

文章编号: 2095-2163(2020)12-0155-05

中图分类号: TP242

文献标志码: A

改进 A* 算法的三维无人机路径规划

付道阔, 范平清

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对无人机的三维路径规划存在难约束、搜索空间复杂、动态环境无法有效的避开障碍物和规划出的路径存在临界转向角、冗余节点等问题, 本文提出一种改进的 A* 算法用于无人机的三维路径规划。首先, 通过对 A* 算法的实际代价函数和启发函数进行改进; 其次, 为了提高无人机的搜索效率, 引入变步长搜索节点法进行改进; 最后, 分别在静态环境和动态环境下对改进算法仿真验证。仿真结果表明: 改进算法较原始 A* 算法路径长度相对减少 28.3%, 时间相对减少 21.5%, 且路径更加平滑, 提高了无人机的飞行效率和动态避障能力, 为实际任务提供支持。

关键词: 三维路径规划; A* 算法; 变步长搜索; 动态环境

Improved A* algorithm for 3D UAV path planning

FU Daokuo, FAN Pingqing

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] The 3D path planning of UAV is difficult to be constrained, the search space is complex, the dynamic environment cannot effectively avoid obstacles, and the planned path has critical turning Angle and redundant nodes. In this paper, an improved A* algorithm is proposed for UAV 3d path planning. Firstly, the actual cost function and the heuristic function of A* algorithm are improved. Secondly, variable step size search node method is introduced to improve the efficiency of UAV search. Finally, the improved algorithm is simulated in static environment and dynamic environment respectively. The simulation results show that the path length of the improved algorithm is 28.3% less than that of the original A* algorithm, the time is 21.5% less, and the path is smoother. It improves the flight efficiency and dynamic obstacle avoidance ability of UAV, and provides support for the actual mission.

[Key words] 3D path planning; A* algorithm; Variable step size search; Dynamic environment

0 引言

无人机(UAV)因具有高机动性、低风险等优点, 常被应用于地质勘查、执行危险地区的侦察或搜救等任务。但无人机的航行时间周期相对较短, 电能消耗相对过快, 飞时也存在一些安全隐患。因此, 在飞行过程中路径规划成了其关键技术^[1]。常用的无人机路径规划算法有 Dijkstra 算法、A* 算法等一些经典的规划算法。有文献提出了一种基于 PSO 和侦察区域优先级的多无人机 3D 联合路径优化算法, 并加入事件检测的 SAI 值更新机制, 仿真结果表明该改进算法能为多个无人机规划出无冲撞的飞行路径, 并且具有较强的动态环境适应能力^[2]; 针对三维路径规划问题, 有文献提出了一种改进的启发式算法, 基于数字地图的路径规划模型引入虚拟地形来削减大量的搜索空间, 从三维空间到二维空间, 然后采用启发式 A* 算法应用于无人机轨迹的生成^[3]; 有文献提出一种改进 A* 算法, 采用球形节点拓展法, 从 3 个方向搜索节点, 将搜索方向拓展到三维空间, 并加入变步长搜索方法, 改变评价函数的权

值, 提升了优化结果和效率^[4]; 有文献提出了子节点安全性检测策略, 采用基于 A* 算法的两步寻优路径搜索策略, 进行 UAV 路径动态规划, 并实现复杂环境下无人机的动态规划^[5]; 有文献改进了传统人工势场函数, 利用周围障碍物的斥力大小动态调节沿墙行走过程中距离所沿障碍物的距离, 并根据障碍物的分布情况灵活设置子目标点, 解决动态环境中机器人路径规划问题^[6]; 有文献针对无人机有限续航和规避碰撞问题提出一种集中式逐次贪婪路径规划算法, 迭代时每次选择无人机及路径顺序进行最佳匹配组合, 能够满足最大化收益同时又能满足无人机有限资源和避碰的要求^[7]; 有文献采用人工势场法指导搜索全局路径, 用 A* 算法指导局部路径规划, 避开障碍物, 最后通过仿真证明该算法的有效性, 能够提高避障性能, 缩短搜索扩展时间, 但在搜索中存在抖动性问题^[8]。虽然三维无人机路径规划已经有了很大的进展, 但相比于二维路径规划三维需要高度的约束, 搜索空间增多, 随之带来的问题也成指数式增长, 对算法的搜索效率要求更高。

