

基于零空间行为融合的多智能体编队控制综述

葛宇^{1,2}, 廖煜雷^{1,3}, 王博^{1,3}, 李晔^{1,3}, 史长亭⁴, 刘海波⁴, 贾琪^{1,3}

(1. 哈尔滨工程大学 智能海洋航行器技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 天津航海仪器研究所, 天津 300131; 3. 哈尔滨工程大学 三亚南海创新发展基地, 海南 三亚 572000; 4. 哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:针对单智能体在民用和军用领域无法完成现实场景下复杂任务的问题, 本文综述了零空间行为融合算法。阐述零空间行为融合算法的设计思想与数学模型, 介绍零空间行为融合算法的文献计量分析。综述了零空间算法的研究进展, 包括编队速度饱和、行为转换不连续、行为优先级分配和多种算法结合方面的改进工作, 并分析当前研究存在的问题。研究表明: 零空间行为融合算法在多智能体编队控制领域, 提高算法的自适应性、考虑动力学特性、异构编队和行为函数优化是该算法未来的发展方向。

关键词: 零空间行为; 编队控制; 多智能体; 逆运动学; 基于行为; 速度饱和; 行为转换; 行为优先级优化

DOI: 10. 11990/jheu. 202204072

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/23. 1390. U. 20240625. 1454. 002>

中图分类号: TP242. 6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)08-1442-09

A review of multiagent formation control based on the null-space-based behavioral fusion algorithm

GE Yu^{1,2}, LIAO Yulei^{1,3}, WANG Bo^{1,3}, LI Ye^{1,3}, SHI Changting⁴, LIU Haibo⁴, JIA Qi^{1,3}

(1. National Key Laboratory of Autonomous Marine Vehicle Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Tianjin Navigation Instruments Research Institute, Tianjin 300131, China; 3. Sanya Nanhai Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Sanya 572000, China; 4. College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Addressing the issue that a single intelligent agent cannot accomplish complex tasks during realistic scenarios in civil and military domains, this paper reviews the null-space-based behavioral (NSB) fusion algorithm. Initially, the design concept and mathematical model of the NSB fusion algorithm are described. Then, a bibliometric analysis of the algorithm is presented. The emphasis then shifts to the research progress of the algorithm, including improvements in formation-speed saturation, discontinuous behavioral transitions, behavioral priority allocation, and the combination of multiple algorithms. Finally, the paper analyzes issues in current research, highlighting that future development directions in multi-intelligent-agent formation control are the improvement of the adaptability of the algorithm, considering dynamics characteristics, addressing heterogeneous formations, and optimizing the behavior function.

Keywords: null-space-based behavior; formation control; multiagent; inverse kinematics; behavior-based; velocity saturation; behavior switching; behavior prioritization optimization

多智能体由多个具有一定决策、控制、执行和通信能力的智能体组成^[1]。从广义上讲, 智能体为无人车、无人机、无人艇和无人潜器等实体^[2]。多智

能体编队控制为驱动多个智能体在向指定的目标或方向运动的过程中, 完成预先规定的几何形状(即编队队形)的同时满足环境约束(即避免碰撞)^[3], 国防、交通、护航、搜索救援和地球观测等领域都有广泛应用^[4], 是多智能体领域的热点问题^[5]。在执行任务的过程中通常需要执行多种行为, 例如: 编队保持行为、避免碰撞行为和趋向目标行为等。在这种情况下, 当执行不同的控制目标时, 可能会发生任

收稿日期: 2022-04-28.

网络出版日期: 2024-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52071097); 海南省自然科学基金项目(522MS162); 水下机器人技术重点实验室研究基金项目(2021JCJQ-SYSJJ-LB06910).

作者简介: 葛宇, 男, 硕士研究生;

廖煜雷, 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 廖煜雷, E-mail: liaoyulei@hrbeu.edu.cn.

务冲突。如何动态平衡多个任务的约束,进而根据优先任务的组合结果对多智能体进行控制,是当前多智能体编队控制面临的挑战之一。因此,需要一个冲突任务的管理机制,并需要根据激活任务之间相对重要的目标配置任务的优先级。行为控制作为解决方案,已经研究了20多年^[6]。

基于行为的编队控制方法由一系列行为,即简的基本动作组成。每个行为都有自己的目标或任务,其输入可以作为智能体的传感信息或者系统中其他行为的输出;相应地,每个智能体的输出送到其执行器以控制智能体的运动,或作为系统中其他行为的输入,从而构成交互的行为网络。基于行为法的核心在于各种基本行为的设计和有效的行为协调机制,即行为选择问题^[7]。

