



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109947136 B

(45)授权公告日 2020.07.10

(21)申请号 201910151483.8

(22)申请日 2019.02.28

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 109947136 A

(43)申请公布日 2019.06.28

(73)专利权人 清华大学  
地址 100084 北京市海淀区清华园1号

(72)发明人 刘华平 吴莹莹 丁肇红 赵怀林  
孙富春 王华鲜

(74)专利代理机构 北京清亦华知识产权代理事  
务所(普通合伙) 11201  
代理人 廖元秋

(51)Int.Cl.  
G05D 1/12(2006.01)  
G01C 21/20(2006.01)  
G01C 21/00(2006.01)

(56)对比文件  
CN 103197684 A,2013.07.10,

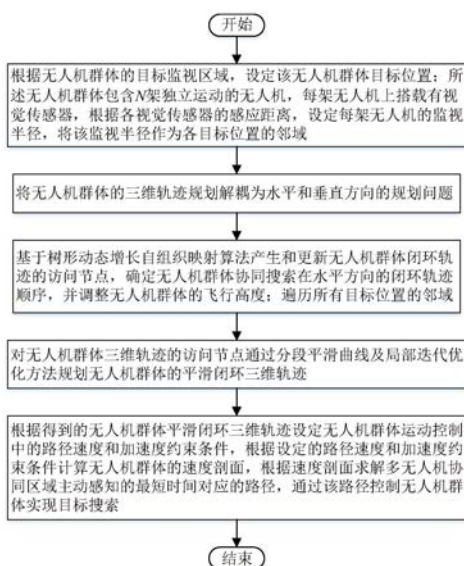
CN 108398960 A,2018.08.14,  
CN 105425820 A,2016.03.23,  
CN 107037829 A,2017.08.11,  
CN 106406354 A,2017.02.15,  
CN 108563243 A,2018.09.21,  
CN 107063255 A,2017.08.18,  
CN 105700555 A,2016.06.22,  
CN 107168380 A,2017.09.15,  
US 2017069214 A1,2017.03.09,  
王林等.《复杂环境下多无人机协作式地面  
移动目标跟踪》.《控制理论与应用》.2011,第28  
卷(第3期),第300-308页.  
王莉等.《TGSOM:一种用于数据聚类的动态  
自组织映射神经网络》.《电子与信息学报》  
.2003,第25卷(第3期),第313-319页.  
陈思静等.《高动态自组织无人机网络架构  
设计与模式研究》.《计算机科学》.2015,第42卷  
(第2期),第50-54页.

审查员 冯加双  
权利要求书3页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称  
一种面向无人机群体快速目标搜索的协同  
主动感知方法

(57)摘要  
本发明公开了一种面向无人机群体快速目  
标搜索的协同主动感知方法,属于多无人机区域  
监视技术领域。包括:根据无人机群体的目标监  
视区域设定目标位置;将多无人机三维轨迹规划  
解耦为水平和垂直方向的规划问题,基于树形动  
态增长自组织映射算法确定多无人机协同搜索  
在水平方向的规划顺序,调整无人机群体的飞行  
高度,访问所有目标位置邻域;利用分段平滑曲  
线实现无人机群体的平滑闭环三维轨迹规划;结  
合无人机路径速度和加速度约束,利用速度剖面  
计算来解决多无人机协同区域主动感知的最短  
时间优化问题。以上过程同时进行,以此规划出  
的航路使得多无人机在最短时间内,尽可能多访  
问目标物体位置,实现协同快速目标搜索,完成

主动感知任务。



CN 109947136 B

1. 一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法,其特征在于,包括如下步骤:

1) 根据无人机群体的目标监视区域,设定该无人机群体的n个目标位置;所述无人机群体包含N架独立运动的无人机,每架无人机上搭载有视觉传感器,根据各视觉传感器的感应距离,设定每架无人机的监视半径,将该监视半径作为各目标位置的邻域;

2) 基于树形动态增长自组织映射算法确定无人机群体轨迹的访问节点,具体包括以下步骤:

2.1) 将无人机群体的三维轨迹规划解耦为水平和垂直方向的规划问题;

2.2) 基于树形动态增长自组织映射算法产生和更新无人机群体闭环轨迹的访问节点,确定无人机群体协同搜索在水平方向的闭环轨迹顺序,并调整无人机群体的飞行高度;遍历所有目标位置的邻域;

3) 对步骤2)最终确定的无人机群体三维轨迹的访问节点通过分段平滑曲线及局部迭代优化方法规划无人机群体的平滑闭环三维轨迹;

4) 根据步骤3)得到的无人机群体平滑闭环三维轨迹设定无人机群体运动控制中的路径速度和加速度约束条件,根据设定的路径速度和加速度约束条件计算无人机群体的速度剖面,根据该速度剖面求解多无人机协同区域主动感知的最短时间对应的路径,通过该路径控制无人机群体实现目标搜索。

