

基于Dijkstra-ACO混合算法的应急疏散路径动态规划

曹祥红* 李欣妍 魏晓鸽 李 森 黄梦溪 李栋禄

(郑州轻工业大学建筑环境工程学院 郑州 450000)

摘 要: 现代建筑设计趋于多样化, 内部结构和功能越来越复杂, 而传统疏散系统逃生指示方向固定、人员疏散时间较长, 火灾发生时, 不能够及时改变指示方向, 易将逃生人员导向危险区域, 威胁被困人员生命安全。该文提出了一种Dijkstra-ACO混合路径动态规划算法, 在Dijkstra算法获得全局最优路径的基础上再采用蚁群优化(ACO)算法对每个节点进一步优化以获取最优路径, 并节省算法运行时间。通过实验仿真验证了混合算法的有效性, 能够根据起火点动态规划疏散路径, 及时调整疏散指示方向, 为火场中人员疏散逃生赢得宝贵时间。

关键词: 应急疏散路径; 动态规划; Dijkstra算法; 蚁群优化算法

中图分类号: TP312

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)06-1502-08

DOI: 10.11999/JEIT190854

Dynamic Programming of Emergency Evacuation Path Based on Dijkstra-ACO Hybrid Algorithm

CAO Xianghong LI Xinyan WEI Xiaoge LI Sen
HUANG Mengxi LI Donglu

(School of Building Environmental Engineering, Zhengzhou University of
Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: With an increasing diversity in modern architectural design, the inner structure of buildings is much more complex than before, which makes the traditional fire emergency escape indication system fail to provide people with real-time instructions because of its inflexibility of changing direction. These failures always lead people to dangerous areas during a fire emergency, which is actual a threaten to people in buildings. A combined algorithm to find a path dynamically during a fire emergency based on Dijkstra and Ant Colony Optimization (ACO) algorithm is presented in this article. This new algorithm shortens the programming time by getting a globally optimal path based on Dijkstra algorithm and operates every single point with ACO algorithm in sequence to get a best path. The combined algorithm is tested by a simulation, in which it is proved effective in adjusting evacuation path depending on the point of ignition. The changeable real-time indication will extend the escaping time with people in a burning building, which is quite precious for saving lives.

Key words: Emergency evacuation path; Dynamic programming; Dijkstra algorithm; Ant Colony Optimization (ACO) algorithm

1 引言

近年来, 我国经济建设取得重大突破, 城市发展进入新的阶段。随着经济的迅速发展, 大型便民

公共建筑物的总体设计更加复杂, 这就加剧了建筑安全隐患问题, 建筑物火灾是威胁公众安全和社会发展的主要灾害之一^[1]。传统应急照明和疏散指示往往是利用疏散指示装置占据的有利空间位置和其不间断电源的有利条件起到应急疏散的作用, 但当发生火灾时, 其指引的路线是通向安全路径还是着火点则并不确定, 即使有安全出口标志和消防疏散指示灯, 仍有可能会误导人员引向危险区域。因此对于能够实现应急疏散路径动态规划的新型智能消防应急照明及疏散指示系统的研究重要性与日俱增^[2]。

路径规划通常指的是距离最短路径规划, 而应

收稿日期: 2019-11-01; 改回日期: 2020-05-08; 网络出版: 2020-05-17

*通信作者: 曹祥红 caoxhong@zzuli.edu.cn

基金项目: 河南省科技攻关项目“高层住宅建筑家庭集聚疏散行为的实验与模拟研究”(172102310670)

Foundation Item: The Science and Technology in Henan Province Project “An Experimental and Simulated Study on Family Agglomeration and Evacuation Behavior in High-rise Residential Buildings” (172102310670)

急疏散路径规划需要考虑建筑实际情况和灾害现场等因素, 疏散路径的确定存在着许多困难, 众多学者对应急疏散路径规划算法也进行了一系列的深入研究。目前常采用的传统算法如可视图法、栅格法、Dijkstra算法等, 以及粒子群算法、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO)等智能算法^[3,4], 这些算法在规划全局路径最短时都有很好的效果, 也实现了盲目搜索向启发式搜索的发展, 但都假定在局部路径最优的基础上。而随着建筑功能日益复杂, 单一的某种算法在对于楼宇内部的拓扑分析和建模过程中求解效率并不尽如人意, 甚至造成误差与绕行的可能^[5]。

