

DOI:10.16356/j.1005-2615.2024.06.010

基于动态传感器的无人机平面搜索研究

杨浩辰, 李爱军, 郭永
(西北工业大学自动化学院, 西安 710129)

摘要: 针对无人机平面搜索任务, 本文采用动态传感器模型, 研究了基于误差梯度的理论搜索策略。由于理论搜索策略存在局部最优情况, 无人机在执行任务过程中会停止运动, 导致搜索中断无法完成搜索任务, 因此本文研究了基于理论搜索策略的改进搜索策略。采用改进搜索策略可以使平面任务区域内的所有点都被搜索且任意一点都达到期望的搜索度。在此基础上, 为了减小冗余搜索度和缩短任务执行时间, 本文提出了结合区域划分思想的搜索策略。最后, 单无人机搜索和多无人机搜索仿真实验结果验证了本文研究的搜索策略的可行性。

关键词: 导航、制导与控制; 无人机; 平面搜索; 动态传感器

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2024)06-1074-08

Research on Plane Search of UAVs Using Dynamic Sensors

YANG Haochen, LI Aijun, GUO Yong

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: This paper studies the problem of plane search of unmanned aerial vehicles (UAVs) using dynamic sensors. A gradient-type nominal search strategy is studied. Since this strategy leads to local optimum which causes the suspension of the task, it does not guarantee to meet the goal of covering the search domain such that each point is surveyed for a certain level. A new strategy is consequently developed based on the nominal search strategy. Furthermore, a novel search strategy, taking advantage of area division, is proposed for the demand that the excessive search level and time cost are both as low as possible. Simulation results of a single UAV and multi-UAVs demonstrate the feasibility of the search strategies.

Key words: navigation, guide and control; unmanned aerial vehicle (UAV); plane search; dynamic sensor

随着无人机技术的发展, 无人机的应用越来越广泛^[1-2]。无人机是一种利用自备的程序控制装置操纵和无线电技术遥控设备无人驾驶飞机, 英文缩写为 UAV^[3]。搜索任务是无人机的一个重要应用方向。发生自然灾害后, 快速有效的救援行动对于拯救灾民生命、减少经济损失和恢复经济社会发展十分重要。灾区救援任务往往需要在充满不确定因素的环境下执行; 战场上的军事行动同样也面临不确定的风险。如果派人员执行任务, 那么执行任务者必定将面临一定的危险。由于无人机具有速度快、机动性强等优点, 因此, 研究无人机搜索任务

的需求愈发迫切^[1-5]。

传统的搜索策略关注的是路径规划问题^[6-7], 即基于合理的区域划分^[8]实现对任务区域的搜索, 比如复杂度比较高的基于泰森多边形的路径规划方法^[9]。而对于无人机搜索任务, 存在一个重要问题如下: 给定一个平面任务区域和 N 架无人机, 如何控制这些无人机的运动, 以保证任务区域被完整搜索。本文的研究即围绕该问题展开。对于该问题, 期望达到的目标是无人机完整搜索给定的任务区域, 也即平面上的每一点都以期望的强度被扫描^[4-5]。对于一些形状特殊的区域, 比如矩形和圆

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JLZ-06)。

收稿日期: 2024-06-05; **修订日期:** 2024-10-31

通信作者: 李爱军, 男, 教授, 博士生导师, E-mail: liaijun@nwpu.edu.cn。

引用格式: 杨浩辰, 李爱军, 郭永. 基于动态传感器的无人机平面搜索研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(6): 1074-1081. YANG Haochen, LI Aijun, GUO Yong. Research on plane search of UAVs using dynamic sensors[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 1074-1081.

形区域,可以多次调整无人机的部署位置以令其完整扫描任务区域。例如,在圆形区域执行单机搜索任务时,可以控制该机从区域中心开始,围绕区域中心旋转进行扫描,扫描完整一个圆周以后,沿径向向外移动一段距离后再扫描完整的一个圆周,这样不断扫描直到边界。然而,在现实的任务场景中,由于执行任务的时间和无人机的能源是有限的,上述多次调整无人机部署位置的方法显然不适用。因此,需要研究一种搜索策略,使得仅设置一次部署点,就可以达到使无人机完整搜索整个任务区域的目的^[4]。

本文研究了基于动态传感器和误差梯度的无人机平面搜索策略。相较于基于区域划分的路径规划搜索方法,本文研究的无人机搜索策略能够保证更高的覆盖率。此外,与本文中的平面搜索策略相关的研究多数都基于理论传感器节点。而本文的研究则针对实际无人机的模型展开,关注现实中的无人机应用场景。首先,本文研究基于动态传感器数学模型的理论搜索策略,适用于机间可实时通讯传输数据的情况。由于理论搜索策略存在局部最优情况,无人机在搜索过程中会停止运动,无法完成搜索任务,本文研究了改进搜索策略。采用改进搜索策略可以使平面任务区域内的所有点都被无人机搜索且任意一点都达到期望的搜索度。在改进搜索策略的基础上,为了减小冗余搜索度和缩短任务执行时间,本文提出了结合区域划分思想的搜索策略。最后,本文给出了上述所有搜索策略的仿真结果以证明文中无人机搜索策略的可行性。

