基于分块优化思想的多无人机覆盖路径规划

肖玉婷, 方勇纯, 梁潇*, 林河, 何桢

南开大学机器人与信息自动化研究所, 天津市智能机器人技术重点实验室, 天津 300350

* E-mail: liangx@nankai.edu.cn

收稿日期: 2019-08-22; 接受日期: 2019-12-03; 网络版发表日期: 2020-04-03

国家自然科学基金(批准号: 61903200, 61873132)和天津市自然科学基金(编号: 19JCQNJC03500, 16JCZDJC30300)资助项目

摘要 覆盖路径规划广泛应用于环境清洁、建图、监控等场景, 为了提高覆盖效率, 经验证, 一组有自主运动能力的无人飞行器配合机载传感器可以提供有效帮助. 本文提出一种可以应用于大规模复杂环境的多无人飞行器覆盖路径规划方法. 在面积规模大、环境情况复杂的区域内, 计算出可以采集到精确可靠环境信息的最优覆盖路径是比较困难的, 本文提出的覆盖路径规划方法基于分块优化的思想, 将大规模的环境分成若干面积较小的子区域, 分别计算子区域内的局部最优覆盖路径, 在一些特定的约束条件下, 所有子区域内的局部覆盖路径可以连接成一条遍历环境中每个子区域的整体覆盖路径, 兼顾了环境的差异性和覆盖的完整性. 同时, 为了保证整体路径的平滑, 适合飞行器跟踪, 在规划路径时还考虑到减小相邻两段局部路径之间的过度转角和飞行器完成一次环境覆盖的调头转向次数, 通过设计不同的覆盖模式以及在计算局部路径的评价函数中加入转角相关项来实现路径的平滑. 最后, 通过仿真和实验验证了所提算法的有效性和可行性.

关键词 分块优化, 多无人机, 环境覆盖, 路径规划

1 引言

在人类不断探索未知环境的过程中, 需要对未知区域作详细的建图, 采集地形、植被、动物、温度、湿度等情况以便全面地了解该区域. 当大片区域遇到突发自然灾害时(地震、海啸、火山喷发、泥石流、干旱、洪水等), 需要对受灾区域作快速而全面的了解, 评估受灾程度, 制定合理救灾方案; 在恶劣环境中发生人员失踪时, 需要在最短时间内找到失踪人员, 合理地规划有助于尽早发现失踪人员, 增大其在危险环境中的生存概率. 在对脆弱自然生态环境进行监测保

护时, 需要实时监控环境中各种因素的动态变化, 及时预防、避免危害的扩大, 如在保护具有重要生态功能却屡遭破坏的森林资源时^[1-3], 除了对乱砍乱伐等破坏森林的人类行为进行有效监管外, 最重要的是预防森林的强大克星——森林火灾, 通过及时发现火源, 可以尽早扑灭处理, 大幅地减小损失^[4,5].

以上场景中, 都涉及对环境区域(未知区域、受灾区域、脆弱的自然生态环境等)的信息采集, 对环境覆盖问题深入而广泛的研究有助于更加高效地完成环境信息采集任务. 同时, 在军事领域, 有效的环境覆盖算法也发挥着重要的作用, 比如对作战环境进行快速准

引用格式: 肖玉婷, 方勇纯, 梁潇, 等. 基于分块优化思想的多无人机覆盖路径规划. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 439–452

Xiao Y T, Fang Y C, Liang X, et al. Planning of the coverage route for multi-UAVs based on section optimization (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 439–452, doi: 10.1360/SST-2019-0298

确的信息采集, 对敌方占领区域作隐蔽深入的侦察, 在危险环境选择安全的侦察路线, 在军事要害区域作实时监控等. 各种环境中覆盖算法的研究有助于切实提高军队的侦察和反侦察能力^[6].

本文主要研究利用四旋翼无人飞行器系统进行环境覆盖的方法. 近年来无人机运动控制方法和技术逐渐成熟, 促使相关产业蓬勃发展, 许多文献对无人机的建模、控制、运动规划、导航等做了广泛研究^[7~11].

环境覆盖指通过集成的传感器对环境中的信息(图像、温度、湿度、辐射等)进行采集或者对环境的清洁, 其中利用机载摄像机进行图像采集的一类应用较为广泛^[12]. 这一类以采集完整可靠环境信息为目的、为单个或多个机器人设计移动方式的方法统称为环境覆盖方法. 由此扩展出的环境监控问题, 本质上属于一种对变化环境的覆盖. 根据不同的应用场景、传感器和机器人平台等, 各种方法的切入点、思路、研究对象等都不同, 大致可以分为以下3种类型.

最早研究的是环境中移动传感器网络的部署问题, 这里将其归纳为静态覆盖方法^[13~17]. Cortés等人^[13]对该类方法做了大量研究, 在文献^[13]中, 为了找到一组可以对环境实现最优覆盖的传感器位置, 首先利用泰森多边形分区原理为环境中初始位置随机分布的传感器进行了分区, 然后计算每个分区重心位置, 每次让所有传感器都向相应的重心方向移动一步, 不断迭代, 直到传感器所在位置已经非常接近其分区重心. 为了避免这种基于梯度下降方法中容易出现的局部极值问题, 在传感器运动时, 尝试在其移动方向增加一个垂直梯度方向的随机向量, 仿真结果证明局部极值问题有所改善^[14].

另外, 文献^[15]研究了添加传感器之间通信距离约束的移动传感器网络最优部署问题. 针对传感范围有限的各向异性传感器, 文献^[16]提出了有效的移动部署方法. Schwager^[17]也研究了该类问题, 通过减小其定义的代价函数, 逐渐优化传感器位置, 并且在3种机器人平台上对所提方法进行了验证. 为了更加贴近实际情况, 全面考虑各种约束, Kwok和Martínez^[18]提出一种移动传感器电量受限情况下的最优移动部署方法. 在仅有短距离且不可靠通信的条件下, Durham等人^[19]提出一种移动传感网络部署方法. 当面对不确定环境, 即环境密度函数未知时, 文献^[20]中设计了一种基于自适应控制的优化方法. 针对无人飞行器搭载图

像传感器(机载摄像机)的情况, Schwager等人^[21]还专门构造了传感器模型描述飞行器的位置和姿态与图像质量的关系, 利用梯度下降法获得一组最佳的飞行器位姿.

