

基金项目论文

一种面向未知环境的无人机群区域覆盖搜索算法研究

刘建生^{1,2} 徐赛^{1,2} 王晨^{1,2} 何涛^{1,2} 李志^{1,2} 闻英友^{1,2}

(1.辽宁省网络空间安全专业技术创新中心, 辽宁沈阳 110169; 2.东北大学东软研究院, 辽宁沈阳 110169)

摘 要:近年来,随着无人机技术的飞速发展,旋翼无人机由于具有灵活机动、轻量化、成本低等优点在搜救领域得到了广泛应用。本文面向未知环境研究无人机群执行区域覆盖搜索任务,以任务耗时最短为算法评价指标,提出了回字形扩展搜索算法。首先对传统区域覆盖搜索算法和本文所提出的算法进行了介绍,之后针对算法建立了仿真环境模型和算法模型,并基于NetLogo 仿真环境通过蒙特卡罗方法进行了试验及结果分析。与传统随机游走覆盖搜索算法进行对比,结果显示本文提出的基于搜索图的协同模式下的回字形扩展覆盖搜索算法区域覆盖耗时短、重叠率低,具有分布式、自主性、在线实时规划、抗毁性等特点。

关键词:区域覆盖;未知环境;回字形扩展搜索算法;无人机群;搜索图;分布式

中图分类号: TP13;V19

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6970.2023.01.015

本文著录格式: 刘建生,徐赛,王晨,等.一种面向未知环境的无人机群区域覆盖搜索算法研究[J].软件,2023,44(01):057-061+070

Research on Area Coverage Search Algorithm for UAVs in Unknown Environment

LIU Jiansheng^{1,2}, XU Sai^{1,2}, WANG Chen^{1,2}, HE Tao^{1,2}, LI Zhi^{1,2}, WEN Yingyou^{1,2}

(1.Cyberspace Security Professional Technology Innovation Center of Liaoning Province, Shenyang Liaoning 110169;

2.Neusoft Reserch, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110169)

[Abstract]: In recent years, with the rapid development of UAV technology, rotor UAV has been widely used in the field of search and rescue due to its advantages of flexibility, light weight and low cost. In this paper, the area coverage search task of UAV swarm is studied for unknown environment. Taking the shortest task time as the evaluation index of the algorithm, a backtracking extended search algorithm is proposed. Firstly, the traditional area coverage search algorithm and the algorithm proposed in this paper are introduced. Then the simulation environment model and algorithm model are established for the algorithm, and the experiment and result analysis are carried out by Monte Carlo method based on NetLogo simulation environment. Compared with the traditional random walk coverage search algorithm, the results show that the Hui extended coverage search algorithm based on the search graph cooperative mode proposed in this paper has short coverage time and low overlap rate. It has the characteristics of distribution, autonomy, online real-time planning and invulnerability.

[Key words]: regional coverage; unknown environment; backtracking extended search algorithm; UAV group; search graph; distributed

0 引言

近年来,自然灾害、人为事故频发,给人们的生命和财产带来了巨大的损失。无人机具有小型、造假低廉、环境适应能力强、使用便捷、起飞方式灵活、飞行方式多样等特点,在各类灾害、事故救援中发挥了重要

的作用^[1]。而在灾害、事故救援中,如何快速进行区域覆盖搜索,及时发现未知区域内的待救援目标,以便为后续救援人员提供目标位置,已成为重要的研究内容。基于无人机群的区域覆盖搜索主要研究无人机群如何按照某种搜索方法在待侦察区域飞行侦察中完成整个区域

基金项目:国家自然科学基金委员会—辽宁联合基金重点支持项目(U1808206)资助

作者简介:刘建生(1984—),男,高级工程师,研究方向:群体智能、边缘智能;徐赛(1989—),男,博士研究生,工程师,研究方向:边缘计算、人工智能;王晨(1987—),女,高级工程师,研究方向:人工智能、区块链;何涛,男,正高级工程师,研究方向:自然语言处理、计算机视觉;李志(1980—),男,博士,正高级工程师,研究方向:群体智能、边缘智能;闻英友(1974—),男,教授、博士生导师,研究方向:群体智能、大数据处理。