1 无人机模型

本文研究的搜索策略适用于机间可实时通讯传输数据的情况。为了实现无人机的控制,必须建立无人机模型和控制器。本文基于运动学方程建立无人机的运动模型,并在此基础上建立控制器,通过速度误差控制力的输入。

1.1 坐标系

在飞行过程中,无人机受到多种力的作用^[2]。为了准确描述其姿态与运动状态并实现对无人机的控制,必须在坐标系中描述无人机的参数。本文所用的坐标系如下:

(1) 地面惯性坐标系

该坐标系是一种相对地球表面固定不动的坐标系,原点选取为地面上某点。

x 轴在水平面内,指向某一方向, y 垂直于 x , z 垂直于水平面向下。坐标系可以由右手定则确定。

(2) 机体坐标系

机体坐标系固联于无人机,原点取无人机的质心, x 轴平行于机身, y 轴垂直于无人机的对称面,指向右。 z 轴也在对称面内,垂直于 x 轴向下。

1.2 相关参数

所有相关的参数定义如表1所示。

表1 无人机的参数
Table 1 Parameters of UAV

参数	符号
质量	m_i
三轴位置	x_i, y_i, z_i
速度	V_i
俯仰角	γ_i
偏航角	χ_i
滚转角	φ_i
推力	T_i
升力	L_i
阻力	D_i
重力加速度	g
干扰	$d_{v_i}, d_{\gamma_i}, d_{\chi_i}$

1.3 无人机运动学模型

无人机的运动学特性由运动学方程确定。基于上文中的参数给出运动学方程^[10]如下

$$\begin{cases} \dot{x}_i = V_i \cos \gamma_i \cos \chi_i \\ \dot{y}_i = V_i \cos \gamma_i \sin \chi_i \\ \dot{z}_i = V_i \sin \gamma_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_i = \frac{T_i - D_i + d_{v_i}}{m_i} - g \sin \gamma_i \\ \dot{\gamma}_i = \frac{L_i \cos \varphi_i - m_i g \cos \gamma_i + d_{\gamma_i}}{m_i V_i} \\ \dot{\chi}_i = \frac{L_i \sin \varphi_i + d_{\chi_i}}{m_i V_i \cos \gamma_i} \end{cases} \quad (2)$$

1.4 控制器

本文中无人机控制器的设计原理是根据速度误差输出相应的控制力。

设施加于无人机的速度指令为 u_{id} 。在此基础上,定义速度误差

$$e = u_i - u_{id} \quad (3)$$

式中: $p_{i1} = [x_i, y_i, z_i]^T$, $p_{i2} = [\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i]^T$ 。

无人机的位置模型

$$\dot{p}_{i2} = \frac{R_i}{m_i} F_{if} + a_i + d_i \quad (4)$$

式中 $d_i = [d_{v_i}, d_{\gamma_i}, d_{\chi_i}]^T$ 。

根据控制需求,设计控制器。

控制器设计如下

$$F_{if} = m_i R_i^{-1} (-a_i - ke) \quad (5)$$

式中: F_{if} 为控制器输出; $a_i = [-D_i \cos \gamma_i \cos \chi_i,$

$$-D_i \cos \gamma_i \sin \chi_i, -D_i \sin \gamma_i - g_i]^T; \quad R_i = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i \cos \chi_i & -\sin \gamma_i \cos \chi_i & -\sin \chi_i \\ \cos \gamma_i \sin \chi_i & -\sin \gamma_i \sin \chi_i & \cos \chi_i \\ \sin \gamma_i & \cos \gamma_i & 0 \end{bmatrix}.$$

2 搜索策略

本文首先根据动态传感器模型研究了理论搜索策略。由于理论搜索策略存在局部最优情况,导致搜索中断无法完成搜索任务,本文研究了改进搜索策略。采用改进搜索策略可以使平面任务区域内的所有点都被搜索且任意一点都达到期望的搜索度。在改进搜索策略的基础上,为了减小冗余搜索度和缩短任务执行时间,本文提出了结合区域划分思想的搜索策略。

2.1 动态传感器模型

本文建立了动态传感器的数学模型。目前常见的传感器模型是布尔模型和圆盘衰减模型。对于任何动态传感器模型来说,最重要的一个性质是其感知范围有限^[4]。本文的研究基于圆盘衰减模型,也即认为距离传感器越远,感知强度越小^[11]。