不难看出, 第一种类型的静态覆盖方法适用于小规模环境区域的覆盖, 面对更大面积的森林、海洋等自然环境, 对传感器的数量需求就会过于庞大. 第二种类型的环境覆盖方法是通过规划合理的覆盖路径, 让机器人搭载传感器在运动中采集信息, 充分利用了机器人的灵活性, 这里将其归纳为基于路径规划的动态覆盖方法. 为了实现这一目的, 规划一条可以让机器人连续运动的周期路径, 在文献^[22]中, 参考静态覆盖中传感器网络的部署方法, 通过优化路径点的位置不断优化多个飞行器的覆盖路径, 在调整路径点位置时考虑路径的平滑和长度因素, 使路径更加适合跟踪同时节约能耗. 文献^[23]将指定环境增量分解为一个胞元单位, 根据当前胞元内覆盖路径的预测终点位置和路径冗余最小的原则选择下一个胞元, 根据最小转弯次数的原则选择胞元内的覆盖路径. 在环境覆盖中, 有时需要在危险环境中收集信息, 如发生火灾时既要保证飞行器的安全又要探测所需信息, 文献^[24]引入信息理论中互信息的概念, 利用其梯度引导机器人移动, 在危险源未知的情况下, 用贝叶斯滤波不断更新危险分布地图, 最终使得环境的信息熵下降到阈值以下.

在生活生产中, 需要对一个区域进行覆盖时, 用的最多的是Z字形路径(割草机路径), 这种方法简单易行, 但是不适用于多飞行器协同场景, 且忽略了环境的差异性. 文献^[25]对其进行了改进, 首先根据飞行器的位置为其划定分区, 然后根据分区的形状选择转弯次数最少的扫描方向和生成相应的Z字形覆盖路径. Ousingsawat和Earl^[26]对不同重要程度的区域设置了相应的覆盖顺序优先级, 在以类似Z字形路径往返覆盖时, 每次选择优先级更高且未覆盖过的一行区域进行采集. 此外, 在路径规划问题中常用的快速扩展随机树方法也可以为规划覆盖路径提供参考, Lan和Schwager^[27]提出一种快速扩展随机圆算法来获得一条最优的闭合覆盖路径, 通过卡尔曼滤波来更新地图. 文献^[28,29]用多项式拟合的方法为飞行器规划专门的三维覆盖路径. 文献^[30]对环境的地形构造了能量消耗地图, 据此为飞行器规划能量最优的覆盖路径.

第三种类型的覆盖方法也是利用一组搭载传感器的机器人在运动中采集环境信息. 与第二种类型不同的是, 这种方法不为机器人预先规划覆盖路径, 而是为其设计运动规则. 这种方法能够适应不断变化的环境, 可以应用于环境的持续监控. Palacios-Gasós等人^[31]利用经典的快速行进方法(fast marching method, FMM)^[32]引导机器人不断运动, 在环境中定义一个随着时间不断衰减的覆盖程度变量, 为了使实际覆盖程度不断趋近于期望覆盖程度, 机器人每次在自己周围选择若干候选目标点同时规划相应候选路径, 然后选择最能提升整体覆盖程度的一条候选路径, 用动态窗方法^[33]导航运动至该点, 任务中不断重复这个过程.

除了不断选择新的目标点, 还可以通过不断给机器人一个输入量指引其速度或者加速度, 据此方式不断移动来执行持续的覆盖监控任务. 这种方法可以统一归纳为基于势场的环境覆盖方法, 构造的势场即提供给机器人的输入量, 后续可以根据需要选择一阶或者二阶运动学模型计算机器人的速度和位移更新. 文献^[34]根据控制反馈的原理, 以减小环境中的覆盖误差为目的构造输入量并随着机器人的运动不断更新. 为了进一步改进效果, 文献^[35]参考热驱动方程, 根据热力学中热能扩散、对流、冷却等过程以覆盖误差为热源构造势场并不断更新, 通过多组仿真验证了其良好效果.

在多无人飞行器进行环境覆盖时, 可以通过飞行器之间的协同合作共同执行整个环境的覆盖任务. 由于所有飞行器执行的任务种类相同(都是信息采集), 为了使每个飞行器的任务更加明确, 同时减小飞行器之间的行为依赖, 也可以将整个环境进行分区, 为每一个飞行器分配一个责任区域, 每个飞行器在各自的指定分区内规划覆盖路径, 执行分区的覆盖任务. 这种情况下, 如何分区关系到整个区域执行覆盖任务的综合效率, 对于能力相同的一组飞行器, 如果分配的工作负荷不平衡(分区面积不等), 会使不同分区的覆盖周期不同, 且当分区的形状过于狭长、曲折时, 也不利于覆盖任务的执行, 容易增大飞行器之间的碰撞风险. 因此, 合理的分区方法对于提高环境覆盖的效率非常重要. 为了使每个分区的面积相等, Pavone等人^[36]利用类似泰森多边形分区(voronoi diagram)的方法, 定义了衡量面积均等程度的代价函数且分析了这个函数与分区参数的关系, 通过梯度下降方法调整分

区参数使每个分区面积趋近于均等. 另外, 文献^[37]研究了存在障碍物的多边形环境中的均等分区方法, 将环境分为若干连续面积相等的子区域且每个分区内都包含一个机器人. 对于用拓扑图表示的地图, 文献^[38,39]中利用顶点替换法逐渐降低其定义的代价函数调整分区. 在文献^[40]以最小生成树的长度为代价函数通过两两优化的方式平衡每个分区的负荷.

以上总结了现有的一些无人飞行器控制、环境覆盖和分区优化的方法. 根据覆盖方法和应用场景的不同将现有覆盖方法归纳为移动传感网络部署、覆盖路径规划和运动规则设计三种类型. 移动传感网络部署的方法需要较多的传感器资源, 不适用于大规模环境的覆盖. 后面两种类型的覆盖方法都属于动态覆盖, 目前存在的问题主要有: (1) 计算复杂度高, 实时性能差, 普通性能的机载电脑难以承受, 不利于大规模推广; (2) 普遍通用的Z字形路径不能适应区域的差异性, 不方便对区域变化做相应调整; (3) 多无人飞行器共同执行任务时缺乏可靠的协调分工方案, 不利于整体效率的提高; (4) 对于飞行器的动力学约束, 续航能力等考虑不足.