Dijkstra算法是一种典型的单源点最短路径算法, 采用贪心思想, 以起始点为中心向外层层拓展, 直到拓展到终点为止, 其求解最短路径的原理是采用遍历搜索方式, 具有可靠性高、鲁棒性好的特点, 被广泛应用于路径优化中, 如在机器人路径规划、GIS网络分析问题、AGV路径规划以及城市交通路径分析中得到了广泛应用^[6,7], 但存在着时间复杂度高、搜索效率低、占用内存大的缺点。启发式算法ACO模拟了生物界蚂蚁觅食过程中的种群行为, 属于群智能仿生算法^[8], 它的优点在于具有正反馈性、并行性、强鲁棒性, 可以不断扩大初始的不同信息素, 能很好解决全局最优问题, 并且容易与其他启发式算法进行结合, 引导群体算法向目标最优解的方向进化, 如将蚁群与粒子群或遗传算法融合应用于对室内移动机器人、泊车系统等路径规划问题当中^[9-13], 缺点则是收敛速度慢, 容易陷入局部最优。

本文融合了传统的Dijkstra算法和ACO智能仿生算法的优点, 提出了一种新的混合算法以实现应急疏散路径的动态规划。采用典型最短路径算法Dijkstra算法与GA, ACO等仿生智能算法分别进行了仿真实验对比, 在此基础上提出了Dijkstra-ACO混合算法, 并将其应用于应急疏散路径规划问题中, 选取Dijkstra算法规划出逃生人员的初始路径, 再使用ACO算法对初始规划路径进行优化, 仿真结果证明了混合算法的有效性。

2 应急疏散环境与建模

2.1 环境描述

为了实现算法在建筑楼宇内应急疏散路径规划中的应用, 需要对环境进行如下假设^[14]:

(1) 假设应急疏散环境为某建筑物内某层俯视图即2维平面图;

(2) 假设图中房间为障碍物, 位置确定, 以多边形表示;

(3) 假设人员在应急疏散环境内匀速前进, 忽略人员因心理因素摔伤昏厥等情况;

(4) 将逃生人员视为质点, 便于仿真。

2.2 环境建模

根据楼宇的照明平面图, 将房间视为障碍物, 通过链接可视图法创建应急疏散环境模型, 图1为采用链接可视图法在MATLAB环境下创建的环境模型^[15], 模型规格为20 m×20 m, 其中黑色多边形表示障碍物区域, 白色空白区域为逃生人员可行区域。图中各障碍物区域以及边界区域顶点之间的虚线已略去。

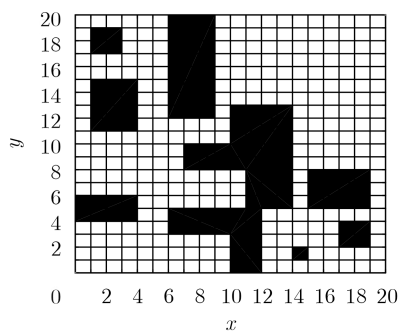


图1 应急疏散环境模型

3 Dijkstra算法和传统蚁群算法

3.1 Dijkstra算法

单源点最短路径算法Dijkstra算法最初是由荷兰计算机科学家E.W.Dijkstra提出的。文中采用该算法规划逃生人员从所在位置 S 到逃生出口 ρ 的路径, 算法实现流程如下^[15,16]:

S 集合记录已经求出最短路径的顶点以及起点与其他各顶点之间的暂时最短路径, U 集合记录还未求出最短路径的顶点以及起点与其他各顶点之间的距离。

Dijkstra算法的操作步骤:

步骤1 初始化: 集合 S 中仅含有起点 s ; 集合 U 中则含有除 s 以外的其它所有顶点, 将各个顶点距离标记为“起点 s 到该顶点的距离”, 不直接相连标记为无穷大。即: $S\{s\}$, $U\{s\}$ = 其他顶点, $d_s = 0$ 。源点标号为 s , 剩余其它点尚未处理。

步骤2 查验 U 中其它所有点到源点 s 的距离, 选出距离最小顶点 k , 将点 k 加入到集合 S 中, 并从集合 U 中删除顶点 k 。即

$$d_{sk} = \min [d_{sj}] \quad (1)$$

步骤3 更新源点 s 到集合 U 中所有其它各顶点的距离。步骤2确定了 k 是最短路径中的顶点, 可能

存在前一顶点即步骤2源点 s 经过顶点 k 到达下一顶点的路径长度比直接到达下一顶点的路径长度小, 所以需要再次更新最短路径, 判定标准是距离最小化, 即

$$d_{sv} = \min [d_{sv}, d_{sk} + d_{kv}] \quad (2)$$

步骤4 重复前两步, 直到遍历完所有顶点结束, 最后结果为 S 集合包含所有顶点, U 集合为空。 S 集合中的距离即为源点 s 到各顶点的最短距离。

3.2 ACO算法

ACO算法最早是为了解决TSP问题(即旅行商问题)^[17,18]。传统蚁群算法的基本原理是: 蚂蚁在觅食过程中, 各蚂蚁间通过遗留在路线上的信息素相互传递信息并根据信息素强度的高低来指引下一步行进方向, 基于这种正反馈机制, 最终搜索出一条最短路径^[19-24]。通常情况下, 食物周围环境是未知的, 在选择路径时, 蚂蚁需要根据转移概率 p_{ij} 来确定, 状态转移概率可由式(3)计算得到