2. 根据权利要求1所述的面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法,其特征在于:所述步骤2.2)是通过以下步骤实现:

2.2.1) 构建树形动态增长自组织映射双层神经网络,随机选择根节点,设该树形动态增长自组织映射双层神经网络内的各神经元节点分别与无人机群体闭环轨迹上的一个访问节点相对应,将无人机群体的目标位置作为树形动态增长自组织映射双层神经网络的输入层,将无人机群体N个闭环轨迹的共计n个访问节点作为树形动态增长自组织映射双层神经网络的输出层,输出的各访问节点分别位于对应的一个目标位置的邻域内;

2.2.2) 将各无人机的闭环轨迹上各个相邻访问节点之间分别以三阶分段Bezier曲线相连,各无人机分别由m条分段曲线组成各自的一个平滑闭环轨迹;

2.2.3) 对于无人机群体的当前目标位置,分别遍历各无人机闭环轨迹上各访问节点之间的分段曲线,找到闭环轨迹上距离当前目标位置航点最近的点,将其作为新增访问节点;其中,所述目标位置航点为访问节点与相应目标位置连线上且位于该目标位置的邻域范围内的任意一点;若该新增访问节点在目标位置邻域内,则该新增访问节点的位置不作调整,执行步骤2.2.4);若该新增访问节点在相应目标位置的邻域外,则调整与各目标位置对应的其他访问节点向该目标位置的航点处靠近,调整方法如下:

$$v' = v + \mu f(\sigma, d) (v^* - v)$$

$$f(\sigma, d) = \begin{cases} e^{-\frac{d^2}{\sigma^2}}, & d < 0.2M \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中,v为待调整访问节点的位置;v'为调整后访问节点的位置;\mu为树形动态增长自组织映射算法的学习率,0<\mu<1;f(\sigma, d)为访问节点的邻域函数,\sigma为树形动态增长自组织映射算法的增益率,0<\sigma<1,d表示待调整的访问节点到新增访问节点的距离,M为各无人机闭环

轨迹中调整前的访问节点的个数,  $v^*.s_p$  为与待调整访问节点所对应的目标位置航点的位置;

2.2.4) 各无人机闭环轨迹上其他的目标位置按照上述步骤2.2.2) 和步骤2.2.3) 进行更新和调整;

2.2.5) 将更新和调整后的不在目标位置邻域内的访问节点或同一目标位置邻域内冗余的访问节点从相应闭环轨迹上移除, 得到获胜访问节点, 以此确定无人机群体协同搜索在水平方向的闭环轨迹顺序; 根据三阶分段Bezier曲线求解Z轴的一阶和二阶导数, 以此调整无人机群体的飞行高度;

2.2.6) 重复执行步骤2.2.2) ~ 2.2.5), 直至达到步骤1) 设定的迭代次数, 或各闭环轨迹中的所有获胜访问节点均在相应目标位置邻域内, 则迭代结束。

3. 根据权利要求1或2所述的面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法, 其特征在于, 步骤3) 中分段平滑曲线采用三阶分段Bezier曲线, 具体包括以下步骤:

对各无人机闭环轨迹的每段分段曲线, 分别选择四个控制点  $B_0, B_1, B_2, B_3$ , 采用的三阶分段Bezier曲线表达式为:

$$X(\tau) = B_0(1-\tau)^3 + 3B_1\tau(1-\tau)^2 + 3B_2\tau^2(1-\tau) + B_3\tau^3$$

其中, 参数  $\tau \in [0, 1]$ ,  $B_0, B_3$  为各分段Bezier曲线的起点和终点位置,  $B_1, B_2$  定义了各分段Bezier曲线起点和终点处的切线; 每个无人机的闭环曲线由  $m$  个分段Bezier曲线组成, 为保证轨迹连续, 各无人机闭环轨迹中相邻两个分段Bezier曲线  $X_{i-1}, X_i$  需满足:  $B_3^{i-1} = B_0^i$ ,  $B_3^{i-1}$  为第  $i-1$  个分段Bezier曲线的终点位置,  $B_0^i$  为第  $i$  个分段Bezier曲线的起点位置;

按照以下公式计算各无人机闭环轨迹中第  $i-1$  个分段Bezier曲线起点的切线  $t_a^{i-1}$  和第  $i$  个分段Bezier曲线终点的切线  $t_b^i$ , 切线  $t_a^{i-1}$  的长度  $l_a^{i-1}$  和切线  $t_b^i$  的长度  $l_b^i$  分别为:

$$t_a^{i-1} = B_1^{i-1} - B_0^{i-1}, t_b^i = B_3^i - B_2^i$$

$$l_a^{i-1} = \|t_a^{i-1}\|, l_b^i = \|t_b^i\|$$

其中,  $B_1^{i-1}$  为第  $i-1$  个分段Bezier曲线起点处的切线,  $B_0^i$  为第  $i-1$  个分段Bezier曲线的起点位置,  $B_3^i$  为第  $i$  个分段Bezier曲线的终点位置,  $B_2^i$  为第  $i$  个分段Bezier曲线终点处的切线;