2 问题描述

为了用一组无人飞行器执行一个大规模复杂环境的覆盖任务, 无人飞行器必须持续不断地在目标区域上空巡航以求采集到最新的环境信息. 受限于传感器有限的探测范围, 飞行器的路径分布必须足够密集来保证覆盖的完整性, 同时考虑路径长度和平滑度等. 由于环境规模的增大进一步增加了问题的难度, 为了能够以较小的计算代价规划出满足要求(信息完整、准确, 路径平滑, 单位长度的采集效率更高)的路径, 本文提出一种基于分块优化思想的覆盖路径规划方法. 概括来说, 就是将整个环境划分为若干面积较小的子区域, 飞行器按照一定顺序分别在每个子区域内规划最优的覆盖路径, 兼顾整体环境覆盖的完整性以及区域的差异性, 同时大大降低问题的难度.

3 子区域内路径优化方法

3.1 传感器模型

为了更好地描述传感器对于其周围不同位置区域

的覆盖效果, 需要建立一个合适的传感器模型. 现有文献中用于覆盖的传感器模型大多假设传感器是静止在某特定位置的基于点的模型. 本文创新性地提出一种更加适合于覆盖路径规划的传感器模型, 即定量描述传感器沿一条指定路径运动时对路径周围一定范围内区域的覆盖效果, 而不是描述传感器位于某一点时对其周围区域的覆盖效果, 是一种基于线的模型, 具体表达如下:

$$f(l, q) = \begin{cases} 10e^{-k_s d_{ql}^2}, & d_{ql} < d_c, \\ 0, & \text{others,} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f(l, q)$ 指当传感器沿路径 l 运动时, 对于环境中点 q 的覆盖效果, d_{ql} 是点 q 到路径 l 的最短距离, d_c 是传感器的最大探测范围, k_s 是传感器参数. 从式(1)可以看出, 随着距离 d_{ql} 的增大, 在路径 l 上对于点 q 的覆盖效果 $f(l, q)$ 也逐渐下降. 根据实验数据显示, 在距离超出 d_c 时, 传感器采集不到任何信息.

注记1 一方面, 在无人飞行器沿着某一路径运动过程中, 机载传感器会不断地采集周围环境信息, 期间同一个位置点的信息会被多次观测到, 在这条路径上对这个点的综合覆盖效果取决于多次信息采集质量的融合; 另一方面, 在本方法中, 直接的优化目标是无人飞行器的覆盖路径, 即一段曲线(或线段), 计算出可以采集到最精确可靠环境信息的覆盖路径. 从以上两方面意义上来讲, 本文所提出的基于线的传感器模型都比基于点的传感器模型更加适合于评价路径的覆盖效果和规划最优的覆盖路径.

3.2 局部覆盖路径评价函数

定义路径评价函数的目的是定量描述一条路径在无人飞行器环境覆盖任务中的优劣, 从而选择评价函数值最高的路径完成覆盖任务. 对一段局部路径 l_i 的评价分为两个方面: 路径的覆盖效果(信息收集能力)和路径的平滑程度(飞行器跟踪性能).

相应地, 评价函数也分为两个部分, 分别代表路径覆盖效果的 $F_{\text{unit}_i}(l_i, Q_i)$ 和整体路径平滑程度的 $F_{\text{turn}}(l_i)$, 并且设有两个权重参数 w_1 和 w_2 控制其所占比重. 如式(2)所示:

$$F(l_i, Q_i) = w_1 F_{\text{unit}_i}(l_i, Q_i) + w_2 F_{\text{turn}}(l_i), \quad (2)$$

其中, $Q \subseteq \mathbb{R}^2$ 是待覆盖的环境, $Q_i \in Q$ 是其中的子区域, l_i 是第 i 段局部路径, $F(l_i, Q_i)$ 代表局部路径 l_i 覆盖子区域 Q_i 的综合评价, w_1 和 w_2 是两项的权重, 满足 $w_1 + w_2 = 1$.

局部路径 l_i 的选择与子区域 Q_i 覆盖效果相关, 这就用到前面构造的传感器模型. 不失一般性地, 将函数 $f(l, q)$ 在一个区域内的积分作为评价路径 l 对这个区域整体覆盖效果的标准. 此外, 兼顾区域的差异性因素, 添加了环境密度函数 $\phi(q)$, 局部路径 l_i 对于子区域 Q_i 覆盖效果 $F_{\text{unit}_i}(l_i, Q_i)$ 为

$$F_{\text{unit}_i}(l_i, Q_i) = \int_{Q_i} f(l_i, q) \phi(q) dq. \quad (3)$$

考虑到上式定义的覆盖效果实际与路径长度有关, 路径越长通常覆盖效果也就越好, 所以更为客观合理的方法是计算平均单位长度的覆盖评价, 如式(4)所示:

$$F_{\text{unit}_i}(l_i, Q_i) = \frac{\int_{Q_i} f(l_i, q) \phi(q) dq}{L_i}, \quad (4)$$

其中, L_i 是局部路径 l_i 的长度.

由于频繁大角度的转弯不利于飞行器平稳飞行和信息采集, 所以在覆盖路径规划中要尽量避免规划出过度曲折的路径. 评价函数 $F(l_i, Q_i)$ 中的 $F_{\text{turn}}(l_i)$ 描述了局部路径 l_i 与它的前一段局部路径 l_{i-1} 之间的夹角对覆盖路径的影响, 即希望从 l_{i-1} 到 l_i 的过渡尽量平滑, 表达式如下:

$$F_{\text{turn}}(l_i) = \begin{cases} (\pi - |\beta_{i-1} - \beta_i|)^2, & |\beta_{i-1} - \beta_i| > \beta_{\text{th}}, \\ \pi^2, & \text{others,} \end{cases} \quad (5)$$

其中, β_i 代表局部路径 l_i 与 x 轴正方向的夹角, $0 < |\beta_{i-1} - \beta_i| < \pi$, β_{th} 是不影响飞行器平稳飞行和信息采集的最大转弯角度.

这里需要特别说明的是, 在本方法中, 局部路径和路径点的编号规则不同, 路径点从0开始编号, 而各段局部路径从1开始编号, 如图1所示, 这样就使得局部路径 l_i 终点的路径点恰好为路径点 p_i . 首先, 为了保证整体覆盖路径的连续, 每一段局部路径都要和前一段准确衔接, 即局部路径 l_i 的起点要位于其前一段局部路径的终点, 也就是路径点 p_{i-1} ; 其次, 为了保证按照规定顺序覆盖每一个子区域, 在飞行器覆盖完子区域 Q_i

图 1 路径点和局部路径编号规则

Figure 1 Numbering rules of the path point and local path.

之后顺次覆盖 Q_{i+1} , 要使得局部路径 l_i 的终点落在 Q_i 与 Q_{i+1} 的公共边界上, 为下一个子区域的局部覆盖路径规划做好准备.