基于行为法被用于计算机动画中模拟鸟群、鱼群等的聚集行为,通过定义并组合3个局部行为实现了群体的聚集^[8]。Balch等^[9]将基于行为法应用于多智能体编队控制中,通过设计一系列基本行为使多智能体编队完成避障并运动至目标点,并且进行了仿真和实物的对比研究。Lawton等^[10]采用基于行为法详尽地研究了多空间飞行器编队飞行问题,并分析了该编队的收敛性和误差的影响;Monteiro等^[11]将基于行为法扩展至考虑非线性动力学的多智能体编队控制;Jadbabaie等^[12]对基于行为法进行了深入的分析和形式化,提出了具有深远影响的最近邻协调思想。然而,传统的行为控制方法不能轻易地将任务结合起来,相应算法的收敛性不能轻易地用数学模型进行分析。Arrichiello等^[13]基于逆运动学技术,利用多智能体的冗余特性,提出零空间(null-space based behavioral, NSB)行为融合方法。保证高优先级任务顺利执行的同时,低优先级的任务也可部分完成,并且通过投影,避免了不同子任务间的直接冲突^[14]。Arrichiello等^[15]给出了严格的稳定性分析,用来证明不同任务可以同时完成。相较于传统基于行为控制法,NSB具有灵活度高、鲁棒性强和行为可融合等一系列优势,该方法已成为多智能体编队控制领域的研究热点。

本文对近年来基于NSB方法解决多智能体编队控制的研究工作进行总结回顾,首先从NSB方法的数学模型出发,并将NSB方法目前存在的问题和改进方向,分为速度饱和、行为切换和行为优先级优化3个方面进行总结。其次,对近20年NSB方法的研究成果进行文献计量分析,全面论述NSB方法在航天器、无人机、无人车和无人艇等多智能体领域的研究进展。对NSB方法在多智能体编队领域未来的研究方向和思路进行了展望。

1 传统零空间

NSB的思想源自基于雅可比转置计算的闭环逆运动学控制问题,首次应用出现在约束冗余度机械臂在杂波环境和给定方向上进行操作并以指定的灵敏度进行避障的路径跟踪任务中^[16]。Arrichiello^[13]将NSB应用于无人艇编队控制问题,为多智能体编队控制问题提供了解决方法。

NSB方法首先将一个复杂的整体任务分解成多个简单的任务行为,分别设计各行为的行为函数完成对应的行为,然后定义各行为的优先级,将低优先级的行为向高优先级行为的零空间投影,得到融合后的行为输出函数,传输给底层的运动控制器控制智能体的运动。

NSB方法的核心思想是将低优先级行为向高优先级行为的零空间上投影,输出单一的指令,在保证高优先级行为顺利完成的同时,兼顾低优先级行为,避免了不同行为之间可能存在的相互冲突情况。与其他基于行为方法相比,具有实时性强、行为之间不冲突的优点。该方法的突出优点是,在保持主要行为完全完成的基础上,充分利用零空间完成次要行为。

假设 x, y, z 是惯性坐标系下的坐标,定义智能体的位置为 $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$,对应的线速度为 $\mathbf{v}_i = [\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i]^T$ 。对于 n 个智能体,定义 $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_1^T, \mathbf{p}_2^T, \dots, \mathbf{p}_n^T]^T$ 和 $\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T, \mathbf{v}_2^T, \dots, \mathbf{v}_n^T]^T$, δ 为可控的任务变量,对应的函数为:

$$\delta = f(\mathbf{p}) \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = \dot{\mathbf{p}} \quad (2)$$

则:

$$\begin{cases} \min_v \|\mathbf{v}\|^2 \\ \text{s. t. } \dot{\delta} = \mathbf{J}(\mathbf{p})\mathbf{v} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\mathbf{J}(\mathbf{p})$ 是 δ 的雅可比矩阵。式(3)可以用拉格朗日乘子法解决,因此式(3)可以写成:

$$\min_v \frac{1}{2} \|\mathbf{v}\|^2 + \lambda^T (\dot{\delta} - \mathbf{J}\mathbf{v}) \quad (4)$$

对式(4)中的 $\dot{\delta}$ 和 λ 求偏导,导数为0处即为极值点:

$$\begin{cases} \mathbf{v}^T - \lambda^T \mathbf{J} = 0 \\ \dot{\delta} - \mathbf{J}\mathbf{v} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

求解式(5)和式(6)可得:

$$\begin{cases} \mathbf{v} = \mathbf{J}^T \lambda \\ \dot{\delta} = \mathbf{J}\mathbf{v} = \mathbf{J}\mathbf{J}^T \lambda \\ \lambda = (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\delta} \\ \mathbf{v} = \mathbf{J}^+ \dot{\delta} = \mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\delta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: J^+ 为雅可比矩阵的伪逆, 如果存在多个行为, 行为的优先序列为 $1, 2, \dots, i-1, i, i+1, \dots$ 。NSB 是将 $i+1$ 级的行为向 i 级行为投影, 得到的行为向量值与 i 级行为的和再在 $i-1$ 级行为的零空间上投影, 得到新的任务输出。以此类推, 递推公式为:

$$v = v_i + (I - J_i^+ J_i) v_{i+1} \quad (7)$$

式中 $I - J_i^+ J_i$ 为行为 i 的零空间。

以3个子行为为例, NSB 的原理如图1所示。

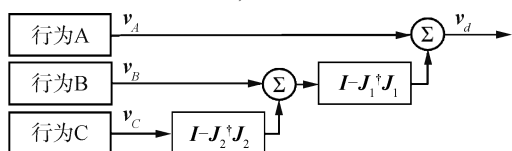


图1 3个行为为例的NSB

Fig.1 Sketch of NSB in a 3-behavior example

2 零空间的改进研究

尽管 NSB 具有实时性强、行为可融合、易于理解等特点, 但在实际应用中仍存速度饱和、任务转换平滑性等问题。

2.1 速度饱和

在实际应用中, 由于 NSB 的增益系数在每个固定条件下都是常数, 传统的 NSB 编队控制方法会产生饱和规划现象: 当初始位置与期望位置距离较大时, 将产生较大的期望速度, 期望速度高于智能体的实际速度极限 (超过其可操作性), 导致任务失败^[17]。速度饱和问题如图2所示。

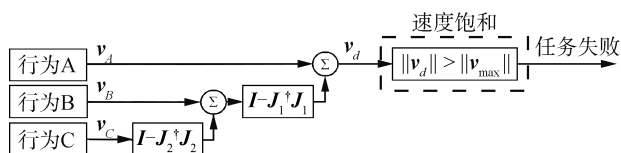


图2 速度饱和

Fig.2 Sketch of velocity saturation

降低任务的期望速度可以避免饱和, 缺点是优先级较高的任务速度会被优先级较低的任务速度拖慢, 违背了优先任务执行的精神, 即低优先级任务不应干扰高优先级任务。为了解决此问题, Arrichiello 等^[18]提出了一种饱和管理策略, 以扩展 NSB 算法。该算法为每个任务都提供一个阈值, 首先为优先级最高的任务提供第1个阈值, 且该阈值不超过智能体所能达到的最大速度, 下一个任务的阈值为第1个任务的阈值减去当前任务的速度。以此类推, 随着任务优先级的降低, 任务的阈值也在降低, 并且任务的总阈值也不会超过智能体所能达到的最大速度, 避免了速度饱和问题并且不影响任务的优先级。

Arrichiello 等^[19]提出了一种新型的饱和管理策略, 通过动态缩放任务速度命令来管理智能体的速度饱和, 克服了解决方案的限制。虽然从算法的角

度来看, 这种方法更复杂, 但绝不过于保守, 仍然足够简单, 可以在线实现。

Oland 等^[17]指出产生速度饱和是由于使用相对距离作为何时启用避碰行为的衡量标准, 因此提出一种饱和管理函数, 将避碰作为优先级最高的任务, 并证明了首要任务在该饱和管理函数下速度始终饱和, 避免了无人艇在避碰时速度过大的问题。

李彦莹等^[20]针对双无人艇溢油围捕问题, 考虑双无人艇队形中心和航迹点的位置、双无人艇队形中心与航迹点的距离以及无人艇的最大航速, 设计轨迹跟踪行为函数, 使得双无人艇在执行任务的过程中期望航速满足双无人艇最大航速的约束。

Fan 等^[21]提出了一种自适应零空间算法, 该方法以无人艇为实验对象, 通过引入具有物理意义的可变系数 (无人艇的最大速度、终点坐标和当前定位坐标) 来重新定义行为运动模型。因此, 在每种工作条件下计算的速度限制在无人艇的机动性范围内。并设计了避碰自适应行为函数。与传统的零空间算法相比, 自适应零空间算法具有自适应性, 能够兼顾无人艇的效率和可操作性。

目前, 解决 NSB 速度饱和问题的方法大致可以分为饱和管理策略和自适应函数2类。饱和管理策略存在一个限制, 即只考虑了单个智能体系统而没有考虑多个智能体系统, 当有多个智能体时, 任务的阈值可能不唯一, 因为不同智能体所能达到的最大速度可能不同。自适应函数的灵活度较差, 因为针对不同行为, 需要单独设计参数自适应函数, 函数中仍有需要通过实验调节的参数, 虽然可以保证速度饱和但并没有证明所得参数为最优解。

2.2 行为转换

在运动执行过程中, 不能任意修改任务的层次结构, 当任务被突然激活时, 输入信号会出现不连续性。此外, 许多多智能体编队都受到最终时间限制, 但大多数基于任务的控制器使用指数递减的任务函数, 导致了控制律的不连续性。由于这些控制器产生的信号被用作每个智能体的输入命令, 它们的连续性和平滑性起着重要作用。行为转换问题原理如图3所示。

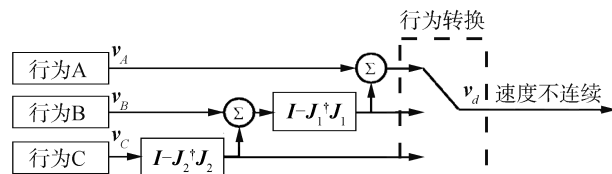


图3 行为转换

Fig.3 Sketch of behavior switching

借鉴 NSB 的行为层次思想, 多智能体编队中的行为可以分为2种: 一个是局部行为, 目标是保持编

队;另一个是全局行为,目标是编队到达指定位置。无论是全局行为还是局部行为,智能体在执行任务的过程中如果遇到障碍物,都需要改变行为的优先级,将避障作为临时的优先级最高的行为,这时就会发生行为转换的不连续。如图4所示,其中4种类型的短划线线段分别代表不同智能体的运动轨迹。

