

中图分类号: TN97

文献标志码: A

文章编号: 1674-2230(2018)06-0067-04

基于改进蚁群算法的三维安全路径规划方法

康 鹰 杨清山 冯清贤

(电子信息控制重点实验室, 成都 610036)

摘要: 针对整个空间域飞行器三维安全路径的优化问题, 提出一种基于稀疏性约束蚁群算法的安全路径规划方法。该方法首先将空间域划分为栅格, 并计算各栅格中由所有雷达探测概率组成的威胁向量, 然后对威胁向量进行量化以合成空间威胁值, 最后利用稀疏性约束的蚁群算法进行路径规划寻优。仿真结果表明, 该文方法可规划出最优的安全路径, 并且相对传统蚁群算法, 有效减少了搜索时间。

关键词: 威胁向量; 向量量化; 稀疏约束; 蚁群算法

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2230.2018.06.014

Three-Dimensional Safe Route Planning With Modified Ant Colony Algorithm

KANG Ying, YANG Qing-shan, FENG Qing-xian

(Science and Technology on Electronic Information Control Laboratory, Chengdu 610036, China)

Abstract: To solve the optimization problem of 3D safe route planning for aerospace vehicle in the whole space domain, a sparse-constrained ant colony algorithm is presented for safe route planning. Firstly space domain is divided into grids; threat vector of every grid is computered using radar detection probability with this proposed method. Then threat vectors to synthesize threat value are quantized. Finally, it adopts sparse-constrained ant colony algorithm to perform optimization of route planning. Simulation results show that the proposed method can obtain the optimized safe route, and cost less time compared with the traditional ant colony methods.

Key words: threat vector; vector quantization; sparse constraint; ant colony algorithm

1 引言

航路规划算法主要包括基于栅格的规划算法、基于类比方法的规划算法以及基于概率图的规划方法等。基于栅格的规划算法有 A* 算法、动态规划算法等^[1], 基于类比的规划算法有遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等^[2-3], 数学规划方法有模型预测控制法、整数线性规划法等。

本文重点研究三维空间中的航路规划问题,

首先采用栅格化的方法对三维空间进行离散化, 然后利用雷达探测概率计算威胁向量, 并且对威胁向量进行量化构造威胁度空间, 最后采用蚁群算法进行路径规划寻优。针对现有蚁群算法计算量大的问题, 在蚂蚁状态转移的过程中通过引入稀疏性的思想, 提出一种基于稀疏性约束的蚁群算法, 从而达到显著加快蚁群收敛速度, 提高计算效率的目的。

收稿日期: 2018-05-16; 修回日期: 2018-06-14

作者简介: 康鹰 (1980—), 男, 重庆人, 学士, 高级工程师; 杨清山 (1985—), 男, 湖南娄底人, 博士, 高级工程师。

2 电磁空间威胁分析

对于航路规划问题, 现有方法大多采用栅格的形式对空间进行离散化, 本文采用了立方体对三维空间进行切分。通过空间栅格化, 也便于执行后续的栅格搜索。若不考虑飞行器的机动约束, 在三维空间中可以将当前点周围的 26 点作为下一个航路点, 图 1 所示为栅格搜索的示意图。

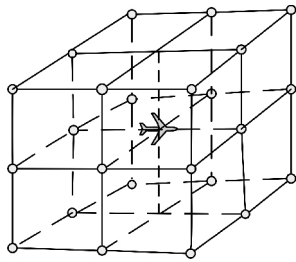


图 1 栅格搜索示意图

对于安全路径规划来说, 如何对整个电磁空间进行科学的威胁分析是一个非常重要的问题。以飞行器的低空突防为例, 在突防过程中将面临雷达探测威胁、地空导弹威胁、攻击机拦截威胁、防空火炮威胁等。为了简化分析过程, 本文将集中就雷达的威胁来进行分析, 主要包括计算雷达的探测概率、威胁信息融合、威胁空间生成三个步骤:

1) 计算雷达探测概率

雷达通过对目标回波的分析获得目标信息, 其探测能力决定了雷达能在多大的距离上发现飞行器, 因此是最主要的威胁。本文采用如下的雷达探测概率方程^[4]:

$$p \cong \frac{\operatorname{erfc}(V/\sqrt{2})}{2} - \frac{e^{-V^2/2}}{\sqrt{2\pi}} [C_3(V^2-1) + C_4V(3-V^2) - C_6V(V^4-10V^2+15)] \quad (1)$$

式中, C_3 、 C_4 和 C_6 为 Gram-Charlier 级数系数, 而变量 V 为^[1]:

$$V = \frac{V_T - n_p(1+SNR)}{\bar{\omega}} \quad (2)$$

2) 威胁信息量化

计算出所有雷达在栅格上的探测概率之后, 需要再对探测概率向量进行量化, 并取量化值作为栅格的威胁值。对于在同一栅格处有多个雷达探测概率的情况, 其威胁信息可通过式(3)所示

的探测向量进行描述:

$$P_{dr} = [p_0 \ p_1 \ \cdots \ p_n] \quad (3)$$

为了便于后续分析, 需要将探测向量 P_{dr} 量化成单个威胁值, 本文采用式(4)所示的方法对探测向量进行量化, 量化结果如式(5)所示。

$$\begin{cases} p'_1 = p_0 + p_1 - p_0 \cdot p_1 \\ p'_2 = p'_1 + p_2 - p'_1 \cdot p_2 \\ \vdots \\ p'_n = p'_{n-1} + p_n - p'_{n-1} \cdot p_n \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{p} = p'_n \quad (5)$$

3) 威胁空间生成

通过探测概率的计算及威胁信息的量化, 可获得空间中每一个栅格的威胁值, 从而形成一个完整的威胁空间。

3 基于改进蚁群算法的安全路径规划

本节中, 首先对安全路径规划问题进行简要的描述, 然后结合该问题, 重点讨论本文提出的基于稀疏性约束的改进蚁群算法。

由第 2 节可知, 对雷达探测概率向量经过量化之后可获得电磁空间的威胁值。本文主要选择威胁度与油耗这两个因子来构造航路的代价函数(由于油耗与航路的长度成正比, 因此采用航路的长度来表示油耗):

$$\omega = \int_0^L [k_1 \omega_t + k_2 \omega_f] ds \quad (6)$$

式中 ω 为代价函数, L 表示整个航路的长度, ω_t 和 ω_f 分别为航路的油耗代价和威胁代价, k_1 为油耗代价的权重, k_2 为威胁代价的权重。为了便于计算, 通过栅格点的形式表示航路, 式(6)可等效为:

$$\omega = \sum_{i=1}^n [k_1 \omega_{ti} + k_2 \omega_{fi}] \quad (7)$$

式中 ω_{ti} 和 ω_{fi} 分别为第 i 段航路的油耗代价和威胁代价。

路径规划问题本质上是一个优化问题, 可通过求解代价函数的最小值实现安全路径的搜索。传统的蚁群算法存在计算量大的问题, 本文拟引入稀疏性的思想, 提出一种基于稀疏性约束的改

进蚁群算法,该算法通过在蚂蚁状态转移的过程中,排除掉一些不满足要求的航路点,以此达到显著提高计算速度的目的,算法流程如图 2 所示。

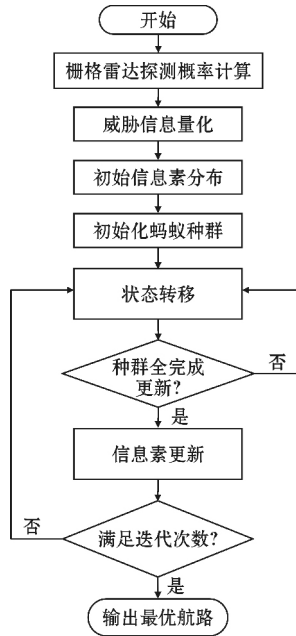


图 2 算法流程图

1) 初始信息素分布

根据威胁栅格的特点,采用基于栅格威胁值的初始信息素分布方法,转换规则如式(8)所示:

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \bar{p}_i / \bar{p}_j, & (\bar{p}_j \neq 0) \\ \infty, & (\bar{p}_j = 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中 τ_{ij} 表示点 i 与点 j 之间的信息素, \bar{p}_i 与 \bar{p}_j 分别为点 i 与点 j 的信息素。

2) 状态转换

设第 k 只蚂蚁 t 时刻位于节点 r ,其下一个转移目标节点为 s ,则从当前节点 r 转换到可行节点 s 的概率 $p_k(r, s)$ 为^[5]:

$$p_k(r, s) = \begin{cases} \frac{\tau(r, s)^\alpha \cdot \eta(r, s)^\beta}{\sum_{s \in J_k(r)} \tau(r, s)^\alpha \cdot \eta(r, s)^\beta}, & s \in J_k(r) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\tau(r, s)$ 表示蚂蚁存储在边 $V(r, s)$ 上的生物信息激素强度; $\eta(r, s)$ 表示节点 s 相对于节点 r 的可见性; α, β 参数控制生物信息激素与可见性的相对重要性; $J_k(r)$ 表示节点 r 的 8 个相邻节点之一。计算出当前节点到下一个目标点的概率,

根据“轮盘赌”的选择方法,随机选取下一个节点,概率越大选取的机会越大。然后将该节点作为当前节点,不断循环计算,直至计算出所有的航路节点。

在蚂蚁状态转移过程中,通过引入稀疏约束的思想,可有效排除大量不满足要求的航路点,从而减少蚂蚁在状态转换过程中的计算量,计算公式如式(10)所示。

$$\begin{cases} s \in J_k(r), & dis(s) \leq dis(r) \\ s \notin J_k(r), & dis(s) > dis(r) \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$dis(r) = |r.x - d.x| + |r.y - d.y| + |r.z - d.z| \quad (11)$$

$$dis(s) = |s.x - d.x| + |s.y - d.y| + |s.z - d.z| \quad (12)$$

式中 r 为当前节点, d 为目标节点, s 为下一步可能选择的节点, $dis(r)$ 为当前节点到目标点之间的距离, $dis(s)$ 为待选择节点到目标点之间的距离。若待选节点到目标点之间的距离小于当前节点,则将该点纳入选择节点之中,否则排除。

3) 信息素更新

当所有蚂蚁完成航路点的选取,得到可行航路之后,需对路径上的信息素进行一次全面的更新。为保证最优蚂蚁路径上的信息素调整最大,本文采用如下的信息素更新规则^[5]:

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \rho) \tau(r, s) + \rho \cdot [\Delta \tau(r, s) + e \cdot \Delta \tau^e(r, s)] \quad (13)$$

式中:

$$\Delta \tau(r, s) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau^k(r, s) \quad (14)$$

$$\Delta \tau^k(r, s) = \begin{cases} Q/W_k, & \text{边 } V(r, s) \text{ 属于蚂蚁 } k \text{ 的候选航路} \\ 0, & \text{边 } V(r, s) \text{ 不属于蚂蚁 } k \text{ 的候选航路} \end{cases} \quad (15)$$

和

$$\Delta \tau^e(r, s) = \begin{cases} Q/W_e, & \text{边 } V(r, s) \text{ 属于蚂蚁 } k \text{ 的最优候选航路} \\ 0, & \text{边 } V(r, s) \text{ 不属于蚂蚁 } k \text{ 的最优候选航路} \end{cases} \quad (16)$$

式中 $0 < \rho < 1$ 是参数,用来蒸发存储在边上的生物信息激素以减弱原有的信息; W_k 是蚂蚁 k 选择的航路的代价;而 W_e 是当前最小的航路代价; m 是蚂蚁数。

4 试验结果

仿真过程各参数的取值分别为: 蚁群进化代数: $t = 40$, 蚁群种群大小: $N_{\text{ant}} = 2000$, 威胁因子: $\omega_f = 1.0$, 油耗代价: $\omega_l = 1.0$, 控制参数: $\alpha = 1$, $\beta = 1.2$, 蒸发因子: $\rho = 0.2$, 蚁群算法中的 Q 常数为 500。

