

基于约束人工势场法的弹载飞行器实时 避障航迹规划

王 伟, 王 华

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 针对弹载飞行器飞行高度低、需实时避障的需求,提出了一种三维约束人工势场法用于弹载飞行器的实时避障航迹规划。该方法将人工势场法扩展到三维空间,增加了一个势场函数——高度调节势场函数,并将弹载飞行器的动力学约束条件引入人工势场法中。该方法继承了传统人工势场法计算速度快、占用内存少的优点,并能保证所规划航迹的可飞性。仿真结果显示约束人工势场法相比于传统人工势场法,具有以下优势:所规划的航迹更具有可飞性;可明显减弱在障碍物附近的抖动现象;可显著改善在狭窄通道中的摆动现象;不易陷入局部最小点。

关 键 词: 弹载飞行器; 实时避障; 航迹规划; 约束人工势场法; 高度调节势场

中图分类号: V249

文献标志码: A

Real-time obstacle avoidance trajectory planning for missile borne air vehicle based on constrained artificial potential field method

WANG Wei, WANG Hua

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A three-dimensional constrained artificial potential field method was proposed for planning of real-time obstacle avoidance trajectory for the missile-borne air vehicle, due to the low altitude and needing real-time obstacle avoidance. Combined with a potential field—height adjust potential field and the dynamic constraints of the missile-borne air vehicle, the artificial potential field method was extended to three-dimensional space. The new method not only inherited the advantages of fast calculation and less memory, but also could ensure the flight performance of planning trajectory for the missile-borne air vehicle. The simulation results show that the constrained artificial field method has the following advantages compared with the traditional artificial potential field method: the planning trajectory presents flight performance; the swing phenomenon near the obstacle is significantly reduced; the oscillatory phenomenon in narrow passage is significantly improved; it is easier to escape from the local minimum point.

Key words: missile borne air vehicle; real-time obstacle avoidance;
trajectory planning; constrained artificial potential field method;
height adjust potential field

弹载飞行器是一种利用现有武器(如导弹等)搭载和投放,能在目标区进行巡航飞行,可实现近

距离侦察与毁伤评估、精确打击、通信中继、目标指示、空中警戒等单一或多项作战任务的新概念

武器系统. 弹载飞行器体积小, 雷达反射面小, 可超低空巡航飞行以搜索、侦察或跟踪目标而不易被发现或击中. 在巡航飞行过程中, 由于预先做全局航迹规划时所用的环境信息有可能不是完整精确的, 一些细高的突出山体、建筑物和山壁上的高大树木等障碍会对弹载飞行器的飞行安全构成威胁, 所以弹载飞行器必须对这些在预定航线上突然出现的障碍具有检测能力和实时避障航迹规划能力.

人工势场法是一种较成熟且高效的实时路径规划方法, 20 世纪 80 年代中期由 Khatib 最先提出^[1]. 它不需要预先采用大量数据表示规划空间, 而是利用运动体自身实时检测到的环境信息建立斥力势场和引力势场, 通过计算当前位置斥力和引力的合力方向完成路径规划. 由于人工势场法算法简明, 实时性好, 在机器人局部规划和实时规划领域得到广泛应用^[2-5]. 但是, 传统人工势场法也存在自身的局限性^[6]: 容易陷入局部最小点; 在障碍物附近有抖动现象; 在狭窄通道间频繁摆动等. 针对这些问题, 许多学者对传统人工势场法提出了改进和完善的方法^[7-11]. 但在这些改进方法中, 多是将传统人工势场法与其他优化算法结合^[4, 12-14], 用其他方法来弥补传统人工势场法的不足, 但这些优化算法往往会加大计算复杂度, 增加计算时间, 影响人工势场法的实时性. 另外, 目前人工势场法多应用于二维空间的路径规划.

考虑到人工势场法规划速度快、实时性好的优点, 本文提出一种三维空间的约束人工势场法应用于弹载飞行器的实时避障航迹规划, 将传统人工势场法扩展到三维空间, 引入弹载飞行器的动力学约束条件, 并增加了一个势场函数——高度调节势场函数, 在保留传统人工势场法优点的同时也明显改善了传统人工势场法的缺点.