Arechavaleta 等^[22]采用一个终端吸引子,确保了任务在期望时间内完成的同时避免行为转换时的不连续性。此外,为了使行为转换更加平滑在引入终端吸引子的同时,增加一个函数值从0~1随时间连续变化的、光滑的行为过渡函数,并且证明了行为转换的稳定性。Trujillo 等^[23]将避障作为局部行为,编队作为全局行为,且局部行为的优先级高于全局行为,然后分别设计行为函数利用零空间算法将2个行为融合,最后在融合后的行为函数中添加行为过渡函数,以保证行为转换的连续性。该方法将编队问题转换为一致性问题,且不需要全局感知智能体的位置。

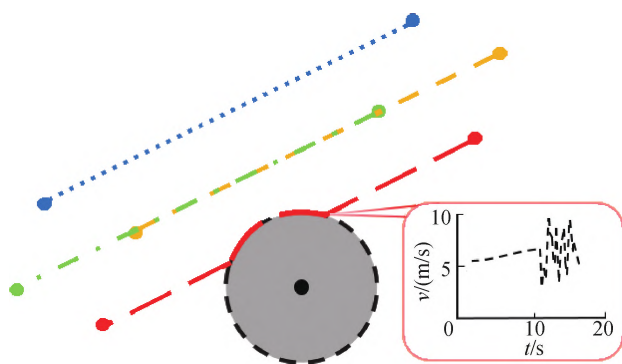


图4 不连续现象

Fig. 4 Phenomenon of discontinuities

Mansard 等^[24]证明了随着任务状态的变化基于伪逆的控制方法通常存在不连续性,提出了一种连续伪逆,这种逆是所有行为的逆的线性组合。Mansard 的逆具有2个特征:1)在行为状态切换过渡期间逆是连续的;2)当所有行为都处于非活动状态或完全活动状态时,逆等于伪逆。由于所有行为都处于非活动或完全活动状态,因此可以保证系统的稳定性,将该逆运算应用于具有不同优先级的多个行为中^[25]。

Colome 等^[26]提出了一种基于雅可比奇异值连续修正的滤波方法,通过该方法,雅可比矩阵可以被假定为满秩,而不会对算法产生太多额外的误差,因此伪逆算子不会因雅可比矩阵的秩变化而出现间断。Colome 将这种滤波方法与连续伪逆算法^[24]和选择性阻尼算法^[27]相结合以生成更加平滑的轨迹,并在时间步长、雅可比条件、多行为性能和计算时间之间很好地实现了折衷。

目前,解决 NSB 行为转换问题的方法大致可以

分为设计过渡函数和连续伪逆策略2类。这些工作将交换操作限制在堆栈中的连续级别,并且可能需要在实现所需的优先级之前进行一组耗时的交换。一些解决方案只允许在最低优先级的任务插入和移除,或者对于许多同时进行的任务转换来说,只考虑了最多2个行为没有更多行为的方法,能否解决上述问题还需要进一步研究。

2.3 行为优先级优化

同样的任务场景,采用不同的行为优先级会对行为最终完成的效果产生不同的影响,所以根据应用场景分配合适的行为优先级,对于 NSB 来说也很重要^[28]。例如编队和驶向目标这2个基本行为:在护卫任务中,编队必须是刚性的,应优先考虑编队,以便被护卫的实体受到组成护卫的机器人的保护;在装载运输任务中,编队的优先级高于驶向目标的优先级,因此物体不会掉落;在绘制一个大区域的地图时,主要的行为是驶向目标以覆盖尚未绘制的区域。

此外,传统的 NSB 行为优先级是根据经验预先设定的,并且在整个行为执行过程中是固定的。当行为数量很大并且环境是动态和未知的时,这可能会降低 NSB 方法的控制性能,并且限制其在动态和未知环境中的应用。行为优先级优化如图5所示。

