU)、定位传感器、云台与相机组成,通过四个旋翼产生的升力对抗重力使无人机在空中飞行,并通过改变旋翼转速改变无人机的飞行状态。显然,系统具有 4 个控制输入与 6 个输出量,是欠驱动系统。而且从稳定性上分析,无人机本质上是不稳定系统,必须施加控制律使系统具有稳定性。

文献 [1] 列举并对比了四旋翼无人机的主要控制器,包括线性控制器、非线性控制器与基于学习的控制器。文章认为无人机控制的研究目前存在以下三个问题:系统对于外部干扰、系统参数漂移等的鲁棒性难以直接得到;特定控制器往往针对特定条件有效,但无方法指出运行条件变化时应如何切换;基于学习的控制器难以分析稳定性。可以看出,这些问题正是复杂系统所面临的不确定性、多样性、复杂性问题 (UDC),因此我们认为使用基于 ACP 的平

行系统可用于解决无人机控制器设计问题。

平行系统结合了数值物理仿真与硬件在环仿真 (Hardware in the loop simulation, HIL),使用实验方式使控制器得到学习与优化,并可以统计形式给出了无人机的在扰动、参数漂移等情况下的稳定性与鲁棒性分析。

多无人机协调规划

四旋翼无人机在实际应用中,受到续航能力、负载能力、计算资源、飞行高度的限制,难以依靠单独无人机进行复杂作业。而恰巧旋翼无人机价格相对低廉,可以大量部署,协同作业以提高系统负载能力、灵活性、执行速度。以多无人机在战场中的应用为例。在未知、动态、非结构化的战场环境中,单无人机难以达到足够的智能化程度以应对各种突发情况,须通过多架无人机有效协作。此时,多无人机系统处理多机协同的能力至关重要。

平行无人系统为多无人机协调提供了合适的工具。首先,无人机可以借助其对应的软件无人机在人工系统中相互通讯,因此解决了不同厂家不同通讯协议下的多无人机通信问题;其次,平行无人系统的层级、分布式网络结构,适用于多无人机成员管理与任务分配;再次,通过在人工系统中发布传感器数据,可以将多无人机的传感数据汇总并融合,便于实现多无人机地图构建、目标跟踪等任务;此外,人工系统平台可作为无人机任务级计算平台,实现远程复杂,本地简单的设计思路,节约无人机板载计算资源;最后,基于多智能体的人工系统可进行计算实验,模拟多无人机在动态、非结构化环境中的协同作业,验证策略与算法的有效性和鲁棒性。

总之,平行无人系统可用于各种多无人机协调规划的科研与应用目标,例如多无人机编队飞行、多无人机协同运输、多无人机地图构建、多无人机环境勘探与监控等。

4.1.2 挑战与展望

无人机仿真建模方法

实现通过计算实验验证控制器的稳定性、鲁棒性,或调解优化控制器参数,首先需要确保虚拟无人机在仿真过程中与真实情景具有一致性。目前,对于无人机仿真的研究有很多,一般基于各机器人仿真平台,如 ROS/Gazebo^[32-33]、MATLAB/Simulink^[34]、FlightGear^[35]、X-Plane^[36]等,通常用于无人机操作员的模拟训练,或用于测试基于传感器的高层控制算法,如视觉伺服跟踪。这些仿真项目对无人机近悬停状态的动力学特性以及传感器特性有清晰的模型描述,但对于无人机的机动动作,或在外部扰动,例如风,的作用下的动力学性能往往缺乏准确建模。因此如何建立无人机在扰动或机动动作情况下的仿真模型是平行无人系统需要探索的研究内容。

参数与系统辨识方法

通过计算实验调节与优化无人机控制器, 并在不同情景中切换控制模式是平行无人系统的重要功能. 因此要求平行无人系统应通过各种方式快速获得无人机工作区域的地图、风速等环境参数, 进而部署计算实验. 目前, 无人机控制系统主要依靠电子地图或地理信息系统 (GIS), 存在数据过时、精度不足等问题. 使用板载传感器可以有效获取实时数据, 如云台相机、风速计等, 但为每个无人机都加装传感器会造成成本上升, 飞机负载能力、续航能力变弱等问题. 因此, 使用飞机已有的基础传感器及基本控制算法进行参数或系统辨识^[37-40] 或有望成为一个有前景的研究方向. 此外, 从互联网或其他数据库中挖掘所需环境参数亦是一个值得研究的问题.

