

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.014

基于最优控制的无人机主动 SLAM 航迹规划

王希彬¹, 宋广大², 杨飞³

(1. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学保障部, 山东 烟台 264001;
3. 中国人民解放军 91213 部队, 山东 烟台 264003)

摘要: 为降低无人机同时定位与地图创建的不确定性, 加快无人机所处环境的搜索速度, 设计一种基于最优控制的主动 SLAM 航迹规划算法。综合考虑各种因素, 利用平均信息增益和新探索地标环境的表示方法, 设计一种新的目标函数, 将无人机 SLAM 作为组合优化问题进行处理, 以达到最优控制全局优化的目的, 同时在建立的简化无人机运动模型基础上进行验证。仿真结果表明: 该算法有效、可行, 且优于随机 SLAM 算法。

关键词: 无人机; SLAM; 最优控制; 航迹规划

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

UAV Active SLAM Trajectory Programming Based on Optimal Control

Wang Xibin¹, Song Guangda², Yang Fei³

(1. School of Aviation Basics, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China; 2. Department of Security, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China; 3. No. 91213 Unit of PLA, Yantai 264003, China)

Abstract: To decrease the uncertainty of localization and mapping of UAV at the same time, and to increase the speed of searching the unknown environment at which UAV locates, an active SLAM trajectory programming algorithm is proposed based on optimal control. With all the factors considered, UAV SLAM is taken as a combined optimization problem to achieve the global optimization by designing a new objective function, by use of the representations of average information gain and new search landmark environment. This algorithm is validated based on the simplified UAV plane motion model. Simulation results show that this algorithm is effective and feasible, and better than the random SLAM algorithm.

Keywords: UAV; SLAM; optimal control; trajectory programming

0 引言

一般的 SLAM 算法仅仅考虑利用获得的信息构建环境地图, 同时要确定无人机的位置, 并没有考虑无人机如何有效探测未知环境。目前的环境探测方法都是驱使无人机向未观测区域飞行, 以减少未观测区域的面积, 同时避免在已观测区域飞行。然而, 对于无人机 SLAM 而言, 无人机必须对已观测到的环境地标进行多次观测, 甚至需要完成闭环运动^[1], 以提高无人机定位和环境地标作图的精度。

恰当的航迹规划可以帮助无人机有效地完成 SLAM 的任务, 然而在传统的随机探索方法中, 随机选择控制输入, 探索环境具有盲目性; 预定航迹的方法假定运动轨迹可以预先确定, 与环境的未知性相矛盾, 限制在某些情形下的应用^[2]。主动 SLAM 由 Federal、Leonard 和 Smith 在文献[3]中提出。目前研究的主动 SLAM 方法主要有最优控制方法^[4]、基于边界的方法^[5]和局部子图法^[6]。对于局部子图和基于边界的主动 SLAM 而言, 基于最优控制方法建

立的目标函数是选择航迹规划点的基础。局部子图的方法更适用于多无人机协同的 SLAM 航迹规划, 对于单个无人机而言, 除了可以减少一定计算量外, 并未显示出明显的优势。基于边界的方法从某种意义上说来就是多步预测的基于最优控制的无人机主动 SLAM; 因此, 笔者设计了一种新的目标函数, 同时考虑了定位与作图的不确定性和地图覆盖面积, 达到了基于最优控制的全局优化的目的。

1 基于最优控制的主动 SLAM

笔者综合考虑各种因素, 利用平均信息增益和新探索地标环境的表示方法, 设计一种新的目标函数, 采用基于最优控制的轨迹规划以达到近似全局优化的目的^[7]。

选择的目标函数为

$$J = \omega_1 \Delta I + \omega_2 \Delta S。$$

其中: $\Delta I = \frac{\text{tr}(P_k)}{n_k} - \frac{\text{tr}(P_{k+1})}{n_{k+1}}$ 为平均相对信息增益, P_k 、

收稿日期: 2018-09-23; 修回日期: 2018-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61473306); 航空基金资助项目(20135184007)

