

doi: 10.7690/bgzd.2015.11.020

无人机 SLAM 避障技术研究

周 源¹, 王希彬²

(1. 海军航空工程学院七系, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院三系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对无人机没有考虑障碍规避而导致无人机的同时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)任务无法完成的问题, 提出一种改进的人工势场法。通过建立一个包含无人机到目标点的距离、无人机到障碍物的距离及障碍物方差的势场函数, 制定避障策略, 从而解决无人机 SLAM 的障碍规避问题, 并在构建的无人机运动模型基础上, 对提出的算法进行仿真验证。仿真结果表明: 该算法在完成 SLAM 任务的同时, 能够有效地避开障碍物的威胁。

关键词: 无人机; 同时定位与地图创建; 避障; 人工势场

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Research on Obstacles Avoidance for UAV SLAM Technology

Zhou Yuan¹, Wang Xibin²

(1. No. 7 Department, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

2. No. 3 Department, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: When UAV is implementing the simultaneous localization and mapping (SLAM) problem, the environments UAV is flying exist obstacles to be avoided, which threatens the completeness of SLAM mission. To conquer this problem, an improved artificial potential field algorithm is proposed to simultaneously accomplish obstacle avoidance of UAV and SLAM mission by building a potential field function containing the distance from UAV to the goal and from UAV to the obstacles and the covariance of features and constituting avoidance strategy. This algorithm is simulated and tested based on the built UAV plane motion model. The result shows that the proposed algorithm is effective to avoid the obstacles while implementing SLAM for UAV.

Keywords: unmanned aerial vehicle(UAV); simultaneous localization and mapping(SLAM); obstacle avoidance; artificial potential field

0 引言

避障问题已经成为无人机研究领域的热门话题, 对无人机的导航而言, 避障的意义尤为重要。无人机在实施同时定位与地图构建(SLAM)^[1]任务时, 通常会估计出已观测障碍物的位置^[2-3], 但是并没有考虑障碍规避问题, 严重影响了无人机的飞行安全和 SLAM 任务的完成; 因此, 障碍规避成为无人机 SLAM 必须要研究的问题。

文献[4-6]研究了无人机的障碍规避问题, 但它们都是基于无人机的位姿或者障碍物的位置是精确已知的, 然而对 SLAM 而言, 二者都是未知的, 需要同时估计出来, 给避障问题带来的更大的挑战。

人工势场法是常用的一种避障算法, 最早是由 Khatib^[7]于 20 世纪 80 年代中期在博士论文中提出的, 首先用于机器人操作臂的避障运动规划。它不需要利用图形的形式表示规划空间, 而是将物体的运动看成是 2 种力作用的结果: 一种是吸引力, 它

将运动物体拉向目标点; 一种是排斥力, 它使运动物体远离障碍物和威胁源, 这样物体总是沿着合力的方向运动。

由于势场法结构简单, 便于底层的实时控制, 在实时避障方面应用广泛, 但也存在局限性。为此, 笔者提出了一种改进的人工势场法, 通过引入新的势场函数, 解决无人机 SLAM 的避障问题。

1 基于改进人工势场法的避障技术

1.1 人工势场法的基本思想

人工势场法的基本思想就是将无人机在环境中的运动视为一种虚拟的人工场中的运动。障碍物对无人机产生斥力, 形成斥力场, 随着无人机远离障碍而减弱; 目标对无人机产生引力, 形成引力场。引力场和斥力场共同作用于无人机, 使无人机不断调整自己运动的速度和方向, 逐渐接近并最终安全达到目标。

如图 1 所示, 无人机的目标位置为 p_G , 且环

收稿日期: 2015-06-29; 修回日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473306)

作者简介: 周 源(1979—), 安徽人, 硕士, 讲师, 从事导弹导航与制导研究。

境中存在障碍物 O_i ($i=1,2,\dots,n$), n 为障碍物的数目, 无人机在位置 p 时的人工势场 $U_{\text{art}}(p)$ 可表示为目标势场 $U_G(p)$ 和障碍势场 $U_o(p)$ 的和, 进而得出作用于无人机的抽象力 $F(p)$ 为:

$$F_G(p) + \sum_{i=1}^n F_{O_i}(p) = -\nabla U_G(p) + \sum_{i=1}^n (-\nabla U_{O_i}(p)).$$

