

飞行器分层势场路径规划算法

代冀阳, 王村松[†], 殷林飞, 杨保建, 熊俊强

(南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 传统势场法是飞行器路径规划的一种常用方法, 但是存在目标不可达、易收敛到局部极小值和无评价机制等问题. 本文针对这些问题提出了一种飞行器路径规划的分层势场算法. 利用分段思想对势场函数进行修正, 解决了目标不可达问题. 引入回环力和飞行器间作用力, 解决了易收敛到局部极小值问题和飞行器间的碰撞问题. 采用分层方法, 建立了多层次多方位路径点阵, 并以此计算最优路径点, 从而引入了势场法的评价机制. 通过数值仿真, 对在复杂障碍环境中的飞行器路径规划进行了传统势场法、改进势场法和分层势场法的对比研究. 仿真结果验证了所提出的分层势场算法的有效性和可行性.

关键词: 路径规划; 飞行器; 势场函数; 回环力; 分层势场法

中图分类号: V249 文献标识码: A

Hierarchical potential field algorithm of path planning for aircraft

DAI Ji-yang, WANG Cun-song[†], YIN Lin-fei, YANG Bao-jian, XIONG Jun-qiang

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi 330063, China)

Abstract: Traditional potential field algorithm is a common method of path planning for aircraft; however, it is not applicable to cases like goal non-reach with obstacle nearby (GNRON), local minimum, no evaluation mechanism, etc. A hierarchical potential field algorithm of path planning for aircraft is proposed to deal with the above problems. In this algorithm, traditional potential function is modified with the segmented idea to solve the problem of GNRON. Rotational force and forces between aircraft are introduced to solve the problems of local minimum and aircraft collision. Multilevel and multidirectional path lattice are established using hierarchical method and the optimal path point is calculated. Thus, the evaluation mechanism of potential field method is introduced. Finally, through numerical simulations, the traditional potential field method, the improved potential field method and the hierarchical potential field method are compared in the complex obstacle environment. Simulation results show that the proposed hierarchical potential field method is effective and feasible.

Key words: path planning; aircraft; potential function; rotational force; hierarchical potential field algorithm

1 引言(Introduction)

路径规划是根据战场态势, 寻找飞行器满足约束条件的最优运动轨迹的技术^[1]. 随着智能控制技术在航空领域的应用与发展, 运用人工智能算法解决飞行器的路径规划已成为飞行器控制领域的重点和热点问题之一^[2]. 用于飞行器编队路径规划的智能算法有很多, 如A*算法^[3]、粒子群算法^[4]、蚁群算法^[5]、D*算法^[6]、人工势能场算法^[7]等. 其中, 人工势能场算法与其他算法相比, 具有规划速度快和实时性好的特点, 但其用于路径规划存在一些固有的缺陷.

针对传统势场法的目标不可达以及局部极小值缺陷, 国内外学者提出了多种改进方法, 如Park Min Gyu等^[8]设置“虚拟障碍物”来改变原势场的分布, 从而达

到跳出局部极小值点的目的; Juan Arturo Herrera Ortiza等^[9]提出一种RankMOEA算法(ranking multi-objective evolutionary algorithm)来获得人工势场法的最优参数, 解决了目标不可达和局部极小值问题; Mohammad Abdel Kareem Jaradat等^[10]利用障碍物斥力和目标引力的模糊模型解决了局部极小值问题. 但这些方法都没有改变传统势场函数, 而是结合其他算法解决传统势场法的缺陷.

利用传统人工势场法进行路径规划, 规划出来的路径无法评价其优劣. 因此, 税薇等^[11]和姚远等^[12]分别预先利用蚁群算法和稀疏A*算法对路径进行全局规划, 当遇到突发障碍物时再利用人工势场法避开障碍物对路径进行实时重规划. 虽然结合其他算法

收稿日期: 2015-05-21; 录用日期: 2015-09-29.

[†]通信作者. E-mail: wangcunsong@yeah.net; Tel.: +86 18690425468.