作者简介: 王希彬(1985—), 男, 山东人, 博士, 从事飞行器导航与控制研究。

P_{k+1} 分别为 k 和 $k+1$ 时间 EKFSLAM 的状态方差阵, n_k 、 n_{k+1} 分别表示与 P_k 与 P_{k+1} 中状态变量的个数。由于不同时刻观测到的地标数目不同, 新地标的加入使得状态变量的数目发生变化, 因此单独使用方差矩阵的秩作为信息增益比较的对象没有任何意义。考虑方差矩阵的维数, 采用平均信息增益作为定位与作图不确定性的度量, 准确地描述系统的不确定性, 使不同时刻的信息增益具有更强的可比性。

$\Delta S = S_{\text{new}} = S_{k+1} - S_k$ 为在控制输入下, 无人机已探索的面积与现在探索到的面积交集, 即无人机新探索的面积。在整个搜索区域 S , 对于均匀分布的所有地标 N , 确定每个地标所占有的平均面积 S/N , 观测到新地标的数目为 l , 则 $\Delta S = l(S/N)$ 。

ω_1 、 ω_2 为权值, 选择 J 最大的预选目标点, 执行相应的控制输入。

2 无人机运动模型

仿真模型采用了简化的无人机平面运动模型, 如图 1 所示。

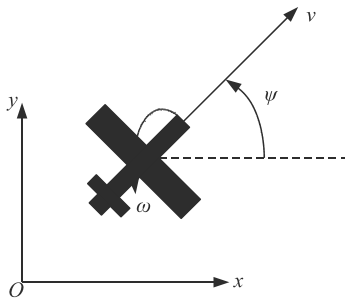


图 1 无人机 2 维模型

无人机的状态 $X_v = [x \ y \ \psi]^T$ 。其中, x 、 y 为无人机在 2 维平面中的位置, ψ 为方位角。控制量 $U = [\Delta d \ \Delta \psi]^T$, 其中, Δd 为无人机一个时间步长的运动距离, $\Delta \psi$ 为姿态变化量。各状态变量的变化方程为:

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

无人机状态方程为

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

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:

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

3 仿真验证

分别采用随机控制和提出的最优控制方法对无人机 SLAM 进行航迹规划。无人机上装载的摄像机可以探测最大距离为 10 m, 最大视角为 90° , 在 $([-20, 20], [-20, 20])$ 环境中均匀分布 50 个地标。初始时刻, 无人机位于坐标原点并朝向 x 轴正向, 目标函数中权值参数 $\omega_1 = 0.5$, $\omega_2 = 0.5$ 。

仿真时, 在无人机的视域内, 以无人机现在的位置为圆心、半径为 2 m 的圆周上选择多个点, 作为下一时刻的候选位置, 比较各点的目标函数值, 将得到最大函数值点作为无人机下一时刻的位置, 此时确定的距离增量和偏转角作为控制量。2 种算法分别运行了 200 步以后无人机的轨迹和地标的位置如图 2 和 3 所示(实线表示估计的无人机运动轨迹, 点和椭圆分别表示估计的地标位置和方差)。

从图 2 和图 3 中可以看出: 随机运动探测环境有限, 并且无人机的运动混乱无规律, 经常会陷入某个区域而不能离开。最优控制的航迹规划能够克服这种情况, 无人机的航迹平滑有序, 就观测地标数而言, 也大大多于随机控制 SLAM 的方法。这样无人机可以探测到更大范围的环境, 并得到较高的地标估计值, 因此基于最优控制的无人机主动 SLAM 要明显优于随机 SLAM。

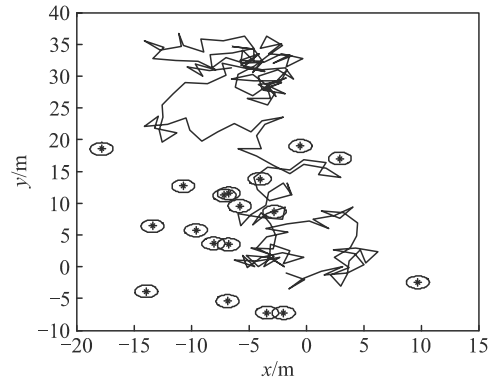


图 2 无人机随机 SLAM

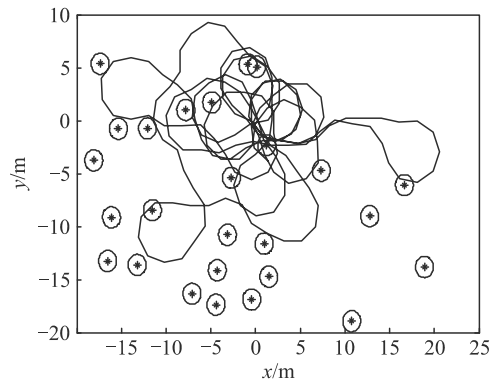


图 3 基于最优控制的无人机主动 SLAM

4 结论

笔者同时考虑了无人机定位不确定性和作图完整性,提出了一种基于最优控制的主动 SLAM 算法,并使用简化的无人机平面模型进行验证。与随机 SLAM 算法的仿真结果相比,该算法在定位精度和搜索速度方面都得到了较好的结果。