开放可靠的无人机通讯网络

通讯网络是实现实际无人机与软件定义的无人机相互通信的基础. 各无人机厂家往往为自己的无人机与地面站设置了不同的通信协议, 例如 PX4、APM 与 Parrot 使用基于 MavLink^[41], ARDrone 使用 UDP 协议, 而 DJI 则使用自己的通信协议. 因此平行无人系统需采用开放的软件架构, 以同时支持不同类型的无人机通讯协议. 此外, 多无人机协同作业时与地面基站将形成多对一或多对多的组织模式, 如何保证通信带宽, 减少冲突, 以及不同基站如何分享或切换无人机的控制权将成为一个重要的研究方向. 由于无人机机动性强, 失控的无人机极易坠毁, 造成人身安全隐患和财产损失, 因而无人机通讯的可靠性至关重要. 在研究平行无人系统的通信网络时, 应首先关注系统的可靠性.

4.2 平行无人车系统

无人车是近年来汽车、自动控制、导航等研究领域的热点问题, 不仅成为丰田、福特、梅赛德斯、特斯拉等汽车厂商追逐的热点, 也引起了 Google、百度等人工智能公司的热切关注. 本节将介绍平行

系统在无人车领域的应用并展望其关键技术.

4.2.1 平行系统在无人车领域中的应用

无人车自动驾驶技术的测评与训练

无人车与日常交通紧密结合, 关系到其他交通成员, 如行人、自行车、有人驾驶汽车等的生命与财产安全, 可见无人车的行驶安全至关重要. 文献 [42] 对无人车驾驶评估的研究现状进行了综述, 并提出无人驾驶车辆自主能力等级 (Unmanned ground vehicles autonomy levels, UGVAL) 评估模型, 如图 10 所示, 提出应考虑环境复杂程度、任务复杂程度、任务完成度、4S 指标 (安全性 (Safety)、智能性 (Smartness)、平滑性 (Smoothness) 和速度 (Speed)) 等对无人车性能综合评估. 无人车的安全性的可分为软硬件两部分, 其中硬件部分是指无人系统在复杂环境下硬件性能的测试, 例如传感器漂移、通信网络丢包等问题, 需要通过硬件系统进行压力测试求得. 无人车的软件测试, 或算法测试, 则可借助平行无人车计算实验来实施.

首先通过场景生成器生成不同复杂程度的环境, 然后加入软件定义的无人车, 设定其各虚拟硬件与虚拟传感器使性能服从于真实条件下的测试结果, 之后可以针对不同程度的复杂任务进行计算实验, 根据实验结果综合打分.

平行无人车测评系统同样可用于无人驾驶的学习与训练. 目前法律尚不允许无人车在正常交通中行驶, 因此无人车难以获得真实实验数据, 更无法通过试错法进行强化学习. 而通过计算实验, 无人车可在人工系统中获得基于虚拟硬件的真实实验数据, 以数据驱动控制算法的学习与训练过程, 不断调整优化, 得到更稳定可靠的控制策略与控制算法. 将无人车的训练过程部署在人工系统中, 可以减轻无人车本地的计算负担, 不仅节约无人车硬件成本, 也使无人车在本地计算资源有限的情况下可以扩展更多的传感器或功能模块.