国家自然科学基金项目(61164015, 61305132), 江西省自然科学基金项目(20151BAB207043), 江西省研究生创新基金项目(YC2014-S393)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61164015, 61305132), National Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20151BAB207043) and Graduate Innovation Fund of Jiangxi Province (YC2014-S393).

来评价路径的优劣,但没有真正建立人工势场法自身的评价机制。

鉴于此,本文针对三维环境中的复杂障碍物,通过改进传统势场法中的势场函数解决了目标不可达问题;进而引入“回环力”解决了局部极小值问题;在此基础上,根据建立的路径点选取方法来评价路径的优劣。同时,提出了一种用于飞行器路径规划的分层势场算法。

2 传统人工势场法 (Traditional artificial potential field method)

人工势场法最初是由Khatib提出的一种应用于机器人路径规划的虚拟力算法。文献[13]将飞行器和目标点视为质点、将障碍物区视为圆,在二维空间中分析了传统人工势场法模型。如图1所示,飞行器的运动方向由目标对飞行器产生的引力场和障碍物对飞行器产生的斥力场所形成的合力决定。

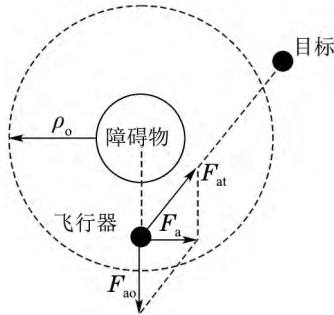


图1 传统人工势场法原理示意图

Fig. 1 Traditional artificial potential field method principle

因此,传统势场法中的引力场函数和斥力场函数可定义为

$$U_{at}(\mathbf{X}) = 0.5\alpha\rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t), \quad (1)$$

$$U_{ao}(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0.5\beta\left(\frac{1}{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o)} - \frac{1}{\rho_o}\right)^2, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) \leq \rho_o, \\ 0, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) > \rho_o, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X} = (x, y)$ 为飞行器的位置向量, α 和 β 分别为引力和斥力增益系数, \mathbf{X} , \mathbf{X}_t , \mathbf{X}_o 分别代表飞行器、目标、障碍物几何中心的空间位置. $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t)$ 和 $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o)$ 分别为飞行器到目标和障碍物几何中心的空间距离, ρ_o 为障碍物对飞行器的影响范围。

对引力和斥力势场函数求负梯度,可以得到相应的引力和斥力函数:

$$F_{at}(\mathbf{X}) = -\nabla U_{at}(\mathbf{X}) = -\alpha\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t), \quad (3)$$

$$F_{ao}(\mathbf{X}) = -\nabla U_{ao}(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0.5\beta\left(\frac{1}{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o)} - \frac{1}{\rho_o}\right)\frac{1}{\rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o)}, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) \leq \rho_o, \\ 0, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) > \rho_o. \end{cases} \quad (4)$$

飞行器所受到的合力为

$$F_a(\mathbf{X}) = F_{at}(\mathbf{X}) + F_{ao}(\mathbf{X}). \quad (5)$$

从上述模型可以看出,传统人工势场法存在以下缺陷: 1) 当飞行器接近目标时,飞行器所受的引力逐渐减小,若目标附近存在障碍物所受斥力大于引力,则飞行器无法到达目标点; 2) 若多个障碍物成某种规律分布时,飞行器通过障碍物区域时会在某个特定的区域不停移动,但是始终无法离开该特定区域,从而形成“局部困扰”,陷入局部极小值点; 3) 人工势场法缺少自身的评价机制。

3 改进的人工势场法 (Improved artificial potential field method)

3.1 改进的势场函数 (Improved potential function)

为了从根本上解决传统势场法的目标不可达缺陷,并应用于飞行器的路径规划中,对原有的势场函数进行改进:

$$U_{at}(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0.5\alpha_1\rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t), & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t) < \rho_a, \\ 0.5\alpha_2\rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t), & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t) \geq \rho_a, \end{cases} \quad (6)$$

$$U_{ao}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \beta\left(\frac{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i)}{\rho_o^2} - \frac{2\ln\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i)}{\rho_o \max} - \frac{1}{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i)}\right), & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i) \in [\rho_1, \rho_2], \\ +\infty, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i) \in [0, \rho_{o \min}], \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\rho_1 = \max\{\rho_{o \max}, \rho_{a \max}\}, \rho_2 = \min\{\rho_{o \min}, \rho_{a \min}\}.$$