作者简介: 付道阔(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 压电驱动器、机器人。

通讯作者: 范平清 Email: fanpingqing@163.com

收稿日期: 2020-09-19

针对无人机三维路径规划问题,本文提出一种改进的A*算法对路径进行规划。该方法不仅可以满足无人机自身约束,还可以规划出安全无碰撞的飞行路径。

1 无人机路径规划建模

1.1 问题的描述

城市的某个区域有很多高低不一的建筑物,也有可能突然会出现动态障碍物。利用无人机执行运输任务时,假设无人机为四旋翼充电式无人机,对续航里程、最大载重量都有规定。为保证无人机顺利到达目

$$L = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2 + (z_{n+1} - z_n)^2}. \quad (1)$$

其中: $L \leq L_{\max}$; (x_1, y_1, z_1) 为起始点坐标, (x_n, y_n, z_n) 为终点坐标。

分析可知航迹长度 L 越短越好。

1.2.2 转向角约束

转向角为无人机在飞行过程中前一时刻飞行方

$$\alpha_i = \arccos \frac{\mathbf{e} \cdot (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1}) \cdot (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)^T}{\|\mathbf{e}\| \cdot \|(x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)\|}. \quad (2)$$

其中, $\alpha_i \leq \alpha_{\max}$ 。

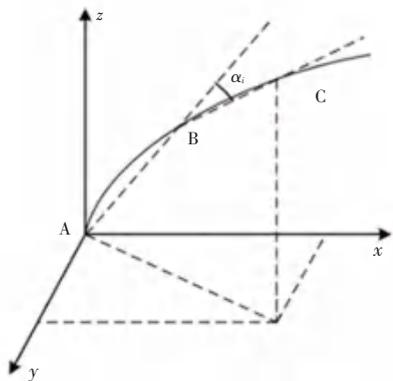


图1 转向角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steering Angle

2 改进A*算法三维路径规划

2.1 传统A*算法及存在的不足

A*算法是一种启发式搜索算法,利用估价函数估计各个节点的搜索代价并选取代价最小的节点,对其进行不断扩展,直至找到目标点位置。其核心公式(3)为:

$$f(n) = g(n) + h(n). \quad (3)$$

其中, $f(n)$ 为总的代价消耗; $g(n)$ 为起始节点到当前节点实际消耗; $h(n)$ 为当前节点到目标点的估计值,体现了算法的启发性。总代价消耗最小是寻找最优路径的标准,因此估价函数 $h(n)$ 的选取是关键。本文选取欧式距离法进行估价函数 $h(n)$ 的计算,相比于曼哈顿、对角线距离欧式距离

标位置,需要对无人机飞行路径做出规划。对无人机做路径规划时,以下条件是已知的:起始点位置、目标点位置、飞行环境信息、无人机性能约束、速度恒定。

1.2 无人机性能约束

1.2.1 航迹长度约束

无人机自身携带的电量有限,所以飞行的航程有一定限制,即不能超过最大航程 L_{\max} 。无人机航程一般由一系列的三维坐标 $\{x_i, y_i, z_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 构成,其中 (x_i, y_i, z_i) 为第 i 个航迹点的三维坐标取值,无人机航迹长度为式(1):

向与当前时刻飞行方向的夹角,如图1所示。转向角可以使无人机路径更加平滑,因此转向角必须小于允许最大转向角 α_{\max} 。转向角计算公式为^[9]式(2):

法更接近真实距离,式(4)。

$$h(n) = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}. \quad (4)$$

采用传统的A*算法进行无人机路径规划时,主要存在以下问题:估价函数 $f(n)$ 仅仅计算飞行的航迹,未对载物量、电池电量等实际考虑;规划出的路径存在过多拐点不利于无人机的飞行控制;规划出的路径距离建筑物等障碍物过近,增加了无人机冲撞概率。