每架无人机搭载一个动态传感器。无人机表示为 A ,任务区域内搭载传感器的无人机数量表示为 N ,无人机 A_i 的位置定义为 $\xi_i, i=1, 2, \dots, N$ 。以 u_i 表示无人机 A_i 的速度

$$\dot{\xi}_i = u_i \quad (6)$$

动态传感器具有感知能力的上限,定义该上限值为 E_i 。对于一个传感器来说,感知强度最大的点位于其自身位置处^[5]。因此,进行如下定义

$$\bar{A}_i(\xi_i, \xi_i) = E_i > \bar{A}_i(\xi, \xi_i) \quad \forall \xi \neq \xi_i \quad (7)$$

圆盘衰减模型的感知范围是圆形的。在感知范围内,若固定以传感器为圆心的某一圆,则该圆上的所有点处的传感器感知强度是相等的常值,即

$$\|\xi_i - \tilde{\xi}\| = \text{const} \quad (8)$$

在此基础上,定义感知强度函数为

$$\bar{A}(\tilde{\xi}, \xi_i) = A_i \left(\|\xi_i - \tilde{\xi}\|^2 \right) \quad (9)$$

感知强度函数的一种范式是二阶多项式函数,也即 $s = \|\xi_i - \tilde{\xi}\|^2$ 的函数。

参考文献[4,5],具体地,考虑如下形式的函数

$$A_i(s) = \begin{cases} \frac{E_i}{r_i^4} (s - r_i^2)^2 & s \leq r_i \\ 0 & s > r_i \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_i 取1.5, r_i 取6。

本文中的仿真均基于上述感知强度函数。该强度函数的空间分布如图1所示。

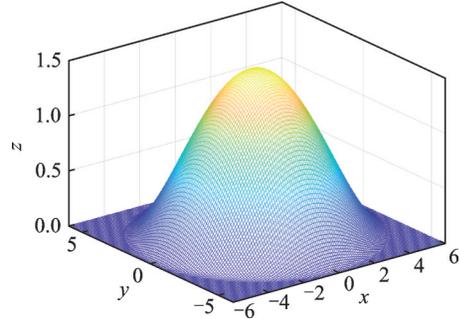


图1 感知强度函数

Fig.1 Sensing density function

2.2 理论搜索策略

对于任务区域内所有点 $\tilde{\xi}$,定义 X 为其期望的被感知强度。

根据前文,可以得到由多个动态传感器组成的传感器网络对平面内一点进行搜索的累积感知度结果

$$S_k(\tilde{\xi}, t) = \sum_{i \in k} S_i(\tilde{\xi}, t) = \int_0^t \sum_{i \in k} A_i \left(\|\xi_i(\tau) - \tilde{\xi}\|^2 \right) d\tau \quad (11)$$

因此,平面搜索任务的目标表示如下

$$S(\tilde{\xi}, t) = X \quad (12)$$

设 D 表示任务区域,定义错误函数,表示任务的未完成度^[4],具体定义如下

$$e(t) = \sum_{\tilde{\xi} \in D} h \left(X - S(\tilde{\xi}, t) \right) \phi(\tilde{\xi}) \quad (13)$$

式中: $h > 0$,为正定函数;平面函数 ϕ 为密度分布函数,表示任务区域的先验信息, ϕ 的值越大,监测到目标的概率越大。由此易知,定义的错误函数本质上是搜索任务的误差,该函数是搜索任务误差的一种表达形式。

设平面区域的初始状态如下

$$S(\tilde{\xi}, 0) = 0 \quad (14)$$

本文采用错误函数的梯度推导理论搜索策略^[4]

$$u(t) = \bar{k} \sum_{\tilde{\xi} \in D} h' \left(X - S(\tilde{\xi}, t) \right) \frac{\partial A(s)}{\partial s} (\xi(t) - \tilde{\xi}) \phi(\tilde{\xi}) \quad (15)$$

式中 $u(t)$ 作为施加于无人机的速度指令。

在无人机执行任务的过程中,其感知范围内的点将达到如下的状态

$$S(\tilde{\xi}, t) = X \quad (16)$$

实际上,在执行理论搜索策略的情况下,无人机的感知区域必将达到此状态。在达到该状态后,由搜索策略计算出的速度指令为0,无人机停止运

动,此时有 $e'(t)=0$,但 $e(t) \neq 0$,是局部最优的情况。从任务的角度说,无人机在执行任务的过程中即停止运动,平面区域内仍存在未达到期望搜索度的点。因此,有必要对该搜索策略进行改进。

2.3 改进搜索策略

对于理论搜索策略,一种改进的思路是^[4-5]:当无人机感知范围内的点达到期望的搜索度时,无人机切换至新的搜索策略,继续运动,当无人机的感知范围内重新出现未达到期望搜索度的点时,无人机重新切换至理论搜索策略。重复此过程可实现平面区域内的所有点都达到期望的被搜索度。

