

无人机自主防碰撞控制技术新进展

魏瑞轩, 许卓凡, 张启瑞, 何仁柯

空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038

摘要 随着低空飞行无人机的日益增多,低空环境的飞行安全问题正变得越来越严峻。在阐述无人机自主防碰撞控制基本原理的基础上,分析了无人机自主防碰撞控制技术研究4类主要方法,进而阐述了低空飞行对无人机防碰撞控制技术提出的挑战。最后提出了可借鉴人类认知发育机理的无人机认知防碰撞控制方法,讨论了认知防碰撞控制技术的新进展。

关键词 无人机;防碰撞控制;低空飞行

当前,世界范围内的无人机正呈现井喷式发展,各类无人机正越来越多地进入公共空域,开展灾害搜救、侦察航拍、低空货运等活动,由此引起的无人机在公共空域的防碰撞“感知-规避”问题备受各国政府、空管机构和学术界的关注^[1]。这其中尤为突出的将是低空环境的无人机防碰撞问题。据报道,2014年3月,全美航空一架CRJ200型客机在佛罗里达州Tallahassee机场2300英尺(约700 m)高度突遇一架无人机,令飞行员措手不及;2014年7月22日,伦敦希思罗机场一架降落中的空客320客机险些与一架无人直升机相撞,当时高度700英尺(约213 m)。这些飞行事故候强烈警示了低空无人机引起的飞行安全问题^[2]。

由于低空环境动态复杂,现有防碰撞控制方法难以有效应对低空难题。主要原因是:现有防碰撞控制技术主要是面向中高空规则环境的防碰撞控制算法,侧重的是无人机能应对事先考虑到的简单碰撞情形。但低空碰撞威胁多且动态复杂,难以事先预知威胁的模式、程度等,使现有防碰撞控制方法面临挑战。为此,部分学者借鉴人类在复杂障碍环境中规避碰撞的能力,结合认知科学的相关知识,研究基于认知发育的低空无人机自主防碰撞控制方法,为

低空无人机的安全防碰撞问题提供了新的研究思路。

1 无人机自主防碰撞系统运行原理

防碰撞安全问题对于飞行器来说,是一个永恒且与时俱进的问题。在民航客机等大中型有人驾驶飞机上,通常安装有空中防撞系统(TCAS),用于提醒飞行员可能发生的碰撞,并指示飞行员进行规避机动。但是,对于无人机来说,由于机上没有飞行员操控,不能安装仅是告警提醒型的TCAS,无人机的防碰撞必须强调全过程的自主性,如图1所示,不仅要能够自动地发现和预知可能的碰撞威胁,而且必须能够自主地进行机动规避。无人机的防碰撞执行过程在前端的感知与探测方面,与有人飞机TCAS的工作机制相似。主要不同在于机动规避的操控方面,无人机在获知潜在的碰撞威胁后,必须自主地进

行规避决策,进而给出规避机动指令。该指令发送到机载的飞行控制系统或是小型无人机的自动驾驶仪,控制无人机执行防碰撞规避。在脱离威胁后,再按照要求返回原航路继续飞行。图1所示为一般无人机的防碰撞执行过程,对于低空飞行的小型无人机来说,由于低空环境障碍威胁多、动态复杂,且其自身的载荷容量又十分有限,因此对自主防碰撞技术要求更高。

从无人机进入公共飞行空域的角度看,无人机自身的自主防碰撞系统应有效融合于空域的飞行管制体系中,与已有的空中交通管理系统形成有效衔接,构成多层的防碰撞体系,如图2所示。第1层的空域结构是面向所有空中飞行器的交通安全。空域结构设计利用高度和航路划分来规划飞行器的空中交通,避免无人机与其他飞行器迎面相遇的潜在碰撞风险。第2层空中交通管理系统是国家对整个空域交通

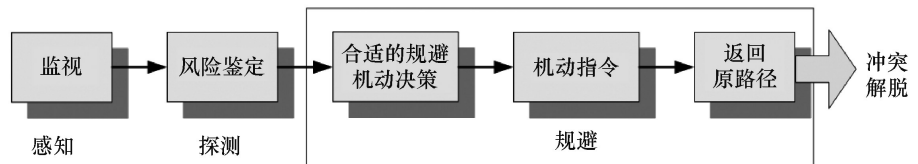


图1 无人机防碰撞过程示意

Fig. 1 Process of autonomous collision avoidance for UAV

收稿日期:2016-12-12;修回日期:2017-03-03

基金项目:国家自然科学基金项目(61573373)