式中: $\mathbf{X} = (x, y, z)$ 为飞行器的位置向量, α_1 和 α_2 为引力增益系数, β 为斥力增益系数. \mathbf{X} , \mathbf{X}_t , \mathbf{X}_i 分别代表飞行器、目标、飞行器与障碍物几何中心连线于障碍物表面交点的空间位置. $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t)$ 和 $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i)$ 分别为飞行器到目标和交点的空间距离. ρ_a 为飞行器编队的临界距离, $\rho_{a \min}$ 和 $\rho_{a \max}$ 分别为飞行器的最小和最大可视化距离, $\rho_{o \min}$ 和 $\rho_{o \max}$ 分别为障碍物对飞行器的最小和最大影响范围。

对改进的引力和斥力场函数求负梯度,可以得到相应的引力和斥力函数:

$$F_{at}(\mathbf{X}) = -\nabla U_{at}(\mathbf{X}) = \begin{cases} -\alpha_1\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t), & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t) < \rho_a, \\ -\alpha_2\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t), & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_t) \geq \rho_a, \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{ao}(\mathbf{X}) = -\nabla U_{ao}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \beta\left(\frac{1}{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i)} - \frac{1}{\rho_o \max}\right)^2, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i) \in [\rho_1, \rho_2], \\ +\infty, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i) \in [0, \rho_{o \min}], \\ 0, & \text{其他}, \end{cases} \quad (9)$$

计算飞行器受到不同障碍物的斥力, 首先应获取飞行器位置和障碍物几何中心连线于障碍物表面的交点, 然后计算飞行器与障碍物交点的距离 $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i)$, 最后根据式(9)获得不同障碍物对飞行器的斥力. 从改进的势场模型中可以看出, 飞行器与目标的距离小于临界距离时, 视为飞行器接近目标. 此时, 通过改变引力增益系数, 即增强引力场对飞行器作用, 使飞行器可以抵达目标点.

3.2 回环力的引进(Rotational force introduction)

为解决传统势场法的局部极小值问题, 本文引进了“回环力”概念. 回环力如图2所示, 分布在障碍物对飞行器斥力的垂直面上, 方向同目标对飞行器的引力在斥力垂直面的投影方向一致.

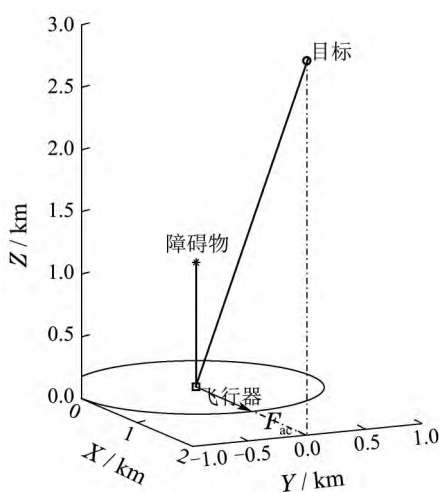


图 2 回环力示意图

Fig. 2 Rotational force diagram

回环力求解如式(10), 首先求出斥力向量与引力向量的单位法向量, 然后求解该单位向量与斥力向量的单位法向量, 再将引力单位向量投影到求解的单位法向量便得到回环力的单位向量即回环力方向. 回环力大小等于斥力大小乘以回环力增益系数.

$$F_{ac}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \gamma \|F_{ao}(\mathbf{X})\| \frac{F_{ao}(\mathbf{X}) \times F_{at}(\mathbf{X}) \times F_{ao}(\mathbf{X})}{\|F_{ao}(\mathbf{X}) \times F_{at}(\mathbf{X}) \times F_{ao}(\mathbf{X})\|} \cdot \frac{F_{at}(\mathbf{X})}{\|F_{at}(\mathbf{X})\|}, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) \leq \eta \rho_{o \min}, \\ 0, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) > \eta \rho_{o \min}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: γ 为回环力增益系数, η 为回环力作用距离系数.