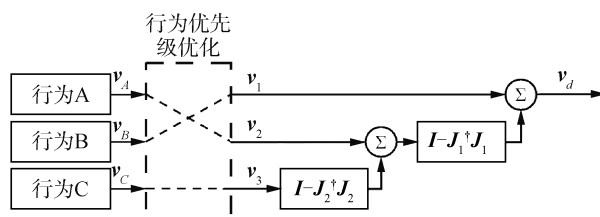


图5 行为优先级优化

Fig. 5 Sketch of behavior prioritization optimization

Fan 等^[21]提出一种逻辑优先避碰策略,将多无人艇编队中所有无人艇都设有编号,编号大的无人艇将编号小的无人艇视为障碍物。该策略有效地解决了编队中每艘艇将彼此视为障碍物都采用避障行为,导致2艘艇都远离目标点的问题。Neto 等^[29]以无人机和轮式机器人协同工作为背景,比较了编队优先级高于/低于驶向目标优先级对于异构系统协同控制的影响。庞师坤等^[30]根据 AUV 与障碍物之间的相对距离,将障碍物周围分为安全区、常规避障区和紧急避障区并定义了3种行为,设计了一种行为管理器。当 AUV 在不同的区域时,行为管理器会触发或抑制对应的行为,并重新分配行为的优先级,实现行为优先级动态变化。Chen 等^[31]用模型预测控制技术提出了一种行为管理器。在每个采样时刻,行为优先级规划问题被公式化为切换模式最优控制问题,该问题可以通过有效的混合整数最优控制算法解决。最佳行为优先级顺序是基于代理的当

域的机器人编队控制都有研究进展。可以看出 NSB 的发展历程与工程需求和任务场景息息相关,从单个机器人的静态避障、驶向目标,到同构机器人的队形保持、动态避障,再到异构机器人的编队重构、队形转换。任务场景更加复杂,应用领域也更加广阔。不同领域对编队控制问题关注的内容不同,在实际应用 NSB 时,根据自身领域的特性对 NSB 提出了不同的要求和改进,使得 NSB 不断完善。NSB 在无人机^[34-40]、航天器^[41-46]、无人车^[22,47-51]和无人艇^[13,20-21]等不同领域编队控制问题上进行了典型应用。其中,NSB 在无人艇编队控制领域的应用较少。

3.2 NSB 典型应用的研究进展

3.2.1 无人机编队控制

Vaca 等^[34]结合零空间控制器的灵活性和滑模控制器的鲁棒性,设计一种基于零空间的鲁棒控制器,实现有阵风干扰的 3 个四轴直升机编队的轨迹跟踪。Camacho 等^[35]提出一种基于零空间的控制策略,用于监控拥挤环境下空中机械手的齐次编队控制。Salinas 等^[37]基于零空间的数学理论,提出了一种多无人机协作控制方法,考虑了无人机柔性缆索挂载载荷的问题,在优先避障的条件下,同时加入风扰动、载荷重量均匀分布和编队形状等因素。在这种任务场景中有效载荷必须遵循预定的路径以避免可能的振荡,并进行了实物试验,如图 7 所示。



图 7 采用 NSB 算法的无人机编队^[52]

Fig. 7 UAV formation with NSB^[52]

3.2.2 航天器编队控制

Zhou 等^[43]利用零空间算法的实时性,改良神经网络模型,实现快速、准确、抗扰动的航天器队形重构控制,该方法具有计算负荷低和保守性低的特点。Schlanbusch 等^[44]将零空间算法应用于航天器编队避障任务中,使用滑动表面控制器实现航天器之间相对位置的跟踪,并根据李亚普诺夫定理,证明了非冲突行为的稳定性,而冲突行为又不会发生,并进行了仿真试验,试验结果如图 8 所示。

3.2.3 无人车编队控制

Hung 等^[47]针对移动机器人在执行任务的过程中所面临的全局网络完整性问题,结合零空间算法分布式控制的特点,设计一种分层分布控制策略,不

需要代数连通性估计的情况下保持机器人的全局网络完整性。LEICA 等^[49]利用零空间算法实现了 2 个轮式机器人和一个无人机之间的编队行为,利用虚拟势场实现避障行为,然后将 2 种行为融合,生成异构编队的期望速度。Leica 等^[51]比较了 NSB-PID 控制和 NSB-SMC 控制在轮式机器人编队上的控制效果,并进行了实物验证试验,如图 9 所示。结果表明 NSB-SMC 的控制效果要优于 NSB-PID 的控制效果。

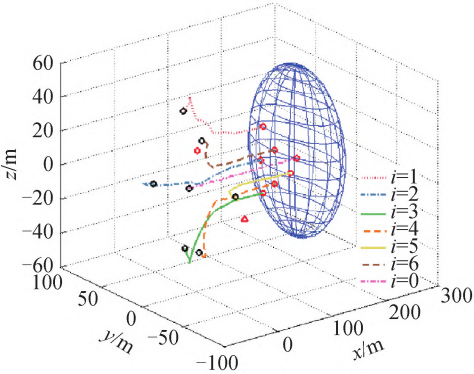


图 8 采用 NSB 算法的各航天器运动轨迹^[14]

Fig. 8 Trajectory map of each spacecraft using NSB algorithm^[14]



图 9 采用 NSB 算法的无人车编队^[6]

Fig. 9 Unmanned vehicle formations using NSB algorithms^[6]

3.2.4 无人艇编队控制

Arrichiello 等^[13]将 NSB 作为多无人艇的制导系统,使多无人艇在复杂的环境中自主导航,避免了低级别的路径规划。Fan 等^[21]提出了一种 ANSB 方法提高了 NSB 的自适应性,并以多无人艇完成任务的效率为目标,提出了一种针对无人艇编队行为优先级的矢量判断方法,试验结果如图 10 所示。李彦莹等^[20]使用零空间算法实现了双无人艇溢油围捕任务。