的完全覆盖搜索以找到待救援目标。

目前,面向未知环境的区域覆盖搜索算法,比较主流的是之字形扫描和螺旋形扫描等,在实际区域覆盖搜索中暴露出了鲁棒性低、抗毁性差、搜索效率低、任务成本高、搜索面积不均等多种问题^[2]。本文提出了基于搜索图的回字形扩展覆盖搜索算法,基于 NetLogo 仿真环境,结合以往的随机搜索算法进行了仿真对比。对比结果表明,回字形扩展覆盖搜索算法区域覆盖耗时短,大大提高了无人机群的区域覆盖搜索效率,突出了该算法的优势。

1 区域覆盖算法介绍

1.1 区域覆盖算法发展现状

基于无人机的区域覆盖搜索算法,按照控制方式的不同主要分为集中式和分布式两种。

集中式区域覆盖搜索算法需要中心控制节点,在事先知道待覆盖区域的形状、面积等先验信息的前提下,提前规划好各无人机的飞行路线,往往需要离线规划。集中式区域覆盖算法优点是重复覆盖区域少甚至完全没有。缺点是当通信距离受限时,需要线下规划,实时性较差。同时,由于事先规划好各无人机飞行路线,一旦某个无人机出现故障,则分配给该无人机的搜索任务则无法完成,无人机抗毁性较差。目前比较常见的算法是之字形搜索算法^[3]、螺旋形扫描搜索算法^[4]、分区域搜索算法^[5]和基于 Voronoi 图的分区搜索算法^[6]。

分布式区域覆盖搜索算法是分布式去中心化的,不需要提前知道待覆盖区域的形状、面积等先验信息。各无人机的搜索路线是自主规划的,无人机之间的协同是自组织的,不需要知道全局信息,只利用局部信息的共享就能做好下一步的搜索路线规划,实时性较强。在通信受限的情况下,也能很好地完成搜救任务。虽然有一定几率出现重复搜索问题,但可以通过无人机间的协同,极大降低这样的概率。由于灾难、事故现场往往通信条件差,现场环境比较复杂,分布式覆盖搜索算法以其能较好适应复杂环境的特点,成为目前主要研究趋势。文献[7]提出了一种一致性协议,实现多智能体协同的一致性,该算法虽然一定程度上符合分布式,但由于需要局部无人机之间进行协商,实际已经形成了一定的集中控制因素,并非完全的分布式方式。文献[8]通过对深海鱼群的聚集行为的研究,发现鱼群间保持着一定的吸引和排斥区,但吸引和排斥区的选择对算法的效果影响很大。此外,近年来有些研究人员尝试将深度学习、强化学习的方法应用到分布式无人机搜索算法中^[9],但由于无人机现有硬件条件的限制,这些方法存

在对训练和运行环境计算资源要求较高、算法验证周期长、算法泛化能力弱,不太适用于无人机特别是小型、微型无人机。

1.2 本文算法介绍

为了更好的阐述各覆盖搜索算法,这里先介绍几个概念:搜索图、通信半径和感知半径。

(1) 搜索图:无人机在搜索过程中,会以列表形式不断记录已搜索的区域的坐标点信息,形成搜索图。

(2) 通信半径:无人机在协同搜索过程中,会涉及到通信半径。通信半径即无人机之间通信时最长的有效通信距离。为了简化,本文假设通信半径范围内无人机之间的通信是理想的,不存在延迟、信息丢失等现象。

(3) 感知半径:也是无人机的搜索半径,是无人机能够通过传感器感知到待搜索区域内目标的最长距离。本文无人机的感知半径为九宫格范围,即围绕无人机周围的8个坐标点和无人机所在位置的坐标点形成的9个坐标点。

在对现有算法研究基础上,本文设计了回字形扩展区域覆盖搜索(Hui Diffusion, HD)算法。HD是以当前无人机为中心,以回字形方式不断向外逐渐扩大查询范围。HD看似与螺旋形搜索很相似,但实际完全不一样。HD查询过程中无人机是不动的,确定下一步要移向的坐标点之后无人机才会移动,极大降低了无人机的搜索试错成本和能源消耗。