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j \in a_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}, & j \in a_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $a_k = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 表示下一步允许选择的节点集合。 $\tau_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻蚂蚁 k 遗留在路径 (i, j) 上的信息素。 $\eta_{ij}(t)$ 表示距离启发函数因子, 通常用 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, d_{ij} 表示节点 i, j 间的距离。 α 为蚂蚁信息素轨迹的相对重要性因子。 β 为启发函数的相对重要性因子。

随着时间的推移, 蚂蚁遗留在路线上的信息素会逐渐挥发丢失, 为避免因信息素量过多或过少而影响蚂蚁节点选择, 在蚂蚁完成1次循环后, 须通过式(4)对可行路径上的信息素进行调整, 调整后的信息素及增量表示为式(5)、式(6)

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+1) \quad (4)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) \quad (5)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) = \begin{cases} \frac{C}{L_k}, & \text{第} k \text{只蚂蚁在本次循环经过路径}(i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, ρ 表示信息素挥发系数。 $\Delta \tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 (i, j) 上的信息素。 $\Delta \tau_{ij}$ 表示在本次循环中蚂蚁遗留在路径 (i, j) 上的信息素增量。 L_k 表示第 k 只蚂蚁完成1次循环的路径长度。 C 为常数。

4 基于Dijkstra和ACO混合算法

在应急疏散路径规划中, 选用传统ACO算法虽然能够规划出一条从起始位置到目标位置的路径, 但依然存在一些不足, 即全局搜索能力弱、收敛速度慢、搜索效率较低、容易出现早熟或停滞以及易陷入局部最优等。针对以上问题, 可采用结合Dijkstra算法与传统ACO算法, 在使用Dijkstra搜索到全局最短路径后, 采用ACO算法对全局最短路径中的各段路径进一步进行优化, 从而更快速得到最优路径。

4.1 节点选择与信息素更新

蚂蚁选择路径的方式, 可根据确定性的信息素浓度来决定, 也可按照状态转移概率进行选择, 是通过设定蚁群的极限感知阈值 ρ_0 和随机数 r 来确定的, ρ_0 的大小决定了蚁群在选择路径的初始阶段的随机性大小。

设 m 为建筑内待疏散的人员总数, 则可得 m 的表达式(7)

$$m = \sum_{i=1}^n b_i(t) \quad (7)$$

其中, n 表示建筑物中疏散结点的总数量。 $b_i(t)$ 表示 t 时刻位于结点 i 的疏散人数。

在初始时刻各条疏散通道上信息素的浓度相同, $\tau_{ij}(0) = C$, C 为常数。设 $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻通道 E_{ij} 上信息素的浓度, 疏散人员 k 当前所走过的节点用禁忌表 Tabu_k 来记录。

疏散人员在疏散过程中, 根据各条疏散通道上信息素的浓度 $\tau_{ij}(t)$ 和启发信息 $\eta_{ij}(t)$, 利用自适应伪随机比例选择规则来确定其行进方向, 即疏散人员 k 按以下概率从节点 i 转移到节点 j , j 的表达式为式(8)

$$j = \begin{cases} \max \{ \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t) \}, & s \in a_k, r > \rho_0 \\ \text{按状态转移概率} p_{ij}^k(t) \text{选择} j, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\max \{ \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t) \}$ 表示在与节点 i 相连通的疏散通道集合中, 具有最大信息量的通道的对应节点, α 和 β 分别是信息启发式因子和期望启发式因子。

定义 ρ_0 为疏散人员对信息素感知的最小阈值, r 为区间 $(0, 1)$ 中均匀分布的随机数, 当 ρ_0 大于或等于 r 时, 蚂蚁就会按 $\max \{ \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t) \}$ 确定性的选择信息素浓度最大的路径; 当 ρ_0 小于或等于 r 时, 蚂蚁就要按照式(9)的状态转移概率随机选择一条路径前进

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in a_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & j \in a_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $a_k = \{U - \text{Tabu}_k\}$, 代表被疏散人员 k 下一步允许选择的节点的集合。

当蚁群整体在完成本次迭代路径搜索后, 选取本次迭代所有路径中长度最短的一条, 并对该条路径上每一点的信息素进行全局更新, 信息素更新可按照式(10)计算, 信息素更新为式(11)