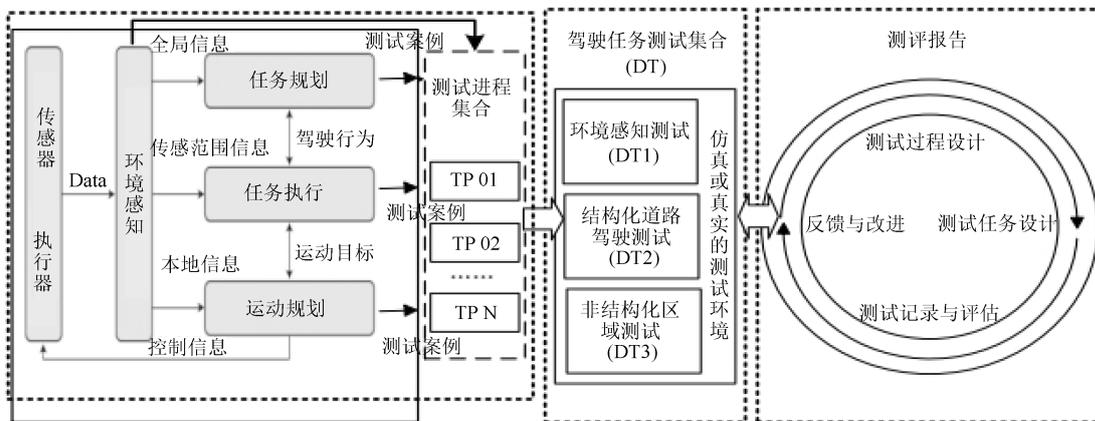


图 10 无人驾驶自主能力等级模型, 引用自 [42]

Fig. 10 Illustration of the unmanned ground vehicles autonomy levels (UGVAL), the image is cited from [42]

无人车在交通中的协调控制

未来,无人车将注定广泛参与到人类的日常交通行为中,无论作为公共交通工具或私人代步工具,无人车在整个路网中的优化协调都至关重要.无人车通过与其对应的软件定义的无人车接入人工交通系统,在人工系统中与其他软件定义的无人车进行信息交流,从而实现无人车协调的通讯基础.平行无人车系统可以以任意粒度组织各无人车成员,以分层的结构协调各成员间的任务,通过计算实验优化各层控制策略,以平行执行的方式确保实现各层的控制目标.

无人车的协调控制可以为交通系统带来从微观到宏观的益处.微观层面,无人车之间共享行驶信息与传感器信息,可以及时交流周围紧急状况并采取措​​施,从而提高系统安全性,也有助于实现全自动交通路口通行.宏观层面,平行无人车系统可以与智能交通系统结合,演化成为平行交通系统^[43-44]从而解决交通拥堵、出行规划、交通灯优化控制等问题.

无人车检修可视化

软件定义的无人车可以实时获取实际无人车的软硬件信息,分析后以2D/3D/VR的方式呈现给维修人员,便于维修人员快速定位故障原因并在可视化实时视图的引导下进行维修.

未来新交通模式的探索

目前无人车自动驾驶的规则与策略,往往是通过将人类司机的驾驶经验封装为知识得到.对于自动驾驶的评价标准往往也是看其是否与人类驾驶行为相近.事实上,由于无人车在传感、通信、反应速度、协同控制等方面都已经或将在未来超过人类司机,继续沿用人类的交通模式或交通规则可能会影响交通系统效率的提升.例如,使用交通路口自主控制的方式显然比使用信号灯控制的方式具有更高的通行效率.

平行无人车系统提供了无人车的虚拟训练环境,在此环境中,任何实验都不存在法律或道德后果.因而可以在虚拟环境中构建无规则的无人车网络,使无人车在系统中不断试错,使用强化学习方法探索新的驾驶模式,整个系统也会涌现出新的交通现象,有助于我们探索新的基于无人车的交通模式.

4.2.2 挑战与展望

无人车技术吸引了大量高校与科研单位的持续关注,大量文献集中于无人车的避障、导航、传感器融合、运动规划、通信系统、机器视觉、人机交互等研究方向.本文对于这些主要的研究方向不作赘述,相关信息可参考文献^[45-48],仅针对平行无人车系统的其他挑战做出分析与展望.

自动生成随机虚拟场景

在人工系统中随机自动生成复杂的虚拟场景是评测与训练自动驾驶技术的关键.首先,要求虚拟场

景可以由人工系统自动生成,以提高系统的复用率;其次,所生成的虚拟场景必须具有一定的随机性,以提高系统评测自动驾驶技术鲁棒性的能力.具体而言,系统须能随机生成道路交通网,随机设置交通标志牌、车道线、信号灯,随机设置动态与静态景物,随机产生具有自主行为的车辆与行人模型,随机设置障碍物.其中,交通标志与景物等并不是完全随机,而是必须符合一定的实际规则.例如,学校附近必须有斑马线与减速带,而高速公路上则不允许出现斑马线或减速带.

目前,机器人仿真场景往往由研究人员手工搭建,或借助于地理信息系统等知识服务平台等实现,难以达到规模化、客观化、随机化的应用要求,不利于无人车算法长期训练.