3.3 飞行器间作用力(Force between aircraft)

飞行器编队要按照一定的编队队形进行飞行, 本文采用文献[14]提出的编队队形, 同时为了避免飞行

器间的碰撞, 引入飞行器间的作用力.

飞行器之间的作用力定义如下:

$$F_{aa}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \varepsilon \left(\frac{1}{\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a)} - \frac{1}{\rho_a} \right)^2, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a) \in [\rho_{a \min}, \rho_{a \max}], \\ 0, & \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a) \notin [\rho_{a \min}, \rho_{a \max}], \end{cases} \quad (11)$$

式中: ε 为飞行器间作用力的增益参数, $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_a)$ 为飞行器到其他相邻飞行器间的距离.

至此, 飞行器所受的合力为

$$F_a(\mathbf{X}) = F_{at}(\mathbf{X}) + F_{ao}(\mathbf{X}) + F_{ac}(\mathbf{X}) + F_{aa}(\mathbf{X}). \quad (12)$$

此时, 可以求出飞行器下一时刻的速度

$$v_{a \text{ new}} = \frac{F_a(\mathbf{X})}{m_a}, \quad (13)$$

式中: $v_{a \text{ new}}$ 为飞行器下一时刻的速度, m_a 为飞行器的质量.

因此, 飞行器下一时刻的空间位置可以得出

$$P_{a \text{ new}}(\mathbf{X}) = P_{a \text{ old}}(\mathbf{X}) + v_{a \text{ new}} \delta_t, \quad (14)$$

式中: $P_{a \text{ old}}(\mathbf{X})$ 为飞行器当前时刻空间位置, $P_{a \text{ new}}(\mathbf{X})$ 为飞行器下一时刻空间位置, δ_t 为计算时间步长.

4 路径规划的分层势场算法 (Hierarchical potential field algorithm of path planning)

4.1 分层人工势场法原理 (Principle of the hierarchical potential field method)

传统人工势场法进行航路规划时, 在障碍物位置及影响范围不变的情况下, 规划出的路径是固定不变的. 同时, 规划出的路径也缺乏一种评价机制来判定规划路径的好坏.

因此, 基于文献[14]中分层处理的思路提出了一种分层势场法, 原理如图3所示. 图中: A 为飞行器当前空间位置; 为了统一图中标识, 将下一时刻飞行器的空间位置 $P_{a \text{ new}}(\mathbf{X})$ 用 $B_{(j,m)}$ 代替; 虚线代表障碍物的影响范围. 每次迭代所扩展的区域将形成一个空间扇形, 并将该区域径向离散化具有不同步长和角度的路径点阵. 再从路径点阵中选取满足约束条件且评价指标最优的路径点作为下一时刻飞行器路径规划起始点. 分的层次与规划速度密切相关, 分的层越多, 每层中选取的点越多, 规划速度就越慢. 因此, 必须要考虑精度和速度折中选取.

其中, 分层势场法的角度 θ 是由离飞行器最近的障碍物而定的, 计算公式如下:

$$\theta = \arccos \frac{\|\mathbf{X}_{B(j,m)} - \mathbf{X}_A\|^2 + \|\mathbf{X}_{B(1,m)} - \mathbf{X}_A\|^2 - \|\mathbf{X}_{B(j,m)} - \mathbf{X}_{B(1,m)}\|^2}{2\|\mathbf{X}_{B(j,m)} - \mathbf{X}_A\| \|\mathbf{X}_{B(1,m)} - \mathbf{X}_A\|}, \quad (15)$$

式中: \mathbf{X}_A 为飞行器当前时刻的空间位置, $B_{(j,m)}$ 为改进势场法下一时刻飞行器的空间位置. $B_{(1,m)}$ 为其中一个分层点的空间位置, $B_{(1,m)}$ 点与 A 点的连线相切于障碍物的影响范围. 障碍物的选取原则是与飞行器距离最近.