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t, t+1) \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \frac{1}{L_l} \quad (11)$$

其中, L_l 表示本次迭代所有蚂蚁搜索到的最优路径长度。

4.2 算法实施流程步骤

- (1) 采用链接可视图法建立环境模型;
- (2) 利用Dijkstra算法规划出一条逃生人员从起点至终点的初始路径;
- (3) ACO算法参数初始化;
- (4) ACO算法开始搜索, 蚂蚁根据当前节点位置 i 按照式(4)选择下一节点 j ;
- (5) 下一节点 j 确定后, 蚂蚁需对刚走过的路径 (i, j) 上的信息素进行局部更新;
- (6) 判断蚂蚁是否到达终点, 若是, 则转至(7), 否则转至(4);
- (7) 统计当前 m 只蚂蚁搜索到的最优路径, 选出其中长度最短的一条, 将其代入式(10)和式(11), 更新全局信息素;
- (8) 判断迭代次数是否满足 $\text{iter} \leq \text{NC}$, 若是, 则转至(4), 否则程序结束, 输出结果。

算法流程图如图2。

5 算法仿真实验

为了验证混合算法在应急疏散路径规划中的可行性, 采用MATLAB 对Dijkstra算法、ACO和Dijkstra-ACO混合算法分别进行仿真实验。考虑GA是仿生学的算法且有比较强的全局搜索能力和鲁棒性^[25], 通过模拟自然进化过程搜索最优解, 与ACO都为随机算法, 因此选择Dijkstra-GA混合算法对实验进行对比验证。Dijkstra-GA混合算法通过Dijkstra算法预计算出一个合适的解, 作为遗传算法的初始DNA, GA随机构造一条路径, 这条路径通过交叉变异, 不断优化。

实验所采用的软件版本为MATLAB 2016a, 计算机硬件为Intel Core i5处理器, 8 G内存。环境模型如图1所示, 实验过程中的起点为(0.5, 19.5)即应急指示灯所在位置, 终点为(19.5, 0.5)即安全出口位置, 黑色多边形表示障碍物, 浅色实线表示相应算法所规划出的最短应急疏散路径。

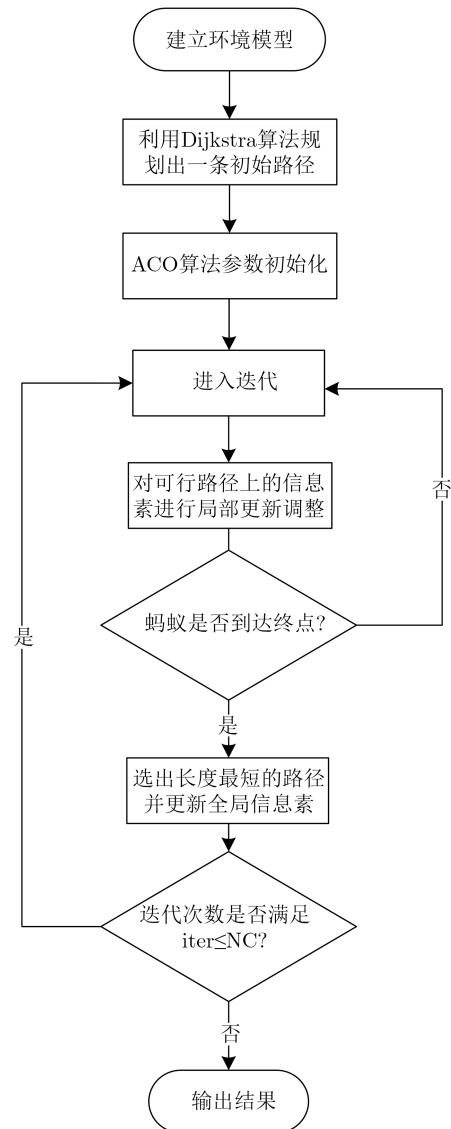


图2 Dijkstra-ACO混合算法流程图

(1) Dijkstra算法仿真实验: 图3表示使用Dijkstra算法规划的应急疏散路径, 该算法规划出最短路径为41.6813 m, 算法运行时间是0.237 s。从图3(a)中可以看出在障碍物稀疏时, 所规划出的局部路径并非最优。由于Dijkstra算法是在计算了所有节点中任意点到起点的最短距离后获得起点到终点的最优路径, 因此图3(b)中收敛曲线变化趋势为直线。