为了简化算法运行场景,将待覆盖搜索区域设置为正方形区域,对区域进行坐标离散栅格化,且有边界。待搜索区域内的坐标点均为整数数值,无人机飞行经历的点是连续的,坐标值可以是浮点数。算法初始时,无人机聚集在待搜索区域的正中心坐标原点附近,飞机朝向随机。搜索开始后,无人机按照各算法的设计飞向不同的方向,无人机存储各自曾经搜索过的区域的坐标信息形成搜索图。无人机有区域边界检测能力,遇到边界会进行搜索路线调整。非协同模式下,各无人机之间不会共享各自存储的搜索图;协同方式下,无人机会将各自的搜索图共享给通信半径范围内的其他无人机。后文仿真环境章节会进行更为详细的描述。

为了与传统算法对比,本文在设计回字形扩展覆盖搜索算法时,也设计了经典的随机游走区域覆盖搜索算法。

1.2.1 随机游走区域覆盖搜索算法

随机游走区域覆盖搜索算法以当前无人机为中心,以某个扇形角度范围为转向区间进行转向,比如转向左右各30°形成60°范围内的转向范围,在转向范围内随机生成转向值进行转向,之后按照某个步长移动,移动过程中进行搜索操作并形成搜索图。无人机移动到下一

个点之后，继续转向、移动、搜索，如此周而复始直至完成整个区域的覆盖搜索。具体算法如下：

初始化时各无人机聚集在原点 (0,0) 附近，设转向角范围为 Φ ，初始值 $\Phi=30^\circ$ 。

(1) 将当前 UAV 所在的坐标点标记为已搜索，并加入到自己的搜索图中。

(2) 无人机在 $[-\Phi, \Phi]$ 闭区间范围内随机生成角度 θ ，无人机转动 θ ，移动一个步长，移动到下一个坐标点，进入步骤 3。

(3) 记录周围九宫格范围内的点的坐标加入到搜索图中。判断整个区域是否搜索完毕，如果是则停止算法，整个区域搜索完毕记录搜索耗时；如果否，则继续步骤 2。

随机游走算法中各无人机各自进行随机搜索，无人机之间不进行协同操作，不会共享搜索图信息。

1.2.2 回字形扩展覆盖搜索算法

回字形扩展覆盖搜索算法，各无人机以自己当前坐标为中心点，以 1 个单位的坐标距离为扩展查询距离呈回字形向外逐渐扩展查询。查询过程中，无人机是保持在当前位置瞬时不动的，查询到坐标点的集合中尚有未在自己搜索图中的点，则在这些点中寻找与当前无人机欧式距离最近的点作为下一步移向的点之后再行移动。距离当前无人机最近回字形扩展算法步骤如下：

初始化时无人机聚集在原点 (0,0) 附近，设搜索圈数为 n ，初始值为 $n=1$ 。

(1) 将当前 UAV 所在的坐标点标记为已搜索，并加入到自己的搜索图中。

(2) 是否为协同方式，如果否，进入步骤 3。如果是，则获取通信半径范围内的其他无人机共享的搜索图与自己的搜索图融合形成新的搜索图，进入步骤 3。

(3) 搜索当前 UAV 外围第 n 圈的坐标点，对比搜索图判断是否有未被搜索的点。如果没有进入步骤 4。如果有，则停止搜索，从这些点中选出距离当前 UAV 欧式距离最小的点作为当前 UAV 下一个搜索点，并且当前 UAV 移向该点，到达该点后依据本算法开启新一轮搜索。

(4) 判断区域内所有坐标点是否已被搜索，如果是，则算法停止，无人机完成整个区域的覆盖搜索任务。如果否，则 $n=n+1$ ，跳转到步骤 3。

如图 1 所示，当前无人机 A 的坐标为 (5,5)，向外扩展搜索，首先将无人机 A 所在的坐标点 (5,5) 设置为已搜索加入到搜索图。当搜索圈数 $n=1$ 时，无人机 A 搜索其周围的 8 个点，即点 (4,6)、(5,6)、(6,6)、(4,5)、