1 人工势场函数

目前人工势场法多用于空间机器人的二维路径规划. 本文将扩展到三维运动空间, 用于弹载飞行器的实时避障航迹规划. 设弹载飞行器的当前位置为 $\mathbf{X}=[x, y, z]$, 局部航迹目标点位置为 $\mathbf{G}=[x_g, y_g, z_g]$, 引力势场函数将参考文献[9]的二维公式扩展到三维

$$U_{\text{att}}(\mathbf{X}) = 0.5\xi\rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{G}) \quad (1)$$

式中 $\xi>0$, 为引力比例系数; $\rho(\mathbf{X}, \mathbf{G})$ 为弹载飞行器与目标的距离. 相应的吸引力 $\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{X})$ 是引力势场 $U_{\text{att}}(\mathbf{X})$ 的负梯度

$$\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{X}) = -\nabla U_{\text{att}}(\mathbf{X}) = \xi(\mathbf{G} - \mathbf{X}) \quad (2)$$

斥力势场函数将参考文献[9]的二维公式扩展到三维

$$U_{\text{rep}}(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0.5\eta\left(\frac{1}{\rho_{\text{obs}}} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 \rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{G}) & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\eta>0$, 为斥力比例系数, ρ_{obs} 表示弹载飞行器与障碍物的最短距离, ρ_0 表示障碍物距离影响正常数.

相应的斥力为

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{X}) = -\nabla U_{\text{rep}}(\mathbf{X}) = \begin{cases} \mathbf{F}_{\text{rep1}}\mathbf{n}_{\text{or}} + \mathbf{F}_{\text{rep2}}\mathbf{n}_{\text{rg}} & \rho_{\text{obs}} \leq \rho_0 \\ 0 & \rho_{\text{obs}} > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{F}_{\text{rep1}} = \eta\left(\frac{1}{\rho_{\text{obs}}} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 \frac{\rho^2(\mathbf{X}, \mathbf{G})}{\rho_{\text{obs}}^2} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{\text{rep2}} = \eta\left(\frac{1}{\rho_{\text{obs}}} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 \rho(\mathbf{X}, \mathbf{G}) \quad (6)$$

式(4)中的 $\mathbf{n}_{\text{or}}$ 和 $\mathbf{n}_{\text{rg}}$ 是两个单位矢量, 前者由障碍物指向弹载飞行器, 后者由弹载飞行器指向目标.

在本文中, 人工势场函数是定义在三维空间的函数, 势场力 $\mathbf{F}_{\text{att}}$ 和 $\mathbf{F}_{\text{rep}}$ 是三维力矢量. 设弹载飞行器机载障碍检测设备的检测区域是一个横向张角为 120° , 纵向张角为 60° 的四棱锥球面, 如图 1. 横向按 $60^\circ, 30^\circ, 0^\circ, -30^\circ, -60^\circ$ 作 5 个纵向面, 纵向取 $30^\circ, 0^\circ, -30^\circ$ 作 3 个横向面, 这些纵向面和横向面的交线就是弹载飞行器的测量点阵方向, 一共有 15 个. 当测量方向上无障碍时, 则该方向不产生斥力, 当测量方向上有障碍, 则按式(4)计算该方向的障碍所产生的斥力 $\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{X})(i)$, i 为检测方向的序号. 则作用于弹载飞行器的引力势场和斥力势场的合力为

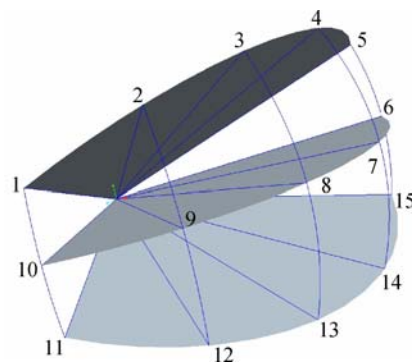


图 1 弹载飞行器的检测区域

Fig. 1 Detection area of missile borne air vehicle

$$\mathbf{F}_{\text{total}}(\mathbf{X}) = \mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^{15} \mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{X})(i) \quad (7)$$