(2) ACO算法仿真实验: 图4表示使用ACO算法规划的应急疏散路径, 该算法规划出的最短路径为36.3848 m, 而算法运行时间为19.804 s。从图4(a)中可以看出在障碍物密集时, 所规划出的局部路径并非最优, 图4(b)可以看出蚁群算法收敛较慢, 由于需要对所有节点进行迭代求解, 因此算法运行时间过长。

(3) 混合算法仿真实验: 图5表示使用Dijkstra-ACO混合算法规划的应急疏散路径, 该算法规划

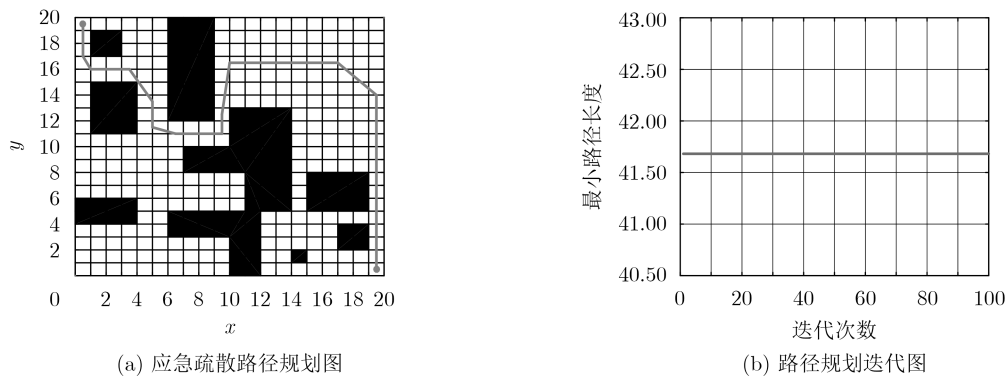


图3 Dijkstra算法仿真结果

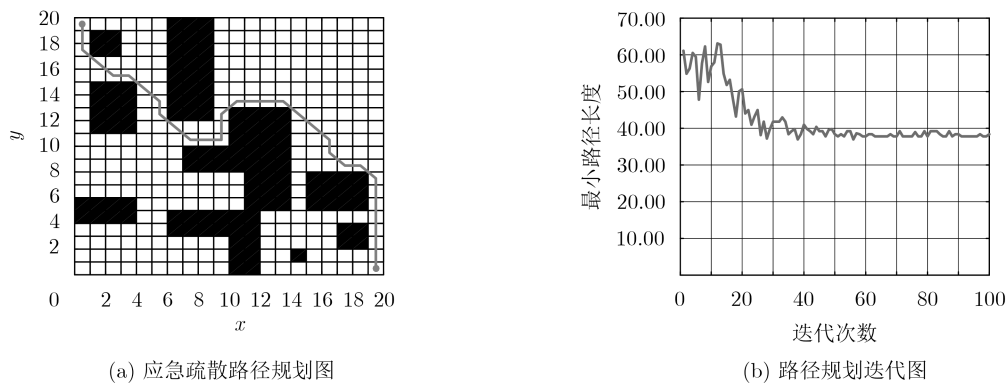


图4 ACO算法仿真结果

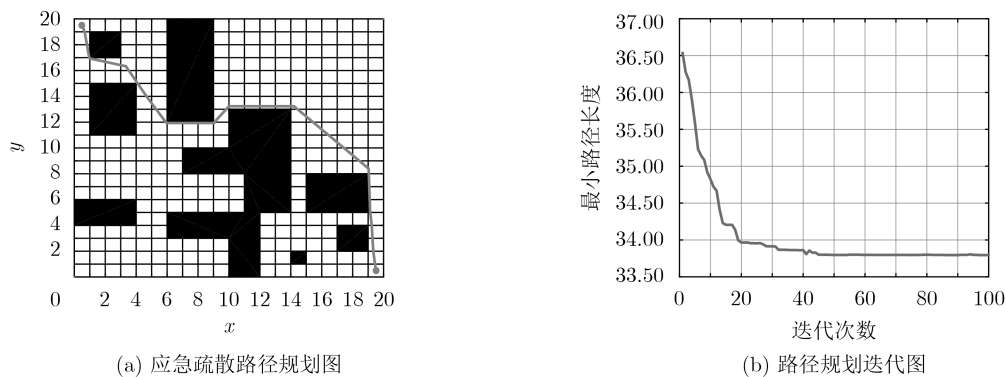


图5 Dijkstra-ACO混合算法仿真结果

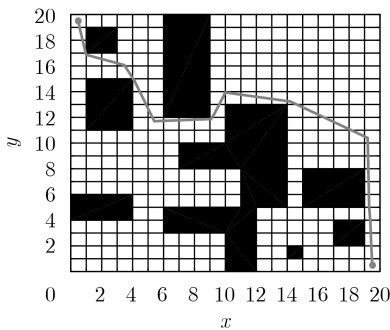
出的最短路径为33.8043 m, 算法运行时间为1.175 s。从图4(a)中可以看出在无论是在障碍物密集还是稀疏处, 所规划出的路径均是最优的, 图5(b)可以看出, Dijkstra-ACO混合算法很快就可以收敛。