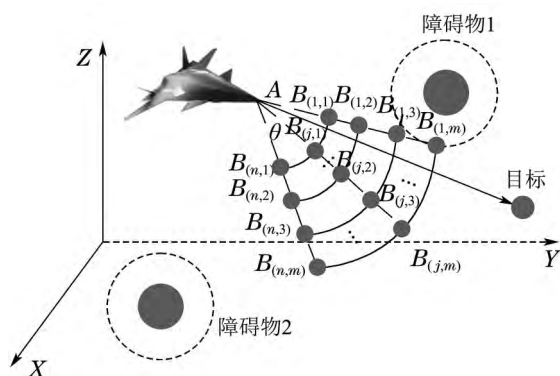


图3 分层势场法原理示意图

Fig. 3 Hierarchical potential field principle diagram

4.2 最优路径点选取方法 (Selection method for optimal path point)

忽略飞行器运动学和动力学约束. 飞行器利用分层势场法进行路径规划的约束条件仅考虑飞行器能够避开所有障碍, 即分层点到障碍物的距离大于障碍物几何中心到分层点与障碍物几何中心连线于障碍物表面的交点距离. 因此, 约束条件定义如下:

$$\rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) > \rho(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_i), \quad (16)$$

式中: \mathbf{X}_o 为分层路径点与障碍物几何中心的距离, $\rho(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_i)$ 为障碍物几何中心到交点的距离.

飞行器的动力消耗与路径的长度相关. 因此, 分层势场法可以将规划的路径长度来代表飞行器的动力消耗, 用来评价路径, 方法定义如下:

$$J(\mathbf{X}) = \frac{\|(\mathbf{X} - \mathbf{X}_{\text{new}}) \times (\mathbf{X} - \mathbf{X}_t)\|}{\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_t\|}, \quad (17)$$

式中: \mathbf{X}_{new} 为分层选取点的空间位置, \mathbf{X} 为飞行器起始的空间位置, \mathbf{X}_t 为飞行器的目标位置.

所以在 n 层中选取最优航迹点可表述为

$$\begin{aligned} \min y &= J(\mathbf{X}) = (j_1(x), j_2(x), \dots, j_m(x)), \\ \text{s.t. } \rho(\mathbf{X}, \mathbf{X}_o) &> \rho(\mathbf{X}_o, \mathbf{X}_i). \end{aligned} \quad (18)$$

4.3 分层势场算法 (Hierarchical potential field algorithm)

在确定的仿真环境中利用分层势场算法进行飞行器路径规划时, 首先, 根据不同障碍物产生的斥力场和目标点产生的引力场计算飞行器所受的引力和斥力; 同时, 计算飞行器的回环力和飞行器间的作用力并计算合力; 然后, 获取利用改进势场法飞

行器下一时刻的空间位置; 进而, 根据分层势场法原理获得路径点阵; 最后, 根据提出的路径点选取方法得到满足约束的最优路径点作为利用分层势场法规划出的飞行器下一时刻空间位置. 因此, 飞行器路径规划的分层势场算法可以归纳如下:

Step 1 根据改进的势场函数、引入的回环力和飞行器间的作用力, 利用式(8)–(11)分别计算当前时刻飞行器所受到的斥力、引力、回环力和相互作用力;

Step 2 根据式(12)获得飞行器所受的合力;

Step 3 利用式(13)和(14)计算获得飞行器下一时刻的空间位置 $B_{(j,m)}$, 获得距离飞行器较近障碍物的相关信息, 由式(15)计算得出分层的角度 θ , 从而获得各分层点空间位置;

Step 4 依据式(18)从满足约束条件的分层点中选取路径最优分层点作为下一时刻飞行器路径规划起始点.

5 数值仿真 (Numerical simulation)

利用分层势场法对飞行器路径进行规划, 需对势场函数参数进行初始化, 参数选取的不同会影响飞行器的飞行路径, 参数越大代表飞行器受到相应势场影响越大, 经过多次参数调节选取最佳参数如表1所示. 飞行器和对应目标的位置信息如表2所示.