作者简介:魏瑞轩,教授,研究方向为无人机自主控制与协同作战,电子信箱:rxwei369@sohu.com

引用格式:魏瑞轩,许卓凡,张启瑞,等.无人机自主防碰撞控制技术新进展[J].科技导报,2017,35(7):64-68;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.007

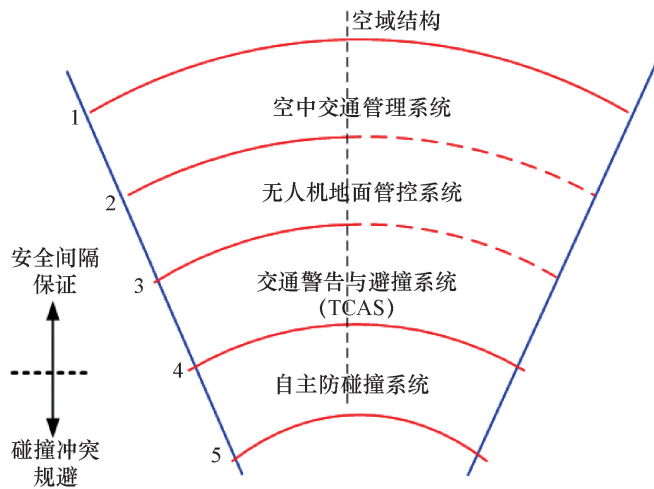


图2 无人机防撞系统层次结构

Fig. 2 Architectural layers of autonomous collision avoidance for UAV

安全实施的管控系统,通过该系统指挥和监控空域内所有飞行器的飞行,确保受控飞行器保持安全间隔,一旦出现潜在冲突情况,则指挥冲突飞机进行机动规避。第3层是无人机的地面任务控制系统,用于监管、控制空域中所有受控无人机,并时刻保持与空中交通管理系统的通信,一旦发现碰撞冲突后,则由地面指控人员及时执行避让策略。第4层是空中防撞告警系统 TCAS,用于指示有人机飞行员进行规避,主动防止与无人机的潜在碰撞。第5层是无人机的自主防撞系统,使无人机自主主动地规避碰撞。

2 无人机防撞控制方法与低空飞行挑战

2.1 无人机防撞控制方法研究现状

无人机防撞问题主要包括感知与规避两个方面。感知研究的是如何使无人机及时准确地获知可能的碰撞威胁,规避研究的是如何控制无人机躲避可能发生的碰撞,核心是防撞控制技术。无人机防撞控制方法的研究是近年来国内外学术界关注的一个热点,主要有以下4类方法。

基于航迹规划的方法是为无人机设计规避碰撞的飞行航路。Wilburm 等^[9]利用改进 Voronoi 图为无人机生成一条可飞的穿越一系列威胁障碍的无

碰撞轨迹。Yu 等^[4]使用扩展卡尔曼滤波估计碰撞时间,获得系统完全可观的必要条件,基于这些条件设计一个可规避障碍的路径规划算法。Venanzio 等^[5]提出一种结合防撞控制的多无人机轨迹生成和时间协同方法,通过调整无人机沿着相应路径的速度实现规避动态障碍。Chi 等^[6]通过获得实时反馈以补偿障碍的不确定性,提出了针对不确定障碍的无人机防撞规避的实时轨迹生成方法。

基于势函数的方法是基于势场实现无人机的防撞规避。Jason 等^[7]将人工势场法用于解决无人机防撞问题,将威胁目标看作是排斥力,目的地建模为吸引力,使用二者合力为无人机确定最安全的运动方向。Chen 等^[8]结合切向量场制导(TVFG)和李亚普诺夫向量场制导(LVFG)提出一种用于无人机障碍规避的动态轨迹规划算法。Dimos 等^[9]基于标准向量场的分布式势函数提出一种用于多智能体导航和防撞的控制策略,并得到其稳定的充分条件。Li 等^[10]针对多无人机协同的防撞问题,设计了一种改进的包含势函数梯度项的位置一致性算法,确保了编队的防撞、连通性保持和速度匹配。张启瑞等^[11]研究了面向城市低空密集不规则障碍空间的无人机航路规划方法,提出基于回溯机制的在线安全航路规