按照下式计算各无人机闭环轨迹中第  $i-1$  个分段Bezier曲线  $X_{i-1}$  起点处切线为:

$$t_b^{i-1} = l_b^{i-1} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \psi_i \end{bmatrix}$$

式中,  $\theta$  为无人机的转弯角,  $\psi$  为无人机的俯仰角;

按照下式计算各无人机闭环轨迹中第  $i$  个分段Bezier曲线  $X_i$  终点处切线为:

$$t_a^i = l_a^i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \psi_i \end{bmatrix}$$

无人机群体轨迹平滑满足表达式:

$$l_a^{i-1} t_b^i = l_b^i t_a^{i-1}$$

利用局部迭代优化方法对四个参数 $\theta_i, \psi_i, l_a^i, l_b^i$ 进行优化,实现无人机群体的平滑闭环三维轨迹规划。

4. 根据权利要求3所述的面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法,其特征在于,所述步骤4)具体包括以下步骤:

4.1) 对无人机群体平滑闭环三维轨迹中的所有分段Bezier曲线均匀采样,计算满足步骤3)确定的分段Bezier曲线表达式的各个采样点的曲率;

4.2) 将无人机群体的初始速度和结束速度设置为0,完成初始化;

4.3) 计算无人机群体平滑闭环三维轨迹曲线方程沿垂直方向的一阶和二阶导数,根据设定的无人机群体的最大垂直速度和最大垂直加速度约束规划轨迹;根据设定的最大水平速度和最大水平加速度以及步骤4.1)计算的各采样点曲率,计算各采样点处的最大水平速度;

4.4) 根据设定的最大切线加速度,采用向前迭代限制无人机群体的速度;根据设定的最大切线加速度,采用向后迭代限制待计算采样点的速度;

4.5) 设定无人机群体的航行时间总和 $T$ 作为目标函数,其表达式如下:

$$\text{minimize } T(\chi) = \sum_{i=1}^n T(X_i)$$

若满足无人机群体目标函数最小,则返回各无人机的轨迹曲线,即返回无人机群体航行时间最短所对应的各无人机路径,各无人机按照求得的该路径进行目标搜索;其中, $x$ 为无人机的最终轨迹, $X_i$ 为无人机的第 $i$ 条分段Bezier曲线。

## 一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于多无人机区域监视技术领域,尤其是涉及一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法。

### 背景技术

[0002] 无人机是一种有动力驱动且能够携带任务设备,具备超视距飞行和自主飞行能力的无人驾驶飞行器。凭借其制造成本低和体积小,机动性强等特点,在军用和民用等领域发挥着越来越重要的作用。多架无人机共同执行任务及相关研究逐渐成为应用的趋势,区域监视是目前无人机群体控制系统的一项重要任务。其中大范围复杂环境中的协同目标搜索和主动感知是无人机群体控制系统领域待解决的主要问题之一。

[0003] 目前无人机目标搜索的航路规划算法研究大多是以避开障碍物到达飞行目标点为目的,通过相关的航路规划算法计算和选择次优或最优的航路轨迹,多数研究停留在二维轨迹规划领域,且存在计算量大,鲁棒性不佳等缺陷。经对现有技术文献的研究发现,多数利用改进A\*算法、粒子群算法进行无人机轨迹规划,但A\*算法搜索速度慢,计算量大,很难在保证在多约束条件下找到无人机最优航迹,粒子群算法规划空间划分较粗糙、难以满足飞行约束条件,不能在可选路径集之外的空间搜索,且粒子群算法精确度不够高,难以在复杂环境和多约束条件下找到最优航迹。

[0004] 树形动态增长自组织映射算法是一种无监督学习的竞争性神经网络算法,是在基本自组织映射算法上进行的改进,采用灵活的树形结构,算法执行效率较高。目前该算法已应用于数据聚类领域,少数论文将自组织映射算法应用于单个无人机在线轨迹规划,且多集中在二维空间。在无人机群体目标搜索领域,尚无专利利用该算法实现无人机群体三维航迹规划任务。