注记2 在计算每个子区域内的最优的局部覆盖路径时, 不仅是根据定义的评价函数选择评价价值最高的一条, 还要求每段局部路径都满足一定的约束条件.

3.3 局部覆盖路径寻优算法

如前文所述, 在定义了传感器模型和评价函数之后, 再结合相应的约束条件, 在所有满足约束的可行解中找出评价价值最高的局部覆盖路径, 即解决一个带有约束的优化问题.

根据实际需求, 这里选择了较为适用的差分进化算法来计算最优解. 差分进化算法是一种基于采样的方法, 通过不断迭代地在可行解空间内采样来获取最优解. 应用在本文的路径寻优方法中, 具体流程如算法1所示(表1), 其中, x_{Qmin} , x_{Qmax} , y_{Qmin} , y_{Qmax} 是环境 Q 分别在 x 轴和 y 轴方向的坐标范围, l_{sub} 是子区域的宽度, 在本文中定为10.

在优化开始前, 首先要根据飞行器的当前运动方向计算出在约束条件下最大的采样范围(第1~6行), 这里的运动方向指飞行器在水平面上前后左右的方向, 在二维俯视角度的地图上, 对应 x 轴的左右方向和 y 轴的上下方向, 分别用两个变量 $pointer_h$ 和 $pointer_v$ 来表示($pointer_h=1$ 表示向左, $pointer_h=-1$ 表示向右; 类似地, $pointer_v=1$ 表示向上, $pointer_v=-1$ 表示向下). 在算法1中, 默认初始 $pointer_h=1$, $pointer_v=1$, 以水平覆盖模式为例, 图2描述了在水平覆盖模式下两种不同运动方向时符合约束的采样范围, 由图中的灰色区域表示.

采样范围 s_{max} 和 s_{min} 确定之后, 采样中心 s_{center} 和采样区间长度 s_{length} 也随之确定, 评价函数的最优值初始化为采样中心的评价价值(第7~9行). 随后, 迭代采样过程开始, 在一组有限数量的样本中找出最优样本(评价价值最高的样本). 然后根据最优样本更新下一次的采样参数, 当找到比上一个最优样本更好的样本时, 就适当扩大采样区域, 否则就适当缩小采样区域, 在最优样本

表 1 第 i 段路径优化算法(以“水平Z形”覆盖模式为例)

Table 1 The optimization algorithm for the i th path (“horizontal Z” coverage pattern as an example)

算法1

输入: 第 i 段路起点 p_{i-1} , 待覆盖的子区域 Q_i , 水平方向指针 $pointer_h$;
输出: 子区域 Q_i 的最优覆盖路径 l_i

```

1: 计算 $Q_i$ 的上下左右范围 $y_{max}^i, y_{min}^i, x_{max}^i, x_{min}^i$ 
2: if  $pointer_h=1$  then
3:    $\alpha_{min} = \arctan((y_{min}^i - y_{i-1}^i) / 10)$ 
4: else
5:    $\alpha_{max} = \arctan((y_{max}^i - y_{i-1}^i) / 10)$ 
6:    $\alpha_{min} = \arctan((y_{i-1}^i - y_{min}^i) / 10)$ 
7:    $\alpha_{max} = \arctan((y_{i-1}^i - y_{max}^i) / 10)$ 
8: end if
9:  $s_{min} \leftarrow \alpha_{min}, s_{max} \leftarrow \alpha_{max}$ 
10:  $s_{center} \leftarrow (s_{max} + s_{min}) / 2, s_{length} \leftarrow s_{max} - s_{min}$ 
11:  $F_{max} \leftarrow F(s_{center}), s_{best} \leftarrow s_{center}$ 
12: while  $s_{length} > 1$  do
13:   在区间 $s_{max}, s_{min}$ 上均匀采集 $n$ 个样本
14:    $F_{premax} \leftarrow F_{max}$ 
15:   for ( $j=1; j \leq n; j++$ ) do
16:     if  $F(s_j) > F_{premax}$  then
17:        $F_{premax} \leftarrow F(s_j), s_{best} \leftarrow s_j$ 
18:   end for
19:   if  $F_{premax} < F_{max}$  then  $s_{length} \leftarrow s_{length} \times s_{exp}$ 
20:   else  $s_{length} \leftarrow s_{length} \times s_{con}$ 
21:   end if
22:    $s_{min} \leftarrow s_{best} - s_{length} / 2,$ 
23:    $s_{max} \leftarrow s_{best} + s_{length} / 2$ 
24:   if  $s_{min} < \alpha_{min}$  then  $s_{min} \leftarrow \alpha_{min}$  end if
25:   if  $s_{max} > \alpha_{max}$  then  $s_{max} \leftarrow \alpha_{max}$  end if
26: end while
27:  $k_l \leftarrow \tan(s_{best}), l_i : y = k_l x + (y_{i-1}^i - k_l x_{i-1}^i)$ 

```

的周围更精细地搜索. 每次采集样本的数量不变, 根据采样区间长度调整不同的采样步长. 当采样区间缩小到设定阈值时, 就停止算法, 保存当前最优样本作为最优局部覆盖路径.

4 整体覆盖顺序规划

上一节介绍了将大规模环境划分成若干小面积的子区域后, 如何在每个子区域内计算出最优的局部覆盖路径, 本节将会介绍如何合理安排各个子区域的覆

图2 (网络版彩图)不同运动方向下的采样示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagram of sampling for different motion directions.

盖顺序, 以保证每一个子区域都得到覆盖. 同时为了尽量减少飞行器调头次数, 设计了“水平Z形”和“垂直Z形”两种覆盖模式. 为了更好地介绍和表示这两种覆盖模式, 引入“扫描方向”的定义, 如图3所示.

在飞行器开始覆盖前, 需要首先决定合适的覆盖模式, 如算法2(表2)所示.

由于在“Z形”覆盖顺序中, 对整体环境完成一次覆盖的调头次数与扫描方向的子区域数量直接相关, 因此, 覆盖模式的选择依据是待覆盖的区域分别在x轴和y轴两个方向的跨度范围, 选择跨度范围更小的作为扫描方向可以减少调头次数.

“水平Z形”和“垂直Z形”两种覆盖模式原理相似, 都是以往复推进的方式安排每一个子区域的覆盖顺序. 主要区别在于扫描方向的不同, 在“水平Z形”覆盖模式下, 飞行器在区域的左右边界之间往返飞行; 而在“垂直Z形”覆盖模式下, 飞行器在区域的上下边界之间往返飞行. 为了表达更加简洁明了, 算法3(表3)中以“水平Z形”覆盖模式为例, 具体介绍了如何安排整体环境中各个子区域的覆盖, 其中反复应用的方法以子算法的形式放在了附加材料中(算法4, 5, 6).