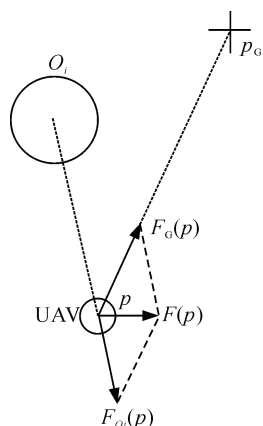


图 1 无人机在人工势场中的受力示意图

势场函数的选择比较灵活, 一般具体情况具体设计。O. Khatib 建立的目标势场和障碍物势场函数^[7]如下:

$$U_G(p) = \frac{1}{2}k(p - p_G)^2;$$

$$U_{O_i}(p) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases}.$$

其中: k 、 $\eta > 0$ 为常数; ρ 是无人机到障碍物的最短距离, ρ_0 为一阈值。

1.2 改进人工势场法

势场法结构简单, 便于底层的实时控制, 在实时避障方面应用广泛, 但它也有局限性, 例如当所有障碍物与目标在某点上形成的合力为零时, 无人机就无法运动, 陷入局部极小; 如果目标点距离障碍物比较近, 当无人机在引力场作用下朝目标运动的同时也在靠近障碍, 在斥力的影响大于引力吸引的情况下, 可能会使得无人机无法到达目标。为了解决这些问题, 许多研究学者给出了针对各种问题的势场法或对势场法进行改进^[8]。为解决传统人工势场法存在的局部极小的问题, 结合 O. Khatib 提出的引力势场和斥力场, 在考虑无人机与目标点及障碍物的距离的基础上, 提出了一种改进的人工势场

避障算法, 重新设计目标势场和障碍物势场函数分别如下:

$$U_G(p) = \frac{1}{2}(x_g - x_v)^T(x_g - x_v);$$

$$U_o(p) = \begin{cases} \frac{1}{2}(x_i - x_v)^T P_{ii}^{-1}(x_i - x_v) + \frac{1}{2}(x_i - x_v)^T(x_i - x_v), & \rho \leq \rho_0 \\ 0, & \rho > \rho_0 \end{cases}.$$

因此, 笔者建立了一个由无人机到目标的距离、无人机与地图中障碍的马氏距离和欧氏距离定义的势场函数:

$$c = \frac{1}{2}(x_g - x_v)^T(x_g - x_v) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [(x_i - x_v)^T P_{ii}^{-1}(x_i - x_v) + (x_i - x_v)^T(x_i - x_v)].$$

等式右边前半部分表征目标点的引力场, 后半部分表征由 n 个障碍物与无人机的马氏和欧式距离构建的斥力场。其中: x_g 为目标的位置; x_v 为无人机的位置; x_i 为第 i 个障碍物的位置; P_{ii} 为方差矩阵中第 i 个障碍物对应的方差子阵; n 为无人机观测到的地标数目, 并且无人机与障碍的距离要求小于 d_0 , d_0 为一阈值。基于由现在的地图、无人机的位置及期望的目标的位置构建的成本函数, 产生无人机的控制命令。

1.3 避障策略

通过最小化成本函数, 由无人机的速度 v 和计算的成本函数的负梯度 ∇c 两向量之间的关系, 确定期望的无人机运动姿态, 即设计避障行为的控制输入为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{v \cdot \nabla c}{|v| |\nabla c|}\right),$$

其中无人机的速度大小为常值: $|v| = v_{\text{constant}}$ 。

c 的负梯度 ∇c 计算为

$$\nabla c = -\frac{\partial c}{\partial x_v} \Big|_{x_v = \hat{x}_v} = \left\{ (x_g - x_v) - \sum_{i=1}^n [P_{ii}^{-1}(x_i - x_v) + (x_i - x_v)] \right\} \Big|_{x_v = \hat{x}_v}.$$

图 2 和图 3 分别表示在仅受目标点吸引和同时受到目标点吸引和障碍物排斥条件下确定的偏转角控制量 γ 的示意图, 得到了更加直观的解释, 图 2

中没有观测到障碍物，只受目标引力的作用，无人机到目标的方向为无人机与目标距离下降最快的方向，即梯度 ∇c 的负方向，转向角 γ 存在以下关系：

$$v \cdot \nabla c = |v| |\nabla c| \cos \gamma。$$

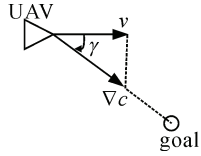


图 2 受目标点引力条件下无人机偏转角 γ

图 3 中无人机受目标引力和障碍物斥力同时作用的影响，由目标对无人机引力和障碍物对无人机斥力合成的方向，即为梯度 ∇c 的负方向，它与无人机速度的夹角即为偏转角 γ 的方向。