### 发明内容

[0005] 发明目的是为了克服已有技术的不足之处,提供一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法,本发明针对大规模且不完全已知的复杂环境,利用树形动态增长自组织映射算法和Bezier平滑规划解决多约束下无人机群体协同区域目标搜索的航迹快速规划和主动感知问题。本发明针对多架无人机持续监视的指定区域,对复杂环境中的目标进行协同目标搜索,快速完成搜索区域内的目标观测,为每架无人机规划出一条最有效的三维空间航迹,以最小代价和最快速度搜索并观测到目标,实时最大化收集区域信息,实现无人机群体的主动感知,达到有效地监视大规模区域的目的。

[0006] 为实现上述目的,本发明采用如下技术方案予以实现。

[0007] 本发明提出的一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法,其特征在于,包括如下步骤:

[0008] 1) 根据无人机群体的目标监视区域,设定该无人机群体的 $n$ 个目标位置;所述无人机群体包含 $N$ 架独立运动的无人机,每架无人机上搭载有视觉传感器,根据各视觉传感器的

感应距离,设定每架无人机的监视半径,将该监视半径作为各目标位置的邻域;

[0009] 2) 基于树形动态增长自组织映射算法确定无人机群体轨迹的访问节点,具体包括以下步骤:

[0010] 2.1) 将无人机群体的三维轨迹规划解耦为水平和垂直方向的规划问题;

[0011] 2.2) 基于树形动态增长自组织映射算法产生和更新无人机群体闭环轨迹的访问节点,确定无人机群体协同搜索在水平方向的闭环轨迹顺序,并调整无人机群体的飞行高度;遍历所有目标位置的邻域;

[0012] 3) 对步骤2) 最终确定的无人机群体三维轨迹的访问节点通过分段平滑曲线及局部迭代优化方法规划无人机群体的平滑闭环三维轨迹;

[0013] 4) 根据步骤3) 得到的无人机群体平滑闭环三维轨迹设定无人机群体运动控制中的路径速度和加速度约束条件,根据设定的路径速度和加速度约束条件计算无人机群体的速度剖面,根据该速度剖面求解多无人机协同区域主动感知的最短时间对应的路径,通过该路径控制无人机群体实现目标搜索。

[0014] 本发明提供一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法,针对大规模且不完全已知的复杂环境,基于树形动态增长自组织映射算法和Bezier平滑规划方法,以解决多约束下无人机群体协同区域目标搜索的航迹快速规划问题。相比于现有技术,具有以下有益效果:

[0015] 1) 相对于单无人机航迹规划方法,本发明能解决无人机群体的快速三维航迹规划问题,完成目标搜索任务,实现无人机群体的主动感知。无人机在航行阶段能够根据实际环境调整飞行高度和速度,适用于不同地形;以最小代价和最快速度搜索并观测到目标,实时最大化收集区域信息。

[0016] 2) 本发明解决了多无人机多协同航迹规划问题,为提高算法执行效率,将基于树形动态增长自组织映射算法和Bezier平滑规划用于航迹快速规划和主动感知问题,本发明方法具有收敛速度快,收敛精度高的优点。

[0017] 3) 和传统的Dubins曲线约束不同,无人机群体可以直线加速,小半径小速度转弯,不受无人机最小正向速度和最小转弯半径约束,而是受无人机最大速度和最大加速度制约,因此本发明采用三阶Bezier曲线进行平滑规划,提高该方法在实际场景中的实用性和高效性。

## 附图说明

[0018] 图1面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法流程图;

[0019] 图2无人机群体、目标位置和目标位置领域的相对位置关系图;

[0020] 图3节点更新与调整流程图。

## 具体实施方式

[0021] 下面结合附图对本发明作进一步说明。

[0022] 参照图1为本发明的一种面向无人机群体快速目标搜索的协同主动感知方法流程图,特别适用于无人机群体在多约束条件下、对大规模且不完全已知的复杂目标区域进行实时快速目标搜索和航迹规划,本方法具体包括以下步骤:

[0023] 1) 设置无人机的数目N、各无人机起点以及后续计算的最大迭代次数。根据无人机群体的目标监视区域, 设定该无人机群体的n个目标位置; 所述无人机群包含N架独立运动的无人机, 每架无人机上分别搭载一个视觉传感器, 根据该视觉传感器的感应距离设定每架无人机的监视半径R(本实施例中, 各视觉传感器相同, 故每架无人机的监视半径R均相等, 且设定为视觉传感器的感应距离)。为了节省目标搜寻时间, 提高主动感知的效率和适应性, 将设定的监视半径作为各目标位置的邻域, 无人机群体只需在监视半径内观测到目标, 即可视为达到观测效果。图2为无人机群体(本实施例由3架无人机构成无人机群体)、目标位置和目标位置邻域的相对位置关系图, 其中, 点A, B, C为无人机群体的起点, 黑色点为监视区域的目标位置, 灰色圆形区域为目标位置的邻域。

[0024] 2) 基于树形动态增长自组织映射算法确定无人机群体轨迹的访问节点, 具体包括以下步骤:

[0025] 2.1) 将无人机群体的三维轨迹规划在二维轨迹规划基础上进行拓展, 即将无人机群体的三维轨迹规划解耦为水平和垂直方向的规划问题, 无人机群体中各无人机在三维空间的轨迹规划中, 位置表示为:

$$[0026] \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi \\ \sin \theta \cos \psi \\ \sin \psi \end{bmatrix}$$

[0027] 其中,  $\theta$ 为无人机的转弯角,  $\psi$ 为无人机的俯仰角; 以机器人底盘圆心为原点, 机器人底盘所在平面上任意互为垂直关系的两个方向作为x、y轴建立坐标系, z轴与x、y轴满足右手螺旋定则;

[0028] 2.2) 基于树形动态增长自组织映射算法产生和更新无人机群体闭环轨迹(每架无人机对应一个闭环轨迹)的访问节点, 确定无人机群体协同搜索在水平方向的闭环轨迹顺序, 并调整无人机群体的飞行高度; 遍历所有目标位置的邻域。其流程图参见图3, 具体实现过程如下(在执行过程中, 各无人机同步完成下述各步骤):

[0029] 2.2.1) 构建树形动态增长自组织映射双层神经网络, 随机选择根节点, 设该双层神经网络内的各神经元节点分别与无人机群体闭环轨迹上的一个访问节点相对应, 将无人机群体的目标位置作为树形动态增长自组织映射双层神经网络的输入层, 将无人机群体N个闭环轨迹的共计n个访问节点作为树形动态增长自组织映射双层神经网络的输出层, 经树形动态增长自组织映射双层神经网络输出的各访问节点分别位于对应的一个目标位置的邻域内;

[0030] 2.2.2) 将各无人机的闭环轨迹上各个相邻访问节点之间分别以三阶Bezier曲线相连, 各无人机分别由m(m为正整数)条分段曲线组成各自的一个平滑闭环轨迹;

[0031] 2.2.3) 对于无人机群体的当前目标位置, 分别遍历各无人机闭环轨迹上各访问节点之间的分段曲线, 找到闭环轨迹上距离当前目标位置航点最近的点, 将其作为新增访问节点, 其中, 目标位置航点为各访问节点与相应目标位置连线上且位于该目标位置的邻域范围内的任意一点; 若新增访问节点在相应目标位置的邻域内, 则该新增访问节点的位置不作调整, 执行步骤2.2.4); 若该新增访问节点在相应目标位置的邻域外, 则调整与各目标位置对应的其他访问节点与相应目标位置航点之间的位置关系, 调整方法如下:

$$[0032] \quad v' = v + \mu f(\sigma, d) (v^* \cdot s_p - v)$$

$$[0033] \quad f(\sigma, d) = \begin{cases} e^{-\frac{d^2}{\sigma^2}}, & d < 0.2M \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

[0034] 其中,  $v$  为待调整访问节点的位置;  $v'$  为调整后访问节点的位置;  $\mu$  为树形动态增长自组织映射算法的学习率,  $0 < \mu < 1$ ;  $f(\sigma, d)$  为访问节点的邻域函数,  $\sigma$  为树形动态增长自组织映射算法的增益率,  $0 < \sigma < 1$ ,  $d$  表示待调整的访问节点到新增访问节点的距离,  $M$  为各无人机闭环轨迹中调整前的访问节点的个数,  $v^*.s_p$  为与待调整访问节点所对应的目标位置航点的位置;  $f(\sigma, d)$  的物理含义为: 若原始访问节点到新增访问节点的距离  $d$  在  $0.2M$  以内, 则按照设定的增益率向相应目标位置航点调整, 反之不调整, 即  $f(\sigma, d) = 0$ ;

[0035] 2.2.4) 对各无人机闭环轨迹上的其他目标位置按照上述步骤2.2.2) 和步骤2.2.3) 进行更新和调整;

[0036] 2.2.5) 将更新和调整不在目标位置邻域内的访问节点或同一目标位置邻域内冗余的访问节点从相应闭环轨迹上移除, 得到获胜访问节点, 以此确定无人机群体协同搜索在水平方向的闭环轨迹顺序; 根据三阶分段Bezier曲线表达式求解Z轴的一阶和二阶导数, 以此调整无人机群体的飞行高度;

[0037] 2.2.6) 重复执行步骤2.2.2) ~ 2.2.5), 直至达到步骤1) 设定的迭代次数, 或各闭环轨迹中的所有获胜访问节点均在相应目标位置邻域内, 则迭代结束。