Gazebo、V-Rep、UWSim等机器人仿真软件都提供了开放的编程接口以修改仿真场景,例如Gazebo可通过编程的方式添加、删除或挪动仿真器中的景物模型,甚至可以赋予景物动作.但在机器人仿真器中以添加模型的方式加入景物,会耗费大量储存于计算资源,影响仿真系统的迭代速度.而地图随机生成技术常见于Roguelike类游戏中.这类游戏地图规模往往远大于机器人仿真中的地图模型,也具备一定的物理仿真能力,并可在PC电脑中流畅运行.如何利用游戏引擎与软件定义的机器人相结合,或成为平行无人车系统计算实验的一个研究方向.

4.3 平行无人船系统

无人船继无人机、无人车之后成为自主控制关注的新领域,主要用于水质监测、巡逻搜救、水下探测等任务.本文所述无人船既包括大型、小型水面无人船,也包括水下无人载具.平行无人船系统是平行系统在无人船领域的应用.本节将介绍平行无人船系统的应用与展望.

4.3.1 平行系统在无人船领域的应用

机械结构与控制器设计

无人船控制面临建模复杂、外部扰动大、时滞严重、障碍物较多等困难.此外,由于无人船通常作业于公海或水下环境,通信环境不理想.因而从频率较低、带宽较窄、噪声较大的数据中求得无人船的实时状态是一项挑战.可见,无人船的控制问题具有UDC性,因而我们考虑使用平行系统的方法处理此复杂问题.

首先通过计算实验测试优化无人船多传感器融合的状态估计方法,提高系统在通信不稳定或不同噪分布的情况下状态估计算法的性能.由于复杂的流体难以建立解析模型,因而使用实际数据驱动的方式建立数值仿真模型,在此基础上通过计算实验仿真无人船的动力学,设计控制律.对于控制时滞长,障碍物较多的情形,可借助平行执行,使虚拟无

人船不仅监控实际无人船, 还用于预测实际无人船的运动状态, 及时发现异常.

4.3.2 挑战与展望

无人船仿真建模方法

相比于无人机、无人车, 无人船更难建立准确的仿真模型. 一是由于流体不仅需要考虑到推力与浮力, 还存在各种涌动, 难以实时观测或测量; 二是由于无人船存在较强的异构性, 即不同的无人船在体积、重量、吃水深度等方面存在较大的差异, 难以通过统一的模型描述其在水中的受力状况.

对于受力模型难以建立的仿真系统, 可以通过动态数据驱动应用系统 (Dynamic Data Driven Application System, DDDAS) 的方式进行仿真. DDDAS 指将动态数据引入执行过程并反过来动态调节测量过程的仿真, 有助于改进模型、提高系统的预测能力^[49]. 使用动态数据驱动的仿真模式与无人船相结合或成为未来的研究方向.

平行执行模式的探索

无人船的控制存在很大的时延与不定性, 不仅是由于无人船的惯性较大, 制动与启动困难, 还因为通过船舵很难精确控制船的转向角. 对于水下无人器也存在同样的问题. 因而应对长时延、低频率的平行执行模式至关重要, 即真实系统与仿真系统在不同时间轴的交互问题. 文献 [50] 提出了如图 11 所示的一种平行执行模式, 以解决传感、预测、执行过程在时间轴上协调的问题. 平行无人船的其他平行执行模式仍为亟待研究的科学问题.

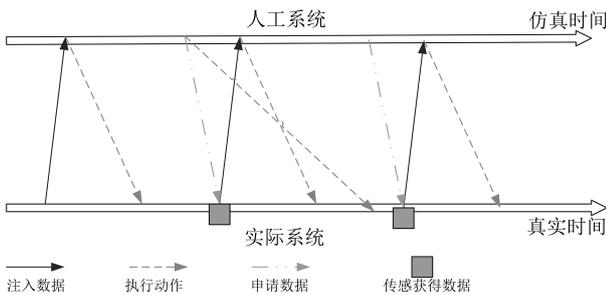


图 11 一种平行执行时序, 图片引用自 [50]

Fig. 11 Illustration of a parallel execution sequence (the image is cited from [50])

4.4 联合平行无人系统

前文介绍了平行无人系统作为独立系统在无人机、无人车、无人船三个领域中的应用, 事实上, 三个独立系统可联合使用, 组成联合平行无人系统, 实现更丰富的功能.