表1 势场函数参数表

Table 1 Potential field function parameters

参数	数值	参数	数值
α_1	1.5	γ	0.05
α_2	3.0	η	350
β	3.0	ε	4000

表2 飞行器与目标位置信息

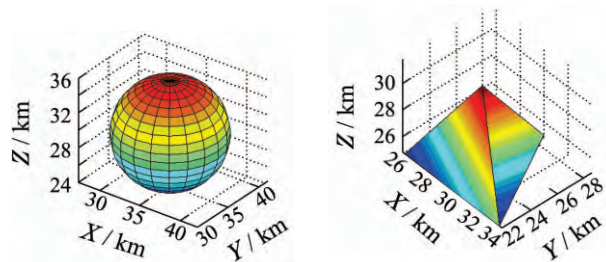
Table 2 Aircraft and target position information

飞行器	目标
(0, -10, 1)	(35, 55, 45)
(-4, -12, -5.53)	(31, 52.69, 38.47)
(0, -5.38, -5.53)	(35, 60, 38.47)
(4, -12.31, -5.53)	(39, 52.69, 38.47)

5.1 仿真环境 (Simulation environment)

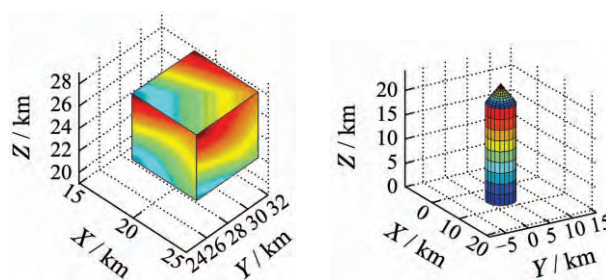
飞行器进行路径规划时, 障碍物不仅仅是球体那么简单, 为了验证算法的可行性和仿真环境的真实性, 本文设计了5种障碍物, 如图4所示. 5种障碍物几何中心的空间位置信息如表3所示. 其中球体的半径为6 km, 正四面体的半径为8 km, 正方体的边长为6 km, 圆柱圆锥体的半径为3 km, 圆柱体高20 km, 圆锥体高3 km, 任意形状障碍物高24 km, 最小最大半径为1 km和13 km. 所有障碍物对飞行

器的影响范围均为 20 km.



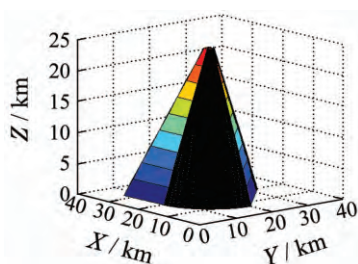
(a) 球体

(b) 四面体



(c) 正方形

(d) 圆柱圆锥体



(e) 任意形状

图 4 障碍物示意图

Fig. 4 Obstacle diagram

表 3 障碍物位置信息

Table 3 Obstacle position information

障碍物形状	位置坐标
球体	(35, 35, 30)
四面体	(30, 24, 25)
正方体	(22, 28, 23)
圆锥圆锥体	(6, 3, 0)
任意形状	(20, 20, 0)

通过以上障碍物位置参数初始化, 可以得到仿真环境如图 5 所示.

5.2 仿真分析(Simulation analysis)

依据仿真环境, 根据设定的飞行器编队, 分别利用传统人工势场法、改进势场法和分层势场法进行飞行器路径规划, 仿真结果如图 6–8 所示, 表 4 给出应用改进势场法和分层势场法规划出的路径长度.