划方法。

基于约束优化的方法是将防撞问题建模为最优控制问题进行求解。Moon 等^[12]使用最小时间方法求解无人机防撞控制问题,将防撞当作是状态空间表述中的不等式约束,用非线性轨迹生成器作为实时优化求解器。Wang 等^[13]利用逆最优控制方法构造非二次型规避代价函数,在一个统一的最优控制架构下,为多无人机编队设计了最优防撞控制律。Panyakeow 等^[14]以规避行为引起的轨迹和超调变化最小为指标,提出了一对具有相同速度无人机之间的冲突消解算法。许云红等^[15]基于无人机防撞冲突检测与威胁评估,建立了基于航向角、速度、高度以及航向速度组合的多种无人机防撞最优机动规避策略。吕明海等^[16]将无人机编队重构问题转化为滚动在线优化问题,采用改进微分进化(DE)算法求解代价,提出一种面向编队重构的防撞控制方法。

基于制导律设计的方法是设计无人机的防撞制导律。Danilo 等^[17]针对协同飞行无人机之间的防撞问题,通过给出新的遭遇时间计算方法,提出一种计算可达空速、航迹角和转弯角速率指令的防撞制导律。Mujumdar 等^[18]将非线性几何制导(NGG)和微分几何制导(DGG)算法扩展到无人机的运动障碍规避问题,设计了无人机规避突发障碍的制导律。茹常剑等^[19]从博弈论的视角研究非隔离空域中无人机的防撞问题,通过建立无人机与入侵机的运动学模型和无人机的认知安全域,提出一种无人机防撞的认知博弈制导策略。崔军辉等^[20]根据采用脉冲微分包含理论对感知-规避问题进行分析,结合无人机飞行策略和制导律,提出一种无人机感知-规避系统安全区域动态决策方法。

2.2 低空飞行对无人机防撞控制的挑战

目前关于无人机防撞控制问题的研究,一个主要特点是以中高空规则环境中少量威胁的背景情形研究防撞控制算法,这对于复杂低空环境中的

防碰撞控制有明显局限。一是低空环境的障碍多、环境复杂,特别是城市环境中,有大量的、分布不规则的高层建筑物,而且经常会出现一些未知的飞行器;二是低空飞行的无人机多为各种小型无人机,本身受监管的程度低,而且随着这类无人机的广泛普及,低空动态环境将会更加复杂,现有的面向预定模式的防碰撞控制算法难以适应对多发任意威胁的有效规避。这些复杂不确定性问题的出现,需要人们为无人机研究更为智能和自主的防碰撞控制算法。

3 基于认知发育的防碰撞控制原理与进展

认知科学的研究表明^[21-22],大脑可以通过学习训练发育出强大的决策能力,使人能够处理非常复杂的问题。对于复杂障碍环境中的防碰撞问题,经过一定训练的人可以具有非常出色的防碰撞能力,其生物与认知基础就是神奇的大脑及其所具有的认知发育机制。借鉴人类的这种高级智能,对于低空复杂动态环境下的无人机防碰撞问题,可以模拟人类大脑的认知发育机制,研究无人机的认知防碰撞控制方法。在国家自然科学基金的支持下,笔者所在课题组开始深入研究基于认知发育的低空环境无人机的防碰撞控制问题及其实现方法。

3.1 基于认知发育的防碰撞控制基本原理

2001年密歇根州立大学Weng^[23]在《Science》上首次阐述了自主心智发育的研究思想,带动了机器人心智发育研究的热潮。2013年,Karaoguz等^[24]提出一种面向动态环境多任务场景的基于回报的高层任务学习与执行机制,为资源受约束系统的信息获取提供了一种新的框架。2014年,Pointeau等^[25]研究了iCub机器人在与人进行社会性交互的过程中,通过学习完成自体记忆的连续发育机理。2015年魏瑞轩等^[26]将认知控制机制引入搜索决策,建立了面向无人机协同搜索的多层认知控制模型,有效提高了搜索效能。上述研究是无人机认知发育防碰撞控制的思想基础。