式中 $\mathbf{F}_{\text{total}}$ 是一个三维矢量. 如果是二维空间的路径规划, $\mathbf{X}, \mathbf{G}, \mathbf{F}_{\text{total}}$ 都是二维矢量, 不需要考虑高度, $\mathbf{F}_{\text{total}}$ 就决定了运动体的每一步的前进方向. 但在三维空间, 由于来自地面的斥力远远多于来自上空的斥力(大部分时间, 来自上空的斥力为零), 航迹很难做到在高度方向的控制. 另外, 弹载飞行器的飞行高度越低, 被敌方探测器发现或被地面防御系统摧毁的概率就越小, 但飞得过低往往会使之与地面相撞坠毁的概率增加^[15]. 因此, 在保证离地绝对高度大于或者等于最小允许飞行高度的前提下, 为使弹载飞行器飞行高度尽量降低, 本文在与地面垂直的方向, 加入了一个高度调节势场, 这是一个引力势场, 势场的大小与弹载飞行器飞行高度和最小允许飞行高度的距离差成正比.

$$U_{\text{alt}} = \begin{cases} 0.5\lambda(h - H_{\min})^2 & h > H_{\min} \\ 0 & h \leq H_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

式中 λ 为比例系数($\lambda > 0$), h 表示弹载飞行器当前规划点的飞行高度, $H_{\min}$ 为弹载飞行器的最小允许飞行高度.

相应的高度调节势场力垂直方向的大小为

$$f_{\text{alt}} = \begin{cases} -\lambda(h - H_{\min}) & h > H_{\min} \\ 0 & h \leq H_{\min} \end{cases} \quad (9)$$

高度调节势场力为 $\mathbf{F}_{\text{alt}}(\mathbf{X}) = [0, 0, f_{\text{alt}}]$.

所以, 所有势场力的合力为

$$\mathbf{F}_{\text{all}}(\mathbf{X}) = \mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^{15} \mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{X})(i) + \mathbf{F}_{\text{alt}}(\mathbf{X}) \quad (10)$$

2 动力学约束条件的引入

对于机器人的路径规划, 一般通过计算势场力的合力, 就可以确定机器人每一步的前进方向. 但对于弹载飞行器来说, 由于受到自身动力学约束条件的限制, 比如最小转弯半径、最大爬升/俯冲角等, 弹载飞行器每一步的飞行方向不能完全按照势场力的合力来决定, 必须在计算每一步的飞行方向时, 将动力学约束考虑进来.

最大转弯角、最大爬升/俯冲角是弹载飞行器必须考虑的动力学约束条件. 它们分别限定了所规划的每一步航迹段的最大转弯角范围, 爬升/俯冲最大角度范围. 两者的大小取决于弹载飞行器的机动性能.

假设已知当前节点 X 和弹载飞行器在当前节点的飞行方向(如图 2 中的箭头方向), 最大转

弯角为 ϕ , 最大爬升/俯冲角为 θ . 那么下一步的飞行方向只能被限定在一个由 2θ 和 2ϕ 所决定的四棱锥内, 如图 2 所示. 四棱锥顶点 X 处纵向张角 $\angle AXB = 2\theta$, 横向张角 $\angle CXD = 2\phi$.

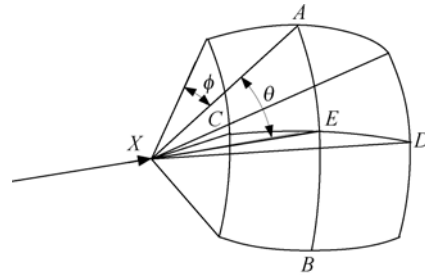


图 2 下一步航迹方向的范围

Fig. 2 Range of the next step trajectory direction

当由式(10)所计算的合力方向包含在这个四棱锥区域中时, 下一步的航迹方向即为此合力方向. 当由式(10)所计算的合力方向超出了这个四棱锥区域时, 则要对合力方向做出修正, 修正规则如下:

以当前节点的飞行方向(图 2 中的 XE 方向)为基准, 横向角度以从上往下看逆时针方向为正, 纵向角度以向上的方向为正. 则①如果合力的横向角度大于 ϕ , 则将合力的横向角度修正为 ϕ . ②如果合力的横向角度小于 $-\phi$, 则将合力的横向角度修正为 $-\phi$. ③如果合力的纵向角度大于 θ , 则将合力的纵向角度修正为 θ . ④如果合力的纵向角度小于 $-\theta$, 则将合力的纵向角度修正为 $-\theta$.

$$\alpha_m = \begin{cases} \phi & \alpha > \phi \\ \alpha & |\alpha| \leq \phi \\ -\phi & \alpha < -\phi \end{cases} \quad (11)$$

$$\beta_m = \begin{cases} \theta & \beta > \theta \\ \beta & |\beta| \leq \theta \\ -\theta & \beta < -\theta \end{cases} \quad (12)$$

式中 α 为由式(10)所计算的合力的横向角度, β 为合力的纵向角度, α_m 为修正后的下一步航迹的横向角度, β_m 为修正后的下一步航迹的纵向角度.

3 基于约束人工势场法的弹载飞行器避障航迹规划仿真结果

以 MATLAB 软件为仿真平台, 设弹载飞行器的最大转弯角为 $\pi/6$, 最大爬升/俯冲角为 $\pi/6$. 取 $\lambda=10$, $\xi=1$, $\eta=500$, $\rho_0=100$. 在相同的地形环

境下,分别采用约束人工势场法和无约束的人工势场法(两种势场法在垂直面内都加了高度调节势场,否则高度无法控制)对弹载飞行器做实时避障航迹规划.最后可得仿真结果如下:图3~图5为基于约束人工势场法的弹载飞行器实时避障航迹,图3为三维图,图4为俯视图,图5为垂直面内的视图;图6~图8为基于无约束的人工势场法的弹载飞行器实时避障航迹,图6为三维图,图7为俯视图,图8为垂直面内的视图.

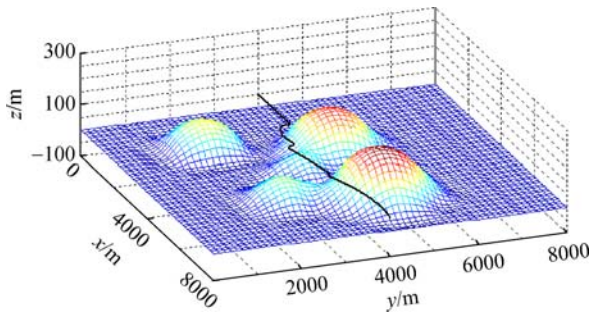


图3 基于约束人工势场法的实时避障航迹规划仿真三维图

Fig. 3 Three-dimensional simulation figure for real-time obstacle avoidance trajectory based on constrained artificial potential field method

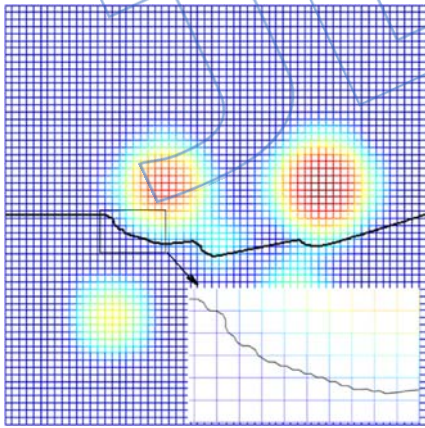


图4 基于约束人工势场法的实时避障航迹俯视图

Fig. 4 Top view figure for real-time obstacle avoidance trajectory based on constrained artificial potential field method

对约束人工势场法和无约束人工势场法的仿真结果进行比较,可发现:约束人工势场法的规划航迹比无约束人工势场法的规划航迹更具有可飞行,特别是在最后阶段,后者几乎是直冲而下到终点的;约束人工势场法对抖动现象有明显改善,这一点在两者的俯视图(图4和图7)表现明显;约

束人工势场法规划的路径飞行高度更低,隐蔽性更好,如图5与图8.