基于以上思路,考虑出现局部最优情况时的搜索策略如下

$$\bar{u}(t) = -\bar{k}(\xi(t) - \tilde{\xi}^*(t_s)) \quad (17)$$

式中 $\tilde{\xi}^*(t_s)$ 表示在 t_s 时刻,所有搜索度未达到期望值的点中和无人机距离最小的点。

因此,改进搜索策略如下

$$u^*(t) = \begin{cases} u(t) & e(t) \neq 0 \text{ 且 } e'(t) \neq 0 \\ \bar{u}(t) & e(t) \neq 0 \text{ 且 } e'(t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中 $u^*(t)$ 作为施加于无人机的速度指令。

当无人机执行该搜索策略时,若无人机的感知区域出现了局部最优的情况,搜索策略将进行切换,无人机向平面内所有搜索度未达到期望值的点中和无人机距离最小的点运动。当无人机感知范围内再次出现搜索度未达到期望值的点时,搜索策略切换为理论搜索策略,从而避免了搜索任务的中断。

2.4 结合区域划分思想的搜索策略

在利用多架无人机执行区域搜索任务时,无人机的航迹在某些位置比较接近甚至重合是常见的现象。这种现象的产生增加了冗余搜索度,从而增加了执行任务所需的时间,并消耗更多能源。在实际的任务场景中,任务执行时间和无人机能源都是有限的。因此,需要新的搜索策略以减小冗余搜索度,节省无人机能源,并缩短执行任务所需的时间。

在改进搜索策略的基础上,考虑新的搜索策略如下:结合区域划分的思想,将任务区域按照无人机数量进行划分,每架无人机独立搜索其中一个区域。设有 N 架无人机,将平面区域 D 进行划分如下: $D_i \in D, i = 1, 2, \dots, N, D = \cup D_i$ 。 D_i 对应的密度分布函数和错误函数分别为 ϕ_i 和 $e_i(t)$ 。

由此,施加于每架无人机的速度指令为

$$u_i^*(t) = \begin{cases} u_i(t) & e_i(t) \neq 0 \text{ 且 } e_i'(t) \neq 0 \\ \bar{u}_i(t) & e_i(t) \neq 0 \text{ 且 } e_i'(t) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $u_i(t) = \bar{k} \sum_{\xi \in D} h'(X - S_i(\xi, t)) \frac{\partial A_i(s)}{\partial s} (\xi_i(t) - \xi) \phi_i(\xi); \bar{u}_i(t) = -\bar{k}(\xi_i(t) - \tilde{\xi}_i^*(t_s))$ 。

定义冗余搜索度为:搜索任务完成后,区域内所有点的实际搜索度与期望搜索度之差的和,即

$$R = \sum_{\xi \in D} (S(\xi) - X) \quad (20)$$

当无人机采用该搜索策略时,各机独立搜索一个区域,避免了航迹的重合,减少了不必要的重复搜索,能够在一定程度上缩短任务执行时间,减小冗余搜索度,降低能源消耗。

3 仿真实验

3.1 理论搜索策略

单无人机仿真:设置平面区域 D 为 $-15 \leq x \leq 15, -15 \leq y \leq 15$ 的区域。令 X 为 6, $\bar{k} = 1.5, r_i = 6, M_i = 1.5$ 。设置 $\phi(\xi) = 1 - \tanh(10^{-5} \times \|\xi\|^2)$ 。搜索结果如图 2~5 所示(文中在反映搜索度时,搜索度高于期望值的点均以期望值计)。