对大脑认知过程的研究表明,人的认知控制行为具有层次化结构,上层是决策性行为,完成学习、认知、决策等高层次的神经控制活动;中间是程序性行为,提供熟练的程序性行为的协调控制活动;下层是反射性行为,完成对上层指令的反应式执行。借鉴人的认知决策模型,可建立具有认知发育功能的无人机防碰撞控制系统的一体化层次模型,包括认知决策层、制导规划层和执行控制层。认知决策层的核心是防碰撞心智发育器,主要完成对碰撞威胁模式的认知和防碰撞规避策略的生成,具有学习和发育功能。中间层主要完成机载规划与制导,负责对确定性策略的解释协调,生成飞控系统指令。下层即是负责具体飞行控制功能的执行层。

3.2 无人机认知防碰撞控制研究进展

围绕无人机的认知防碰撞控制问题,已在以下3方面取得了研究进展。

1) 关于无人机认知防碰撞控制系统的稳定性分析。

不同于传统的无人机飞行控制系统,无人机的认知防碰撞控制实际上包括了威胁环境、防碰撞认知发育器和制导控制子系统3部分。作为自主性的防碰撞控制系统,在怎样的条件下能够保证无人机有效规避碰撞威胁,即使无人机与环境系统在防碰撞意义下是稳定的,是无人机认知防碰撞控制系统设计的重要问题。为此,将无人机、认知防碰撞系统和飞行环境整体作为“认知无人机-环境系统”考虑,定义“如果无人机的行动域与环境威胁域总是不相交,则认为认知无人机-环境系统是防碰撞稳定的。”

该系统工作过程包含3种工作模式。在正常飞行状态下,制导控制系统控制无人机按正常航路飞行,是一种连续工作状态,称为连续工作模式;当探测到突然闯入的碰撞威胁时,认知决策层将紧急决策出防碰撞策略,再通过制导飞控层控制无人机迅速规避,这是一种短时的非连续工作状态,视为脉冲工作模式。考虑到人认知过程的复杂性,将认知防碰撞的决策过程看成是防碰撞认知发育器根据环境威胁发出一系

列脉冲规避指令的过程,从而将防碰撞认知发育器建模为包括时间和幅值的脉冲指令发生器。这样,就可将认知无人机-环境系统建模为一类脉冲微分包含(impulse differential inclusions, IDI)系统。

根据脉冲微分包含系统的基本理论,研究导出了使认知无人机-环境系统防碰撞稳定的条件是“当且仅当无人机与各个威胁之间的最小距离大于等于两者的等效碰撞半径之和”。特别地,针对正向动态碰撞模式,分析得到了使系统防碰撞稳定的安全边界条件。只要防碰撞认知发育器在恰当的时时刻发出防碰撞脉冲指令,控制无人机进行障碍规避机动,使无人机与威胁满足安全边界条件,即可保证无人机不会与威胁发生碰撞。也就是说,认知无人机-环境系统在运行过程中是防碰撞稳定的。关于这一问题的研究成果尚在评审中^[27]。

2) 基于Skinner条件反射机制的无人机应急规避机动策略^[28]。

该方法将无人机应急规避行为理解为在外界威胁刺激下的一种应激性,借鉴人的Skinner条件反射机制,结合无人机威胁规避策略,提出从感知到规避的条件反射式应急机制。建立了基于威胁紧迫度的Skinner响应策略,用本机与威胁的相对速度来度量威胁紧迫度,以此模拟外界刺激信号。模拟飞行员在应对突发紧急碰撞情况下的拉杆动作,将阶跃信号作为无人机应急动作指令,运用动作评价算法计算输出策略。借鉴Monte Carlo方法和模拟退火算法,通过不断训练强化刺激到动作的映射,形成威胁状态与规避动作的匹配,实现从感知到规避的条件反射。实验结果表明,该方法对突发威胁情况具备有效的规避能力。

3) 基于层次发育结构的无人机认知防碰撞控制方法^[29-30]。

为了使无人机的认知防碰撞能力具有自主发育性,建立了基于层次发育结构的无人机认知防碰撞控制方法。在认知无人机-环境系统中,构建包括感知层、逻辑层和发育模块的认知防碰

撞决策子系统。由感知层获取威胁信息,以障碍的位置矢量和速度矢量作为对障碍模式描述的基本参考,通过模糊化取值,计算障碍模式的贴进度。逻辑层进一步组合多个障碍的集合构成威胁模式,建立威胁模式描述知识库。通过对威胁模式和规避策略的分析,建立基础的威胁-规避匹配映射。发育模块的核心是设计知识库增量判断函数。基于增量判别函数分析两种威胁模式的相似度,如果相似度