多源数据导航

无人车虽然装备有丰富的传感器以测量周围环境, 但对于远处环境或被遮挡物体仍无法探测得到. 此时, 通过平行无人系统, 无人车可参考不同数据源

采得的环境数据, 如无人机航拍图片, 在此基础上进行路径规划或导航.

无人车作为无人机通讯基站

无人机的活动范围较广, 如遇到遮挡或其他原因造成控制信号丢失的情况, 则无人机可通过与无人车通信, 借助车联网保持与人工系统的通信. 此过程可通过平行无人系统实现. 当无人机与人工系统失去连接时, 人工系统根据对应的软件定义的机器人存储的位置与通信协议等信息, 选择临近的无人车, 并使其通过通信协议接通无人机控制信号, 恢复人工系统与无人机的连接.

5 小结

无人机、无人车、无人船是科研领域、军用领域、民用领域共同关注的热点问题, 不久的将来将与人类日常生活紧密相关. 本文首先介绍了平行系统理论与平行机器人的概念, 然后将平行系统理论与无人机、无人车、无人船相结合, 提出基于 ACP 方法的平行无人系统概念. 本文分别对平行无人机系统、平行无人车系统、平行无人船系统的应用和挑战进行了总结与展望, 并指出一些未来可能的研究方向. 最后, 本文展望了无人平行系统在三个领域联合的应用前景.

References

- 1 Amin R, Aijun L, Shamshirband S. A review of quadrotor UAV: control methodologies and performance evaluation. *International Journal of Automation and Control*, 2016, **10**(2): 87–103
- 2 Gupte S, Mohandas P I T, Conrad J M. A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the 2012 IEEE Southeastcon*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012. 1–6
- 3 Wang Fei-Yue. On the modeling, analysis, control and management of complex systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006, **3**(2): 26–34
(王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理. *复杂系统与复杂性科学*, 2006, **3**(2): 26–34)
- 4 Wang Fei-Yue, Liu De-Rong, Xiong Gang, Cheng Chang-Jian, Zhao Dong-Bin. Parallel control theory of complex systems and applications. *Complex Systems and Complexity Science*, 2012, **9**(3): 1–12
(王飞跃, 刘德荣, 熊刚, 程长建, 赵冬斌. 复杂系统的平行控制理论及应用. *复杂系统与复杂性科学*, 2012, **9**(3): 1–12)
- 5 Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 1–8
(王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华. *自动化学报*, 2015, **41**(1): 1–8)
- 6 Wang Fei-Yue. Computational theory and method on complex system. *China Basic Science*, 2004, **6**(5): 3–10
(王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法. *中国基础科学*, 2004, **6**(5): 3–10)
- 7 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and decision*, 2004, **19**(5): 485–489, 514
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. *控制与决策*, 2004, **19**(5): 485–489, 514)
- 8 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013,