飞行器的初始位置 p_0 可以位于待覆盖区域中的任

图3 (网络版彩图)扫描方向定义

Figure 3 (Color online) Definition of the scanning direction.

表2 覆盖模式选择

Table 2 The method for coverage mode selection

算法2

输入: 待覆盖的环境 Q , 飞行器的初始状态 p_0 ;
输出: 相应覆盖模式;
1: 初始化覆盖方向指针 $pointer_h=1$, $pointer_v=1$
2: 计算 $span_h=x_{Qmax}-x_{Qmin}$, $span_v=y_{Qmax}-y_{Qmin}$
3: if $span_h > span_v$, then
4: 选择“水平Z形”覆盖模式
5: else
6: 选择“垂直Z形”覆盖模式
7: end if

表3 “水平Z形”覆盖模式算法流程

Table 3 Algorithm flow of “horizontal Z” coverage pattern

算法3

输入: 待覆盖的环境 Q , 飞行器的初始位置 p_0 , 初始夹角 β_0 ;
输出: 飞行器期望飞行路径;
1: $p_0 \leftarrow \lceil \text{ceil}(x_0 / 10) \times 10, y_0 \rceil$
2: $i \leftarrow 1$
3: while (任务未结束) do
4: if $pointer_h=1$ then
5: 计算 p_{i-1} 右侧正方形子区域的中心点坐标 c_{right}^{i-1}
6: if $c_{right}^{i-1} \in Q$ then
7: 计算 Q_i 内的最优覆盖路径 $l_i \rightarrow$ 算法1
8: 计算 l_i 的终点 p_i
9: else
10: $pointer_h \leftarrow -pointer_h$
11: 换下一行子区域覆盖 $\rightarrow$ 算法4
12: end if
13: else
14: 计算 p_{i-1} 左侧正方形子区域的中心点坐标 c_{left}^{i-1}
15: if $c_{left}^{i-1} \in Q$ then
16: 计算 Q_i 内的最优覆盖路径 $l_i \rightarrow$ 算法1
17: 计算 l_i 的终点 p_i
18: else
19: $pointer_h \leftarrow -pointer_h$
20: 换下一行子区域覆盖 $\rightarrow$ 算法4
21: end if
22: end if
23: $i \leftarrow i+1$
24: end while

意一点, 首先飞行器将向左飞行到离它最近的一个子区域边界处(第1行); 然后, 根据当前的运动方向变量 $pointer_h$ 的值初步确定下一个要覆盖的子区域, 计算该子区域的中心位置以判断该区域是否在飞行器的规定区域内. 如果判断结果肯定, 可以直接应用算法1在该子区域中计算出最优的局部覆盖路径 l_i 以及下一个路径点位置 p_i (第7~9行); 如果已经到达规定区域的边界处(根据 $pointer_h$ 初步确定的下一个子区域不属于飞行

器的规定区域), 则将运动方向变量 $pointer_h$ 翻转(第11行、第20行), 同时利用算法4重新选择下一个要覆盖的子区域, 飞行器也会先运动到下一个要覆盖的子区域的边界处准备覆盖. 算法中用到的一些符号变量的意义在图4中进行了标示说明.

这部分主要介绍了如何安排整个环境中各个子区域的覆盖顺序, 着重说明了当飞行器到达区域边界时的处理方法, 使得该算法能够适应更多形状的环境. 主要的技术点如下几方面.

(1) 设计了“水平Z形”和“垂直Z形”两种覆盖模式适应不同形状的环境区域, 减少飞行器在一次完整覆盖中的总调头回转次数.

(2) 算法通过 $pointer_h$ 和 $pointer_v$ 两个方向变量来记录和指示当前的运动方向, 并且在飞行器到达区域边界时改变它们的符号. 这种机制保证了覆盖的完整和有序, 避免出现个别子区域被忽略或者过度覆盖的情况.

(3) 基于分块优化的思想, 本文提出的大规模环境覆盖路径计算方法具备灵活调整的特点, 当环境密度函数 $\phi(q)$ 或者飞行器规定的覆盖区域形状发生改变时, 飞行器可以方便地随之调整覆盖路径.

5 仿真与实验结果

仿真部分给出两个软件平台的仿真结果, Matlab

图4 (网络版彩图)算法3~6中用到的区域标识符号说明
Figure 4 (Color online) Description of notations used in Algorithms 3-6.

的仿真结果主要展示根据环境密度函数所计算出的覆盖路径的情况, 说明算法的有效性; Gazebo仿真的主要目的是观察飞行器的跟踪效果、飞行状态, 验证所规划路径的可行性. 为了全面展示算法在不同情况下的表现, 本文设计了正方形环境、不规则形状环境以及多飞行器协同覆盖等场景. 最后, 为了进一步验证算法的可行性, 提供了单飞行器和多飞行器的实验结果.

5.1 仿真部分

本文所提方法的仿真在Matlab和Gazebo两种仿真环境下进行, 对单个无人飞行器和多无人飞行器进行环境覆盖的场景共提供了6组仿真结果, 前4组仿真是单个飞行器场景, 其中前3组是在Matlab中的仿真, 第4组在Gazebo中利用四旋翼模拟飞行. 第5组和第6组是3个飞行器的仿真, 第5组展示Matlab中的仿真结果, 第6组仿真利用Gazebo中的3架飞行器模型跟踪第5组仿真中所计算的路径. 算法中参数设置分别为: $w_1=0.9$, $w_2=0.1$, $d_s=0.03$, $d_c=8$, $\beta_{th}=0.15$, $s_{exp}=1.2$, $s_{con}=0.8$. 下面依次进行介绍.

(1) 第1组仿真(Matlab仿真结果)

首先验证单个无人飞行器对一个规则正方形区域的覆盖路径规划结果. 图5中线条是计算出的覆盖路径.

地图上的不同深浅颜色表示设置的环境密度函数, 颜色越深的地方代表环境密度函数的值越高, 也就是该区域在覆盖任务中更为受重视, 以下在Matlab中的仿真图都遵循这个原则. 从图5中可以看出在各个子区域中当两边的环境密度不均衡时, 规划的路径会更偏向于环境密度更高的一边, 同时路径也足够平滑适合飞行器跟踪给出的路径.