根据仿真结果可知,当错误函数未收敛至 0 时,错误函数变化率即变为 0,且不再发生变化,搜索任务中断,平面内仍存在未达到期望搜索度的点。

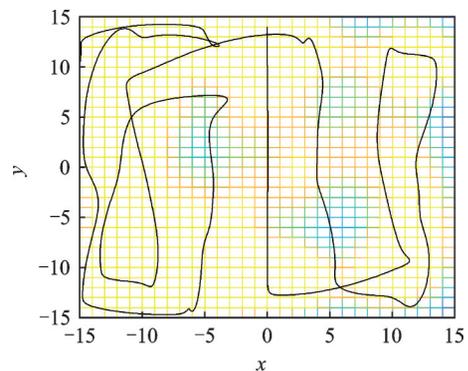


图 2 理论搜索策略单无人机搜索结果

Fig.2 Results of nominal search strategy with one UAV

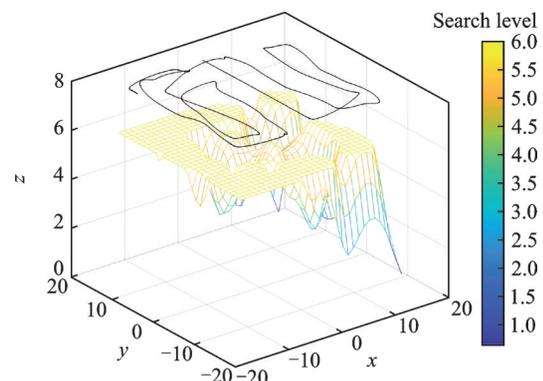


图 3 理论搜索策略单无人机搜索度

Fig.3 Search level of nominal search strategy with one UAV

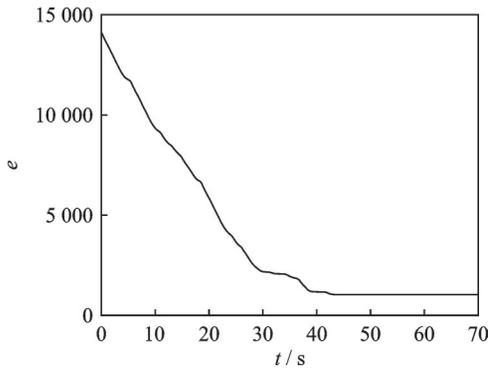


图4 理论搜索策略单无人机搜索错误函数

Fig.4 Error function of nominal search strategy with one UAV

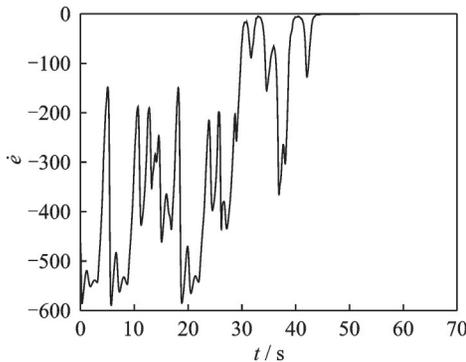


图5 理论搜索策略单无人机搜索错误函数变化率

Fig.5 Derivative of error function of nominal search strategy with one UAV

多无人机仿真:无人机3架。设置平面区域 D 为 $-30 \leq x \leq 30, -30 \leq y \leq 30$ 的区域。令 X 为6, $\bar{k} = 1.5, r_i = 6, M_i = 1.5$ 。设置 $\phi(\xi) = 1 - \tanh(10^{-5} \times \|\xi\|^2)$ 。搜索结果如图6~9所示。

根据仿真结果可知,当错误函数未收敛至0时,错误函数变化率即变为0,且不再发生变化,搜索任务中断,平面内仍存在未达到期望搜索度的点。采用理论搜索策略的单无人机搜索和多无人机搜索仿真结果证明:理论搜索策略无法保证平面区域 D 内所有点的被搜索度达到期望值。