图6表示使用Dijkstra-GA混合算法规划的应急疏散路径, 该混合算法规划出的最短路径为35.9051 m, 算法运行时间为5.173 s。从图6(a)中可以看出这个算法所规划出的路径产生了拐点, 路径长度变大, 易引起方向上的混淆, 从图6(b)可以看出, Dijkstra-GA混合算法的前期收敛极快, 而后开始趋于平缓, 存在过早收敛也会带来局部最优的问题。

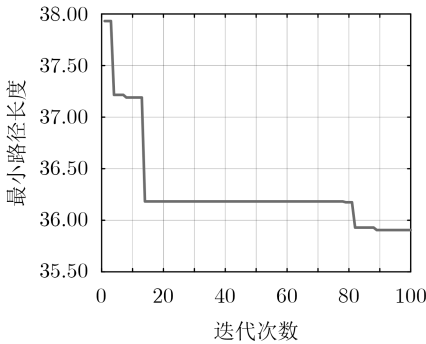
(4) 仿真结果对比分析: 对比图3—图6可以发现, Dijkstra算法虽然计算速度快, 但是其规划的路径太长, 这是由于算法限制导致其在障碍物稀疏时不能得到局部最优路径。ACO算法虽然缩短了规划路径的距离, 但是需要过长的计算时间, 在障碍物密集处所规划的局部路径也并非最优。Dijkstra-GA混合算法运行时间相对较快, 距离也比前两种算法更短, 但其在路径规划上并非最优。Dijkstra-ACO混合算法是在Dijkstra算法获得全局最优路径的基础上再采用ACO对每个节点进一步优化, 规划的路径最短且明显优于其他3种算法, 收敛速度较快。Dijkstra-ACO混合算法在获取最优路径的同

时大大节约了算法计算时间，算法运行时间仅高于Dijkstra，远低于ACO，路径规划能力综合最优。4种算法仿真实验结果对比如表1。

将起点(0.5, 19.5)看作指示灯，在未起火时，指示灯所指向的两个方向(x 正方向和 y 负方向)都为亮。假设图7点(2.5, 17)附近为着火点，(19.5, 0.5)为安全出口位置。火灾发生时，由着火点区域内的传感器向控制台发送危险信号，控制台获取火场信息后，采用Dijkstra-ACO混合算法立即对疏散路径重新进行规划，选择可通行最短路径，熄灭指向不可通行路径方向(y 负方向)的指示灯。利用混合算法动态规划路径，改变应急指示灯指向，从而达到动态疏散，指引逃生人员及时到达安全出口。



(a) 应急疏散路径规划图

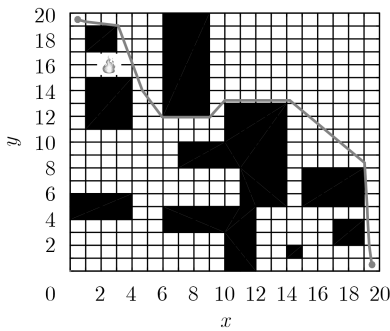


(b) 路径规划迭代图

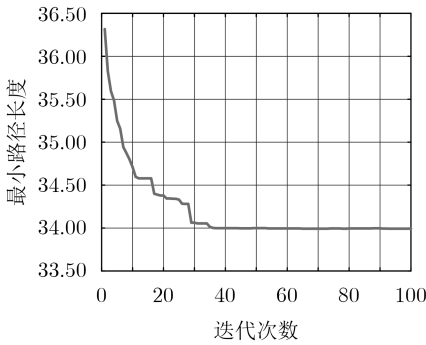
图6 Dijkstra-GA混合算法仿真结果

表1 4种算法仿真结果

	Dijkstra	ACO	Dijkstra-ACO混合算法	Dijkstra-GA混合算法
运行时间(s)	0.237	19.804	1.175	5.134
最短路径(m)	41.6813	36.3848	33.8043	35.9051



(a) 应急疏散路径规划图



(b) 路径规划迭代图

图7 假设着火点位置混合算法仿真结果

参考文献

[1] 十一届全国人大常委会第二十一次会议举行第二次全体会议听取关于消防工作情况的报告[J]. 中国消防, 2011(13): 4-5.
The 21st meeting of the Standing Committee of the 11th National People's Congress holds the second plenary session