(2) 第2组仿真(Matlab仿真结果)

第2组仿真验证单个无人飞行器在非凸不规则区域的覆盖路径规划结果. 如图6所示, 飞行器可以在每次到达规定区域边界处时及时调头, 路径按顺序覆盖了环境中的每一个子区域, 显示了本文所提算法的较强适应性.

(3) 第3组仿真(Matlab仿真结果)

为了进一步验证本文所提算法的优势, 第3组做了3种路径的对比仿真. 把每段局部路径的评价函数值进行累加, 观察3种方法的整体评价结果, 同时, 与前两组

图5 (网络版彩图)第1组仿真结果(单个飞行器覆盖正方形环境)

Figure 5 (Color online) The simulation results of Group 1 (coverage of square environment by single UAV).

仿真相比, 设置了新的环境密度函数, 用3种不同方法覆盖同一环境. 图7(a)是本文所提算法规划的路径, 可以看出整体路径在环境密度函数比较高的地方分布也更加密集. 图7(b)是每个子区域内在满足约束的前提下随机选择方向所产生的路径, 路径曲折无规律且没有足够关注重点区域. 图7(c)是普通直线路径, 在每个子区域内都走一样的中轴线, 该路径的缺点是没有考虑区域的差异性. 图8是3种方法累计覆盖效果的对比, 本文所提方法显然优于另外两种, 并且随着覆盖任务进行, 差距逐渐变大.

表4用4个指标更加全面地对以上3种方法进行了对比. 其中, $F_Q = \sum_{Q_i \in Q} \int_{Q_i} f(l_i, q) \phi(q) dq$ 是所有局部路

图6 (网络版彩图)第2组仿真结果(单个飞行器覆盖不规则形状环境)

Figure 6 (Color online) The simulation results of Group 2 (coverage of irregular environment by single UAV).

径覆盖效果的加和, $L = \sum L_i$ 是所有局部路径长度的加和, L_k 是通过环境密度函数 $\phi(q) \geq \phi_{th}$ 的重点区域的路径长度, $r_k = L_k / L$ 是 L_k 所占路径总长度的比例. 从表中可以看出, 本文所提算法计算出来的路径具有更好的覆盖效果, 更短的长度. 同时, 在重点区域中的路径长度所占比例也更高, 体现了算法的优越性.

(4) 第4组仿真(Gazebo仿真结果)

为了进一步验证算法的可行性, 第4组是用单个飞行器在Gazebo+QGroundControl环境下做飞行模拟仿真. 在Gazebo中构造一个虚拟的四旋翼无人飞行器, 并将这架飞行器与地面站控制平台QGroundControl连接, 控制该飞行器按照规划的覆盖路径在虚拟空间中执行任务. 如图9所示, 在Ubuntu系统下通过3个窗口来观察飞行器状态, 终端窗口通过打印出当前目标路

图7 (网络版彩图)第3组仿真结果(单个飞行器覆盖正方形环境3种路径对比). (a) 本文算法规划路径; (b) 随机方向路径; (c) 普通直线路径

Figure 7 (Color online) The simulation results of Group 3 (comparison results of the 3 kinds of paths by single UAV). (a) The path of algorithm planning in this paper; (b) the path in random direction; (c) the path made up of lines.

图 8 (网络版彩图)第3组仿真结果(3种方法覆盖环境过程中累计覆盖效果对比)

Figure 8 (Color online) The simulation results of Group 3 (comparison of the cumulative coverage effects of the three methods).

径点编号来显示任务进程, 右侧的九宫格图记录了飞行器在跟踪覆盖路径的过程中9个时间的实际飞行路径, 这组仿真证明了本文算法所计算出的覆盖路径具有平滑适于飞行器跟踪的特点。

(5) 第5组仿真(Matlab仿真结果)

第5组仿真用3个飞行器共同覆盖一个正方形区域, 每架飞行器有各自独立的分区, 各自在自己的分区内负责覆盖任务(分区是提前设定好的), 图10仿真结果, 为了更加清晰简明, 图10和11分别给出了分区地图和环境密度地图上的路径。

在这组仿真中, 可以看出飞行器根据不同的区域形状选择不同的覆盖模式。当分区的x轴方向跨度更大时, 选择“水平Z形”覆盖模式; 当分区的y轴方向跨度更大时, 选择“垂直Z形”覆盖模式, 以此方式来减少飞行

表 4 三种方法各指标对比结果

Table 4 Comparison results of the 3 methods in various indicators

对比指标	本文算法规划路径	随机方向路径	普通直线路径
F_Q	10393.0	9796.0	10258.0
L	1083.4	1167.1	1099.8
L_k	224.3	220.4	200.4
r_k	20.7%	18.9%	18.2%

器的调头转向次数, 节约时间和能耗。

(6) 第6组仿真(Gazebo仿真结果)

类似地, 3架飞行器做环境覆盖的情况也在Gazebo中做了可行性的验证, 如图12所示, 左侧是Gazebo中建立的3架飞行器模型, 右侧9张快照的每一列分别是3架飞行器在跟踪覆盖路径过程中的3个状态, 曲线是飞行器的实际飞行路径, 同一架飞行器和它对应的一组任务快照分别用相同颜色的圆点和矩形框标记。在仿真过程中3架虚拟飞行器未出现碰撞等意外情况, 验证了算法在多飞行器场景下的适应性。

5.2 实验验证

为了验证本文所提算法在现实场景下的可行性, 用小型四旋翼无人机结合实验室的运动捕捉系统进行了实验。用4架四旋翼搭载Pixhawk飞控和Raspberry Pi 3B+机载电脑组成飞行器系统, 其中1台采用QAV250机架, 另外3台采用F330机架。本文实验主要考虑飞行器机动性和实验场景大小, 决定用轴距为330的四旋翼飞行器较为合适, 相应的机载电脑为Raspberry Pi 3B+, 64位1.4 GHz处理器, 重量仅45 g, 性能和重量都满足

图 9 (网络版彩图)第4组仿真结果(单个飞行器在Gazebo中的仿真结果)

Figure 9 (Color online) The simulation results of Group 4 (simulation results of single UAV in Gazebo).

图 10 (网络版彩图)第5组仿真结果(3架飞行器覆盖-环境密度地图)

Figure 10 (Color online) The simulation results of Group 5 (coverage environment by 3 UAVs).

图 11 (网络版彩图)第5组仿真结果(三架飞行器覆盖-分区地图)

Figure 11 (Color online) The simulation results of Group 5 (the partitions of 3 UAVs).

图 12 (网络版彩图)第6组仿真结果(3架飞行器在Gazebo中的仿真)

Figure 12 (Color online) The simulation results of Group 6 (simulation results of 3 UAVs in Gazebo).