2.2 改进A*算法

针对传统A*算法存在的不足,本文进行以下改进。

2.2.1 改进实际代价函数 $g(n)$

无人机不同飞行航迹消耗的电量不同,因此需要在仅考虑飞行航程代价 $g(n)$ 中加入电量消耗计算。设无人机单位电量消耗与飞行距离成正比,正比系数为 κ 。因此 $g^*(n)$ 为式(5):

$$g^*(n) = g(n-1) + \lambda_1 t(n-1, n) + \lambda_2 \kappa (|x_n - x_{n-1}| + |y_n - y_{n-1}| + |z_n - z_{n-1}|). \quad (5)$$

其中, λ_1, λ_2 分别为无人机飞行时间电量消耗的代价权重系数; (x_n, y_n, z_n) 和 $(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1})$ 为相邻量航迹点三维坐标; $t(n-1, n)$ 为无人机相邻航迹点之间飞行时间,其计算方法为式(6):

$$t(n-1, n) = \frac{|x_n - x_{n-1}| + |y_n - y_{n-1}| + |z_n - z_{n-1}|}{v}.$$

(6)

其中, v 为无人机的飞行速度。

2.2.2 改进启发函数 $h(n)$

原启发函数 $h(n)$ 只考虑了预估航程, 并未体现耗能、飞行时间等对路径的影响。为保证路径飞行成本最小, 应考虑剩余电量、剩余飞行时间。

改进后的启发函数 $h(n)$ 为式(7):

$$h^*(n) = |T - t(n, end) + E_{all} - E(n, end)|. \quad (7)$$

其中, T 为预估飞行总时间; $T = t_2 - t_1$; $t(n, end)$ 、 $E(n, end)$ 分别为从航迹节点 n 到终止路径节点 end 的预估无人机飞行时间与电量, 式(8)。

$$\begin{cases} t(n, end) = \frac{|x_{end} - x_n| + |y_{end} - y_n| + |z_{end} - z_n|}{v}, \\ E(n, end) = \kappa(|x_{end} - x_n| + |y_{end} - y_n| + |z_{end} - z_n|). \end{cases} \quad (8)$$

其中, t_1 为无人机飞行开始时刻; t_2 为结束时刻; v 为无人机的飞行速度; κ 为正比系数; (x_n, y_n, z_n) 、 $(x_{end}, y_{end}, z_{end})$ 分别为无人机航迹路径点 n 和终止航迹点坐标。

2.2.3 变步长搜索节点

无人机搜索方向可以设定为 3 个(前向、俯仰和偏航), 对剩余飞行空间进行探索, 当在俯仰或偏航时运用无人机机动性约束条件限制, 以最大搜索范围在俯仰和偏航方向。当无人机在前向搜索方向上时, 为了提高搜索效率, 本文提出变步长搜索, 最大步长受到无人机机载雷达探测范围的限制即在最大和最小转弯半径之间调整。A* 算法变步长搜索示意图如图 2 所示。

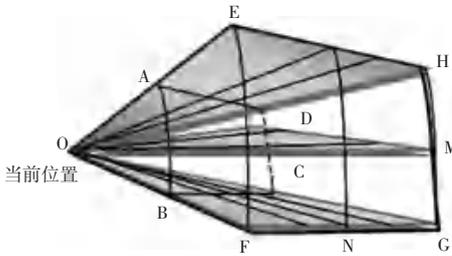


图 2 A* 算法变步长搜索示意图

Fig. 2 A* Algorithm variable step size search schematic diagram

图 2 中, O 为无人机当前位置点; OA 为搜索扩展的最小步长(受最小转弯半径控制); OE 为搜索扩展的最大步长。 $\angle FON = \alpha_{max}$ 为无人机最大转向角; $\angle FOG = 2\alpha_{max}$ 为俯仰角范围; $\angle EOH = 2\alpha_{max}$ 为转向角变化范围。以当前无人机节点 O 为起始位置搜索飞行空间, 分别从前向、偏航和俯仰方向进行。对每一个节点启发式扩展搜索评估, 选取代价