[0038] 3) 对步骤2) 最终确定的无人机群体三维轨迹的访问节点通过分段平滑曲线及局部迭代优化方法规划无人机群体的平滑闭环三维轨迹。本实施例中, 利用三阶分段Bezier曲线, 并确保轨迹上所有曲线满足平滑和连续条件, 通过局部迭代优化算法对无人机群体的三维轨迹中所有分段曲线的转弯角 $\theta$ 、俯仰角 $\psi$ 、起点切线长度 $l_a$ 和终点切线长度 $l_b$ 四个参数进行优化, 以此得到优化后的无人机群体平滑闭环三维轨迹。本步骤的具体过程如下:

[0039] 对各无人机闭环轨迹的每段分段曲线, 分别选择四个控制点 $B_0, B_1, B_2, B_3$ , 所采用的三阶分段Bezier曲线的表达式为:

$$[0040] \quad X(\tau) = B_0(1-\tau)^3 + 3B_1\tau(1-\tau)^2 + 3B_2\tau^2(1-\tau) + B_3\tau^3$$

[0041] 其中, 参数 $\tau \in [0, 1]$ ,  $B_0, B_3$ 为每段分段Bezier曲线的起点和终点的位置,  $B_1, B_2$ 决定了每段分段Bezier曲线起点和终点处的切线; 每个无人机的闭环轨迹曲线由 $m$ 个分段Bezier曲线组成, 为保证轨迹连续, 各无人机闭环轨迹中相邻两个分段Bezier曲线 $X_{i-1}, X_i$ 的控制点需满足以下关系式:  $B_3^{i-1} = B_0^i$ ;

[0042] 按照以下公式计算各无人机闭环轨迹中第 $i-1$ 个分段Bezier曲线起点的切线 $t_a^{i-1}$ 和第 $i$ 个分段Bezier曲线终点的切线 $t_b^i$ , 切线 $t_a^{i-1}$ 的长度 $l_a^{i-1}$ 和切线 $t_b^i$ 的长度 $l_b^i$ 分别为:

$$[0043] \quad t_a^{i-1} = B_1^{i-1} - B_0^{i-1}, t_b^i = B_3^i - B_2^i$$

$$[0044] \quad l_a^{i-1} = \|t_a^{i-1}\|, l_b^i = \|t_b^i\|$$

[0045] 按照下式计算各无人机闭环轨迹中第 $i-1$ 个分段Bezier曲线 $X_{i-1}$ 起点处切线为:

$$[0046] \quad t_b^{i-1} = l_b^i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \psi_i \end{bmatrix}$$

[0047] 按照下式计算各无人机闭环轨迹中第 $i$ 个分段Bezier曲线 $X_i$ 终点处切线为:



$$[0048] \quad t_a^i = l_a^i \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \theta_i \cos \psi_i \\ \sin \psi_i \end{bmatrix}$$

[0049] 无人机群体轨迹平滑满足表达式：

$$[0050] \quad l_a^{i-1} t_b^i = l_b^i t_a^{i-1}$$

[0051] 利用局部迭代优化方法对四个参数 $\theta_i, \psi_i, l_a^i, l_b^i$ 进行优化,其中两个角度优化步长为 $0.01\pi$ ,两个长度参数优化步长为 $0.5\%$ ,迭代次数达到50次则优化结束,实现无人机群体的平滑闭环三维轨迹规划。

[0052] 4) 根据步骤3)得到的无人机群体平滑闭环三维轨迹设定无人机群体运动控制中的路径速度和加速度约束条件,根据设定的路径速度和加速度约束条件计算无人机群体的速度剖面;根据该速度剖面求解多无人机协同区域主动感知的最短时间对应的路径,通过该路径控制无人机群体实现目标搜索。

[0053] 本步骤中,无人机水平和垂直方向的运动受各自最大速度和最大加速度约束,其中,水平方向加速度可分解为切线加速度和径向加速度。切线加速度影响无人机的速度大小,径向加速度仅影响无人机轨迹的曲率。其航行时间由轨迹的速度剖面确定。通过计算速度剖面解决多无人机协同区域主动感知的最短时间优化问题。具体包括以下步骤:

[0054] 4.1) 对无人机群体平滑闭环三维轨迹中的所有分段Bezier曲线均匀采样,计算满足步骤3)确定的分段Bezier曲线表达式的各个采样点的曲率;

[0055] 4.2) 将无人机群体的初始速度和结束速度设置为0,完成初始化;

[0056] 4.3) 计算无人机群体平滑闭环三维轨迹曲线方程沿垂直方向的一阶和二阶导数,根据设定的无人机群体的最大垂直速度和最大垂直加速度约束规划轨迹;根据设定的最大水平速度和最大水平加速度以及步骤4.1)计算的各采样点曲率,计算各采样点处的最大水平速度;

[0057] 4.4) 根据设定的最大切线加速度,采用向前迭代限制无人机群体的速度(包括水平和垂直两个方向的速度);根据设定的最大切线加速度,采用向后迭代限制待计算采样点的速度(包括水平和垂直两个方向)。