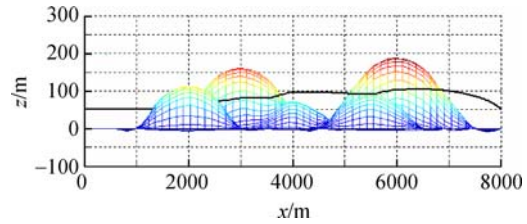


图5 基于约束人工势场法的实时避障航迹垂直面内视图

Fig. 5 Vertical plane view figure for real-time obstacle avoidance trajectory based on constrained artificial potential field method

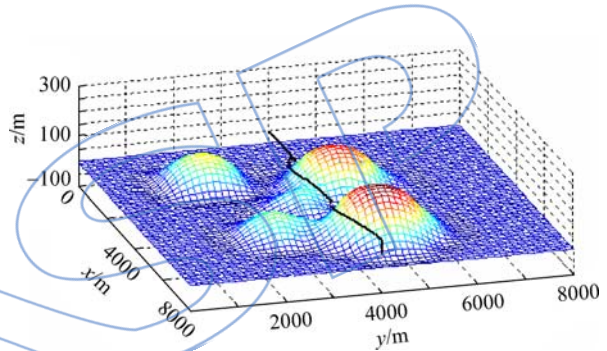


图6 基于无约束人工势场法的实时避障航迹规划仿真三维图

Fig. 6 Three-dimensional simulation figure for real-time obstacle avoidance trajectory based on the artificial potential field method without constraints

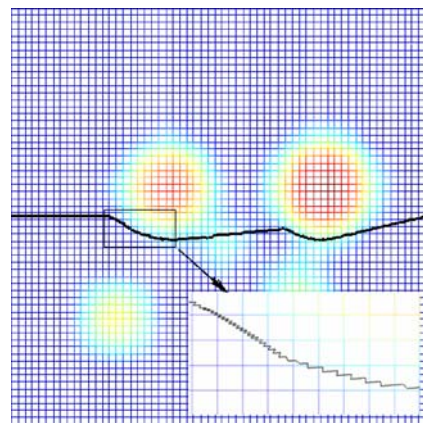


图7 基于无约束人工势场法的实时避障航迹仿真俯视图

Fig. 7 Top view figure for real-time obstacle avoidance trajectory based on artificial potential field method without constraints

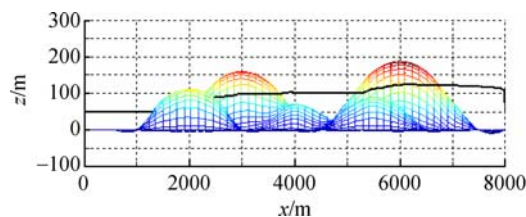


图 8 基于无约束人工势场法的实时避障航迹垂直面内仿真视图

Fig. 8 Vertical plane view figure for real-time obstacle avoidance trajectory based on artificial potential field method without constraints

4 约束人工势场法对传统人工势场法缺陷的改善作用

为了验证约束人工势场法对传统人工势场法缺陷的改善作用,本文在二维平面内做了两个航迹规划仿真实验,如图 9~图 12.

图 9 与图 10 分别为约束人工势场法和传统人工势场法在相同的二维环境中的航迹规划结果.约束人工势场法可以跳过局部最小点,顺利到达目标点,而传统人工势场法却陷入局部最小点,

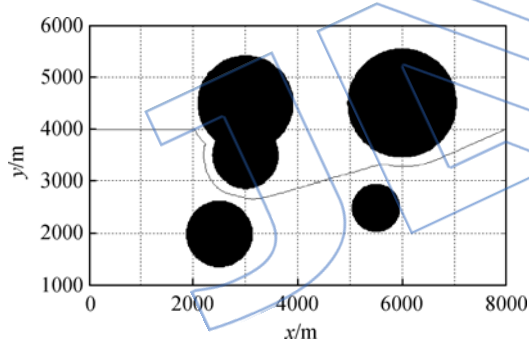


图 9 基于约束人工势场法的航迹规划

Fig. 9 Trajectory planning based on constrained artificial potential field method