- 39(4): 293–302
(王飞跃. 并行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, 39(4): 293–302)
- 9 Wang Fei-Yue. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, 1(4): 25–35
(王飞跃. 人工社会、计算实验、并行系统 — 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25–35)
- 10 王飞跃. 机器人的未来发展: 从工业自动化到知识自动化. 科技导报, 2015, 33(21): 39–44
- 11 杨书评, 刘颖. 机器人标准化领域研究进展和趋势. 科技导报, 2015, 33(23): 116–119
- 12 Goldberg K. Beyond the web: excavating the real world via mosaic. In: Proceedings of the 2nd International World Wide Web Conference. Chicago, USA, 1994. 1–12
- 13 Zweigle O, van de Molengraft R, D’Andrea R, Häussermann K. RoboEarth-conneting robots world-wide. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Interaction Sciences Information Technology, Culture and Human. Seoul, Korea: ICIS, 2009. 184–191
- 14 Hunziker D, Gajamohan M, Waibel M, D’Andrea R. Rapyuta: the RoboEarth cloud engine. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013. 438–444
- 15 Saxena A, Jain A, Sener O, Jami A, Misra D K, Koppula H S. RoboBrain: large-scale knowledge engine for robots. ArXiv: 1412.0691, 2014. 1–11
- 16 Hu G Q, Tay W P, Wen Y G. Cloud robotics: architecture, challenges and applications. *IEEE Network*, 2012, 26(3): 21–28
- 17 王飞跃. 知识机器人与工业 5.0: 迎接智能机的时代. 北京, 中国: 2015 年国家机器人发展论坛, 2015
- 18 Wang Fei-Yue. Parallel driving for intelligent vehicles: past, present, and future. 2015 China Conference on Intelligent Vehicles, 2015 National Intelligent Vehicle Development Forum, Soochow, 2015
(王飞跃. 无人车的未来: 平行车和并行驾驶. 首届中国智能车大会暨国家智能车发展论坛, 苏州, 2015)
- 19 He F, Miao Q H, Li Y T, Wang F Y, Tang S M. Modeling and analysis of artificial transportation system based on multi-agent technology. In: Proceedings of the 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Toronto, Canada: IEEE, 2006. 1120–1124
- 20 Duan W, Cao Z D, Wang Y Z, Zhu B, Zeng D, Wang F Y, Qiu X G, Song H B, Wang Y. An ACP approach to public health emergency management: using a campus outbreak of H1N1 influenza as a case study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, 43(5): 1028–1041
- 21 Lun Shu-Xian. Research on the classification of parallel execution modes of ACP theory. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(10): 1602–1608
(伦淑娴. ACP 理论的并行执行方式分类研究. 自动化学报, 2012, 38(10): 1602–1608)
- 22 Li Li, Lin Yi-Lun, Cao Dong-Pu, Zheng Nan-Ning, Wang Fei-Yue. Parallel learning — a new framework for machine learning. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(1): 1–8
(李力, 林懿伦, 曹东璞, 郑南宁, 王飞跃. 平行学习 — 机器学习的一个新型理论框架. 自动化学报, 2017, 43(1): 1–8)
- 23 Wang F Y, Zhang J, Wei Q L, Zheng X H, Li L. PDP: parallel dynamic programming. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, 4(1): 1–5
- 24 Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(1): 1–8
(王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华. 自动化学报, 2015, 41(1): 1–8)
- 25 O’Kane J M. *A Gentle Introduction to ROS*. Create Space Independent Publishing Platform, 2013
- 26 Smashing Robotics. Most advanced robotics simulation software overview[Online], available: <http://www.smashingrobotics.com/most-advanced-and-used-robotics-simulation-software/>, March 6, 2016
- 27 Cook D, Vardy A, Lewis R. A survey of AUV and robot simulators for multi-vehicle operations. In: Proceedings of the 2014 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). Oxford, MS, USA: IEEE, 2014. 1–8
- 28 Koenig N, Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In: Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems. Sendai, Japan: IEEE, 2004, 3: 2149–2154
- 29 Rohmer E, Singh S P N, Freese M. V-REP: a versatile and scalable robot simulation framework. In: Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 1321–1326
- 30 Jia X, Meng M Q H. A survey and analysis of task allocation algorithms in multi-robot systems. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Shenzhen, China: IEEE, 2013. 2280–2285
- 31 Gautam A, Mohan S. A review of research in multi-robot systems. In: Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). Chennai, India: IEEE, 2012. 1–5
- 32 Meyer J, Sendobry A, Kohlbrecher S, Klingauf U, von Stryk O. Comprehensive simulation of quadrotor UAVs using ROS and gazebo. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2012. 400–411
- 33 Roy A. Ardupilot SITL gazebo plugin[Online], available: https://github.com/AurelienRoy/ardupilot_sitl_gazebo_plugin, February 10, 2017
- 34 Quadcopter dynamic modeling and simulation (quad-sim) v1.00[Online], available: <https://github.com/dch33/QuadSim>, February 10, 2017
- 35 Rahul G, Shahb S M, Guptac N K, Ananthkrishnan N. Modeling, simulation and flight testing of an autonomous quadrotor. In: Proceedings of the 2009 ICEAE. 2009. 1–7
- 36 Figueiredo H, Bittar A, Saotome O. Platform for quadrirotors: analysis and applications. In: Proceedings of the 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Orlando, FL, USA: IEEE, 2014. 848–856
- 37 Waslander S, Wang C. Wind disturbance estimation and rejection for quadrotor position control. In: Proceedings of the 2009 AIAA Infotech@Aerospace Conference and AIAA Unmanned ... Unlimited Conference. Seattle, Washington, USA: AIAA, 2009. 1–14
- 38 Neumann P P, Bartholmai M. Real-time wind estimation on a micro unmanned aerial vehicle using its inertial measurement unit. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 235: 300–310
- 39 Arain B, Kendoul F. Real-time wind speed estimation and compensation for improved flight. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(2): 1599–1606
- 40 Brezoescu A, Castillo P, Lozano R. Wind estimation for accurate airplane path following applications. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 73(1–4): 823–831
- 41 Meier L, Camacho J, Godbolt B. Mavlink: micro air vehicle communication protocol[Online], available: <http://qgroundcontrol.org/mavlink/start>, February 10, 2017