6 总结

本文提出了将经典Dijkstra算法与ACO相结合应用于应急疏散路径规化问题当中。在算法迭代进程中利用Dijkstra算法依次通过路径相关节点，以生成初始次优路径；在初始路径的基础上，应用ACO求解出全局最优路径。通过进行仿真实验对比，验证了Dijkstra-ACO算法在应急疏散路径规划收敛速度和路径长度方面综合最优，证明了动态疏散的可行性。但是在研究中尚未考虑人的心理生理因素以及公共场所内障碍物的影响因素，在后续的研究中还需要对每条路径上权值的影响因子进行探索，以减小算法的误差。

to hear a report on the work of fire protection[J]. *China Fire*, 2011(13): 4-5.
[2] 雷春英. 基于改进蚁群算法的火灾疏散路径优化研究[D]. [硕士论文], 武汉理工大学, 2014.
LEI Chunying. Route optimization of fire evacuation based

- on improved ant colony algorithm[D]. [Master dissertation], Wuhan University of Technology, 2014.
- [3] 于振中, 李强, 樊启高. 智能仿生算法在移动机器人路径规划优化中的应用综述[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(11): 3210–3219. doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.07.0483.
- YU Zhenzhong, LI Qiang, and FAN Qigao. Survey on application of bioinspired intelligent algorithms in path planning optimization of mobile robots[J]. *Application Research of Computers*, 2019, 36(11): 3210–3219. doi: 10.19734/j.issn.1001-3695.2018.07.0483.
- [4] 杨雁莹, 徐仙伟, 曹霖. 基于仿生理论的新型优化算法综述[J]. 计算机仿真, 2016, 33(6): 233–237, 293. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2016.06.051.
- YANG Yanying, XU Xianwei, and CAO Ji. Overview of new optimization algorithms based on bionic theory[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(6): 233–237, 293. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2016.06.051.
- [5] 何梦男, 付瑜玲, 陈诚, 等. 基于元胞自动机的应急疏散最短路径优化算法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 51–57. doi: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.04.009.
- HE Mengnan, FU Yuling, CHEN Cheng, *et al.* Shortest path optimal algorithm for emergency evacuation based on cellular automata[J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29(4): 51–57. doi: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.04.009.
- [6] 任伟建, 左方晨, 黄丽杰. 基于GIS的Dijkstra算法改进研究[J]. 控制工程, 2018, 25(2): 188–191. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.150340.
- REN Weijian, ZUO Fangchen, and HUANG Lijie. The improvement research of Dijkstra algorithm based on GIS[J]. *Control Engineering of China*, 2018, 25(2): 188–191. doi: 10.14107/j.cnki.kzgc.150340.
- [7] 张银铃, 牛小梅. 蚁群算法在移动机器人路径规划中的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(6): 231–234. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2011.06.057.
- ZHANG Yinling and NIU Xiaomei. Simulation research on mobile robot path planning based on ant colony optimization[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(6): 231–234. doi: 10.3969/j.issn.1006-9348.2011.06.057.
- [8] 陈月云, 简荣灵, 赵庸旭. 基于快速群体智能算法的毫米波天线设计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(2): 493–499. doi: 10.11999/JEIT170455.
- CHEN Yueyun, JIAN Rongling, and ZHAO Yongxu. Millimeter wave antenna design based on fast swarm intelligence algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(2): 493–499. doi: 10.11999/JEIT170455.
- [9] 王晨阳, 张玉茹. 对基本蚁群算法的改进及其在TSP中的应用[J]. 哈尔滨商业大学学报: 自然科学版, 2017, 33(5): 561–564.
- WANG Chenyang and ZHANG Yuru. Improvement of basic ant colony algorithm and its application in TSP[J]. *Journal of Harbin University of Commerce: Natural Sciences Edition*, 2017, 33(5): 561–564.
- [10] 齐苗. 建筑火灾中人员疏散自适应蚁群算法的研究[D]. [硕士学位论文], 沈阳航空航天大学, 2011.
- QI Zhuo. Adaptive ant colony algorithm based on evacuation in building fire[D]. [Master dissertation], Shenyang Aerospace University, 2011.
- [11] 陈超, 张莉. 基于改进蚁群算法的三维路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(20): 192–196. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1904-0212.
- CHEN Chao and ZHANG Li. Three-dimensional path planning based on improved ant colony algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(20): 192–196. doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1904-0212.
- [12] 熊沂铖, 王栋. 基于蚁群算法的车辆路径问题研究[J]. 信息技术, 2019(7): 15–17, 23.
- XIONG Yicheng and WANG Dong. Vehicle routing problem based on ant colony algorithm[J]. *Information Technology*, 2019(7): 15–17, 23.
- [13] 段鹏飞. 面向校园疏散的均衡模型与疏导优化方法研究[D]. [博士学位], 武汉理工大学, 2013.
- DUAN Pengfei. Research on equilibrium model and optimization method for campus evacuation[D]. [Ph. D. dissertation], Wuhan University of Technology, 2013.
- [14] 杨桂华, 符士宾, 刘志毅, 等. 基于改进蚁群算法的室内移动机器人路径规划[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 175–179.
- YANG Guihua, FU Shibin, LIU Zhiyi, *et al.* Path planning of indoor mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(19): 175–179.
- [15] 温正. 精通MATLAB科学计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 55–59.
- WEN Zheng. Proficient in MATLAB Scientific Computing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 55–59.
- [16] 王辉, 朱龙彪, 王景良, 等. 基于Dijkstra-蚁群算法的泊车系统路径规划研究[J]. 工程设计学报, 2016, 23(5): 489–496. doi: 10.3785/j.issn.1006-754X.2016.05.012.
- WANG Hui, ZHU Longbiao, WANG Jingliang, *et al.* Research on path planing of parking system based on Dijkstra-ant colony hybrid algorithm[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2016, 23(5): 489–496. doi: 10.3785/j.issn.1006-754X.2016.05.012.
- [17] 石晓达, 孙连英, 葛娜, 等. 应急资源配送中Dijkstra改进算法的研究[J]. 北京联合大学学报, 2018, 32(2): 61–66. doi: 10.16255/j.cnki.lxbz.2018.02.011.
- SHI Xiaoda, SUN Lianying, GE Na, *et al.* Research on the