低于相似度阈值,则将新出现的威胁模式作为新知识加入到威胁模式知识库中,从而实现防碰撞知识的自主发育。基于这种层次发育结构,实现了“线上即时规避,线下寻优发育”的防碰撞规避策略的自主发育机制。

4 结论

无人机的自主防碰撞控制技术是支撑无人机进入公共空域飞行的重要技术,也是当前无人机控制技术领域

研究的一个重点问题。

本文分析了当前防碰撞控制研究的几类主要方法,简要讨论了模拟人类认知智能的无人机认知防碰撞控制方法的研究进展。这是一个能够有效处理飞行环境中严重不确定性威胁的有效技术方法,但当前正处于初步的研究阶段,后续对防碰撞威胁模式和规避策略的发育机制、认知控制器的发育方法等问题,需要进行更加深入的研究。

参考文献(References)

- [1] Plamen Angelov. 无人飞行器系统的感知与规避——研究与应用[M]. 齐晓慧, 田庆民 译. 北京: 国防工业出版社, 2014.
Plamen Angelov. Sense and avoid in UAS: Reasearch and application[M]. Qi Xiaohui, Tian Qingmin, trans. Beijing: National Defence Industry Press, 2014.
- [2] 魏瑞轩, 茹常剑. 无人机运行安全问题及对策研究[R]. 北京: 空军司令部, 2014.
Wei Ruixuan, Ru Changjian. Reasearch on strategy and problems for the flight safety in UAVs[R]. Beijing: Air Force, 2014.
- [3] Davis J, Perhinschi M, Wilburn B, et al. Development of a modified voronoi algorithm for UAV path planning and obstacle avoidance[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston VA: AIAA, 2006.
- [4] Yu H, Sharma R, Beard R W, et al. Observability-based local path planning and obstacle avoidance using bearing-only measurements[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1392-1405.
- [5] Cichella V, Choe R, Mehdi B S, et al. Trajectory generation and collision avoidance for safe operation of cooperating UAVs[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston VA: AIAA, 2013.
- [6] Lai C K, Whidborne J. Real-time trajectory generation for collision avoidance with obstacle uncertainty[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston VA: AIAA, 2011.
- [7] Jason R, Robert S, James C, et al. Unmanned Aerial system collision avoidance using artificial potential fields[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2014, 11(3): 140-144.
- [8] Chen H D, Chang K C, Craig S A. UAV path planning with Tangent-Plus-Lyapunov vector field guidance and obstacle avoidance[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2013, 49(2): 840-856.
- [9] Dimarogonas D V. Sufficient conditions for decentralized potential functions based controllers using canonical vector fields[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(10): 2621-2626.
- [10] Li S H, Wang X Y. Finite-time consensus and collision avoidance control algorithms for multiple AUVs[J]. Automatica, 2013, 49(11): 3359-3367.
- [11] 张启瑞, 魏瑞轩, 何仁珂, 等. 城市密集不规则障碍空间无人航路规划[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1407-1413
Zhang Qirui, Wei Ruixuan, He Renke, et al. Path planning for unmanned aerial vehicle in urban space crowded with irregular obstacles[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1407-1413.
- [12] Moon J, Prasad J V R. Minimum-time approach to obstacle avoidance constrained by envelope protection for autonomous UAVs[J]. Mechatronics, 2011, 21(5): 861-875.
- [13] Wang J, Xin M. Integrated Optimal Formation Control of Multiple Unmanned Aerial Vehicles[J]. Control Systems Technology IEEE Transactions on, 2013, 21(5): 1731-1744.
- [14] Prachya P, Mehran M. Deconfliction algorithms for a pair of constant speed unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 54(1): 456-426.
- [15] 许云红, 周锐, 夏洁, 等. 无人机自动防碰撞冲突检测与优化控制方法[J]. 电光与控制, 2014, 24(1): 1-6.
Xu Yunhong, Zhou Rui, Xia Jie, et al. Conflict detection and optimal control for UAVs in automatic avoiding of dynamic obstacles[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(1): 1-6.
- [16] 魏瑞轩, 吕明海, 茹常剑, 等. 基于DE-DMPC的无人机编队重构防碰撞控制[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(12): 2473-2478.
Wei Ruixuan, Lü Minghai, Ru Changjian, et al. Reconfiguration collision avoidance method for UAV's formation based on DE-DMPC[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(12): 2473-2478.
- [17] Galisteu D G, Almeida F. Three-dimensional Guidance Filter for Autonomous Collision Avoidance[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston VA: AIAA, 2013.
- [18] Anusha M, Radhakant P. Reactive collision avoidance using nonlinear geometric and differential geometric guidance[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2011, 34(1): 303-310.
- [19] 茹常剑, 魏瑞轩, 郭庆, 等. 面向无人机自主防碰撞的认知博弈制导控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1555-1560.
Ru Changjian, Wei Ruixuan, Guo Qing, et al. Guidance control of cognitive game for unmanned aerial vehicle autonomous collision avoidance[J]. Control