(5,5)、(6,5)、(4,4)、(5,4)、(6,4)，假设这些点已经被搜索过，即在搜索图中存有这些点的信息，跳转到步骤 3， $n=n+1$ ，此时 $n=2$ 。开始搜索第二圈，即搜索点 (3,7) 到点 (7,7) 再到点 (7,3) 再到点 (3,3)，最后回到 (3,7) 点形成的矩形。搜索这个矩形中的点，假设发现有未搜索的点，本示例为 (7,5) 和 (3,3) 两个点。将这两个点与当前无人机 A 的坐标 (5,5) 做欧式距离计算，发现 (7,5) 离 (5,5) 更近，则无人机将 (7,5) 点作为一个飞向的坐标点，停止搜索算法 (7,5) 点，到达该点后按上述算法开启新的搜索。以上步骤不断重复，直至区域内所有坐标点均已被搜索算法停止。

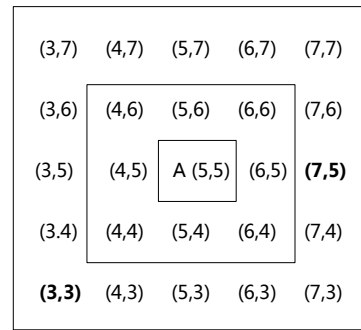


图 1 回形区域

Fig.1 Gyrate region

该算法的主要思想是让无人机尽量以当前无人机为中心向外围逐渐扩大搜索范围，让无人机每一步的移动距离最短。

2 算法仿真

2.1 仿真环境介绍

本文算法仿真环境采用的是 NetLogo 仿真平台。NetLogo 是研究基于多 Agent 的面向群体智能的主流仿真平台。经过 20 多年的发展，NetLogo 已被全球数千万学生、教师和研究人员用于教学、学习和研究当中。

2.2 仿真环境模型

2.2.1 仿真环境假设

为了重点关注算法核心内容，对仿真环境进行了一些假设，如下：

(1) 仿真环境为二维平面；

(2) 无人机为四旋翼无人机且均飞行在同样高度上，不考虑无人之间的碰撞。无人机匀速飞行，不考虑加速和减速阶段，飞行途中可以随意转向；

(3) 无人机间的通信有效性是 0 和 1，超过某个通信半径，完全不能通信。在通信半径范围内，通信是理想的，不考虑通信延迟和信号衰减；

(4) 无人机感知范围，感知范围只包含周围一圈的坐标范围。比如当前无人机坐标为 (0,0)，则其感知范围

为 $(-1,1)$, $(0,1)$, $(1,1)$, $(-1,0)$, $(0,0)$, $(1,0)$, $(-1,-1)$, $(0,-1)$, $(1,-1)$, 即九宫格范围;

(5) 相对待覆盖区域, 无人机群密度较为稀疏。每个时刻各无人机可覆盖面积之和, 相较于待覆盖区域面积小 $1 \sim 2$ 个数量级^[10];

(6) 区域内不存在无人机需要规避的危险区域, 无人机可在待侦察区域任意飞行。

2.2.2 仿真环境设计

本文仿真区域为二维平面, 在 NetLogo 仿真环境里称为世界 World。如图 2 所示, 世界为正方形平面, 是离散化、栅格化的, 尺寸为 $41 \text{ patch} \times 41 \text{ patch}$ 。每个 patch 为 1 个小正方形, 尺寸是 16 像素 \times 16 像素。坐标原点 $(0,0)$ 位于世界的正中心位置, 左上角坐标为 $(-20,20)$ 。世界是有边界的, 无人机无法飞跃世界最外侧的四条边。无人机数量为 20 架四旋翼无人机, 因为在抢险救灾过程中往往很难短时间内调集相对救灾场景高密度的无人机群, 这个数量比较贴近无人机密度较小的实际场景需求。无人机的每次移动的步长 step-size 为 1 个栅格的边长长度。设置完成后的图如图 2 所示。