最小的节点作为下一搜索节点, 直到目标点位置。

2.2.4 加入动态障碍物

无人机在实际环境飞行过程中不仅存在静态障碍物, 还可能会突然出现动态障碍物, 比如正在施工的塔吊等, 动态障碍物出现的位置可能不同, 这就需要无人机实时避开障碍物避免发生碰撞。

当机载雷达在探测范围内发现动态障碍物时就会提前做好避障策略。当障碍物在无人机正前方出现时无人机会采取“绕行”策略; 当障碍物在飞行轨迹的后方时按原路径飞行; 当障碍物在无人机最低飞行高度之上时采取“爬升”策略。

3 仿真结果及分析

为了验证改进算法的有效性与实时性, 本文分别在静态和动态环境下进行仿真验证, 设置参数见表 1。

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter setting

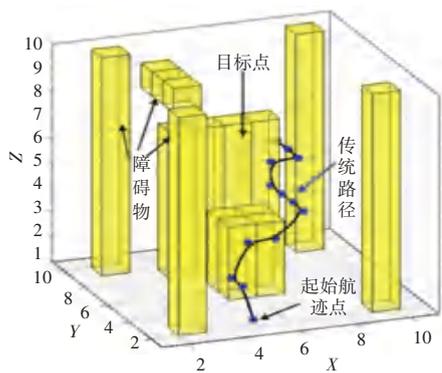
参数	值
最大航程	50/Km
总电量	5 000 J
飞行时间权重	0.15
电量消耗权重	0.35
无人机飞行速度	20 Km/h
机载雷达探测半径 r	100 m
无人机步长 l_{min}	50 m
无人机步长 l_{max}	100 m
最大转向角 α_{max}	90°
正比系数 κ	101(J/Km)
航迹起始点坐标	(4, 1, 1)
航迹目标点坐标 end	(7, 9, 5)

静态环境下的仿真结果如图 3 所示。

为了便于分析无人机规划的三维路径选取投影在 X-Y 平面进行研究, 如图 3 中(b)、(d)所示。

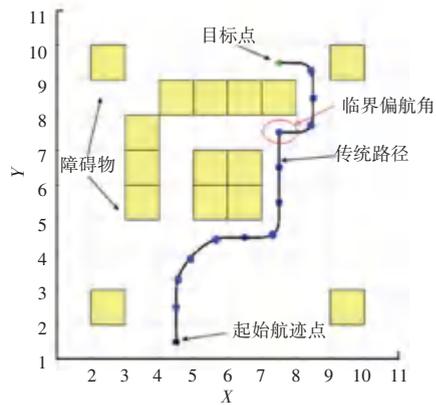
分析图 3 可知, 无人机采用改进前后 A* 算法都可以规划出从起始点到目标点的飞行路径。改进前规划出的路径存在最大临界转向角, 导致无人机急转弯, 由于具有一定的速度, 因此会增加无人机冲撞的概率; 再者规划出的路径距离障碍物较近。相比于改进前, 改进后的无人机路径规划可以避开临界转向角, 飞行路径更加平滑; 改进后路径去除了冗余节点, 时路径长度缩短, 减少了电量的消耗, 增加了无人机总的航迹长度。仿真结果表明改进后的算法可以很有效提高无人机的飞行效率。