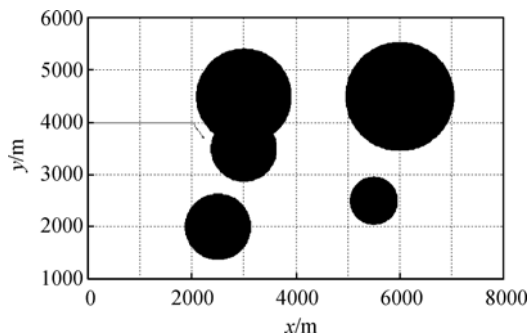
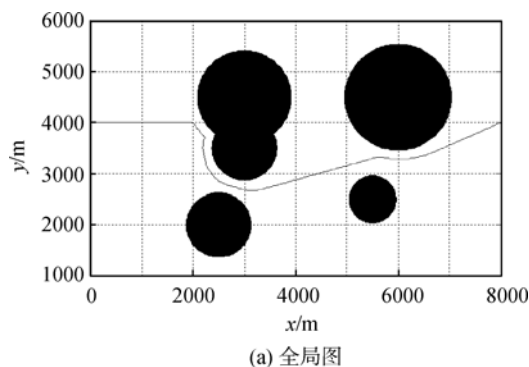
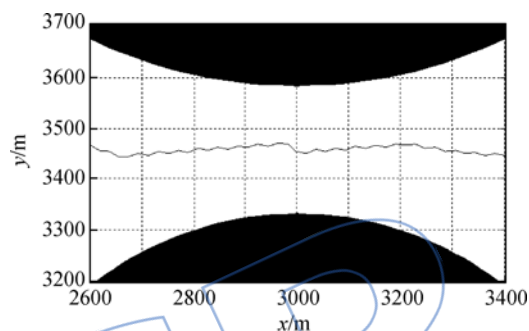


图 10 基于传统人工势场法的航迹规划

Fig. 10 Trajectory planning based on traditional artificial potential field method

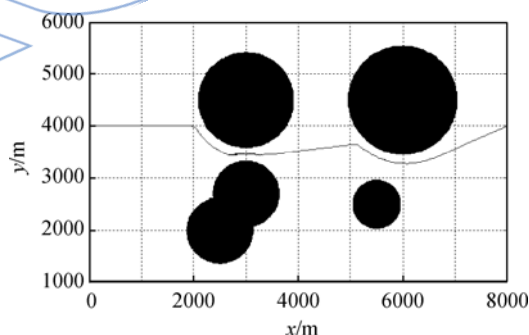


(a) 全局图

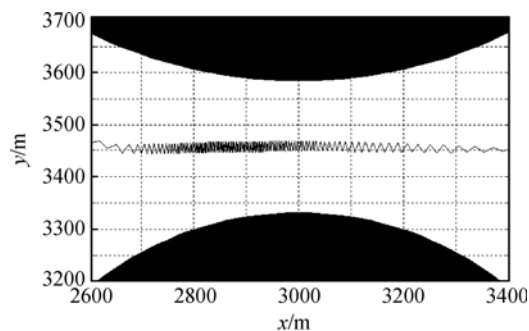


(b) 局部放大图

图 11 基于约束人工势场法通过狭窄通道的航迹
Fig. 11 Trajectory through narrow channel based on constrained artificial potential field method



(a) 全局图



(b) 局部放大图

图 12 基于传统人工势场法通过狭窄通道的航迹
Fig. 12 Trajectory through narrow channel based on traditional artificial potential field method

无法逃出,最后导致航迹规划失败.可见,约束人工势场法更不容易陷入局部最小点.