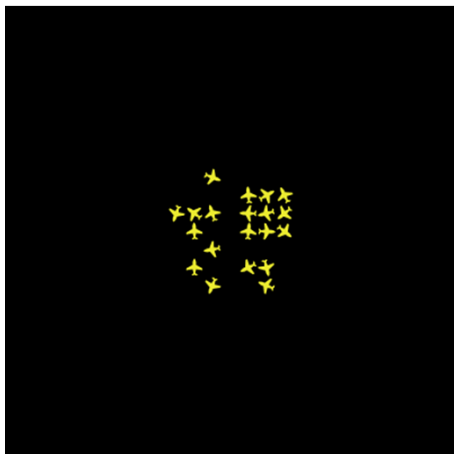


图 2 仿真环境初始化

Fig.2 Initialization of simulation environment

初始化时 20 架无人机聚集在世界原点位置, 二维地图黑色部分代表无人机未搜索过的区域。无人机开始搜索时, 会根据算法, 飞向世界的各个区域, 搜索到的区域会变为白色。无人机之间可以进行通信, 通信半径可动态设置。

NetLogo 仿真环境有时间概念, 以 ticks 嘀嗒来计时, 每嘀嗒一次, 时间向后推进一个单位。仿真过程中, 各个算法利用 NetLogo 自带的行为空间工具, 采用蒙特卡洛模拟统计方法进行大量重复试验。每个试验重复 3000 次, 区域全覆盖耗时取 3000 次的算数平均值。部分算法存在迟迟无法完全覆盖搜索区域的现象,

比如随机游走算法, 某些时候完成区域覆盖可能需要 2000 ticks 以上。为了减少这种超时覆盖情况, 加速仿真速度, 则需要控制 ticks 上限, 不能让仿真程序“无休止”的运行下去。某次运行时间超过该上限值, 则本次仿真强制结束, 所记录的 ticks 值采用均值过滤方式进行过滤处理。

2.2.3 算法评价指标

算法以无人机群覆盖搜索整个仿真区域的耗时为评价指标, 耗时越短算法相对越具有时间上的优势。即当同样数量的无人机构成的无人机群, 采用不同算法对仿真区域进行覆盖搜索, 搜索完成时, NetLogo 中的 ticks 计时器数值越小越好。

3 仿真结果分析及对比

算法仿真过程中, 我们增加了传统随机游走算法的仿真, 将随机游走覆盖搜索算法与回字形扩展覆盖搜索算法进行了简单的对比。

3.1 无人机通信半径

在协同模式下无人机间的最佳通信距离会影响算法的整体效果, 本文需要对有效通信距离进行简单分析。

经过大量试验尝试发现, 协同方式下, 通信距离、世界尺寸、无人机数量, 都会影响算法效果。为了简化算法对比, 本文将世界尺寸、无人机数量固定, 只关注通信距离对算法的影响。试验发现, 在协同模式下回字形覆盖搜索算法中, 算法的耗时随着无人机的有效通信半径的增加, 开始时会逐渐降低, 当通信半径超过某个阈值之后则会呈现小幅区间震荡。阈值半径值大概为世界边长的 36% 左右, 也即通信半径为 15 个 patch 长度时是最佳通信半径。该通信半径既能保证算法运行结果的理想度, 实际当中也能最大程度地减少由于通信半径增加功率过大带来的能量消耗。也即通信距离增加会缩短区域覆盖耗时, 但不能无限缩短, 当距离大于某个值后, 再增大通信距离, 不会继续缩短覆盖耗时。

3.2 随机游走覆盖搜索算法

随机游走覆盖算法无人机之间不共享搜索图信息, 即无人机之间是非协同的。如图 3 所示是随机游走法无人机群的区域覆盖搜索的二维仿真图, 图中显示的是大部分区域已经被搜索完毕, 只剩余少量区域待搜索。

图 3 中的线条为各无人机的搜索轨迹, 白色区域为无人机已搜索区域, 黑色区域为待搜索区域。从图 3 中可以直观看出, 随机游走算法每一步方向选择上均有一定的偏角, 一定程度上增加搜索的随机性, 扩大了搜索范围。随机游走搜索过程中存在一定的飞行线路重叠。通过蒙特卡洛方法, 完成所有区域搜索, 随机游走算法