仿真软件环境: Win7, Visual Studio 2008, 语言 C++。

硬件环境: HP-Z420 工作站, 主频: 2.80GHz, 内存: 4G。

电磁空间量化示意如图 3 所示(图中 A, B, C 分别表示威胁程度高、中、低的栅格)。仿真采用的典型测试场景如图 4 所示, 图 5 和图 6 所示为采用本文方法所规划出的安全路径, 其中图 5 为俯视图, 图 6 为侧视图。由图 5 和图 6 可知, 规划出的安全路径可有效规避三维空间中的威胁区域。

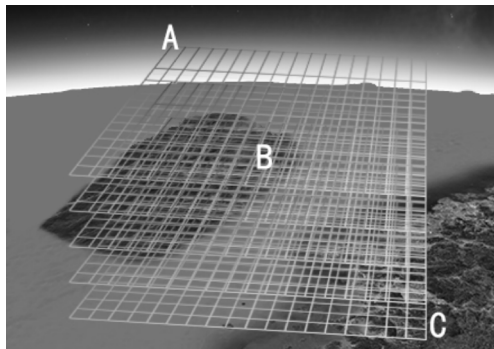


图 3 电磁空间量化栅格示意图

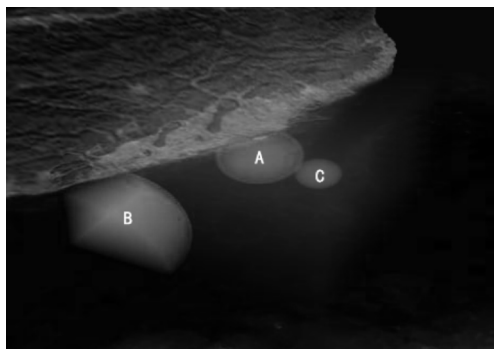


图 4 电磁空间测试场景

此外, 采用改进前的算法进行安全路径规划需 200~300 秒, 而采用本文提出的带稀疏性约束的蚁群算法, 规划时间缩短至约 15~20 秒, 有效地减少了计算量。

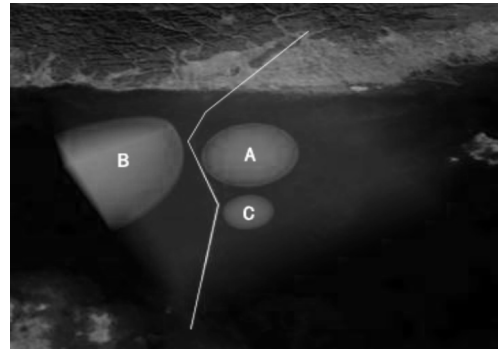


图 5 算法仿真俯视图

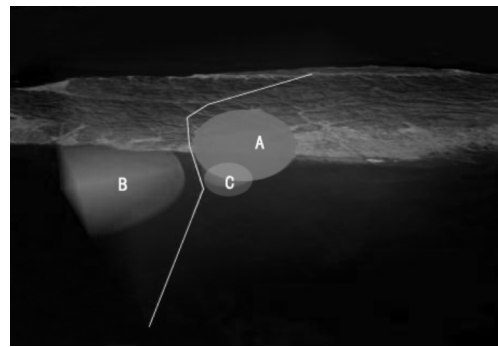


图 6 算法仿真侧视图

5 结束语

针对传统蚁群算法计算量较大的问题, 在蚂蚁状态转移的过程中引入稀疏性约束进行改进, 仿真结果表明, 提出的方法不仅可有效地进行路径规划寻优, 同时可显著加快蚁群的收敛速度, 减少搜索时间。

蚁群算法具有分布式、贪婪式搜索等适于并行计算的特点, 下一步可考虑采用 CUDA 并行计算技术进一步提高计算速度。

参考文献:

- [1] 叶文. 低空突防航路规划算法综述[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(10): 2357-2361.
- [2] 严建林. 基于进化算法无人机航路规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [3] 刘斌. 基于蚁群算法的三维管道路径规划[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [4] 陈志杰. 雷达系统分析与设计(MATLAB 版)[M]. 2nd ed. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [5] 柳长安. 无人机航路规划方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.