动态环境下的仿真结果如图 4 所示。



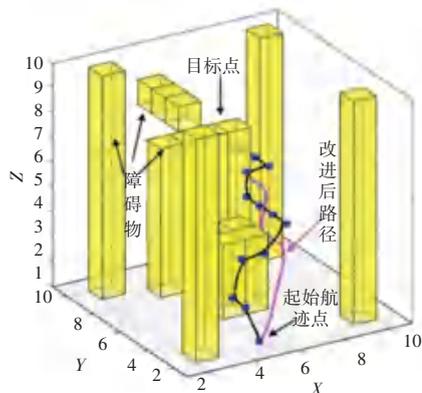
(a) 无人机传统路径规划

(a) UAV traditional path planning



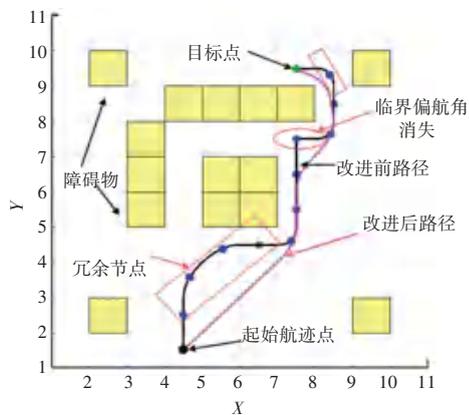
(b) 投影 X - Y 平面路径规划

(b) Projection X-Y plane path planning



(c) 无人机改进后路径规划

(c) Improved UAV path planning

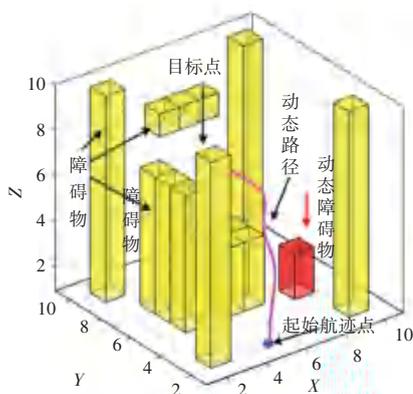


(d) 投影 X - Y 平面路径规划

(d) Projected X - Y plane path planning

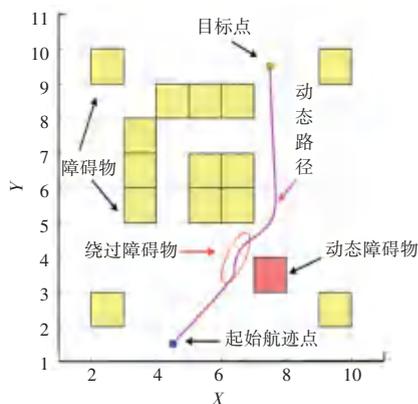
图3 静态环境下无人机路径规划对比

Fig. 3 Comparison of UAV path planning under static environment



(a) 动态无人机路径规划

(a) Dynamic UAV path planning



(b) 投影 X - Y 平面路径规划

(b) Projection X - Y plane path planning

图4 动态环境下无人机路径规划

Fig. 4 UAV path planning in dynamic environment

同样为了便于分析无人机规划的三维动态路径,选取投影在 $X - Y$ 平面进行研究如图4中(b)所示。

分析图4可知,当无人机在运输飞行过程中遇到突然出现的动态未知障碍物时,通过采用改进的 A^* 算法,可以有效地避开障碍物规划出一条安全无

碰撞且相对平滑的路径;图4(b)中可以很清楚地看到无人机绕过了动态障碍物。

通过在静态环境和动态环境的分析仿真结果表明了改进算法的有效性,改进前后仿真结果对比见表2。

表 2 改进前后仿真结果对比

Tab. 2 Comparison of simulation results before and after improvement

算法	节点/个	路径长度/Km	时间/S
传统 A* 算法	48	19.8	3.21
改进 A* 算法	32	14.2	2.52
优化率	33.3% ↓	28.3% ↓	21.5% ↓

由表 2 知,改进后节点个数相对减少 33.3%;路径长度相对减少 28.3%;时间相对减少 21.5%。再次证明改进后算法的有效性。

4 结束语

本文研究了三维环境的无人机路径规划,首先分析了 A* 算法的原理与不足,从实际代价函数 $g(n)$ 、启发函数 $h(n)$ 、变步长搜索节点 3 个方面对算法进行改进,并在静态环境和动态环境下分别进行了仿真验证。仿真结果表明改进后的算法可以很有效提高无人机的飞行效率,并能适应一定的动态复杂环境,有利工程实际的应用。

(上接第 154 页)

4.2.3 黑名单库

如图 9 为车牌识别系统的黑名单库事例。若该车辆在校园内有超速行为,加入黑名单后,由车牌信息储存模块将该车辆车牌号以字符串的形式储存在 txt 文本中(图示车牌号均为虚拟车牌,实际生活中并不存在)。