- Theory & Applications, 2014, 31(11):1555-1560
- [20] 崔军辉, 魏瑞轩, 张小倩. 无人机感知-规避系统安全区域动态决策方法[J]. 控制与决策, 2014, 29(12): 2195-2200.
Cui Junhui, Wei Ruixuan, Zhang Xiaoqian. Dynamic decision-making method for safety region of sense and avoid system for unmanned aerial vehicle [J]. Control and Decision, 2014, 29(12): 2195-2200.
- [21] Asada M, MacDorman K, Ishiguro H, et al. Cognitive developmental robotics as a new paradigm for the design of humanoid robots[J]. Robotics Autonomous System, 2001, 37(2):185-193.
- [22] Reiner O, Axel S. System-ergonomic design of cognitive automation: Dual-mode cognitive design of vehicle guidance and control work systems[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [23] Weng J, McClelland J, Pentland A, et al. Autonomous mental development by robots and animals[J]. Science, 2001, 291(5504): 599-600.
- [24] Karaoguz C, Rodemann T, Wrede B, et al. Learning information acquisition for multitasking scenarios in dynamic environments[J]. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, 2013, 5(1): 46-61.
- [25] Poiteau G, Dominey P F. Successive developmental levels of autobiographical memory for learning through social interaction[J]. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, 2014, 6(3): 200-212.
- [26] 魏瑞轩, 茹常剑, 周凯, 等. 多无人机协同搜索的模糊认知决策方法研究[J]. 中国科学(技术科学), 2015, 45(6): 595-601.
Wei Ruixuan, Ru Changjian, Zhou Kai, et al. Study on fuzzy cognitive decision-making method for multiple UAVs cooperative search[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(6): 595-601.
- [27] 魏瑞轩, 许卓凡, 倪天. 无人机认知防撞系统的防撞稳定性与安全边界研究[R]. 西安: 空军工程大学, 2017.
Wei Ruixuan, Xu Zhuofan, Ni Tian. Study on the stability of collision avoidance & safety bound for the cognitive collision avoidance system of UAV[R]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2017.
- [28] 魏瑞轩, 何仁珂, 张启瑞, 等. 基于Skinner理论的无人机应急威胁规避方法[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 2016, 36(6): 620-624.
Wei Ruixuan, He Renke, Zhang Qirui, et al. Skinner-based emergency collision avoidance mechanism for UAV[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 620-624.
- [29] 张启瑞. 面向无人机防撞的自主心智发育方法[D]. 西安: 空军工程大学, 2016.
Zhang Qirui. Autonomous Mental development method for collision avoidance of UAV[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2016.
- [30] Zhang Q R, Wei R X, Xu Z F, et al. Small UAVs with autonomous avoidance using humanlike thoughts[C]//Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Nanjing: IEEE, 2016: 1080-1084.

New progresses in autonomous collision avoidance control for UAV

WEI Ruixuan, XU Zhuofan, ZHANG Qirui, HE Renke

Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

Abstract Because there are more and more unmanned aerial vehicles (UAVs) which are flying into low-altitude area, the flight safety problem is becoming more and more serious. In this paper after the basic principle for autonomous collision avoidance control for UAV is described, four main methods of autonomous collision avoidance control technologies for UAV are analyzed. Then some low-altitude challenges to the collision avoidance control technique for UAV are discussed. Moreover, a cognitive collision avoidance control method is presented by referring to the human cognitive development principle. Finally, some new research developments on the cognitive collision avoidance control of UAV are introduced.

Keywords unmanned aerial vehicles; collision avoidance control; low-altitude flight

(责任编辑 刘志远)