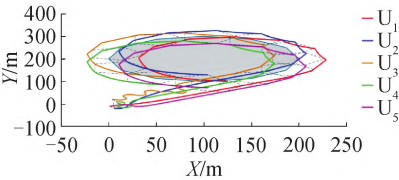


图 10 采用 NSB 算法的无人艇编队运动轨迹^[53]

Fig. 10 USV formation motion trajectory using NSB^[53]

4 结论

1)提高自适应性。虽然FAN等^[21]提出了一种自适应零空间算法,可根据目标点的位置和智能体本身的位置解算出增益系数,不需要随着目标位置的改变重新调整增益系数,提高了一定程度的自适应性,但其参数模型中仍有需要人为设定的系数以使智能体完成任务的效率最大化,并且不同行为的参数自适应模型仍需单独设计,自适应程度不高。所以综合考虑任务的多样性和工程应用的简单实用性,设计自适应性更强的NSB算法是未来值得关注的方向之一。

2)考虑动力学特性。目前关于零空间算法的理论分析大多只考虑了控制对象运动学特性而没有考虑动力学特性,如何根据NSB算法特点、控制对象和任务背景,设计并实现符合动力学特性的编队控制算法,使其在实际应用中发挥出较高的性能水平,这是未来值得研究探索的问题。

3)异构编队。应用零空间法实现无人机和轮式机器人之间的异构编队已得到了研究,并获得了不错的效果。但目前无人艇零空间异构编队的研究较少,且在无人艇外场试验时经常遇到多个无人艇结构、重量、操纵性等多个方面不统一的异构问题,导致实验失败。同时,实现无人机、无人潜器与无人艇之间异构编队控制,是未来亟待突破的技术难题。

4)行为函数的优化。NSB算法的优势是将不同优先级的行为函数进行融合而不会发生冲突,而对于不同的行为函数的设计是不唯一的,哪种行为函数更能体现出该行为的内部机理还有待进一步研究。例如编队行为函数可以结合一致性理论^[54]或领导跟随法^[55]来研究,避障行为函数可以结合鸽群算法^[56]或人工势场算法^[57]等实现,不同行为函数结合后的控制效果也不同。因此,根据实际的任务场景,选择合适的行为函数也值得研究。

5)行为优先级优化。目前NSB的行为优先级优化大多采用局部的优化策略。例如,当障碍物进入到危险区域时触发局部避障行为,此时局部避障行为和全局编队行为同时存在,再利用NSB算法完成融合。但该策略有违NSB算法的初衷,并且频繁的任务切换会导致轨迹振荡,速度指令不连续等现象。因此设计全局行为,充分利用NSB算法的融合特性,也是未来值得关注的方向之一。

参考文献:

- [1] OLFATISABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE transactions on automatic control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [2] 王龙, 卢开红, 关永强. 分布式优化的多智能体方法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(11): 1820-1833.
WANG Long, LU Kaihong, GUAN Yongqiang. Distributed optimization via multi-agent systems[J]. Control theory & applications, 2019, 36(11): 1820-1833.
- [3] OH K K, PARK M C, AHN H S. A survey of multi-agent formation control[J]. Automatica, 2015, 53: 424-440.
- [4] MOTOYAMA T, CAI Kai. Top-down synthesis of multi-agent formation control: an eigenstructure assignment based approach[J]. IEEE transactions on control of network systems, 2019, 6(4): 1404-1414.
- [5] ZHANG Jie, SHA Jianfa, HAN Guangjie, et al. A cooperative-control-based underwater target escorting mechanism with multiple autonomous underwater vehicles for underwater Internet of Things[J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(6): 4403-4416.
- [6] HUANG Jie, ZHOU Ning, CAO Ming. Adaptive fuzzy behavioral control of second-order autonomous agents with prioritized missions: theory and experiments[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2019, 66(12): 9612-9622.
- [7] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613.
WANG Xiangke, LI Xun, ZHENG Zhiqiang. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and decision, 2013, 28(11): 1601-1613.
- [8] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[C]//Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1987: 25-34.
- [9] BALCH T, ARKIN R C. Behavior-based formation control for multirobot teams[J]. IEEE transactions on robotics and automation, 1998, 14(6): 926-939.
- [10] LAWTON J R T, BEARD R W, YOUNG B J. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. IEEE transactions on robotics and automation, 2003, 19(6): 933-941.
- [11] MONTEIRO S, BICHO E. A dynamical systems approach to behavior-based formation control [C]//Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 2606-2611.
- [12] JADBABAIE A, LIN Jie, MORSE A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE transactions on automatic control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [13] ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S, FOSSEN T I. Formation control of underactuated surface vessels using the null-space-based behavioral control[C]//2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 5942-5947.
- [14] WANG Wenjia, LI Chuanjiang, GUO Yanning. Relative position coordinated control for spacecraft formation flying with obstacle/collision avoidance[J]. Nonlinear dynamics, 2021, 104(2): 1329-1342.
- [15] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S. Stability analysis for the null-space-based behavioral con-