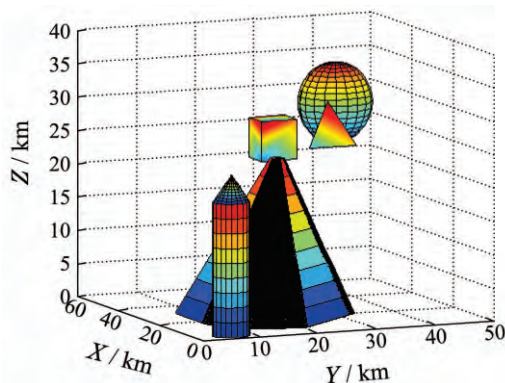


图 5 仿真环境

Fig. 5 Simulation environment

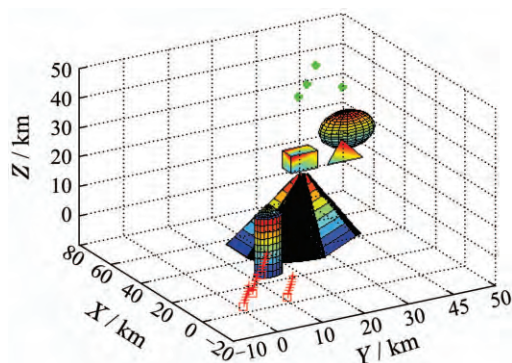


图 6 传统人工势场法路径规划

Fig. 6 Path planning based on traditional potential field method

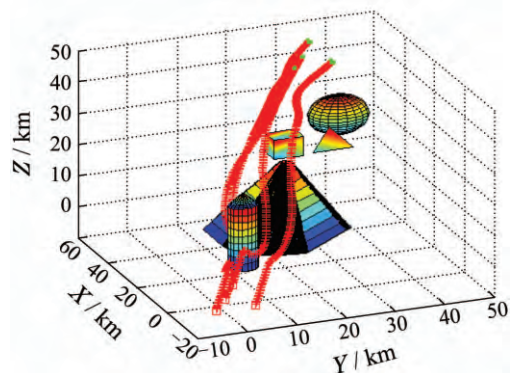


图 7 改进势场法路径规划

Fig. 7 Path planning based on improved potential field method

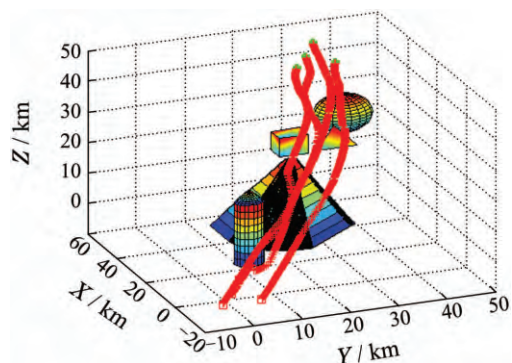


图 8 分层势场法路径规划

Fig. 8 Path planning based on hierarchical potential field method

表4 改进势场法与分层势场法路径长度

Table 4 Path length using improved potential field method and layered potential field method

编号	改进势场法路径长度/km	分层势场法路径长度/km
飞行器1	90.91	90.41
飞行器2	92.85	91.64
飞行器3	97.15	88.62
飞行器4	92.08	91.33

从图6中可以看出,利用传统人工势场法,飞行器编队陷入局部极小值点,导致路径规划失败.从图7可以看出,利用改进势场法,飞行器编队成功避开了设计的复杂障碍物到达了目标点.可以得出,改进的势场法解决了传统势场法目标不可达和局部极小值的问题.

比较仿真效果图可以看出,图7中利用改进势场法在躲避第一个障碍物的时候有明显的绕行,路径弯曲较大,飞行器一般很难做出如此大的机动飞行.相比之下,图8利用分层势场法规划出的路径较为合理,符合飞行器的路径要求.

分析表4可以得出,在满足飞行约束的条件下,分层势场法规划的路径相对改进势场法规划的路径长度要短,路径更优.

以上仿真对比结果验证了分层势场路径规划算法的可行性,优于传统人工势场法和改进的势场法.

6 结论(Conclusions)

本文针对飞行器路径规划问题,在对传统势场法改进的基础上提出了一种飞行器的分层势场算法,解决了目标不可达和易陷入局部极小值问题.建立的最优路径点选取方法弥补了传统势场法无路径评价机制的缺陷.对比仿真实验结果表明,分层势场法规划的路径明显优于传统势场法和改进势场法所规划的路径.