参考文献:

[1] NEWMAN P M. On the structure and solution of the simultaneous localization and map building problem[D]. Australian: University of Sydney, 1999.

[2] 姜超, 宋科璞, 周海军. 基于 L1 自适应方法的尾坐式无人机控制律设计[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 14-19.

[3] 张恒, 樊晓平. 移动机器人同步定位与地图构建过程中的轨迹规划研究[J]. 机器人, 2006, 28(3): 285-290.

[4] FEDER H, LEONARD J, SMITH C. Adaptive mobile robot navigation and mapping[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(7): 650-668.

[5] LIU Y, SUN F. A solution to active simultaneous localization and mapping problem based on optimal control[C]. Proceeding of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Harbin, China, 2007: 314-319.

[6] 苑晶. 未知环境中移动机器人主动同时定位与地图构建技术研究[D]. 天津: 南开大学, 2007.

[7] 曲鹏, 周应旺, 崔雷. 小型无人机发动机控制系统 CAN 总线通信技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 57-61.

(上接第 42 页)

为了符合实际使用需求,抵消由于场地倾斜度的影响,需要对辅助天线伺服系统的垂直升降装置提出实时控制的要求,即在测试过程中,根据辅助天线实际的垂直距离变化,改变垂直升降装置的状态,通过车载跟踪稳定平台中的升降装置调节高度,通过惯导系统测得的数据调节转台的方位、高度、俯仰,从而使辅助天线和被测天线恢复对准状态,然后再重新测试。

2 试验结果与分析

在某外场试验场,对实装天线方向图进行测试,其测试效果如图 9^[6]所示,测试结果主要反映了阵地及试验场地环境影响下的天线方向图效果。

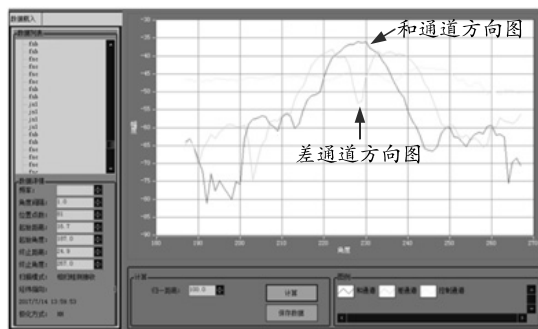


图 9 测试系统对外场天线测试效果

3 结论

经验证,采用测试车垂直天线法线方向直线行驶并实施数据采集和方向图计算的方法实现方向图测试,其测试结果基本与暗室测试结果保持一致,解决了天线方向图测试受外场环境,以及天线不易转动或移动限制的问题。

该测试系统通过对二次雷达天线方向图的测试,主要目的是天线性能外场快速测试和检测,为装备外场排故、维护保障提供支撑。

参考文献:

[1] 郝永刚, 李家杰, 谢来阳. 航管二次雷达天线波瓣测量的探讨[J]. 空中交通管理, 2007(4): 12-17.

[2] 窦晓杰, 程乃平, 倪淑燕. 相控阵天线远场测试场测量方法[J]. 现代电子技术, 2013(9): 54-56.

[3] 陈宵. 外场天线测试系统的数据处理及软件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 35-37.

[4] 刘明忠, 高留洋, 苗振坤. 机载遥测系统发射天线辐射规律研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 72-76.

[5] 张培忠, 郑建福, 苏伟丽, 等. 机载预警雷达转台的疲劳寿命相似物理模型设计[J]. 兵器装备工程学报, 2017(5): 10-13.

[6] 许刘林, 沈新民, 周建钊, 等. 基于单线激光雷达数据拼接的地面环境感知技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(9): 17-22.