图11为约束人工势场法的航迹规划结果,图12为传统人工势场法的航迹规划结果,比较两者的局部放大图可以看出约束人工势场法相比传统人工势场法,在狭窄通道中的摆动现象有明显改善.

此外,传统人工势场法所规划航迹在障碍物附近会有剧烈的抖动现象,如图4,而约束人工势场法所规划航迹的抖动现象明显减弱,如图7所示.

5 结 论

本文提出了三维约束人工势场法进行弹载飞行器实时避障航迹规划,将传统人工势场法扩展到三维空间.该算法继承了传统人工势场法计算速度快、占用内存少的优点,并能保证所规划航迹的可飞性.通过该算法与传统人工势场法的仿真结果比较,验证了该算法应用于弹载飞行器的实时避障航迹规划的有效性.该算法所规划的航迹表明:①更具有可飞性;②可显著改善在障碍物附近的抖动现象;③可明显减弱在狭窄通道中的摆动现象;④不易陷入局部最小点.

参考文献:

- [1] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[R]. St. Louis: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1985: 500-505.
- [2] Rimón E, Koditschek D E. Exact robot navigation using artificial potential functions[J]. Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 501-518.
- [3] GAO Jian, XU Demin, ZHAO Ningning, et al. A potential field method for bottom navigation of autonomous underwater vehicles[C]//Proceedings of 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing: IEEE, 2008: 7466-7470.
- [4] Parkm G, Jeon J H, Lee M C. Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field approach with simulated annealing[R]. Pusan, Korea: IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001.
- [5] Sfeir J, Saad M, Saliha-Hassane H. An improved artificial potential field approach to real-time mobile robot path planning in an unknown environment[R]. Montreal, QC, Canada: Robotic and Sensors Environments (ROSE), IEEE International Symposium, 2011.
- [6] Koren Y, Borenstein J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California: IEEE, 1991: 1398-1404.
- [7] Al-Sultan K S, Aliyu M D S. A new potential field-based algorithm for path planning[J]. Journal of Intelligent and Robotics Systems, 1996, 17(3): 265-282.
- [8] Ge S S, Cui Y J. New potential functions for mobile robot path planning[J]. Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(5): 615-620.
- [9] 钟碧良, 张祺, 杨宜民. 基于改进势场法的足球机器人避障路径规划[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 623-626.
ZHONG Biliang, ZHANG Qi, YANG Yimin. Anti-collision path planning for soccer robot using modified field method[J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(4): 623-626. (in Chinese)
- [10] 刘春阳, 程亿强, 柳长安. 基于改进势场法的移动机器人避障路径规划[J]. 东南大学学报, 2009, 39(1): 116-120.
LIU Chunyang, CHENG Yiqiang, LIU Changan. Anti-collision path planning for mobile robot based on modified potential field method[J]. Journal of Southeast University, 2009, 39(1): 116-120. (in Chinese)
- [11] Pradhan S K, Parhi D R, Panda A K, et al. Potential field method to navigate several mobile robots[J]. Applied Intelligence, 2006, 25(3): 321-333.
- [12] 况菲, 王耀南. 基于混合人工势场-遗传算法的移动机器人路径规划仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 774-777.
KUANG Fei, WANG Yaonan. Robot path planning based on hybrid artificial potential field/genetic algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 774-777. (in Chinese)
- [13] 陈婷. 基于混沌人工势场法的多足球机器人的路径规划[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
CHENG Ting. Multi-soccer robot path planning based on chaotic artificial potential method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [14] 张培艳, 吕恬生. 基于模拟退火-人工势场法的足球机器人路径规划研究[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(4): 547-555.
ZHANG Peiyan, LÜ Tiansheng. Soccer robot path planning based on artificial potential field approach with simulated annealing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2003, 22(4): 547-555. (in Chinese)
- [15] 叶媛媛, 闵春平, 沈林成, 等. 基于VORONOI图的无人机空域任务规划方法[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(6): 1353-1359.
YE Yuanyuan, MIN Chunping, SHEN Lincheng, et al. VORONOI diagram based spatial mission planning for UAVs[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(6): 1353-1359. (in Chinese)