参考文献(References):

- [1] 叶文,朱爱红,范洪达.低空突防航路规划算法综述[J].系统仿真学报,2007,19(10): 2357-2361.
(YE Wen, ZHU Aihong, FAN Hongda. Survey of route planning of low altitude penetration [J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(10): 2357-2361.)
- [2] 刘钢,老松杨,谭东风,等.反舰导弹航路规划问题的研究现状与进展[J].自动化学报,2013,39(4): 347-359.
(LIU Gang, LAO Songyang, TAN Dongfeng, et al. Research status and progress on anti-ship missile path planning [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(4): 347-359.)
- [3] RAHUL K, ANUPAM S. Fusion of probabilistic A^* algorithm and fuzzy inference system for robotic path planning [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2010, 33(4): 307-327.
- [4] ZHENG Z, KARL S, ANDREW L. Efficient path replanning for UAVs operating in spatiotemporal currents [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2014, 79(1): 135-153.
- [5] 赵娟平,高宪文,符秀辉,等.移动机器人路径规划的改进蚁群优化算法[J].控制理论与应用,2011,28(4): 457-461.
(ZHAO Juanping, GAO Xianwen, FU Xiuhui, et al. Improved ant colony algorithm of path planning for mobile robot [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(4): 457-461.)
- [6] MARIJA D, IVAN P. Two-way D^* algorithm for path planning and replanning [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2011, 59(5): 329-342.
- [7] 朱毅,张涛,宋靖雁.非完整移动机器人的人工势场法路径规划[J].控制理论与应用,2010,27(2): 152-158.
(ZHU Yi, ZHANG Tao, SONG Jingyan. Path planning for nonholonomic mobile robots using artificial potential field method [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 152-158.)
- [8] PARK M G, LEE M C. A new technique to escape local minimum in artificial potential field based path planning [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2003, 17(12): 1876-1885.
- [9] JUAN A H O, KATYA R V. Autonomous robot navigation based on the evolutionary multi-objective optimization of potential fields [J]. *Engineering Optimization*, 2013, 25(1): 19-43.
- [10] MOHAMMAD A K J, MOHAMMAD H G, EYAD A F. Autonomous mobile robot dynamic motion planning using hybrid fuzzy potential field [J]. *Soft Computing*, 2012, 16(1): 153-164.
- [11] 税薇,葛艳,韩玉,等.基于混合蚁群算法的无人机航路规划[J].系统仿真学报,2011,23(3): 574-576.
(SHUI Wei, GE Yan, HAN Yu, et al. Path planning for UAV based on mixed ant colony algorithm [J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(3): 574-576.)
- [12] 姚远,周兴社,张凯龙,等.基于稀疏 A^* 搜索和改进人工势场的无人机动态航路规划[J].控制理论与应用,2010,27(7): 953-959.
(YAO Yuan, ZHOU Xingshe, ZHANG Kailong, et al. Dynamic trajectory planning for unmanned aerial vehicle based on sparse A^* search and improved artificial potential field [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(7): 953-959.)
- [13] 张殿富,刘福.基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J].计算机工程与科学,2013,35(6): 88-95.
(ZHANG Dianfu, LIU Fu. Research and development trend of path planning based on artificial field method [J]. *Computer Engineering & Science*, 2013, 35(6): 88-95.)
- [14] 曲成刚,曹喜滨,张泽旭.人工势场和虚拟领航者结合的多智能体编队[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(5): 1-5.
(QU Chenggang, CAO Xibin, ZHANG Zexu. Multi-agent system formation integrating virtual leaders into artificial potentials [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 46(5): 1-5.)
- [15] 吴剑,喻玉华,周继强.无人机航路规划中的变步长 A^* 算法[J].电光与控制,2011,18(5): 1-6.
(WU Jian, YU Yuhua, ZHOU Jiqiang. An A^* algorithm with changeable steps for route planning of UAVs [J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(5): 1-6.)

作者简介:

代冀阳 (1966-),男,教授,博士生导师,目前研究方向为鲁棒控制理论及应用、智能控制技术等, E-mail: djiyang@163.com;

王村松 (1990-),男,硕士研究生,目前研究方向为智能控制技术, E-mail: wangcunsong@yeah.net;

殷林飞 (1990-),男,硕士研究生,目前研究方向为智能控制技术, E-mail: yinlinfei@163.com;

杨保建 (1987-),男,硕士研究生,目前研究方向为智能控制技术, E-mail: 502995601@qq.com;

熊俊强 (1991-),男,硕士研究生,目前研究方向为智能控制技术, E-mail: 675355153@qq.com.