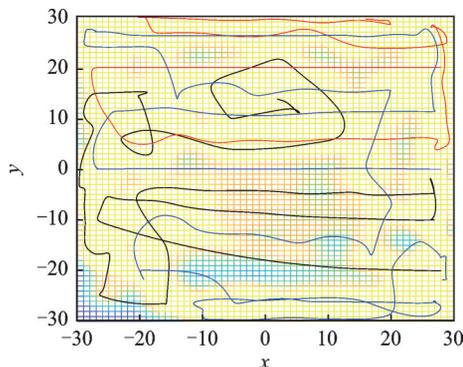


图6 理论搜索策略多无人机搜索结果

Fig.6 Results of nominal search strategy with three UAVs

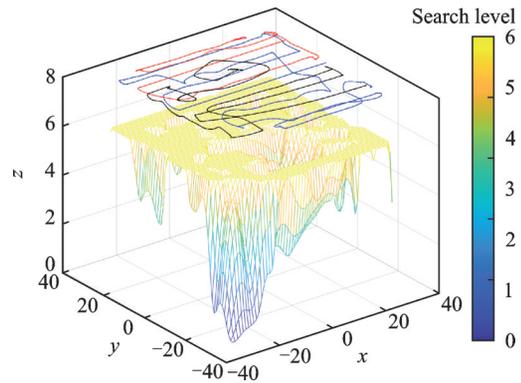


图7 理论搜索策略多无人机搜索度

Fig.7 Search level of nominal search strategy with three UAVs

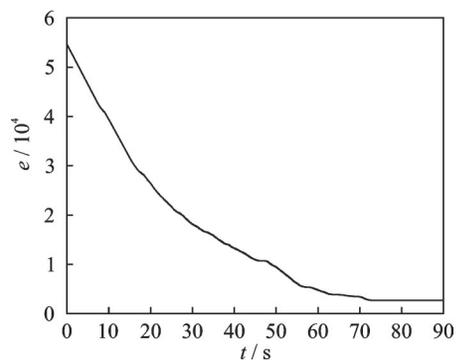


图8 理论搜索策略多无人机搜索错误函数

Fig.8 Error function of nominal search strategy with three UAVs

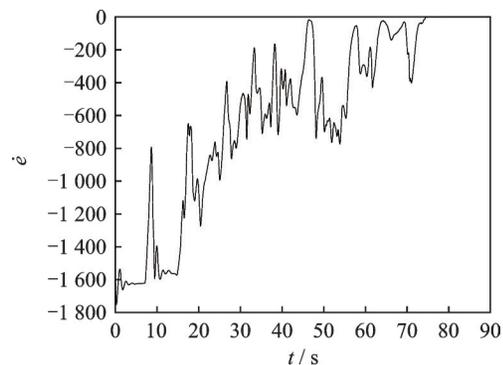


图9 理论搜索策略多无人机搜索错误函数变化率

Fig.9 Derivative of error function of nominal search strategy with three UAVs

3.2 改进搜索策略

单无人机仿真:设置平面区域 D 为 $-15 \leq x \leq 15, -15 \leq y \leq 15$ 的区域。令 X 为6, $\bar{k} = 1.5, r_i = 6, M_i = 1.5, \bar{k} = 3.0$ 。设置 $\phi(\xi) = 1 - \tanh(10^{-5} \times \|\xi\|^2)$ 。搜索结果如图10~12所示。

根据仿真结果可知,错误函数收敛至0,平面内所有点都达到了期望的搜索度。

多无人机仿真:无人机3架。设置平面区域 D 为 $-30 \leq x \leq 30, -30 \leq y \leq 30$ 的区域。令 X 为6, $\bar{k} = 1.5, r_i = 6, M_i = 1.5, \bar{k} = 3.0$ 。设置 $\phi(\xi) =$