- trol for multi-robot systems[C]//2008 47th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ: IEEE, 2008: 2463–2468.
- [16] CHIACCHIO P, CHIAVERINI S, SCIavicco L, et al. Closed-loop inverse kinematics schemes for constrained redundant manipulators with task space augmentation and task priority strategy[J]. International journal of robotics research, 1991, 10(4): 410–425.
- [17] OLAND E, ANDERSEN T S, KRISTIANSEN R. Underactuated control of quadrotors with collision avoidance[J]. IFAC proceedings volumes, 2013, 46(30): 162–167.
- [18] ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S, PEDONE P, et al. The null-space based behavioral control for non-holonomic mobile robots with actuators velocity saturation[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 4019–4024.
- [19] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S. The null-space-based behavioral control for mobile robots [C]//2005 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 15–20.
- [20] 李彦莹. 柔性连接式双无人艇自主协同控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- LI Yanying. Research on the autonomous cooperative control of a flexible joint dual unmanned surface vehicles [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [21] FAN Jiajia, LIAO Yulei, LI Ye, et al. Formation control of multiple unmanned surface vehicles using the adaptive null-space-based behavioral method [J]. IEEE access, 2019, 7: 87647–87657.
- [22] ARECHAVALETA G, MORALES-DÍAZ A, PÉREZ-VILLEDA H M, et al. Hierarchical task-based control of multirobot systems with terminal attractors [J]. IEEE transactions on control systems technology, 2017, 25(1): 334–341.
- [23] TRUJILLO M A, BECERRA H M, GÓMEZ-GUTIÉRREZ D, et al. Priority task-based formation control and obstacle avoidance of holonomic agents with continuous control inputs[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(13): 216–222.
- [24] MANSARD N, REMAZEILLES A, CHAUMETTE F. Continuity of varying-feature-set control laws [J]. IEEE transactions on automatic control, 2009, 54(11): 2493–2505.
- [25] MANSARD N, KHATIB O, KHEDDAR A. A unified approach to integrate unilateral constraints in the stack of tasks[J]. IEEE transactions on robotics, 2009, 25(3): 670–685.
- [26] COLOMÉ A, TORRAS C. Closed-loop inverse kinematics for redundant robots; comparative assessment and two enhancements[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2015, 20(2): 944–955.
- [27] BUSS S R, KIM J S. Selectively damped least squares for inverse kinematics[J]. Journal of graphics tools, 2005, 10(3): 37–49.
- [28] ANTONELLI G, ARRICHIELLO F, CHIAVERINI S. The entrapment/escorting mission [J]. IEEE robotics & automation magazine, 2008, 15(1): 22–29.
- [29] NETO V E, SARCINELLI-FILHO M, SANTOS BRANDÃO A. Trajectory-tracking of a heterogeneous formation using null space-based control[C]//2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (IC-UAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 187–195.
- [30] 庞师坤, 梁晓锋, 李英辉, 等. 基于零空间行为法的自主水下机器人避障策略[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(3): 295–304.
- PANG Shikun, LIANG Xiaofeng, LI Yinghui, et al. Collision avoidance strategy for autonomous underwater vehicle based on null-space-based behavioral approach [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(3): 295–304.
- [31] CHEN Yutao, ZHANG Zhenyi, HUANG Jie. Dynamic task priority planning for null-space behavioral control of multi-agent systems [J]. IEEE access, 2020, 8: 149643–149651.
- [32] HUANG Jie, MEI Hengquan, ZHANG Zhenyi. Intelligent mission supervisor design for null-space-based behavioral control system: a reinforcement learning approach [C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC). Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 5861–5866.
- [33] DING Ruxi, PALOMARES I, WANG Xueqing, et al. Large-Scale decision-making: Characterization, taxonomy, challenges and future directions from an Artificial Intelligence and applications perspective [J]. Information fusion, 2020, 59: 84–102.
- [34] VACA E, SAMANIEGO P, CRUZ P J, et al. Null-Space based Robust Controller for Quadcopter's Formation in windy environments [C]//2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 643–649.
- [35] CAMACHO O, LEICA P, ANTAMBA J, et al. Null-space based control applied to a formation of aerial manipulators in congested environment [C]//2019 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 244–250.
- [36] ZHU Xu, LIANG Yufei, YAN Maode. A flexible collision avoidance strategy for the formation of multiple unmanned aerial vehicles [J]. IEEE access, 2019, 7: 140743–140754.
- [37] SALINAS L R, GIMENEZ J, ROSALES C, et al. Null-space-based path-following control for cooperative payload transport using multiple rotorcraft UAVs [C]//2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (IC-UAS). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 631–638.
- [38] SAMANIEGO P, VACA E, LEICA P, et al. Dynamic obstacle avoidance based on null-space for Quadcopter's Formation [C]//2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1–6.
- [39] SANTOS M C P, ROSALES C D, SARCINELLI-FILHO M, et al. A novel null-space-based UAV trajectory tracking controller with collision avoidance [J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 2017, 22(6): 2543–2553.
- [40] DONG Shi you, ZHU Xiao ping, LONG Guo qing. The null space based cooperative formation control for UAVs swarm [J]. Applied mechanics and materials, 2013,