- improved algorithm of Dijkstra in emergency resource distribution[J]. *Journal of Beijing Union University*, 2018, 32(2): 61–66. doi: 10.16255/j.cnki.ldxbz.2018.02.011.
- [18] WANG Han, ZHANG Hongjun, WANG Kun, *et al.* Off-road path planning based on improved ant colony algorithm[J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 102(2): 1705–1721. doi: 10.1007/s11277-017-5229-5.
- [19] DENTLER J, ROSALIE M, DANOY G, *et al.* Collision avoidance effects on the mobility of a UAV swarm using chaotic ant colony with model predictive control[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, 93(1/2): 227–243. doi: 10.1007/s10846-018-0822-8.
- [20] CHEN Zhiping, LI Zhijun, LIU Zhen, *et al.* The research and application of improved ant colony algorithm with multi-thresholds in edge detection[C]. International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, Wuhan, China, 2017: 5–9. doi: 10.1109/ICIICIT.2017.27.
- [21] CHIN W, SAPUTRA A A, and KUBOTA N. A neuro-based network for on-line topological map building and dynamic path planning[C]. 2017 International Joint Conference on Neural Networks, Anchorage, USA, 2017: 2805–2810. doi: 10.1109/IJCNN.2017.7966202.
- [22] YAO Baozhen, CHEN Chao, SONG Xiaolin, *et al.* Fresh seafood delivery routing problem using an improved ant colony optimization[J]. *Annals of Operations Research*, 2017, 273(1/2): 163–185. doi: 10.1007/s10479-017-2531-2.
- [23] FATHI M, RODRÍGUEZ V, and ALVAREZ M J. A novel memetic ant colony optimization-based heuristic algorithm for solving the assembly line part feeding problem[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1/4): 629–643. doi: 10.1007/s00170-014-6068-0.
- [24] DU Baigang and GUO Shunsheng. Production planning conflict resolution of complex product system in group manufacturing: A novel hybrid approach using ant colony optimization and Shapley value[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 94: 158–169. doi: 10.1016/j.cie.2015.12.015.
- [25] 张勇, 高鑫鑫, 王昱洁. 基于SFLA-GA混合算法求解时间最优的旅行商问题[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(2): 363–370. doi: 10.11999/JEIT170484.
- ZHANG Yong, GAO Xinxin, and WANG Yujie. Solving the time optimal traveling salesman problem based on hybrid shuffled frog leaping algorithm-genetic algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(2): 363–370. doi: 10.11999/JEIT170484.

曹祥红: 女, 1972年生, 副教授, 研究方向为建筑电气节能技术、智能照明控制技术、智能供配电技术。

李欣妍: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为智能照明控制技术。

魏晓鸽: 女, 1987年生, 讲师, 研究方向为建筑科学与工程、安全科学与工程、灾害防治。

李 森: 男, 1987年生, 讲师, 研究方向为建筑科学与工程、安全科学与工程、灾害防治。

黄梦溪: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为建筑电气节能技术。

李栋禄: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为智能供配电技术。