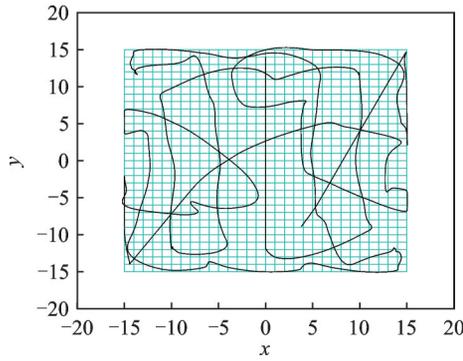


图 10 改进搜索策略单无人机搜索结果

Fig.10 Results of improved search strategy with one UAV

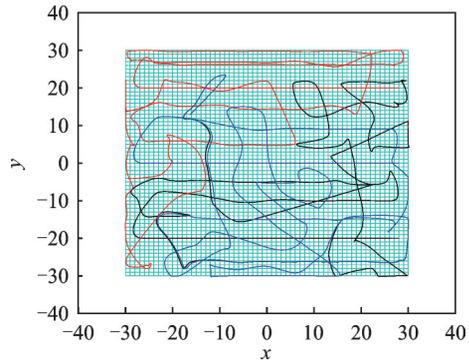


图 13 改进搜索策略多无人机搜索结果

Fig.13 Results of improved search strategy with three UAVs

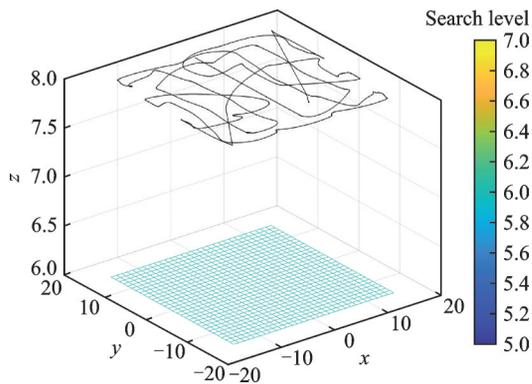


图 11 改进搜索策略单无人机搜索度

Fig.11 Search level of improved search strategy with one UAV

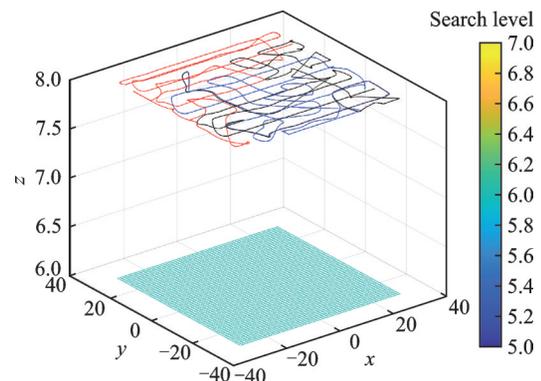


图 14 改进搜索策略多无人机搜索度

Fig.14 Search level of improved search strategy with three UAVs

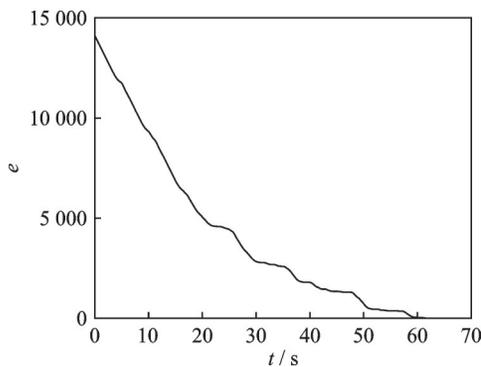


图 12 改进搜索策略单无人机搜索错误函数

Fig.12 Error function of improved search strategy with one UAV

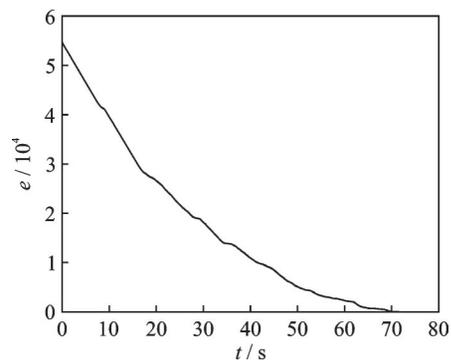


图 15 改进搜索策略多无人机搜索错误函数

Fig.15 Error function of improved search strategy with three UAVs

$1 - \tanh(10^{-5} \times \|\xi\|^2)$ 。搜索结果如图 13~15 所示。

根据仿真结果可知,错误函数收敛至 0,平面内的所有点达到了期望的搜索度,搜索耗费时间 71.55 s,冗余搜索度的结果为 10 796。采用改进搜索策略的单无人机搜索和多无人机搜索仿真结果证明:采用改进搜索策略能够完成搜索任务。

3.3 结合区域划分思想的搜索策略

无人机 3 架。设置平面区域 D 为 $-30 \leq x \leq 30, -30 \leq y \leq 30$ 的区域,并划分为 3 个区域。令 X 为 6, $\bar{k} = 1.5, r_i = 6, M_i = 1.5, \bar{k} = 3.0$ 。设置 $\phi(\xi) = 1 - \tanh(10^{-5} \times \|\xi\|^2)$ 。搜索结果如图 16~18 所示。

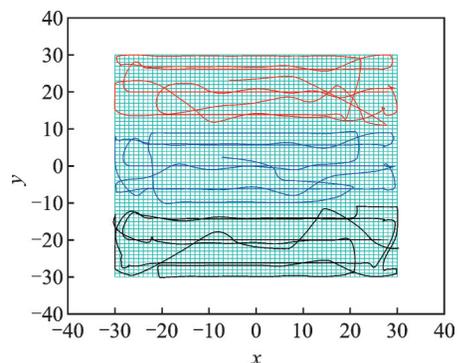


图 16 基于区域划分策略的搜索结果

Fig.16 Results of search strategy based on area division with three UAVs

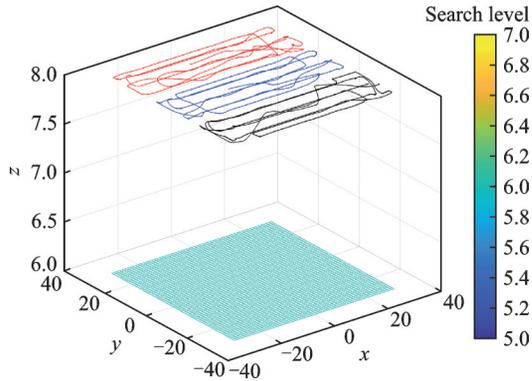


图17 基于区域划分策略的多无人机搜索度

Fig.17 Search level of search strategy based on area division with three UAVs

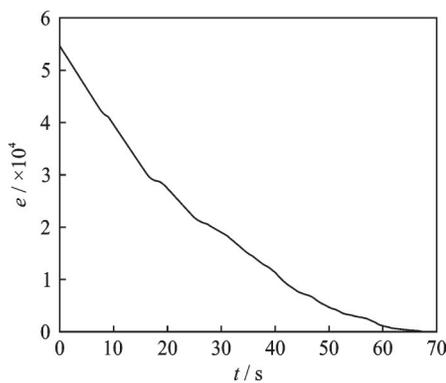


图18 基于区域划分策略的多无人机搜索错误函数

Fig.18 Error function of search strategy based on area division with three UAVs

根据仿真结果,错误函数收敛至0,平面内所有点达到了期望的搜索度,搜索时间为69.58 s,冗余搜索度的结果为10 020,相较于采用改进搜索策略的情况,搜索时间更短,冗余搜索度也更低,证明该搜索策略相比改进搜索策略具有优越性。