完成整个区域的覆盖搜索平均耗时为 334.6 ticks。

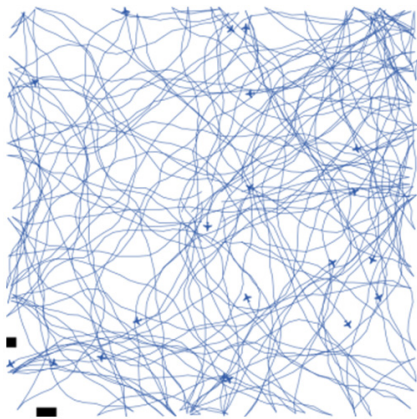


图 3 随机游走算法

Fig.3 RW algorithm

3.3 回字形扩展覆盖算法

回字形扩展算法分为协同和非协同两种模式。如图 4、图 5 所示，分别是协同和非协同模式下的距离当前无人机最近回字形扩展算法的仿真图。

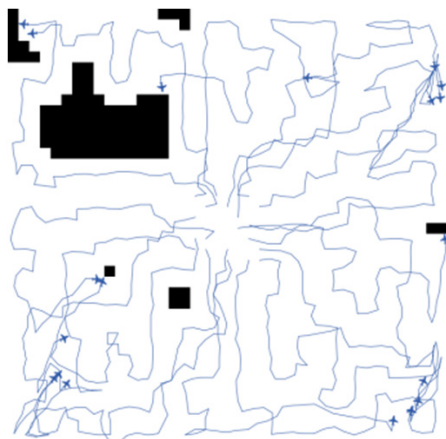


图 4 协同模式

Fig.4 Co-HD-CTC



图 5 非协同模式

Fig.5 NCo-HD-CTC

试验结果显示回字形扩展覆盖搜索算法，协同模式下完成整个区域覆盖搜索所需平均耗时为 74ticks，非协同模式下平均耗时为 197.3ticks。非协同模式下区域覆盖耗时较长，原因是因为搜索图信息未在无人机间进行共享，提高了无人机对其他无人机已经搜索过的区域进行重复搜索的概率，进而增加了覆盖搜索耗时。从图 4 和图 5 对比能看出，明显图 5 非协同模式下无人机飞行重叠区域较多。

3.4 算法对比

本节对随机游走覆盖搜索算法、协同和非协同两种模式下的回字形扩展搜索算法完全覆盖区域平均耗时进行对比如表 1 所示。

表 1 算法耗时对比

Tab.1 Time consumption of each algorithm

算法名称	协同模式	总耗时 (tick)
随机游走覆盖搜索	非协同	334.6
	协同	74
回字形扩展覆盖搜索	非协同	197.3

通过上表对比分析可知：

(1) 对未知区域进行完全覆盖搜索耗时，回字形扩展覆盖搜索算法在协同和非协同两种模式下较传统的随机游走算法降低了 77.9% 和 41%，大大缩短了区域覆盖搜索耗时；

(2) 回字形扩展覆盖搜索算法协同模式较非协同模式耗时要短，大概缩短了 62.5%。

回字形扩展覆盖搜索算法相比于随机游走算法大大缩短了区域覆盖所需时间。协同模式下的回字形扩展覆盖搜索算法属于分布式算法，无人机只需要利用局部共享信息即可完成搜索路线的规划，较非协同模式算法耗时短，搜索路线重叠率低，具备较强的自主性、在线实时规划、抗毁性等特点，算法优势较为明显。

4 结语

本文针对未知环境的区域覆盖搜索问题设计了回字形扩展区域覆盖搜索算法，按照无人机间是否共享信息该算法分为协同和非协同两种方式。连同传统的随机游走搜索算法，基于 NetLogo 多 Agent 仿真平台，通过蒙特卡洛方法对这些算法进行了仿真对比。对比分析后发现基于搜索图的协同方式下的回字形扩展算法表现最优，该算法具有分布式、自主性、在线实时规划、抗毁性等特点。下一步将在该算法基础上，考虑非规则区域边界和算法移动点随机性选择方面继续深入研究。