图 9 车牌识别系统的黑名单库

Fig. 9 Blacklist of the license plate recognition system

5 结束语

本文从限制校园内车辆的车速,提高校园安全程度出发,设计了一种基于机器视觉和 GPS 的校园车速监控系统。便携式 GPS 速度监测警报系统通过在车辆超速时发出警报提醒驾驶员减速慢行,通过记录超速时间与里程实现对忽视警告的车主的监控;在校园出口处通过基于深度学习的车牌识别系统识别车辆车牌,把超过超速上限的车辆加入黑名单,通过入口处的车牌识别系统限制其再次进入校园。实验结果表明,基于机器视觉和 GPS 的校园车速监控系统可以实现对入校车辆车速的全程监控,

参考文献

- [1] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [2] 胡腾,刘占军,刘洋,等. 多无人机 3D 侦察路径规划[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(7):1551-1559.
- [3] QI Z, SHAO Z, PING Y S, et al. An Improved Heuristic Algorithm for UAV Path Planning in 3D Environment [C]// International Conference on Intelligent Human-machine Systems&Cybernetics. IEEE, 2010.
- [4] 马云红,张恒,齐乐融,等. 基于改进 A* 算法的三维无人机路径规划[J]. 电光与控制,2019,26(10):22-25.
- [5] 谭雁英,李洋,周军,等. 复杂环境下基于 A* 算法的无人机路径再规划[J]. 系统工程与电子技术,2017,39(6):1268-1273.
- [6] 朱毅,张涛,程农,等. 动态环境下基于子目标的移动机器人路径规划方法[J]. 系统仿真学报,2010,22(增刊 1):254-257.
- [7] 胡洁,兰玉彬,欧阳帆. 一种为地面 WSN 充电的无人机碰撞规避路径规划方法[J]. 计算机科学,2019,46(1):162-168.
- [8] 王云常,戴朱祥,李涛. 基于 A 星算法与人工势场法的无人机路径规划[J]. 扬州大学学报(自然科学版),2019,22(3):36-38,49.
- [9] 胡腾,刘占军,刘洋,等. 多无人机 3D 侦察路径规划[J]. 系统工程与电子技术,2019,41(7):1551-1559.

弥补了车辆测速常用的定点测速的不足。本论文设计的便携式 GPS 速度监测警报系统收集的超速信息尚不能自动传入车牌识别系统,还需要人工判断。下一阶段应考虑设计便携式 GPS 速度监测警报系统通过通信模块将超速信息发送到车牌识别系统,以便车牌识别系统自动将违规车辆加入黑名单。

参考文献

- [1] RAHMAN M M, STRAWDERMAN L. The Effect of Sign Saturation on Driver Speed Limit Compliance in School Zones [C]// Human Factors & Ergonomics Society Meeting. 2015: 1612-1615..
- [2] 何馨悦,王馨瑛,卜立言. 减速带在校园环境中的应用研究[J]. 设计,2016(3):120-121.
- [3] ZHANG G, LIU J. High Time-Resolution Visual Motion Detection with Time Stamped Pixel Design [J]. Analog Integr Circ Sig Process 2006, 46:153-158.
- [4] 魏武,张起森,王明俊,等. 基于计算机视觉和图像处理的交通参数检测[J]. 信息与控制,2001(3):257-261.
- [5] 郝先锋,刘广孚. 机动车地感线圈测速仪校准系统的设计与实现[J]. 科学技术与工程,2009,9(13):3912-3915.
- [6] 李锦明,张虎威,高文刚,等. 基于 FPGA 的多普勒雷达测速系统设计[J]. 电子器件,2017,40(6):1408-1413.
- [7] FAN Huayu, REN Lixiang, LONG Teng, et al. A high-precision phase-derived range and velocity measurement method based on synthetic wideband pulse Doppler radar [J]. Science China (Information Sciences), 2017, 60(8):151-162.
- [8] 朱旭东,赵辉. 高速公路全程测速系统的构想[J]. 科学技术创新,2015(24):164.