- 341/342: 824–829.
- [41] ZHOU Ning, CHEN Riqing, HUANG Jie, et al. Adaptive H_{∞} formation reconfiguration of multiple spacecraft system [C]//2018 37th Chinese Control Conference (CCC). Piscataway, NJ: IEEE, 2018: 2939–2943.
- [42] ZHOU Ning, CHEN Riqing, XIA Yuanqing, et al. Neural network-based reconfiguration control for spacecraft formation in obstacle environments[J]. International journal of robust and nonlinear control, 2018, 28(6): 2442–2456.
- [43] ZHOU Ning, XIA Yuanqing. Coordination control design for formation reconfiguration of multiple spacecraft[J]. IET control theory & applications, 2015, 9(15): 2222–2231.
- [44] SCHLANBUSCH R, KRISTIANSEN R, NICKLASSON P J. Spacecraft formation reconfiguration with collision avoidance[J]. Automatica, 2011, 47(7): 1443–1449.
- [45] OLAND E, KRISTIANSEN R, NICKLASSON P J. Spacecraft formation reconfiguration with plume avoidance [C]//2010 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1–11.
- [46] 姚红, 曾国强, 胡敏. 基于零空间方法的航天器编队协同控制[C]//2009 系统仿真技术及其应用学术会议. 合肥, 2009: 563–566.
- YAO Hong, ZENG Guoqiang, HU Min. Null-Space-based coordinated control of spacecraft formation [C]//2009 Academic Conference on System Simulation Technology and Applications. Hefei, 2009: 563–566.
- [47] HUNG P D, VINH T Q, NGO T D. Hierarchical distributed control for global network integrity preservation in multirobot systems[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2020, 50(3): 1278–1291.
- [48] PÉREZ-VILLEDA H M, ARECHAVALETA G, MORALES-DÍAZ A. Multi-vehicle coordination based on hierarchical quadratic programming[J]. Control engineering practice, 2020, 94: 104206.
- [49] LEICA P, SAGNAY B, POVEDA F, et al. Null-space-based controller for heterogeneous robot formation in congested environments [C]//2019 International Conference on Information Systems and Computer Science (IN-CISCOS). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 238–243.
- [50] HUANG Jie, WU Wenhua, NING Yingying, et al. A behavior control scheme for multi-robot systems under human intervention [C]//2019 Chinese Control Conference (CCC). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 6189–6193.
- [51] LEICA P, BALSECA J, CABASCANGO D, et al. Controller based on null space and sliding mode (NSB-SMC) for bidirectional teleoperation of mobile robots formation in an environment with obstacles [C]//2019 IEEE Fourth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). Piscataway, NJ: IEEE, 2019: 1–6.
- [52] MUSCIO G, PIERRI F, TRUJILLO M A, et al. Coordinated control of aerial robotic manipulators: theory and experiments[J]. IEEE transactions on control systems technology, 2018, 26(4): 1406–1413.
- [53] FAN Jiajia, LI Ye, LIAO Yulei, et al. A formation reconfiguration method for multiple unmanned surface vehicles executing target interception missions[J]. Applied ocean research, 2020, 104: 102359.
- [54] 沈佳颖. 多无人艇一致性自主编队控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- SHEN Jiaying. Research on autonomous formation control of unmanned surface vehicles[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019.
- [55] 刘杨, 刘美杰. 基于领导跟随的欠驱动船舶编队跟踪控制[J]. 控制工程, 2013, 20(5): 980–983, 989.
- LIU Yang, LIU Meijie. Leader/follower formation control of underactuated surface ships[J]. Control engineering of China, 2013, 20(5): 980–983, 989.
- [56] 李霜琳, 何家皓, 敖海跃, 等. 基于鸽群优化算法的实时避障算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(2): 359–365.
- LI Shuanglin, HE Jiahao, AO Haiyue, et al. Real-time obstacle avoidance algorithm based on pigeon-inspired optimization[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(2): 359–365.
- [57] 王迪, 李彩虹, 郭娜, 等. 改进人工势场法的移动机器人局部路径规划[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 1–6.
- WANG Di, LI Caihong, GUO Na, et al. Local path planning for mobile robot based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Shandong University of Technology (natural science edition), 2021, 35(3): 1–6.

本文引用格式:

葛宇, 廖煜雷, 王博, 等. 基于零空间行为融合的多智能体编队控制综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(8): 1442–1450.

GE Yu, LIAO Yulei, WANG Bo, et al. A review of multiagent formation control based on the null-space-based behavioral fusion algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(8): 1442–1450.