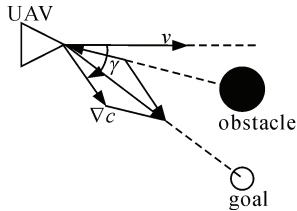


图 3 受目标点吸引和障碍物排斥下无人机的偏转角 γ

2 无人机运动模型

为验证提出的避障算法，笔者采用简化的无人机平面运动作为仿真模型，如图 4 所示。

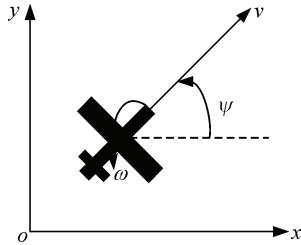


图 4 无人机二维模型

无人机的状态 $X_v = [x \ y \ \psi]^T$ ，其中： x 、 y 为无人机在两维平面中的位置， ψ 为方位角；控制量 $U = [v \ \gamma]^T$ ， v 为无人机的速度， γ 为姿态角变化量。各状态变量的变化方程为：

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + v_k \Delta t \cos(\psi_{k-1} + \gamma) \\ y_k = y_{k-1} + v_k \Delta t \sin(\psi_{k-1} + \gamma) \\ \psi_k = \psi_{k-1} + \gamma \end{cases}$$

其中 Δt 为时间步长。

无人机状态方程为

$$X_{v_k} = f(X_{v_{k-1}}, U_k) + W_k。$$

其中 W_k 为系统噪声。

第 i 地标的状态为 $m_i = [m_x \ m_y]^T$ ，假设地标是静止的，则 $m_{i,k} = m_{i,k-1}$ 。

无人机与第 i 地标的测量方程为：

$$Z_{i,k} = h(X_{v_k}, m_{i,k}) + v_k$$

其中 v_k 为测量噪声。

3 仿真试验

仿真试验中，控制量为无人机的速度 v 和偏转角 γ 。初始时刻无人机在 (20, 0) 以 5 m/s 的速度沿 x 轴正向运动，摄像机的视域为 90° ，光轴对准无人机的 x 轴方向。在坐标平面分布 2 个地标 (60, 5)、(120, 0) 作为障碍物，障碍物的半径大小为 3 m，无人机目标点的位置为 (180, 0)，系统噪声方差 Q 和测量噪声方差 R 分别为：

$$Q = \text{diag}\{0.3^2, (0.02\pi/180)^2\};$$

$$R = \text{diag}\{0.1^2, (0.01\pi/180)^2\}。$$

图 5 给出了基于改进人工势场的无人机的避障曲线。六角形表示无人机的运动目标；星形点表示分布的地标；实线表示无噪声情形下无人机的避障曲线；虚线表示估计的无人机的避障曲线；“+”号表示估计的障碍物中心的位置；虚线椭圆表示估计的障碍物中心的不确定性；“*”号表示障碍物中心的位置；周围的圆表示障碍物的大小。

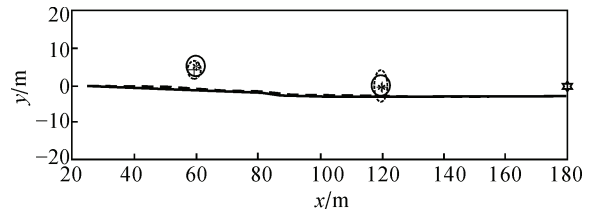


图 5 基于改进人工势场的无人机避障

开始时无人机受目标点的吸引，朝着目标点运动，当无人机离观测到的障碍物的距离 d_0 小于 20 m 时，受目标点引力和地标障碍物斥力的共同作用，无人机的运动方向发生偏转避开障碍物，最后无人机运动到距离目标点的位置误差小于 2 m，从而完成无人机的运动。仿真验证结果表明：该策略可以实时规划无人机的航迹，成功地避开障碍物的威胁，同时完成 SLAM 的任务。