实验要求. 用一台安装了QGroundControl的计算机作为地面站. 在飞行器上固定4~5个标志球, 通过Qualisys运动捕捉系统获取标志球位置, 同时计算飞行器的实时位姿信息; 在室外环境, 可以在飞行器上安装GPS定位装置, 通过GPS信号获取飞行器实时位置. 飞行器、运动捕捉系统和地面站之间通过ROS的MAV-Link协议进行通讯. 一方面, ROS主机接受来自运动捕捉系统计算的飞行器实时位姿信息和来自地面站的期望路径信息; 另一方面, 在飞行器的机载电脑上运行一个ROS节点来订阅飞行器的期望路径信息和实时位姿信息, 如图13所示, ROS主机汇总整个实验系统的所有信息并提供给需要的子系统. 实验中飞控所用跟踪控

制方法为非线性PD控制, 由飞行器的飞控单元执行, 通过地面站QGroundControl与飞行器连接可以对飞行器各维度的位置、速度的控制增益进行调节, 以适应飞行器重量、飞行要求以及环境情况.

由于实验场地的限制, 飞行器的覆盖范围设置为一个 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的正方形区域, 分别用单个飞行器和多个飞行器做了两组实验.

第一组实验是利用QAV250四旋翼进行的单个飞行器实验, 对第1组仿真中的路径按比例缩小后进行跟踪实验. 设置飞行高度为 1 m , 将计算出的覆盖路径按比例缩小后发送给飞行器, 观察期望路径的可实现程度.

图 13 (网络版彩图)实验系统通讯示意图

Figure 13 (Color online) The communication diagram of the experimental system.

图14给出了实验中 x , y , z 三个维度上飞行器实际飞行轨迹和期望路径的数据记录, 6组数据分别用不同颜色的曲线画出, 从图中可以看出, 每个维度上期望路径都得到了有效的跟踪, 说明本文所提算法在实际飞行中的可行性.

第二组实验是利用3台F330四旋翼同时起飞, 对第5组仿真中的部分路径按比例缩小后进行跟踪实验. 结果如图15所示, 实验中设置固定飞行高度为1.5 m, 将每个飞行器3个维度的期望位置 and 实际位置随时间变化的结果分别记录下来, 实验中用到的运动捕捉系统的频率是75 Hz, 即每秒发送75次实时位置信息.

6 讨论与结论

本文提出了一种基于分块优化思想, 可以适用于

大规模环境的覆盖路径规划方法. 首先利用Z字形原理安排子区域的覆盖顺序, 然后依次在每个子区域内规划出最优覆盖路径, 最终连接成一条连续的覆盖整个环境的路径.

主要贡献与创新点有: (1) 构造了基于线的传感器模型, 直接把线作为优化对象, 为覆盖路径规划提供了有效可行的解; (2) 通过分块优化思想, 将大规模环境分块优化, 减小了计算量, 使得算法在性能有限的机载电脑上也可以在线规划路径; (3) 两个方向指针的标记修改使得各个子区域有序覆盖, 保证了覆盖的完整性; (4) 通过不同覆盖模式的选择减少飞行器转弯次数, 提高覆盖效率和安全性; (5) 算法可以适应多种形状的区域, 在多飞行器覆盖任务中, 飞行器的分区发生改变时, 可以方便地相应调整覆盖路径. 未来该算法可以将每个子区域内计算的局部

图 14 (网络版彩图)第1组实验结果

Figure 14 (Color online) The experimental results of Group 1.

图 15 (网络版彩图)第2组实验结果. (a) 第1架飞行器的路径跟踪结果; (b) 第2架飞行器的路径跟踪结果; (c) 第3架飞行器的路径跟踪结果

Figure 15 (Color online) The experimental results of Group 2. (a) The tracking results of the first UAV; (b) the tracking results of the second UAV; (c) the tracking results of the third UAV.

覆盖路径扩展到曲线; 对于整个环境所有子区域覆盖顺序的安排更加体现区域的差异性; 同时子区域

可以灵活尝试更多其他形状, 选择效率更高的划分方法.

补充材料

本文的补充材料见网络版techcn.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

参考文献

- 1 Ghamry K A, Zhang Y. Fault-tolerant cooperative control of multiple UAVs for forest fire detection and tracking mission. In: 2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems. Barcelona: IEEE, 2016. 133–138
- 2 Kaltenbrunner A. Waldbrandprävention im Kanton Graubünden | Forest fire prevention in Canton Grisons. *Swiss Forry J*, 2010, 161: 460–464
- 3 Merino L, Dios M D, Ollero A. Cooperative unmanned aerial systems for fire detection, monitoring, and extinguishing. In: *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, 2014. 2693–2722
- 4 Cruz H, Eckert M, Meneses J, et al. Efficient forest fire detection index for application in unmanned aerial systems (UASs). *Sensors*, 2016, 16: 893