..... 下转第70页

导游评价游客完成评分与评价并提交，在导游系统中将生成新的导游评分列表，如图 10 所示。

导游资料详情

姓名	李阳	导游证
性别	男	年龄
手机号	147****5521	

评分及评价

综合评分

★★★★★ 满意

全部评价

张峰

2022-07-06 11:25:50

★★★★★ 一般

服务较好

张峰

2022-07-06 10:44:21

★★★★★ 惊喜

很好

图 10 导游信息列表中评分与评价界面

Fig.10 Scoring and evaluation interface in tour guide information list

在本系统中，游客通过访问页面来查阅导游的部分真实信息，同时可以查看导游评价记录，为其他游客选择导游做参考。游客对导游信息的预览及预订后，系统中显示导游的真实信息，包括邮箱、联系方式等信息，

为导游与游客提供更好的联系渠道。当导游服务结束后，由双方共同进行服务结束确认，游客在服务后可进行对导游的评价，并同步更新在导游的信息列表中。通过平台的设计，能够对导游服务的线上服务监督功能，为游客选择更可靠的导游服务提供良好的保障。

5 总结

本文主要研究一种导游与游客之间交互的新渠道，利用网络平台资源可以实现导游资源的共享模式，作为消费者的游客通过导游信息库查询并预订导游，通过在线式评价与评分系统，将导游的服务满意度体验利用网络环境的公开、透明的特点实现公众化，通过这种网络渠道有助于实现未来对导游服务质量的改进与提高。

参考文献

[1] 潘成斌.改革开放以来中国旅游政策演进研究[D].兰州:西北师范大学,2021.

[2] 石磊,冯怡欣.导游执业自由化的发展现状及对策研究——以无锡为例[J].湖北开发职业学院学报,2021,34(04):102-104.

[3] 吴聪.探究旅行社导游服务质量提升面临的问题与解决策略[J].西部旅游,2021(02):67-68.

[4] 国家图书馆研究院.《中华人民共和国文化和旅游部2020年文化和旅游发展统计公报》发布[J/OL].国家图书馆学刊,2021(4):75.[2023-01-09].http://zwgk.mct.gov.cn/zfxxgkml/tjxx/202107/t20210705_926206.html.

..... 上接第61页

参考文献

[1] 崔怀森,李向新,郭晓乐.现代化无人机技术在河湖划界方面的应用[J].软件,2020,41(10):187-190.

[2] 韦定江,魏霄冉,蒋晓刚,等.基于5G通信网络条件下的无人机海上搜救方案[J].软件,2021,42(06):145-150.

[3] FRANCO C D,BUTTAZZO G.Coverage Path Planning for UAVs Photogrammetry with Energy and Resolution Constraints[J].Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2016,83(3/4):445-462.

[4] CABREIRA T M,FRANCO C D,FERREIRA P R,et al. Energy-aware Spiral Coverage Path Planning for UAV Photogrammetric Applications[J].IEEE Robotics and Automation Letters,2018,3(4):3662-3668.

[5] 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[J].中国科学(技术科学),2020,50(4):439-452.

[6] YANG C M,DU L M,LI C.Methods and Efficiency

Comparison of UAV Swarms Collaborative Search in Unknown Area[J].Aeronautical Science & Technology, 2019,30(10):56-63.

[7] REZAEI H,ABDOLLAHI F.Average Consensus Over High-order Multiagent Systems[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2015,60(11):3047-3052.

[8] JOLLES J W,BOOGERT N J,SRIDHAR V H,et al. Consistent Individual Differences Drive Collective Behavior and Group Functioning of Schooling Fish[J].Current Biology, 2017,27(18):2862-2868.

[9] 李波,杨志鹏,贾卓然,等.一种无监督学习型神经网络的无人机全区域侦察路径规划[J].西北工业大学学报,2021,39(1):77-84.

[10] 任少睿,陆忠梅,石远明,等.一种基于信息素图的无人机高效通信覆盖方法[J].航空学报,2022,43(2):332-346.