4 结论

笔者主要研究了无人机 SLAM 的避障问题，提

出了一种改进的人工势场法, 通过设计一个基于无人机到目标的距离、无人机到障碍物的欧式和马氏距离的势场函数, 利用势场函数的负梯度与无人机速度矢量之间的关系, 确定无人机避障时的偏转角, 从而进行机动达到避障的目的。算法在无人机的平面运动模型上得到验证, 结果表明该算法是有效可行的。

参考文献:

- [1] Smith R, Self M, Cheeseman P. Estimating uncertain relationships in robotics[C]. Proceedings of Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, Amsterdam: 1988: 435-461.
- [2] Gregory F Ivey, Eric N. Johnson. Investigation of methods for simultaneous localization and mapping using vision sensors[C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Colorado: AIAA, 2006.

(上接第 41 页)

表 2 中, 参数 1 对应的电机加速/减速时间为 300 ms/300 ms, 参数 2 为 150 ms/150 ms; 转盘电机最大转速分别为 2 500 r/min 和 3 000 r/min。表 2 中对不同转速、不同伺服驱动器参数的转台定位过程分别记录了 20 组实验数据。从数据中可以清楚地看到: 当转台转速、伺服驱动器参数有变化时, 控制输入步长值有少许差异, 进而保证了定位精度的稳定性, 其控制效果完全满足系统高速、高精度的要求, 验证了方法的可行性。

6 结束语

笔者以某小口径炮弹底火拧紧设备的旋转工作台的快速精确定位为研究方向。在依靠系统辨识方法得到转台系统模型的基础上, 设计了一种基于闭环 PID 型迭代学习控制律的转台运行控制策略。其控制效果完全满足系统高速、高精度的要求, 并且具有较好的鲁棒性, 基本不受转速、伺服驱动器参数等变化的影响, 同时具有较快的收敛速度, 易于编程实现, 已在该小口径炮弹底火拧紧设备的转台定位过程中成功使用, 可以在类似的具有重复特性的控制过程中进行推广应用。

参考文献:

- [1] 舒泽胜, 刘锡朋, 赵建抒. 小口径炮弹底火自动拧紧专

- [3] Sukkarich S, Durrant Whyte H. Towards the development of simultaneous localisation and map building for an unmanned air vehicle[C]. Proc. Int. Conference of Field and Service Robotics, 2001: 193-200.
- [4] 赵静, 陈一民. 基于双目视觉移动机器人的路径规划和避障研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(23): 5462-5466.
- [5] 王广君, 田金文, 柳健. 激光成像雷达在飞行器避障过程中的应用[J]. 电波科学学报, 2001, 16(2): 249-251.
- [6] 王一凡, 谌德荣, 张立燕. 一种用于小型无人机避障的快速视差测距方法[J]. 中国测试技术, 2008, 34(3): 114-116.
- [7] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. International Journal of Robotics Research, 1986, 5(1): 90-99.
- [8] Jack Langelaan, Steve Rock. Towards Autonomous UAV Flight in Forests[C]. Guidance, Navigation and Control Conference. San Francisco: AIAA, 2005.
- *****
- 机研究[J]. 兵工自动化, 2014, 33(7): 75-82.
- [2] 陈新民, 丁峰. 自适应控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 61-97.
- [3] 徐晓伟. 新型失重秤计量系统的研究与设计[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2009: 30-36.
- [4] 樊厉, 林红权, 高东杰. 过程控制常用连续模型的直接辨识法及应用[J]. 控制工程, 2006, 13(4): 310-313.
- [5] 宁宗夏. PID 参数对控制系统稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 1-4.
- [6] 李国林. PID 控制器参数整定技术与优化设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 17-23.
- [7] 董德胜. 迭代学习控制的收敛速度研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 1-7.
- [8] 林辉, 王林. 迭代学习控制理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998: 1-91.
- [9] Uchiyama M. Formulation of high-speed motion of a mechanical arm by trial[J]. Transaction of the Society of Instrumentation and Control Engineers, 1978, 14(6): 706-709.
- [10] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning[J]. Journal of Robotic systems, 1984, 1(2): 123-140.
- [11] Lee K H, Bien Z. Initial condition problem of learning control. IEE Proc-D, 1991, 138(6): 525-528.
- [12] 张兴国, 林辉. 迭代学习控制理论进展与展望[J]. 测控技术, 2006, 25(11): 1-5.