- 5 Merino L, Caballero F, Martínez-de-Dios J R, et al. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. *J Intell Robot Syst*, 2012, 65: 533–548
- 6 Liu L W, Yuan G G, Pan Z G, et al. Military environment discrimination based on GMM and gunshot detection (in Chinese). *Ship Electron Eng*, 2009, 29: 103–105 [刘力维, 袁高高, 潘志刚, 等. 基于GMM和枪声的军事环境判别. *传播电子工程*, 2009, 29: 103–105]
- 7 Ross S, Melik-Barkhudarov N, Shankar K S, et al. Learning monocular reactive UAV control in cluttered natural environments. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Karlsruhe, 2012. 1765–1772
- 8 Ryll M, Bühlhoff H H, Giordano P R. Modeling and control of a quadrotor UAV with tilting propellers. In: *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Saint Paul, 2012. 4606–4613
- 9 Escareo J, Sanchez A, Garcia O, et al. Triple tilting rotor mini-UAV: Modeling and embedded control of the attitude. In: *2008 American Control Conference*. Seattle, 2008. 3476–3481
- 10 Liang X, Fang Y C, Sun N, et al. A novel energy-coupling-based hierarchical control approach for unmanned quadrotor transportation systems. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2019, 24: 248–259
- 11 Liang X, Fang Y C, Sun N, et al. Adaptive nonlinear hierarchical control for a rotorcraft transporting a cable-suspended payload. *IEEE Trans Syst Man Cybern Syst*, 2019, 1–12
- 12 Faessler M, Fontana F, Forster C, et al. Autonomous, vision-based flight and live dense 3D mapping with a quadrotor micro aerial vehicle. *J Field Robotics*, 2016, 33: 431–450
- 13 Cortés J, Martínez S, Karatas T, et al. Coverage control for mobile sensing networks. *IEEE Trans Robot Automat*, 2004, 20: 243–255
- 14 Schwager M, Bullo F, Skelly D, et al. A ladybug exploration strategy for distributed adaptive coverage control. In: *IEEE International Conference on Robotics & Automation*. Pasadena, 2008. 2346–2353
- 15 Cortés J, Martínez S, Bullo F. Spatially-distributed coverage optimization and control with limited-range interactions. *ESAIM-COCV*, 2005, 11: 691–719
- 16 Laventall K, Cortés J. Coverage control by multi-robot networks with limited-range anisotropic sensory. *Int J Control*, 2009, 82: 1113–1121
- 17 Schwager M. A gradient optimization approach to adaptive multi-robot control. Dissertation for Doctoral Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009
- 18 Kwok A, Martínez S. Deployment algorithms for a power-constrained mobile sensor network. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2010, 20: 745–763
- 19 Durham J W, Carli R, Frasca P, et al. Discrete partitioning and coverage control for gossiping robots. *IEEE Trans Robot*, 2012, 28: 364–378
- 20 Schwager M, Rus D, Slotine J J. Decentralized, adaptive coverage control for networked Robots. *Int J Robot Res*, 2009, 28: 357–375
- 21 Schwager M, Julian B J, Angermann M, et al. Eyes in the sky: Decentralized control for the deployment of robotic camera networks. *Proc IEEE*, 2011, 99: 1541–1561
- 22 Soltero D E, Schwager M, Rus D. Decentralized path planning for coverage tasks using gradient descent adaptive control. *Int J Robotics Res*, 2014, 33: 401–425
- 23 Batsaikhan D, Janchiv A, Lee S G. Sensor-based incremental boustrophedon decomposition for coverage path planning of a mobile robot. In: Lee S, Cho H, Yoon K J, et al., eds. *Intelligent Autonomous Systems 12. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 193. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. 621–628
- 24 Schwager M, Dames P, Rus D, et al. A multi-robot control policy for information gathering in the presence of unknown hazards. In: Christensen H, Khatib O, eds. *Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol 100. Cham: Springer, 2017
- 25 Maza I, Ollero A. Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms. In: Alami R, Chatila R, Asama H, eds. *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*. Tokyo: Springer, 2007
- 26 Ousingsawat J, Earl M G. Modified lawn-mower search pattern for areas comprised of weighted regions. In: *IEEE American Control Conference*. New York, 2007. 918–923
- 27 Lan X, Schwager M. Rapidly exploring random cycles: Persistent estimation of spatiotemporal fields with multiple sensing robots. *IEEE Trans Robot*, 2016, 32: 1230–1244
- 28 Popović M, Hitz G, Nieto J, et al. Online informative path planning for active classification using UAVs. In: *International Conference Robotics and Automation*. Singapore, 2017. 5753–5758
- 29 Richter C, Bry A, Roy N. Polynomial trajectory planning for aggressive quadrotor flight in dense indoor environments. In: Inaba M, Corke P, eds. *Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol 114. Cham: Springer, 2016. 649–666

- 30 Wang X, Sun T, Li D. Energy-optimal coverage path planning on topographic map for environment survey with unmanned aerial vehicles. [Electron Lett](#), 2016, 52: 699–701
- 31 Palacios-Gasós J M, Talebpour Z, Montijano E, et al. Optimal path planning and coverage control for multi-robot persistent coverage in environments with obstacles. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Singapore, 2017. 1321–1327
- 32 Valero-Gomez A, Gomez J V, Garrido S, et al. The path to efficiency: fast marching method for safer, more efficient mobile robot trajectories. [IEEE Robot Automat Mag](#), 2013, 20: 111–120
- 33 Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance. [IEEE Robot Automat Mag](#), 2002, 4: 23–33
- 34 Mathew G, Mezić I. Spectral multiscale coverage: A uniform coverage algorithm for mobile sensor networks. In: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference. Shanghai, 2009. 7872–7877
- 35 Ivić S, Crnković B, Mezić I. Ergodicity-based cooperative multiagent area coverage via a potential field. [IEEE Trans Cybern](#), 2017, 47: 1983–1993
- 36 Pavone M, Arsie A, Frazzoli E, et al. Distributed algorithms for environment partitioning in mobile robotic networks. [IEEE Trans Automat Contr](#), 2011, 56: 1834–1848
- 37 Carlsson J G, Carlsson E, Devulapalli R. Balancing workloads of service vehicles over a geographic territory. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013. 209–216
- 38 Yun S K, Rusy D. Distributed coverage with mobile robots on a graph: Locational optimization. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. Saint Paul, 2012. 634–641
- 39 Yun S K, Rus D. Distributed coverage with mobile robots on a graph: Locational optimization and equal-mass partitioning. [Robotica](#), 2014, 32: 257–277
- 40 Klodt L, Willert V. Equitable workload partitioning for multi-robot exploration through pairwise optimization. In: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, 2015. 2809–2816

Planning of the coverage route for multi-UAVs based on section optimization

XIAO YuTing, FANG YongChun, LIANG Xiao, LIN He & HE Zhen

Tianjin Key Laboratory of Intelligent Robotics, Institute of Robotics and Automatic Information System, Nankai University, Tianjin 300350, China

Route planning coverage is commonly used in vacuuming, mapping, and tracking of the area. A group of programmable unmanned aerial vehicles (UAVs) is an ideal choice for such missions to increase coverage efficiency. In this paper, for the large-scale environmental coverage challenge, a novel route planning approach is proposed, which gathers abundant information per unit length and ensures full coverage for the entire environment. The proposed approach is based on the method of section optimization, as it is extremely difficult to obtain a coverage route directly for the large-scale setting with accurate and reliable information. Next, the atmosphere is divided into several small sub-regions that conform to the sensor's detection distance. Based on this, the optimal coverage route for each sub-region is calculated. For clarity, the route in each sub-region is termed as a partial path. Under certain specific constraints, the obtained partial routes are connected to constitute an integral path. It is worth noting that the higher steering frequency and the greater turning angle will result in more time and energy consumption. The proposed approach is also aimed at reducing these two significant indexes. Another benefit of the proposed approach is that even if the area in charge is changed, it is easy to adjust. To validate the performance of the proposed planning scheme, simulation, and experimental results are provided.

section optimization, multiple UAVs, environment coverage, route planning

doi: [10.1360/SST-2019-0298](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0298)