4 结 论

本文针对无人机平面搜索任务,采用动态传感器模型,研究了基于误差梯度的理论搜索策略。由于理论搜索策略存在局部最优情况,导致搜索中断无法完成搜索任务,因此本文研究了基于理论搜索策略的改进搜索策略。采用改进搜索策略可以使平面任务区域内的所有点都被搜索且任意一点都达到期望的搜索度。在改进搜索策略的基础上,为了减小冗余搜索度和缩短任务执行时间,本文提出了结合区域划分思想的搜索策略。本文的研究基于动态传感器模型和误差梯度函数,相较于基于区域划分的路径规划搜索方法,本文研究的搜索策略能够保证更高的覆盖率。此外,与本文中的平面搜索策略相关的研究多数都基于理论传感器节点。而本文的研究则针对无人机的模型展开,关注实际的无人机任务场景。仿真结果证明本文研究的无

人机搜索策略具有可行性。本文的研究基于理想的模型和条件。然而,实际的任务场景存在诸多限制条件,如任务区域内存在障碍物、无人机之间存在一定的通信障碍等。后续的工作是研究具有更多约束条件的搜索任务。

参考文献:

- [1] LI J W, WANG W, LI A J, et al. UAVs formation control based on artificial potential functions with the orientation considered [M]//Lecture Notes in Electrical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2019: 315-324.
- [2] 全权. 多旋翼飞行器设计与控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [3] 余仕龙, 胡家杰. 无人机自主飞行控制系统综述[J]. 中国科技信息, 2022(20): 41-43.
YU Shilong, HU Jiajie. Overview of UAV autonomous flight control system[J]. China Science and Technology Information, 2022(20): 41-43.
- [4] HUSSEIN I I, STIPANOVIC D M. Effective coverage control using dynamic sensor networks with flocking and guaranteed collision avoidance[C]//Proceedings of 2007 American Control Conference. New York, NY, USA: IEEE, 2007: 3420-3425.
- [5] WANG Y, HUSSEIN I I. Awareness coverage control over large scale domains with intermittent communications[C]//Proceedings of 2008 American Control Conference. Seattle, WA, USA: IEEE, 2008: 4370-4375.
- [6] CABREIRA T, BRISOLARA L, JR FERREIRA P R. Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles[J]. Drones, 2019, 3(1): 4.
- [7] GALCERAN E, CARRERAS M. A survey on coverage path planning for robotics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(12): 1258-1276.
- [8] HIRANI P K, SINGH M. A survey on coverage problem in wireless sensor network[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 116(2): 1-3.
- [9] CHANDLER P R, PACHTER M, RASMUSSEN S. UAV cooperative control[C]//Proceedings of the 2001 American Control Conference. Arlington, VA, USA: IEEE, 2001: 50-55.
- [10] LIU B J, GUO Y, LI A J. Nussbaum-based finite-time containment control for multi-UAVs with input saturation and velocity constraints[J]. Aerospace Science and Technology, 2023, 139: 108407.
- [11] MEGERIAN S, KOUSHANFAR F, QU G, et al. Exposure in wireless sensor networks: Theory and practical solutions[J]. Wireless Networks, 2002, 8(5): 443-454.

- [12] CORTES J, MARTINEZ S, KARATAS T, et al. Coverage control for mobile sensing networks[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 243-255.
- [13] LI W, CASSANDRAS C. Distributed cooperative coverage control of sensor networks[C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control. Seville, Spain: IEEE, 2005.
- [14] JU Z Y, ZHANG H, TAN Y, et al. Coverage control of mobile sensor networks with directional sensing [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2022, 19(3): 2913-2934.
- [15] MEGUERDICHIAN S, KOUSHANFAR F, POTKONJAK M, et al. Coverage problems in wireless AD-HOC sensor networks[C]//Proceedings of the Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2001, 3: 1380-1387.
- [16] ZHAI Chao, ZHANG Haitao, XIAO Gaoxi. Cooperative coverage control of multi-agent systems and its applications[M]. [S.l.]: Springer, 2021.
- [17] 张伟, 张三乐, 宋小康, 等. 四旋翼无人机的运动控制与轨迹规划[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2023, 26(4): 40-48.
- ZHANG Wei, ZHANG Sanle, SONG Xiaokang, et al. Motion control and trajectory planning of quadrotor unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Xi'an University (Natural Science Edition), 2023, 26(4): 40-48.
- [18] AMINZADEH A, KHOSHNOOD A M. Multi-UAV cooperative search and coverage control in post-disaster assessment: Experimental implementation[J]. Intelligent Service Robotics, 2023, 16(4): 415-430.
- [19] ALMADHOUN R, TAHA T, SENEVIRATNE L, et al. A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(8): 847.

(编辑: 胥橙庭)