- 42 Huang Wu Ling. Parallel Driving System Supported Autonomous Driving Safety Enhancement Research [Ph.D. dissertation], University of Chinese Academy Sciences, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, China, 2014
(黄武陵. 平行驾驶系统支持的自动驾驶安全性研究 [博士学位论文], 中国科学院大学, 中国科学院自动化研究所, 中国, 2014)
- 43 Xiong G, Wang K F, Zhu F H, Cheng C, An X J, Xie Z D. Parallel traffic management for the 2010 Asian Games. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(3): 81–85
- 44 Wang F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 45 Nashashibi F. Automated driving in urban environments: technical challenges, open problems and barriers. In: Proceedings of the 6th Workshop on Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles. 2014
- 46 Browne A F, Vutetakis D. Localization of autonomous mobile ground vehicles in a sterile environment: a survey. In: Proceedings of the 2015 ASEE Southeast Section Conference. USA: American Society for Engineering Education, 2015. 1–7
- 47 Lefèvre S, Vasquez D, Laugier C. A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles. *ROBOMECH Journal*, 2014, **1**: 1
- 48 Mukhtar A, Xia L K, Tang T B. Vehicle detection techniques for collision avoidance systems: a review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(5): 2318–2338
- 49 Darema F. Dynamic data driven applications systems: a new paradigm for application simulations and measurements. In: Proceedings of the 4th International Conference on Computational Science. Berlin Heidelberg, Germany: IEEE, 2004. 662–669
- 50 Zhou Yun, Huang Ke-Li, Hu De-Wen. Conceptual study on dynamic data driven application system. *Journal of System Simulation*, 2009, **21**(8): 2138–2141
(周云, 黄柯棣, 胡德文. 动态数据驱动应用系统的概念研究. 系统仿真学报, 2009, **21**(8): 2138–2141)



白天翔 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为先进机器人控制, 机器人协调与机器人仿真.

E-mail: baitianxiang2014@ia.ac.cn

(**BAI Tian-Xiang** Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers advanced robotics control, robot coordination and robotics simulation.)



王帅 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为社会计算和并行管理. E-mail: wangshuai2015@ia.ac.cn

(**WANG Shuai** Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese

Academy of Sciences. His research interest covers social computing and parallel management.)



沈震 中国科学院自动化研究所副研究员. 主要研究方向为复杂系统, 智能制造. E-mail: zhen.shen@ia.ac.cn

(**SHEN Zhen** Associate professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers complex systems and smart manufacturing.)



曹东璞 英国克兰菲尔德大学驾驶员认知与自动驾驶实验室主任. 中科院自动化所客座研究员. 主要研究方向为自动驾驶, 人车协同, 与平行驾驶.

E-mail: d.cao@cranfield.ac.uk

(**CAO Dong-Pu** Director of Driver Cognition and Automated Driving Laboratory, Cranfield University, Visiting

Professor at Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers automated driving, driver-automation collaboration and parallel driving.)



郑南宁 西安交通大学人工智能与机器人研究所教授. 中国工程院院士. 主要研究方向为模式识别与智能系统、机器视觉与图象处理.

E-mail: nanzheng@mail.xjtu.edu.cn

(**ZHENG Nan-Ning** Professor at Institute of Artificial Intelligence and Robotics (IAIR), Xi'an Jiaotong University. Member of Chinese Academy of Engineering. His research interest covers pattern recognition and intelligent systems, computer vision and image processing.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员. 国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模、分析与控制. 本文通信作者.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Director of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems. Corresponding author of this paper.)