[0058] 4.5) 设定无人机群体的航行时间总和 $T$ 作为目标函数,其表达式如下:

$$[0059] \quad \text{minimize } T(x) = \sum_{i=1}^n T(X_i)$$

[0060] 若满足无人机群体目标函数最小,则返回各无人机的轨迹曲线,即返回无人机群体航行总时间最短所对应的各无人机路径,各无人机按照求得的该路径进行目标搜索;其中, $x$ 为无人机的最终轨迹, $X_i$ 为无人机的第 $i$ 条分段Bezier曲线。

[0061] 无人机群体内的各无人机同步执行上述各步骤,以此规划出的航路使得多无人机在最短时间内,尽可能多访问目标物体位置,实现协同快速目标搜索,完成主动感知任务。

[0062] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应以所述权利要求的保护范围为准。

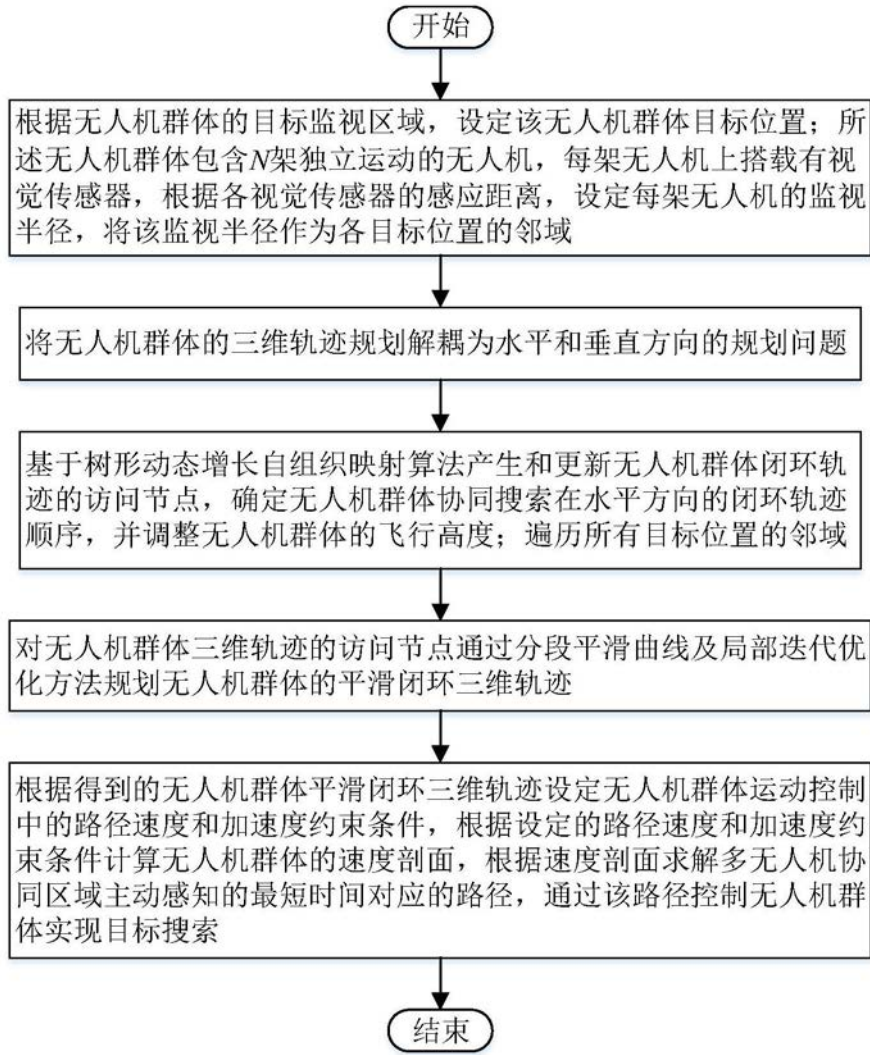


图1

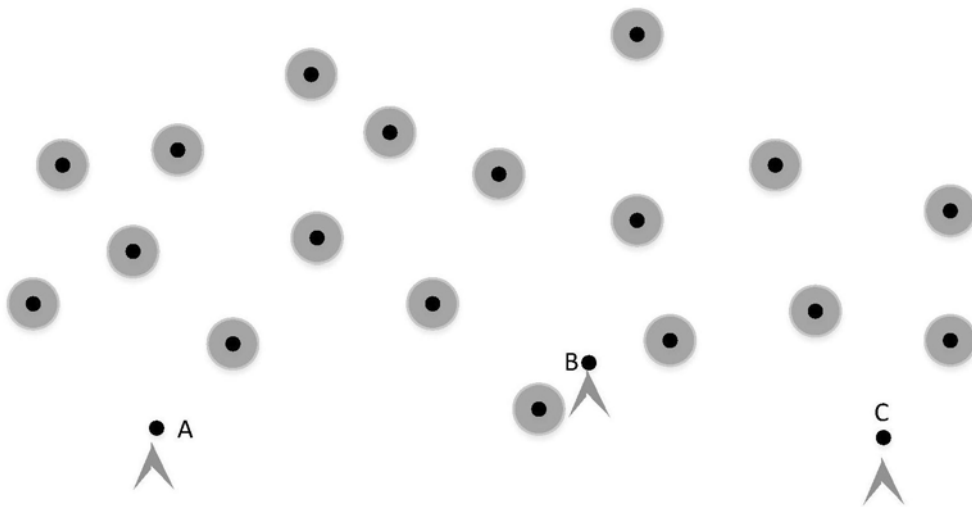


图2

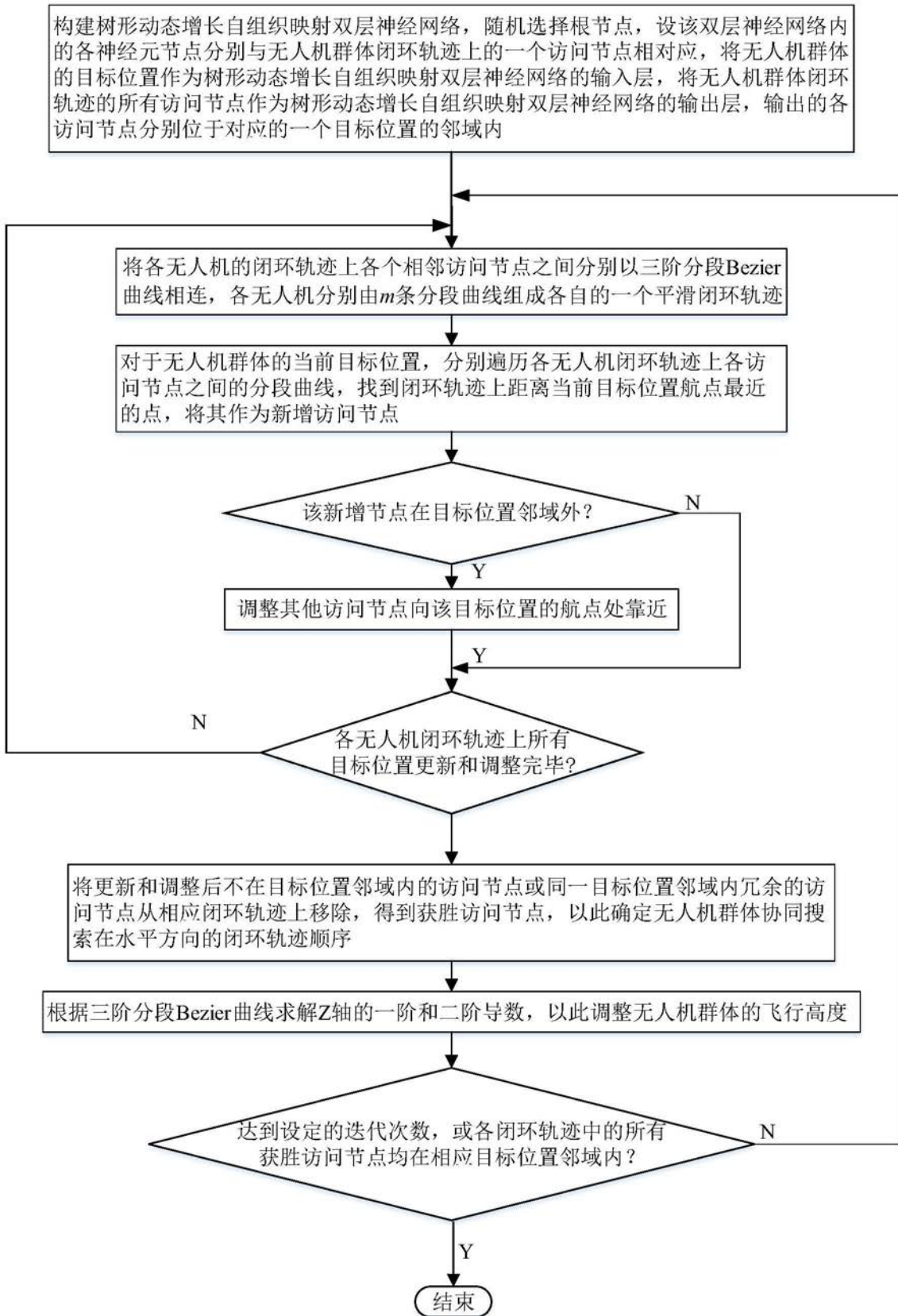


图3